



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Master of Science in Electrical Engineering

Master Thesis Dissertation

**Sviluppo di un Convertitore per Banchi
Prova Azionamenti Elettrici**

Relatori

Prof. Eric Giacomo Armando
Dr. Fabio Mandrile

Candidato

Stefano Bongiovanni

Marzo 2025

Sommario

L'obiettivo del lavoro di tesi è la creazione di un sistema unificato di controllo motore per un banco prova da laboratorio, all'interno del quale più componenti, come il convertitore di potenza, i sensori e le schede elettroniche operano in modo sinergico e coordinato per fornire un controllo avanzato e affidabile del motore elettrico in tutte le sue condizioni di funzionamento. Un aspetto critico dell'integrazione del convertitore di potenza nel sistema è la capacità di raccogliere dati in tempo reale su tensione, corrente, posizione, temperatura e coppia del motore, elaborandoli tramite un complesso algoritmo di controllo implementato all'interno di un microcontrollore. A partire da schematici circuitali si è realizzato il Routing della Scheda di Controllo del convertitore, mentre l'assenza di un sistema unificato per il banco prova già esistente ha condotto lo sviluppo della tesi anche nella realizzazione di un layout meccanico atto al posizionamento del sistema di controllo, comprensivo di tutti i componenti elettromeccanici coinvolti, direttamente sul banco prova. L'elaborazione in tempo reale dei costanti segnali di feedback è stata ottenuta tramite la scrittura di un algoritmo di controllo che assicura l'affidabilità del banco ed elevate prestazioni dinamiche del motore. La validazione sperimentale del sistema si ramifica nell'assemblaggio, integrazione e testing delle schede elettroniche, nella realizzazione del layout meccanico, nella creazione di un'interfaccia utente di controllo motore, nella definizione di un insieme di messaggistica CAN tra il sistema e l'interfaccia di controllo. Infine, la discussione dei risultati ottenuti in diverse condizioni di funzionamento del motore, in controllo diretto di coppia o velocità, con inversioni dinamiche e in presenza o meno di compensazione dell'errore di tensione dovuto al convertitore integrato nel sistema.

Sempre peggio

Indice

Elenco delle tabelle	VI
Elenco delle figure	VII
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivi della Tesi	4
2 Panoramica sulle Schede di Controllo e di Servizio	7
2.1 Contesto di Integrazione delle Schede nel Banco Prova	7
2.2 Obiettivi e Sezioni Operative delle schede	10
2.2.1 Sezioni Operative della Scheda di Controllo	15
2.2.2 Sezioni Operative della Scheda di Servizio	30
2.3 Processo di Routing della Scheda di Controllo	35
2.3.1 Fasi e Tecniche del processo di Routing	40
2.3.2 Criticità e Validazione	53
3 Layout meccanico	57
3.1 CAD Meccanico della Scatola	61
3.2 Integrazione dei Componenti e Stato delle Connessioni	67
3.2.1 Integrazione dei Componenti Interni	74
3.2.2 Integrazione dei Componenti Esterni	81
3.3 CAD Meccanico del Banco Prova	93
3.3.1 Integrazione del Castello	93
3.3.2 Generazione del File di Foratura e dei Disegni Quotati	97
4 Controllo Motore	101
4.1 Richiami di Modellazione Macchine ac e di Algoritmi di Controllo	103
4.1.1 Modellazione Macchine ac e IPM	103
4.1.2 Panoramica sugli Algoritmi di Controllo	112
4.2 Ottenimento delle Mappe per FPC	118
4.3 Flux Polar Control	134

4.3.1	Blocchi Funzionali	134
4.3.2	Risultati delle Simulazioni	145
5	Assemblaggio e Validazione Sperimentale	153
5.1	Scheda di Servizio	155
5.1.1	Assemblaggio della Scheda di Servizio	155
5.1.2	Test e Validazione della Scheda di Servizio	164
5.2	Scheda di Controllo	172
5.2.1	Accensione della Scheda e Montaggio su Convertitore	177
5.2.2	Configurazione del Microcontrollore	183
5.2.3	Test e Validazione della Scheda di Controllo	208
5.3	L'algoritmo di Controllo	217
5.3.1	Routine di Controllo	217
5.3.2	Comunicazione CAN	226
5.4	Interfaccia Utente di Controllo	232
5.5	Assemblaggio della Scatola	237
5.6	Test e Validazione del Sistema Unificato	241
6	Conclusions	251
	Bibliografia	255

Elenco delle tabelle

2.1	Tabella dei Valori di Tensione di Alimentazione delle Sezioni Operative.	17
2.2	Tabella della Logica Enable Drivers.	28
2.3	Caratteristiche Principali della Precarica.	30
2.4	Caratteristiche Principali della Scarica.	31
2.5	Livelli di Tensione e GND Presenti nei Layer.	44
3.1	Tabella delle Dimensioni della Scatola.	62
5.1	Tabella dei segnali ADC.	195
5.2	Tabella dei Timer e loro utilizzo.	197
5.3	Tabella dei Parametri di Scala e Offset.	215
5.4	Tabella dei Messaggi e Segnali rete CAN	228
5.5	Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo.	242
5.6	Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo FOC-CVC.	246
5.7	Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo FPC.	248

Elenco delle figure

1.1	Kit convertitore di potenza Wolfspeed CRD300DA12E-XM3 [2].	3
1.2	Schema Completo del Banco Prova [3].	5
2.1	Vista 3D della DC-Side Board.	11
2.2	Vista 3D dello stato iniziale della Control Board.	11
2.3	Schematico delle Funzioni della DC-Side Board.	13
2.4	Schematico delle Funzioni della Control Board.	14
2.5	Stato Finale della Control Board.	15
2.6	Menù delle Funzioni Base di Altium.	37
2.7	Menù delle Regole Utente.	38
2.8	Menù della Gestione Centralizzata dei Poligoni.	39
2.9	Sbroglia Completo del PCB di Controllo.	40
2.10	Routing del Layer 1.	42
2.11	Routing del Layer 4.	43
2.12	Routing del Layer 2.	43
2.13	Routing del Layer 3.	44
2.14	Esempio di Intensificazione delle Vie.	46
2.15	Esempio di Utilizzo di Poligoni.	48
2.16	Esempio di Smussamento dei Poligoni.	49
2.17	Esempio di Distanza Minima tra le Piste.	50
2.18	Esempio di Distanza Minima tra Poligoni.	50
2.19	Differenza tra Thermal Relief e Connessione Completa.	51
2.20	Pista di collegamento per Poligoni a 5V.	52
2.21	Sbroglia Completo del Microcontrollore.	53
2.22	Percorso della pista 3V3_A.	54
2.23	Percorso del Poligono a 12V.	55
2.24	Percorso del Segnale PG_3V3A.	55
3.1	Vista dei 3 Piani Coordinati.	59
3.2	Menù di base SolidWorks 3D.	59
3.3	Assieme Globale del Layout Meccanico.	60
3.4	Particolare dell’Incastro di due facce Ortogonali.	63
3.5	Vista Esplosa della Scatola Senza Componenti.	63

3.6	CAD e Quotatura Semplice di un Profilo ad L per Cerniera.	64
3.7	Vista Completa della Scatola Chiusa e con le Cerniere.	65
3.8	Vista della Scatola comprensiva dei Componenti.	67
3.9	Vista Esplosa della Scatola comprensiva dei Componenti.	70
3.10	Schema Unifilare della Connessione Monofase a 230 V RMS.	70
3.11	Stato delle Connessioni 230 V e 15 V.	71
3.12	Schema Unifilare della Connessione Monofase a 600 V.	72
3.13	Stato delle Connessioni 600 V.	72
3.14	Stato delle Connessioni di Segnale.	73
3.15	Stato delle Connessioni di Terra.	73
3.16	Confronto CAD del Wolfspeed.	75
3.17	Moduli di Potenza del kit Wolfspeed.	75
3.18	Schede Gate Driver del kit Wolfspeed.	76
3.19	Confronto CAD del Filtro EMI.	77
3.20	Schema Circuitale del Filtro EMI.	77
3.21	Confronto CAD dell'assieme dei Power Supply, Barra DIN e Morsettiera.	78
3.22	Confronto CAD del Contattore Kilovac.	80
3.23	Confronto CAD dell'isolatore.	80
3.24	Confronto CAD del Connettore D-Sub.	81
3.25	Confronto CAD del Filtro Schaffner.	82
3.26	Schema Circuitale del Filtro Schaffner.	83
3.27	Confronto CAD dell'interruttore a Bilanciere.	83
3.28	Confronto CAD della Morsettiera di Emergenza.	84
3.29	Confronto CAD dell'assieme Connettori Binder.	85
3.30	Confronto CAD dell'assieme Connettori Amphenol.	86
3.31	Confronto CAD del Pressacavo di Diametro Maggiore.	87
3.32	Confronto CAD dell'assieme della Connessione Idraulica da Pannello.	88
3.33	Circuito Interno alla Cooling Unit.	89
3.34	Confronto CAD della Cooling Unit.	90
3.35	Particolare della Tenuta CAD del Wolfspeed.	91
3.36	Particolare della Tenuta CAD della Cooling Unit.	91
3.37	Particolare della sezione di Alimentazione Schede Elettroniche.	92
3.38	Vista Esplosa dell'Assieme Globale.	94
3.39	Particolare dell'Accoppiamento Angolare e Banco.	95
3.40	Particolare dell'Accoppiamento Angolare Laterale e Angolare di Sostegno.	95
3.41	Accoppiamento tra Angolare di Sostegno e Scatola.	96
3.42	Estratto del File Excel delle Forature del Layout.	97
3.43	Computo Totale del numero di Fori presenti nel Layout.	98
3.44	Menù di SolidWorks 3D adibito alla creazione dei Disegni Quotati.	98
3.45	Esempio di Disegno Quotato delle Cerniere Filettate.	99

3.46	Esempio di Disegno Quotato del Pannello delle Alimentazioni.	100
4.1	Sistemi di Riferimento per la Modellazione delle macchine ac [27].	104
4.2	Rappresentazione di un Vettore Generico nei due Sistemi di Riferimento.	105
4.3	Caratteristiche Magnetiche dei Flussi.	108
4.4	Direzionamento dei Sistemi di Riferimento Rotanti.	109
4.5	Circuito PLECS del controllo FOC-CVC.	112
4.6	Schematico del controllo FPC.	116
4.7	Schema della Funzione Matlab "griddedInterpolant".	119
4.8	Schema della Funzione Matlab "scatterednterpolant".	121
4.9	Mappe di Flusso Diretta e Inversa ad 1 Quadrante.	122
4.10	Mappe di Flusso Diretta e Inversa a 4 Quadranti.	122
4.11	Mappa di Coppia nel Piano delle Correnti.	123
4.12	Schema della Matrice "T_iso_Is_As".	124
4.13	Mappa di Coppia con MTPA e MTPV.	125
4.14	Ottenimento delle Mappe di Controllo Quadrate.	126
4.15	Mappa di Coppia con i Limiti di Funzionamento applicati.	128
4.16	Mappa dell'Angolo di Carico prima della Normalizzazione.	129
4.17	Mappa dell'Angolo di Carico.	129
4.18	Andamenti grafici delle LUTs del controllo FPC.	130
4.19	Andamenti grafici delle LUTs del controllo FPC.	132
4.20	Circuito PLECS del controllo FPC.	134
4.21	Circuito PLECS del Blocco Condizionamento di Segnale.	135
4.22	Circuito PLECS del Blocco PLL.	136
4.23	Circuito PLECS del Blocco del Flusso di Riferimento.	137
4.24	Circuito PLECS del Blocco della Coppia di Riferimento.	138
4.25	Circuito PLECS del Blocco dell'Angolo di Carico di Riferimento.	139
4.26	Circuito PLECS del Blocco dei Regolatori PI.	140
4.27	Circuito PLECS del Blocco dell'Osservatore di Flusso.	142
4.28	Circuito PLECS del Blocco della Generazione Duty Cycle.	143
4.29	Circuito PLECS della Simulazione.	145
4.30	Circuito PLECS del Controllo Coppia-Velocità.	146
4.31	Test MTPS da Motore: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.	147
4.32	Test MTPS da Motore: Flusso, Angolo di Carico e Tensioni $(d, q)_s$ nel tempo.	148
4.33	Test MTPS da Motore: Flussi (α, β) e Angolo di Carico "Reali" e Osservati nel tempo.	149
4.34	Test MTPS da Generatore: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.	150
4.35	Test MTPS da Generatore: Flusso, Angolo di Carico e Tensioni $(d, q)_s$ nel tempo.	150
4.36	Test Dinamico: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.	151

4.37	Test Dinamico: Flusso e Angolo di Carico nel tempo.	151
4.38	Test di Accuratezza, step di Coppia a 700 e 2000 rpm.	152
5.1	Stato iniziale della Scheda di Servizio.	155
5.2	Estratto BOM della Scheda di Servizio.	156
5.3	Strumenti utilizzati nelle fasi di Assemblaggio.	157
5.4	Framing della Scheda di Servizio.	158
5.5	Scheda di Servizio dopo Stesura della Pasta Saldante.	158
5.6	Scheda di Servizio dopo Posizionamento Componenti SMD.	159
5.7	Ciclo di Cottura per PCB.	160
5.8	Spostamento Condensatore durante Processo di Cottura.	160
5.9	Strumenti Utilizzati per Processo di Saldatura Componenti THT.	161
5.10	Stato Finale della Service Board.	163
5.11	Cavo di Alimentazione della Service Board.	165
5.12	Stato della Scheda di Servizio dopo la sua Alimentazione.	166
5.13	Pinout della Nucleo Board.	167
5.14	Accoppiamento Nucleo Board con Service Board.	168
5.15	Stato delle Connessioni del Connettore di Potenza della Service Board.	169
5.16	Stato delle Connessioni della Scheda per tutte le Fasi.	170
5.17	Forme d'onda della Tensione DC-Link in Precarica e Scarica.	170
5.18	Cavo e Connettore per scambio Segnali DC Side Board e Control Board.	171
5.19	Stato della Scheda di Controllo al termine della sua produzione.	172
5.20	Confronto Footprint Regolatore TPS7A2633DRVR [28] Giusto e Ribaltato.	173
5.21	Footprint del Nuovo Regolatore Lineare TLV75533PDBVR [29].	174
5.22	Scheda di Controllo comprensiva dei nuovi Regolatori.	175
5.23	Cavo di Alimentazione della Scheda di Controllo.	177
5.24	Stato della Control Board comprensiva dei Cavi di Alimentazione Temporanei.	178
5.25	Kit Inverter Wolfspeed privato della precedente Control Board.	180
5.26	Spessori e Inserti Filettati utilizzati in fase di Montaggio della Control Board.	181
5.27	Particolare dell'Inserito Filettato Montato sul kit Wolfspeed.	181
5.28	Stato Finale della Control Board Montata sul kit Inverter.	182
5.29	Pinout Completo del Microcontrollore.	187
5.30	Estratto del Clock Tree del Microcontrollore.	188
5.31	Organizzazione del menù "GPIO Mode and Configuration".	189
5.32	Singola EXTI line connessa a 7 GPIO Pins.	190
5.33	Priorità degli Interrupt generati dalle EXTI lines.	191
5.34	Conversione di tipo Single Injected [32].	196
5.35	Repetition Counter per l'HRTIM Timer A [32].	199

5.36	Deadtime Asimmetrico di Salita e Discesa [32].	200
5.37	Rappresentazione dei Compare Registers Values nell'HRTIM.	201
5.38	Generazione della Funzione di Commutazione a partire dai Compare Register Values [32].	202
5.39	Funzionamento Timer 1 in Encoder Mode + index [32].	203
5.40	Comportamento dei Timer in PWM Input Capture Mode [32].	204
5.41	Funzioni di Commutazione per gli Switch Superiori delle tre Gambe di Inverter.	209
5.42	Particolare del Tempo Morto tra le Funzioni di Commutazione Complementari.	209
5.43	Schematico delle Connessioni delle Prove in Corrente.	211
5.44	Stato delle Connessioni delle Prove in Corrente.	212
5.45	Stato delle Connessioni delle Prove in Tensione.	213
5.46	Linee di Tendenza delle Correnti di Fase.	214
5.47	Linee di Tendenza della Tensione DC-Link.	214
5.48	Linee di Tendenza della Tensione DC-Link.	216
5.49	Schema a Blocchi del file main.c.	218
5.50	Schema a Blocchi della ISR di controllo motore.	219
5.51	Schema a Blocchi della Macchina a Stati.	222
5.52	Schema a Blocchi della ISR di Gestione Termica.	224
5.53	Schema rete CAN implementata.	228
5.54	Interfaccia Utente di Controllo Motore.	232
5.55	Schema di Connessione D-Sub a 9 vie per Encoder e CAN.	238
5.56	Schema di Connessione D-Sub a 9 vie per Torsionometro e particolare su Morsettiera di Emergenza.	239
5.57	Stato Finale della Scatola Assemblata e Cablata.	240
5.58	Test I_Hz per Carico Induttivo, Tensione di Fase Istantanea con Tensione DC-Link pari a 40 V.	242
5.59	Test I_Hz per Carico Induttivo, Corrente della fase A, con riferimento di ampiezza pari a 10 A.	242
5.60	LUT Errore di Tensione per Inverter.	245
5.61	Correnti di Fase e Angolo Meccanico durante il test di identificazione dell'errore di tensione.	245
5.62	Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi (d, q) in funzione del tempo per test CVC.	247
5.63	Punti di Funzionamento su MTPA nel piano (d, q) in funzione del tempo per test CVC.	247
5.64	Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi $(d, q)_s$ in funzione del tempo per primo test FPC.	249

5.65	Punti di Funzionamento su MTPA nel piano $(d, q)_s$ in funzione del tempo per primo test FPC.	249
5.66	Coppia e velocità in funzione del tempo per secondo test FPC.	250
5.67	Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi $(d, q)_s$ in funzione del tempo per terzo test FPC.	250

Capitolo 1

Introduzione

L'evoluzione dei sistemi di trazione elettrica è strettamente legata all'avanzamento dell'elettronica di potenza e dei sistemi di controllo motore. La crescente spinta verso l'elettificazione dei veicoli ha determinato una vera e propria rivoluzione in questo settore, dove il motore elettrico diventa l'elemento chiave per garantire prestazioni, efficienza e sostenibilità. In questo contesto, i banchi prova per motori elettrici rivestono un ruolo fondamentale per la validazione e l'ottimizzazione dei motori destinati alla trazione.

Un banco prova è sostanzialmente una piattaforma di test in laboratorio che permette di simulare e misurare le condizioni operative del motore in un ambiente controllato, analizzando prestazioni, efficienza, potenza e risposta dinamica del motore in situazioni realistiche ma sicure. Nel caso specifico della trazione elettrica, attraverso il banco prova è possibile osservare il comportamento del motore soggetto a diversi carichi e velocità, valutandone il consumo energetico, la generazione di calore e le prestazioni dinamiche. Costituisce quindi uno strumento essenziale per sviluppare soluzioni di trazione elettrica avanzate; attraverso l'integrazione dell'elettronica di potenza e dei sistemi di controllo, è possibile rispondere alle sfide imposte dall'elettificazione.

L'elettronica di potenza permette di gestire efficientemente la conversione e il trasferimento dell'energia necessaria al funzionamento del motore. La progettazione e realizzazione dei PCB (Printed Circuit Board) non solo permette di raggiungere elevate prestazioni nel controllo di motori elettrici destinati alla trazione, ma garantisce anche l'affidabilità, la sicurezza e l'efficienza del sistema. Grazie ad una gestione attenta di dissipazione, routing, isolamento e protezione, essi sono in grado di supportare le complesse esigenze dei moderni veicoli elettrici, favorendo una trazione efficiente e duratura.

Allo stesso tempo, i sistemi di controllo motore svolgono una funzione essenziale per ottimizzare la risposta dinamica e la stabilità del motore. Questi sistemi ricevono costantemente informazioni dai sensori presenti e adattano i parametri operativi per ottenere le migliori prestazioni in ogni condizione di funzionamento. Nella trazione elettrica, il controllo motore permette di mantenere al contempo delle condizioni operative stabili sia in funzionamento continuo e prolungato, sia in condizioni in cui sono richieste importanti variazioni dinamiche.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la creazione di un sistema unificato di controllo motore, all'interno del quale più componenti, come il convertitore di potenza, i sensori, le schede elettroniche e il banco prova stesso, operano in modo sinergico e coordinato per fornire un controllo avanzato e affidabile del motore elettrico.

Uno degli aspetti chiave del sistema di controllo unificato è l'integrazione del convertitore di potenza, un componente essenziale che modula e adatta l'energia proveniente dall'alimentazione (come una batteria o alimentazione di laboratorio) per soddisfare le richieste operative del motore. Un aspetto critico della sua integrazione è la capacità di raccogliere dati in tempo reale sulla tensione, corrente, posizione, temperatura e coppia del motore; questi feedback vengono costantemente inviati al sistema di controllo, basato su un algoritmo complesso implementato all'interno di un microcontrollore. Pertanto, l'integrazione del convertitore di potenza in un sistema di controllo unificato rappresenta il nucleo del banco prova.

L'assenza di un sistema unificato di questo tipo per un banco prova già esistente ne ha dunque permesso la sua creazione. La fase iniziale dello sviluppo di questo sistema è stata già affrontata in un lavoro di tesi precedente [1], attraverso la creazione degli schematici circuitali delle due schede elettroniche da integrare: la scheda di controllo e la scheda di servizio. In particolare, lo sbroglio del PCB è stato completato solo per la scheda di servizio.

Il convertitore di potenza da integrare all'interno del banco prova è il Wolfspeed CRD300DA 12E-XM3 [2], inverter trifase da 300kW caratterizzato dalla presenza di tre moduli di potenza di tipo Half Bridge a SiC MOSFETs; nominalmente sopporta una tensione di DC-Link di 800V e una corrente di fase efficace di 360 Arms, con frequenza di commutazione a 20 kHz e capacità totale di DC-Link di 300 μ F. In Figura 1.1 è mostrato il kit del convertitore che include: tre moduli di potenza, gestione termica effettuata tramite due ventole e predisposizione di un raffreddamento a liquido tramite uno scambiatore di calore forato per il suo passaggio, condensatori di DC-Link, schede gate drivers, sensori di corrente a effetto Hall e scheda di controllo.



Figura 1.1: Kit convertitore di potenza Wolfspeed CRD300DA12E-XM3 [2].

Il lavoro di tesi precedente [1] si basa in particolare sulla sostituzione della Control Board esistente. La scheda di controllo precedente e fornita col kit inverter, si basava su un microcontrollore Texas Instruments non direttamente montato e presentava diversi limiti che ne hanno reso necessaria la sostituzione, tra cui la mancanza di funzionalità di protezione del sistema, rendendolo di fatto esposto a potenziali rischi operativi in assenza di interruttori automatici e sequenze di emergenza, limitata integrazione del microcontrollore, come già anticipato separato dalla control board, assenza di filtraggio EMI per le interferenze elettromagnetiche, e infine il cablaggio non ottimale della scheda esistente, il quale non supportava tutti i sensori necessari per la configurazione del banco prova, come il torsionmetro, i sensori di flusso, la ventilazione e i sensori di temperatura.

1.1 Obiettivi della Tesi

Pertanto, il progetto qui presentato si fa carico del completo sviluppo del sistema unificato a partire da ciò che è stato ultimato nei lavori precedenti. Le fasi principali dello sviluppo sono di seguito riassunte:

1. **Conclusione del processo di sbroglio della nuova di scheda di controllo.** Una volta definite tutte le limitazioni introdotte dall'utilizzo della precedente scheda di controllo, è necessario integrare la nuova Control Board all'interno del sistema. Per far ciò occorre ultimare il processo di Routing della scheda; pertanto, una volta terminato, la scheda di controllo sarà direttamente montata sulla sommità del kit inverter al posto della vecchia Control Board;
2. **Realizzazione CAD meccanico della scatola che ospiterà il sistema unificato.** Il banco prova in esame è già caratterizzato dalla presenza di due motori elettrici gemelli allineati e accoppiati lungo l'asse degli alberi motore. Tuttavia, per poter realizzare un sistema di controllo unificato destinato ad essere utilizzato solamente per questo banco prova, è necessaria la progettazione e realizzazione di una scatola robusta che protegga e contenga al suo interno fisicamente tutti i componenti che operano in modo coordinato al funzionamento del banco. Ultimata la sua creazione fisica, questa viene assemblata, riempita con i componenti connessi fra di loro e posizionata al di sopra del MUT (machine under test);
3. **Scrittura dell'algoritmo di controllo.** L'algoritmo di controllo motore per un banco prova definito deve rispondere alle strette esigenze di controllo del MUT specifico; in particolare, l'algoritmo deve essere in grado di attuare un controllo di coppia preciso, affidabile, ad elevate prestazioni dinamiche in ogni condizione di funzionamento, continue o con inversioni di coppia. Non solo, ma deve essere in grado di gestire ogni segnale proveniente dal sistema, come segnali di feedback specifici per il controllo motore, di emergenza, di azionamento sistema di gestione termica; l'elaborazione in tempo reale di ogni segnale è un requisito fondamentale che pone l'affidabilità e la sicurezza del banco e degli operatori come obiettivo principale;
4. **Validazione sperimentale del sistema.** La validazione sperimentale del sistema costituisce la fase finale del progetto di tesi e permette di verificare la funzionalità non solo del sistema nel suo complesso, ma di ogni suo componente. A partire dalla validazione delle schede elettroniche, questo processo viene applicato nel dettaglio a tutti i componenti del banco prova, fino alla validazione del corretto funzionamento dell'algoritmo di controllo.

Infine, si riporta in Figura 1.2 lo schema a blocchi del sistema unificato; in verde sono state evidenziate le alimentazioni delle schede elettroniche, in rosso i segnali che le stesse devono essere in grado di gestire per soddisfare i requisiti di integrazione imposti dal sistema unificato, in blu il sistema di raffreddamento a liquido, in nero le connessioni di potenza.

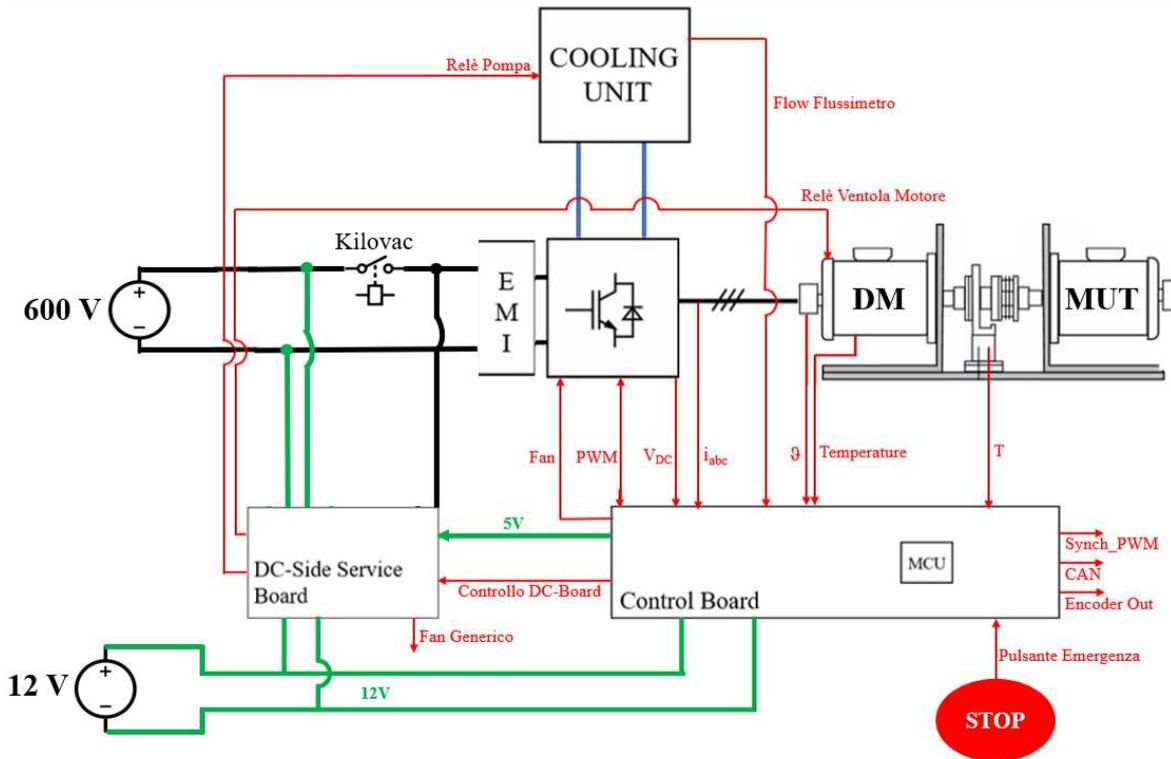


Figura 1.2: Schema Completo del Banco Prova [3].

Capitolo 2

Panoramica sulle Schede di Controllo e di Servizio

2.1 Contesto di Integrazione delle Schede nel Banco Prova

Il presente capitolo si propone di fornire una visione completa e introduttiva del contesto in cui le schede elettroniche sviluppate verranno applicate. Pertanto, le tematiche principali affrontate si concentrano non solo sull'integrazione delle schede nel banco prova, ma anche sull'importanza di garantire compatibilità tra le schede e il sistema esterno, concentrandosi sulla loro capacità di lavorare in sinergia all'interno del sistema. Un altro elemento chiave trattato in questo capitolo è la descrizione delle macroaree funzionali di ciascuna scheda. Solamente grazie ad un'accurata analisi delle sezioni operative di ciascuna scheda è possibile riconoscere ogni ruolo delle stesse. Non solo, ma la conoscenza approfondita di ogni macroarea consente di identificare quanti e quali segnali sono gestiti all'interno di ognuna e come queste si interfacciano tra di loro; l'affidabilità dell'intero sistema dipende infatti dalla corretta gestione di questi segnali. Verranno inoltre approfonditi tutti gli aspetti legati al Routing della scheda di controllo. Il processo di sbroglio è stato guidato da vincoli tecnici stringenti e dalla necessità di assicurare un flusso continuo dei segnali di potenza e controllo.

In un'applicazione più generica e non specifica per un banco prova esistente, l'integrazione di una Control Board e di una DC Side Board segue una struttura ben definita, adattata a sistemi di controllo più standard, come applicazioni industriali o robotica. In questo contesto, l'integrazione delle schede è focalizzata su aspetti più generici come la gestione del flusso di potenza e scrittura di algoritmi di controllo motore robusti, tuttavia con minori requisiti personalizzati rispetto a un banco prova specifico.

Le differenze tra un'applicazione di questo tipo e una più specifica di un banco esistente, come quello trattato nella tesi, possono così essere identificate:

- **Obiettivi e Complessità del Sistema.** L'obiettivo principale è non solo l'algoritmo di controllo del motore, ma anche la misurazione accurata e il monitoraggio dettagliato delle prestazioni di quest'ultimo. Dunque, il sistema deve essere in grado di raccogliere diverse tipologie di dati, come coppia, velocità, temperature, correnti e tensioni, trasferire queste informazioni ad un'unità di controllo specifica che possa tradurle efficacemente ed in tempo reale;
- **Algoritmi di Controllo.** Gli algoritmi di controllo motore considerati verranno approfonditi nei capitoli dedicati. D'altra parte, al fine di approfondire il contesto in cui le schede sono state integrate, è necessario considerare che per questo tipo di applicazione gli algoritmi di controllo considerati sono spesso più sofisticati e includono logiche avanzate di test e simulazione, per mettere alla prova il sistema in condizioni più critiche. Il controllo del motore può includere algoritmi per la simulazione di scenari specifici, come l'accelerazione, la frenata o le inversioni di coppia e velocità;
- **Gestione dei Segnali.** È necessaria un'accurata conoscenza e sincronizzazione dei segnali per garantire che tutte le misure siano prese correttamente e confrontabili in tempo reale. I segnali possono provenire direttamente dai feedback del banco prova, possono essere scambiati tra le schede di controllo e di servizio o possono servire per controllare componenti fisici specifici del banco prova, quali relè o circuiti di precarica e scarica;
- **Requisiti di sicurezza e protezione.** In un banco prova, la sicurezza è gestita in modo molto più rigoroso, con molteplici livelli di protezione. Oltre alla protezione del sistema, è necessario garantire la sicurezza degli operatori e dell'ambiente circostante. Sistemi di arresto di emergenza, monitoraggio continuo delle condizioni dei test e algoritmi per la gestione delle condizioni critiche o di errori sono integrati nel processo.

Di conseguenza, conoscere le macroaree funzionali delle schede all'interno di un'applicazione come quella di un banco prova per motori elettrici è fondamentale per diverse ragioni. In primo luogo, la suddivisione del sistema in macroaree permette una gestione più efficiente di tutte le funzioni critiche del banco prova. In secondo luogo, permette di integrare più facilmente le schede sviluppate all'interno di questo contesto, aiutando a comprendere come ogni sezione del sistema contribuisca al funzionamento generale. D'altro canto, questa visione suddivisa in macroaree potrebbe risultare frammentaria o sconnessa, tuttavia permette invece di ottimizzare la progettazione, poiché si possono

affrontare separatamente le aree dedicate alle diverse funzioni; non solo, ma le sezioni operative permettono di localizzare in modo preciso dove si generano o vengono processati i segnali.

Il Routing o sbroglio del PCB riveste un'importanza fondamentale. Questo processo si concentra sull'ottimizzazione dei percorsi delle tracce elettriche che collegano i vari componenti, garantendo che i segnali di potenza e controllo fluiscano correttamente senza interferenze o perdite significative. La disposizione delle tracce influisce direttamente sulle prestazioni del sistema, quindi è essenziale che ogni percorso sia progettato per massimizzare l'affidabilità e la stabilità funzionale della scheda, riducendo dunque il rischio di errori o condizioni critiche durante il funzionamento del banco prova.

2.2 Obiettivi e Sezioni Operative delle schede

Il progetto degli schematici della Scheda di Controllo, gli schematici e lo sbroglio della Scheda di Servizio, sono stati portati avanti da lavori di tesi antecedenti [1] a quello presentato in questa istanza. Pertanto, lo stato iniziale di entrambe le schede verrà presentato a seguire, come punto di partenza dello sviluppo che è stato condotto su queste. Successivamente, questa sezione si propone di analizzare in dettaglio il ruolo e gli obiettivi di ciascuna scheda utilizzata nel sistema di controllo per il banco prova, con un focus maggiore su come queste siano suddivise in macroaree funzionali, ciascuna precedentemente progettata per svolgere compiti specifici. Verranno approfonditi inoltre i segnali associati a ciascuna sezione operativa, descrivendo in che modo questi vengono utilizzati per garantire il corretto funzionamento delle schede e l'integrazione nel sistema complessivo.

Nel contesto del banco prova in esame, la DC Side Board e la Control Board svolgono ruoli complementari e cruciali per garantire un controllo preciso e una gestione efficiente della potenza. La divisione in queste macroaree riflette infatti la necessità di separare sia fisicamente che logicamente la gestione dell'energia e del controllo dei segnali, ottimizzando la funzionalità della singola scheda e migliorando la sicurezza e l'efficienza della stessa. Ad esempio, questa divisione permette di isolare i componenti ad alta potenza, come il DC Link, dai circuiti di controllo o comunicazione, minimizzando le interferenze e migliorando la gestione delle problematiche legate alla sicurezza, consentendo anche una manutenzione più efficiente, proprio perché ogni scheda si occupa di una specifica area del sistema. Ognuna di essa svolge un ruolo fondamentale per la stabilità operativa del sistema globale, integrandosi con altre sezioni operative per assicurare che la scheda possa operare senza problemi in diverse condizioni.

A seguire, si riportano in Figura 2.1 e in Figura 2.2 gli stati iniziali di entrambe le schede. Si noti che lo stato della DC Side Board sia già completo, pertanto il suo montaggio e validazione sperimentale verrà approfondito nel capitolo 5.1.1. La Control Board invece, necessita del processo di Routing che verrà analizzato successivamente.

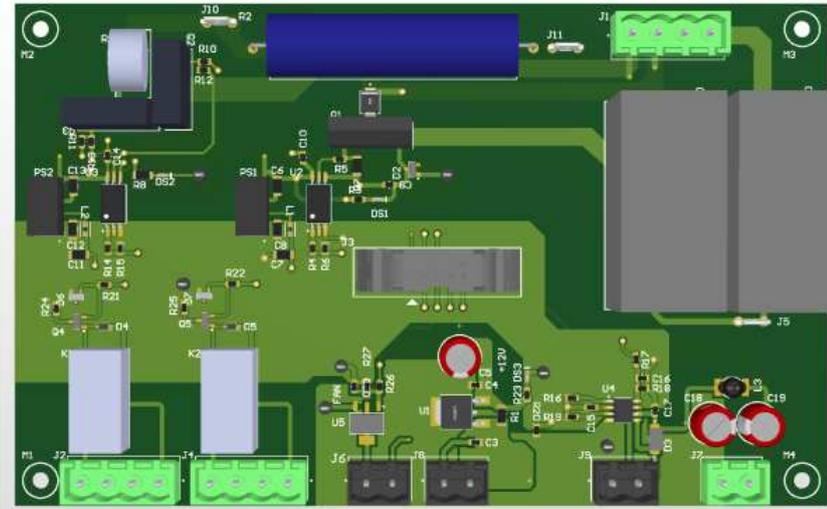


Figura 2.1: Vista 3D della DC-Side Board.

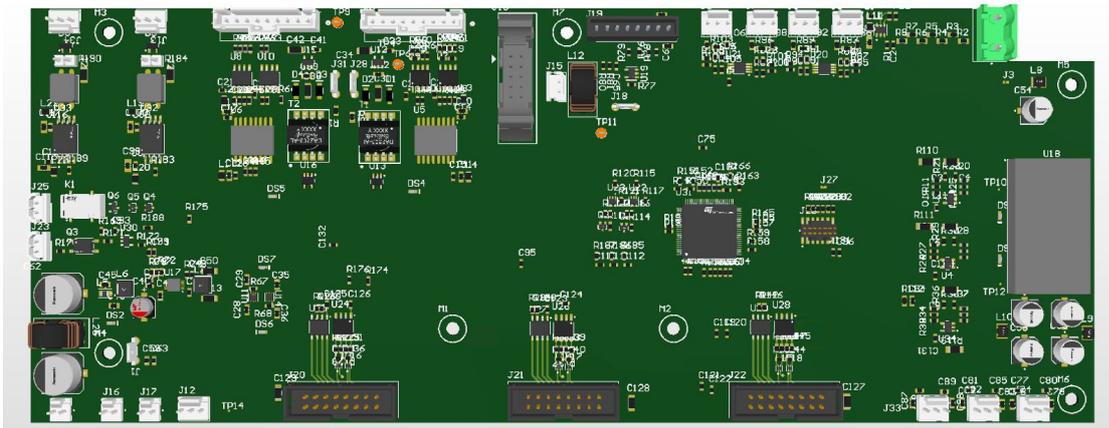


Figura 2.2: Vista 3D dello stato iniziale della Control Board.

A partire dai lavori di tesi sviluppati precedentemente [1], nessuna sezione o componente della scheda di servizio è stato modificato. La scheda di controllo d'altra parte, ha subito delle minori variazioni, discusse dettagliatamente nella sezione dedicata alle macroaree funzionali della scheda, Capitolo 2.2.1. Le variazioni introdotte sono state:

- Variazione dello stadio di conversione alimentazione da 5V a 5V_ISO1 e 5V_ISO2;

- Introduzione di una nuova sezione operativa e di uno schematico dedicato completamente alla sincronizzazione PWM della scheda di controllo del MUT e della DM. La sincronizzazione delle due schede e la loro corretta interazione risulta necessaria per il corretto controllo dei due motori in modulazione PWM;
- Disposizione dei componenti non presenti ancora sulla scheda nel processo di sbroglio;
- Riposizionamento connettore e componenti per comunicazione con scheda di servizio;
- Riposizionamento delle sezioni di conversione alimentazione da 5V a 3V3_D e 3V3_A;
- Variazioni di alcuni Pin Input/Output del microcontrollore, per gestire i nuovi segnali della sincronizzazione PWM;
- Minori variazioni di componenti SMD.

In questa sezione si presentano inoltre gli obiettivi principali di ciascuna scheda, prima delle descrizioni dettagliate delle macroaree e segnali delle stesse, le quali saranno presentate nei prossimi capitoli.

La DC Side Board si occupa della gestione della distribuzione della potenza lato DC del convertitore, assicurando la sicurezza dell'intero sistema durante le fasi critiche di avvio e spegnimento. In particolare, risulta primaria la corretta gestione del DC Link, un elemento cruciale per l'immagazzinamento e la stabilizzazione dell'energia. Quest'ultimo ha l'obiettivo principale di garantire un'erogazione stabile di corrente, filtrando i ripple di tensione generati dalla modulazione PWM ad alta frequenza. Il sistema di precharge è essenziale per limitare la corrente di spunto che si verifica quando i condensatori del DC Link vengono inizialmente caricati. Questo processo di Precharge evita danni ai componenti e garantisce che la transizione all'accensione avvenga in modo sicuro e controllato, distribuendo in maniera controllata la potenza iniziale. Parallelamente, la scheda include anche un sistema di Discharge, che entra in funzione quando il sistema viene spento. Il suo scopo è dissipare in sicurezza l'energia residua immagazzinata nei condensatori, poiché l'energia rimanente può rappresentare un rischio per l'operatore o per il sistema se non viene gestita correttamente.

Oltre a queste funzioni principali, la DC Side Board gestisce anche ventole di raffreddamento e relè per dispositivi ausiliari, garantendo che l'inverter mantenga temperature operative sicure e che i componenti possano essere controllati e alimentati in modo indipendente.

Infine, la scheda ha anche la responsabilità di gestire il contattore Kilovac, che agisce come un interruttore ad alta tensione, posto fisicamente tra il convertitore e le connessioni di potenza del DC Link. Questo consente di connettere o isolare in sicurezza l'alimentazione DC al sistema. In figura 2.3 uno schema riassuntivo delle funzioni della scheda:

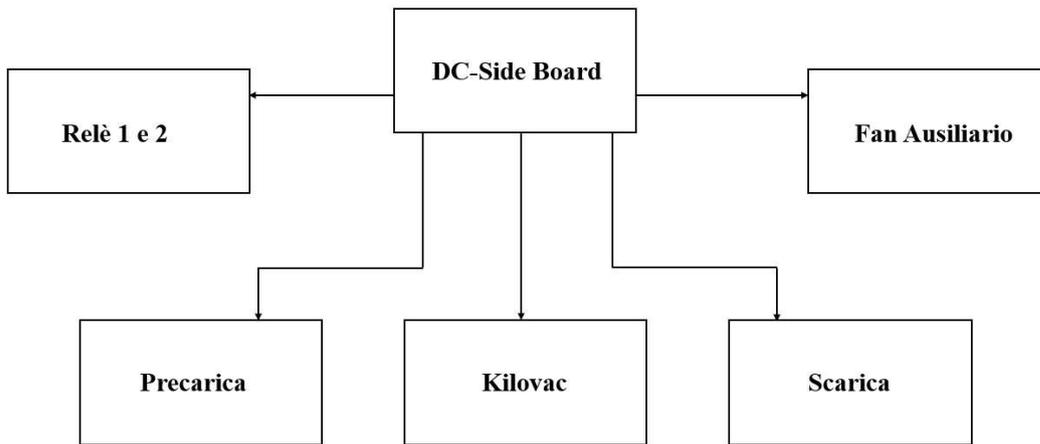


Figura 2.3: Schematico delle Funzioni della DC-Side Board.

D'altra parte, la Control Board gioca un ruolo centrale nel sistema del banco prova. Essa gestisce tutti i segnali di feedback e di controllo, regola il preciso funzionamento del motore elettrico tramite l'implementazione diretta sulla scheda del microcontrollore. Prende decisioni in tempo reale per garantire che il sistema convertitore-motore-ausiliari funzionino in modo efficiente e sicuro, raccogliendo costantemente dati dai sensori (corrente, tensione, temperatura del sistema e coppia meccanica, che vengono utilizzati per monitorare lo stato del motore e intervenire immediatamente in caso di anomalie) e inviando comandi ai componenti di potenza. Uno degli obiettivi principali della scheda è la generazione e gestione dei segnali PWM, i quali regolano il comportamento degli switch di potenza all'interno del convertitore trifase. Inoltre, la comunicazione è un aspetto centrale nella Control Board, che utilizza bus come il CAN per scambiare informazioni con sistemi esterni, come il computer che supervisiona il banco prova o altre unità di controllo. Un ulteriore obiettivo della Control Board è garantire la sicurezza operativa del sistema, fondamentale per soddisfare i requisiti di integrazione delle schede nel banco. La scheda integra circuiti di protezione per rilevare eventuali condizioni critiche, come sovratensioni, sovracorrenti o surriscaldamento. Essa può attivare funzioni di protezione, interrompendo l'alimentazione o segnalando la necessità di un intervento di manutenzione.

Infine, come già anticipato, deve essere in grado di coordinare le altre schede del sistema, come la DC Side Board o la scheda di controllo della DM. In figura 2.4 si riporta quindi lo schematico riassuntivo delle funzioni della Control Board:

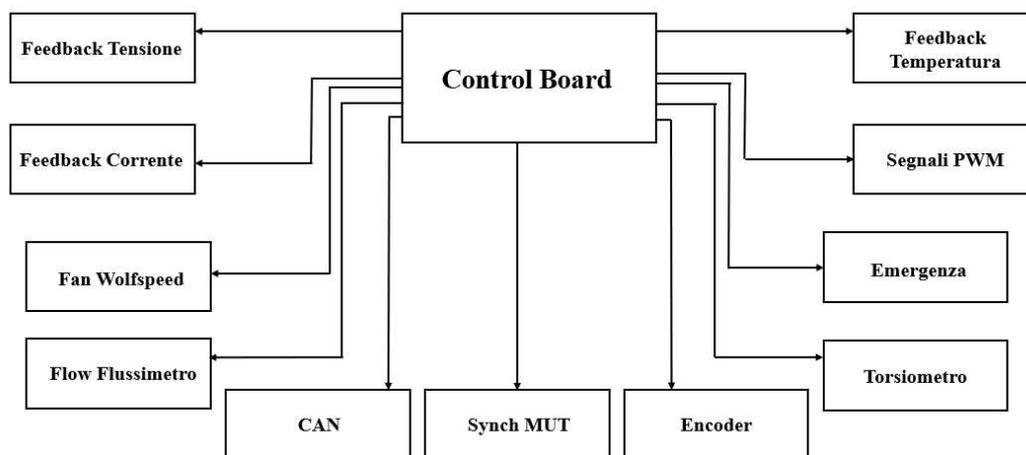


Figura 2.4: Schematico delle Funzioni della Control Board.

2.2.1 Sezioni Operative della Scheda di Controllo

Al termine della precedente sezione sono state brevemente descritte le funzioni principali della scheda di controllo. Di seguito si propone invece un'analisi dettagliata di tutte le sezioni operative della scheda, necessaria non solo per la conoscenza di ogni sua macroarea, ma anche per i segnali principali che vengono gestiti dai componenti presenti. Come già anticipato, è proprio la Control Board che ne comanda il funzionamento di ogni sua sezione operativa. Perciò, nella sezione 2.2.2 si ritiene necessario descrivere anche le sezioni operative di quest'ultima.

Di seguito, in Figura 2.5, si riporta lo stato finale della scheda di controllo. Le modifiche che sono state apportate rispetto alla configurazione iniziale sono brevemente discusse nelle sezioni operative di interesse. La disposizione nella scheda di alcune macroaree non è di certo casuale; nel momento in cui una particolare disposizione ha difatti un interesse pratico all'interno dell'azionamento, essa è discussa al fondo della descrizione della sezione operativa che la riguarda.

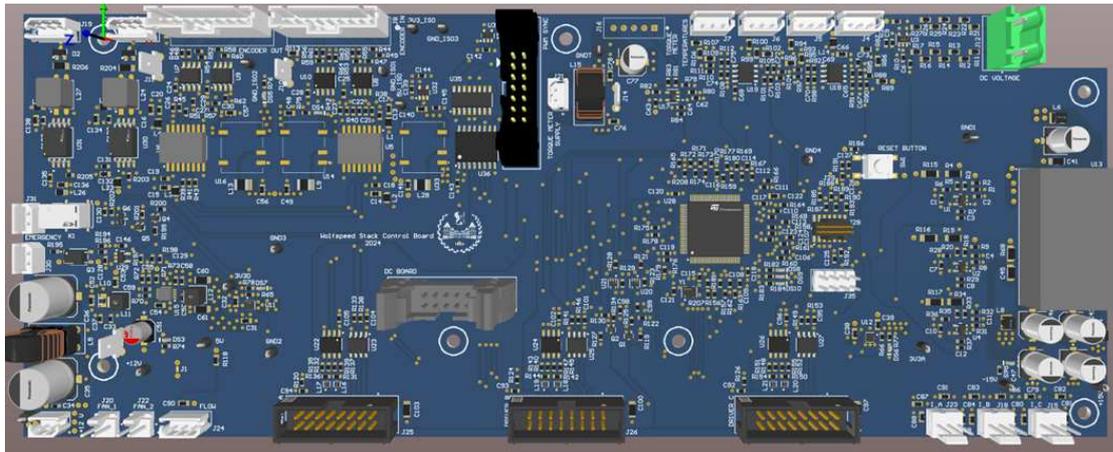


Figura 2.5: Stato Finale della Control Board.

La macroarea dell'alimentazione della Control Board è una sezione fondamentale per garantire che tutti i componenti della scheda ricevano una tensione stabile e regolata, necessaria per il loro funzionamento corretto. In un sistema complesso come quello del banco prova, è essenziale che l'alimentazione sia affidabile, stabile e adeguatamente monitorata per evitare malfunzionamenti e garantire la protezione di componenti critici. Gli obiettivi principali della macroarea sono dunque:

- Fornire un'alimentazione regolata e stabile ai vari componenti della Control Board, inclusi il microcontrollore, le sezioni di feedback, i sistemi di comunicazione e i driver PWM;

- Gestire la distribuzione dell'alimentazione in modo efficiente, assicurando che ogni parte della scheda riceva la tensione richiesta in modo stabile, senza aumenti o cadute di tensione;
- Gestire l'avvio e lo spegnimento sicuro della scheda, assicurando che l'alimentazione venga attivata e disattivata in modo controllato.

I livelli di tensione presenti nella scheda sono molteplici, sia per assicurare il funzionamento di diversi componenti presenti che li richiedono, sia per assicurare alimentazioni "dedicate" e isolate per determinate sezioni operative, seppure il valore di tensione sia lo stesso. Ogni alimentazione è caratterizzata dalla presenza di un LED che ne garantisce all'operatore lo stato operativo. In Tabella 2.1 si riportano in sintesi i diversi livelli di tensione presenti e la sezioni operative che alimentano.

Valori di Tensione di Alimentazione	Sezioni Operative di Interesse
+Vcc	Alimentazione primaria della scheda, 12V
12V	Per stadio di conversione a 5V Per alimentazione connettori FAN
12V_PWR	Tramite Jumper, per alimentazione connettori driver PWM del convertitore
+15V, -15V	Per alimentazione sensori Hall del feedback di corrente
+Vcc_T	Alimentazione secondaria della scheda, 24V, per alimentazione del torsiometro
5V	Alimentazione connettore flussimetro Alimentazione connettore DC Side Board Alimentazione per Integrati di sezione Driver PWM Alimentazione per Integrati di sezione Emergency Per stadio di conversione sezione Synch_PWM
5V_ISO_1	Alimentazione per Integrati di sezione Encoder
5V_ISO_2	Alimentazione per Integrati di sezione Encoder Alimentazione per Integrati di sezione CAN
3V3_A	Alimentazione per Integrati di sezione Torsiometro Alimentazione per Integrati di sezione Feedback Corrente Alimentazione per Integrati di sezione Feedback Temperature Alimentazione Macroarea MCU Alimentazione Base BJT sezione Emergency

Valori di Tensione di Alimentazione	Sezioni Operative di Interesse
3V3_D	Alimentazione per Integrati di sezione Encoder Alimentazione per Integrati di sezione Driver PWM Alimentazione Macroarea MCU Alimentazione per Integrati di sezione CAN Alimentazione per Integrati di sezione Synch_PWM
3V3_PT	Alimentazione di riferimento di sezione Feedback Temperature
3V3_ISO	Alimentazione per Integrati di sezione Synch_PWM
VDC	Feedback diretto della tensione del DC Link, gestito nella macroarea dedicata

Tabella 2.1: Tabella dei Valori di Tensione di Alimentazione delle Sezioni Operative.

La macroarea dell'alimentazione della Control Board utilizza alcuni segnali per gestire l'erogazione continua di alimentazione, garantire la protezione e fornire feedback continuo sullo stato dell'alimentazione.

- **PG_5V**, segnale interno alla macroarea. Questo segnale viene inviato dallo stadio di conversione 12V – 5V per assicurare il suo corretto funzionamento allo stadio di conversione 5V – 3V3_D;
- **PG_3V3D**, segnale interno alla macroarea. Questo segnale viene inviato dallo stadio di conversione 5V – 3V3_D per assicurare il suo corretto funzionamento allo stadio di conversione 5V – 3V3_A;
- **PG_3V3A**, segnale di Output. Questo segnale viene inviato dallo stadio di conversione 5V – 3V3_A. Differentemente dai precedenti, esso riveste un ruolo cruciale nella comunicazione tra le sezioni operative della scheda, in particolare tra la sezione di alimentazione, quella di Emergency, quella dei Driver PWM e quella del microcontrollore. Difatti, il segnale viene inviato dalla sezione di alimentazione ad uno specifico Pin del microcontrollore, agli integrati che gestiscono la logica di Enable PWM dei driver (2.2) e ad uno dei BJT presenti nella sezione di Emergency. In condizioni di emergenza, le quali possono provenire sia dall'azione esterna dell'operatore tramite il pulsante di emergenza, sia dall'azione del microcontrollore che rileva uno stato di errore, il segnale viene forzato ad un livello nullo di tensione.

Infine, per quanto concerne la disposizione della macroarea di alimentazione, questa risulta essere distribuita sulla scheda per diverse ragioni. L'orientamento dei vari stadi

di conversione è mutuato da quello dei diversi connettori della scheda, i quali vincolati a posizioni specifiche che non possono essere modificate. Alcune disposizioni iniziali di alcuni stadi di conversione sono stati modificati; ad esempio, lo stadio di conversione 5V – 3V3_A è stato spostato in una posizione più vicina al microcontrollore e agli integrati del feedback di corrente. In generale, alcuni stadi di conversione sono stati posizionati vicino le sezioni operative che necessitano di quei valori di tensione, minimizzando così le connessioni di potenza necessarie per connettere le varie macroaree.

La sezione operativa della gestione del feedback di corrente della scheda di controllo è fondamentale per il monitoraggio preciso delle correnti di fase del MUT. Gli obiettivi della macroarea del sensing di corrente sono:

- Misurare in tempo reale le correnti di fase che attraversano le fasi del motore, garantendo che rimangano entro i limiti operativi previsti;
- Fornire dati di feedback alla Control Board per il controllo in anello chiuso del motore, come il controllo di velocità o di coppia, assicurando che l'algoritmo funzioni in modo quanto più preciso;
- Rilevare sovracorrenti o condizioni di guasto, in modo da attivare le protezioni di sicurezza in caso di guasti o condizioni critiche.

La macroarea del sensing di corrente utilizza diversi segnali per raccogliere, processare e inviare informazioni relative alle correnti misurate nel sistema.

- **Ia, Ib, Ic, -Ia, -Ib, -Ic**, segnali di Input. Questi segnali rappresentano in modo differenziale le correnti di fase misurate dai sensori di corrente, come i sensori a effetto Hall, nelle tre fasi del motore (a, b, e c). Essi forniscono informazioni sulla corrente che attraversa ciascuna fase, dati essenziali per il controllo preciso del motore;
- **Ia_cond, Ib_cond, Ic_cond**, segnali di Output. Questi segnali analogici sono destinati ad essere inviati alle unità ADC 1,2 e 3 del microcontrollore, permettendo alla Control Board di monitorare in tempo reale lo stato delle correnti nel sistema. I valori effettivi di corrente di fase infatti sono ricostruiti dall'algoritmo di controllo motore, come discusso nel capitolo [5.2.3](#).

La disposizione dei connettori di feedback a bordo scheda consente di raccogliere le misure in modo più pratico, ma il posizionamento degli integrati di processing dei segnali di feedback è rivolto verso la macroarea del microcontrollore, permettendo dunque delle connessioni tramite delle piste più dirette e più corte.

D'altra parte, la macroarea funzionale del sensing di tensione del DC Link consente di misurare il livello di tensione presente ai capi di quest'ultimo al fine di assicurare che l'algoritmo di controllo motore elabori dei valori di tensione di fase di riferimento il cui picco sia sempre inferiore ad un determinato valore massimo, legato alla tensione del DC Link. Gli obiettivi della macroarea del sensing di tensione sono:

- Misurare in tempo reale la tensione del bus DC;
- Fornire feedback al microcontrollore per monitorare e regolare le operazioni del sistema in base alle condizioni di tensione;
- Ottimizzare le prestazioni del sistema regolando la potenza in base ai valori di tensione rilevati, per mantenere il motore e l'inverter in condizioni operative ideali.

Anche la sezione operativa del feedback di tensione gestisce sia segnali di Input che di Output. Quest'ultimo segnale fornisce al microcontrollore tutte le informazioni necessarie per monitorare e gestire la tensione.

- **VDC_P e VDC_N**, segnali di Input. Il segnale di tensione proveniente dal DC Link. Questo segnale misura la tensione continua che alimenta l'inverter e rappresenta il valore di tensione più critico da monitorare. Portato in maniera differenziale, questi devono essere prima elaborati e adattati alla scala analogica dell'ADC del microcontrollore;
- **VDC_cond**, segnale di Output. Dopo l'elaborazione del segnale differenziale, questo segnale analogico può essere mandato al microcontrollore e processato nell'algoritmo di controllo. Infatti, così come per i feedback di corrente, anche il valore di tensione del DC Link sarà ricostruito al suo interno tramite un opportuno fattore di scala, discusso nel capitolo dedicato [5.2.3](#).

Il connettore di questo feedback è posizionato al bordo scheda nella parte superiore della stessa. La motivazione risiede nel fatto che la scheda una volta montata sopra il convertitore, raccoglie il segnale di feedback da un connettore di quest'ultimo posto proprio in quell'area.

La macroarea del sensing di coppia della Control Board è responsabile della gestione e dell'acquisizione dei dati provenienti dal torsionmetro. Questo strumento viene utilizzato per misurare la coppia meccanica prodotta dal motore e fornisce informazioni utili per il controllo e la regolazione delle prestazioni del sistema. Infatti, monitorare la coppia meccanica permette alla Control Board di affinare l'algoritmo di controllo, ad esempio con tecniche di Feed-Forward. Di seguito gli obiettivi principali della sezione del sensing di coppia:

- Misurare in tempo reale la coppia generata dal motore per monitorare le prestazioni e verificare che il motore stia operando entro i parametri desiderati;
- Fornire feedback alla scheda per regolare il controllo del motore, ottimizzando la risposta dinamica e mantenendo la coppia entro i limiti massimi;
- Identificare eventuali sovraccarichi o variazioni di coppia che potrebbero indicare problemi operativi o guasti, permettendo di attivare le protezioni in caso di anomalie.

La sezione operativa del torsionmetro presenta due connettori disposti sulla scheda. Come già anticipato nella Tabella 2.1, la scheda riceve dall'esterno un'alimentazione di 24V; una volta filtrata, quest'ultima viene poi mandata al torsionmetro per la sua alimentazione tramite il secondo connettore. Nuovamente, da quest'ultimo alla Control Board arrivano i segnali differenziali del feedback del torsionmetro. Dunque, i segnali presenti nella macroarea del sensing di coppia sono:

- **T_{in+}, T_{in-}**, segnali di Input. Questi segnali differenziali rappresentano l'ingresso della misurazione della coppia meccanica effettuata dal torsionmetro in tempo reale. I segnali devono prima essere elaborati dall'integrato montato su quest'area;
- **T_{cond}**, segnale di Output. L'elaborazione del segnale differenziale di input viene effettuata per adattare la sua scala analogica a quella dell'ADC del microcontrollore, definita da 0 a 3.3V. Questa operazione viene effettuata nella macroarea da un integrato dedicato. Dopodiché, il segnale viene direttamente inviato ad un Pin dedicato del microcontrollore.

In conclusione, la disposizione della macroarea non è definita da particolari esigenze di posizionamento dei componenti.

La macroarea del sensing di temperatura della Control Board è responsabile della misurazione e del monitoraggio della temperatura dei vari componenti del sistema, come tre fasi del motore. Gli obiettivi di questa sezione operativa possono essere riassunti in:

- Misurare la temperatura dei componenti critici, come l'inverter e il motore, in tempo reale, per prevenire condizioni di surriscaldamento;
- Fornire feedback alla Control Board per attivare le procedure di regolazione o protezione in caso di temperature elevate, tramite algoritmo di controllo dedicato.

Questa sezione operativa presenta 4 circuiti di acquisizione ed elaborazione dei segnali di temperatura; ne consegue che l'algoritmo di controllo può gestire fino a 4 diversi feedback di temperatura nel sistema. In questa applicazione, il sensing di temperatura è dedicato ai 3 avvolgimenti del motore e ad una generica temperatura che può essere rilevata nel banco prova. I segnali presenti nella macroarea sono:

- **RTDX_2 e RTDX_REF, con X = 1,2,3,4**, segnale di Input. La differenza di potenziale tra questi due segnali definisce la temperatura misurata in un punto specifico del sistema. Tuttavia, per poter essere inviato al microcontrollore è necessario che il segnale venga prima adattato alla sua scala analogica;
- **RTDX_cond, con X = 1,2,3,4**, segnale di Output. Una volta effettuato il condizionamento del segnale analogico di temperatura, questo può essere inviato al Pin dedicato del microcontrollore. L'utilizzo dei segnali di temperatura all'interno dell'algoritmo di controllo sarà approfondito nella sezione dedicata [5.2.3](#).

La disposizione dei componenti non è dettata da particolari esigenze di posizionamento.

La sezione operativa dei connettori ausiliari può essere considerata e descritta sotto un'unica macroarea funzionale, seppur con scopi differenti. All'interno di questa sezione operativa fittizia è possibile considerare i connettori di alimentazione diretta del comando ventole del convertitore, il connettore di ricezione segnale e alimentazione del flussimetro, infine il connettore di interfaccia tra la Control Board e la DC Side Board. Gli obiettivi di questa macroarea si possono riassumere in:

- Monitorare il flusso di fluido refrigerante e attivare le ventole in base alle condizioni di temperatura, garantendo un controllo termico efficace;
- Fornire i comandi alla Control Board per attivare le procedure di precarica, scarica, comando relè, contattore principale e ventola motore, tramite algoritmo di controllo dedicato.

I segnali che vengono gestiti in questa macroarea fittizia sono invece:

- **FLOW**, segnale di Input. Questo segnale di feedback arriva direttamente dal flussimetro, lo strumento usato per la misurazione e regolazione del flusso di fluido refrigerante del convertitore. Il segnale viene direttamente mandato al Pin dedicato del microcontrollore per il suo utilizzo all'interno dell'algoritmo di controllo;
- **RELE_1, RELE_2, FAN_ON, PRE_ON, DSG_ON, PWR_ON**, segnali di Output: Questi segnali saranno spiegati nel dettaglio nel capitolo successivo [2.2.2](#), incentrato sulla descrizione delle macroaree funzionali della DC Side Board. In sintesi, questi segnali provenienti dal microcontrollore comandano le varie funzioni della scheda di servizio.

La disposizione dei connettori del feedback del flussimetro e del comando ventola non soggette a esigenze stringenti, tuttavia per comodità di connessione sono posizionate nella parte inferiore della scheda. D'altra parte, rispetto alla configurazione iniziale, la posizione del connettore della scheda di servizio è stata variata; questa scelta è motivata dall'inserimento del connettore per la sincronizzazione PWM con la scheda di controllo della DM.

La macroarea della gestione dell'encoder sulla Control Board è responsabile dell'acquisizione e dell'elaborazione dei segnali provenienti dall'encoder del motore. L'encoder è un dispositivo essenziale per monitorare la posizione, la velocità e verso di rotazione del motore, fornendo alla scheda informazioni fondamentali per implementare un controllo preciso e ottimizzato del sistema. Gli obiettivi della macroarea della gestione dell'encoder possono essere riassunti in:

- Monitorare in tempo reale la posizione e la velocità del motore attraverso i segnali provenienti dall'encoder, consentendo un controllo accurato della velocità e della coppia;
- Rilevare eventuali anomalie di rotazione, e operare prontamente per arrestare il sistema in caso di condizioni critiche;
- Ottimizzare l'efficienza e la precisione del sistema. Non trattandosi di un'applicazione sensorless, il controllo motore risulta più robusto e sicuro per questo banco prova.

Nello specifico, questa sezione operativa deve essere in grado di acquisire in forma differenziale i 3 segnali tipici dell'encoder incrementale (A e B treni di impulsi sfasati di un quarto di periodo e Z per il reset della posizione angolare). Una volta elaborati, i segnali vengono isolati e adattati in tensione per essere inviati al microcontrollore. Inoltre, è presente uno stadio successivo di isolamento ed elaborazione dei segnali, per essere inviati nuovamente in forma differenziale all'esterno della scheda, ad esempio per acquisizioni e simulazioni in tempo reale in ambienti software dedicati. D'altra parte, la gestione dell'encoder comporta l'uso di una serie di segnali, di input e output, di seguito riportati:

- **X_ENC, X_N_ENC, con X = A, B, Z**, segnali di Input. Il condizionamento di questi segnali consente di ottenere per ciascuna coppia un unico segnale che viene inviato agli integrati responsabili dell'isolamento e adattamento in tensione degli stessi, al fine di essere inviati al microcontrollore con una scala di tensione da 0V a 3.3V;

- **X_MCU, con X = A, B, Z**, segnali di Output. Questi segnali, vengono direttamente inviati al microcontrollore. A_MCU è uno dei due segnali di fase dell'encoder che, in combinazione con il segnale B_MCU, consente di determinare posizione, velocità e direzione di rotazione del motore. Z_MCU è il segnale di riferimento o di zero dell'encoder, utilizzato per indicare una posizione di riferimento specifica (ad esempio, il punto di zero o una posizione iniziale), come descritto nella sezione 5.2.2 dedicata;
- **X_ENC_EXT, X_N_ENC_EXT, con X = A, B, Z**, segnali di Output. Dopo che i segnali inviati al microcontrollore sono stati nuovamente isolati e adattati in tensione fino a 5V, questi sono ancora una volta portati in forma differenziale e mandati al connettore dedicato. Come sempre, la trasmissione in forma differenziale permette di ottenere forte immunità ai disturbi esterni preservando l'integrità originale del segnale.

Per quanto riguarda la disposizione dei componenti della macroarea sulla scheda, i connettori di input e output dei segnali differenziali sono posti sul bordo superiore della scheda, vicino ai circuiti di condizionamento dei quest'ultimi. Lo stadio di conversione alimentazione da 5V a e 5V_ISO2 è stato modificato e posto nelle strette vicinanze degli integrati responsabili dell'isolamento e adattamento in tensione dei segnali dell'encoder, al fine di preservare quanto più fedelmente l'integrità dei segnali. Nel capitolo dedicato 2.3.2 al processo di sbroglio, è descritto nel dettaglio quale criticità è stata incontrata per il posizionamento della scheda di questi stadi di conversione, riguardo la loro corretta alimentazione.

La sezione operativa della comunicazione CAN della Control Board è fondamentale per lo scambio di dati tra la stessa e sistemi di controllo esterni, ad esempio un computer che sovrintenda al banco prova o sistemi software per simulazioni in tempo reale. In sintesi, il CAN (Controller Area Network) è un protocollo di comunicazione robusto e affidabile; esso utilizza due fili, chiamati CAN_H e CAN_L, per trasmettere i dati, in quanto la trasmissione differenziale aiuta a ridurre i disturbi esterni preservando l'integrità del segnale. Ogni dispositivo connesso, o nodo, può leggere tutti i messaggi trasmessi sul bus. Tuttavia, ognuno di questi accetta solo messaggi con determinati ID: se l'ID di un messaggio corrisponde a quello che il nodo è programmato per leggere, allora processa i dati, altrimenti, lo ignora. Pertanto ogni messaggio ha un ID, che definisce sia il contenuto del messaggio che la sua priorità. Se più dispositivi tentano di inviare dati contemporaneamente, il messaggio con ID più basso ha la precedenza, permettendo una risoluzione automatica dell'invio simultaneo sullo stesso bus di comunicazione. Gli obiettivi della macroarea della comunicazione CAN sono:

- Scambiare dati e comandi tra la Control Board e altri moduli del sistema in modo rapido e affidabile, garantendo un funzionamento sincronizzato e coordinato;

- Raccogliere dati dai sensori o trasduttori presenti nel banco prova, fornendo all'esterno aggiornamenti in tempo reale sulle condizioni operative;
- Ottimizzare l'efficienza del sistema attraverso uno scambio rapido e continuo di dati senza ritardi di comunicazione.

La sezione operativa nello specifico presenta due canali di comunicazione CAN, il canale A e B. Pertanto sulla scheda sono presenti due connettori dedicati per ciascun canale, i quali funzionano sia per la ricezione che per l'invio dei dati in forma differenziale. Non solo, ma per il corretto funzionamento della comunicazione CAN sono presenti anche due Transceiver, uno per canale, i quali permettono in ricezione di selezionare il messaggio differenziale in base all'ID e conseguentemente di isolarlo e processarlo per essere inviato al microcontrollore, in trasmissione invece isola e rende differenziale il segnale proveniente dal microcontrollore. Per quanto riguarda i segnali presenti nella macroarea della comunicazione CAN si ha:

- **CANK_H, CANK_L, con K = A, B**, segnali di Input/Output: Il segnale CANK_H rappresenta la linea "alta" del bus di comunicazione CAN. Questo segnale, insieme a CANK_L, forma il canale di comunicazione differenziale attraverso cui vengono scambiati i dati tra i vari dispositivi. Le due linee trasportano i dati con tensioni opposte, il che permette al sistema di rilevare e correggere automaticamente eventuali disturbi che potrebbero interferire con la comunicazione;
- **CANK_TX, CANK_RX, con K = A, B**, segnali di Input/Output. Il segnale CANK_TX è responsabile della trasmissione dei dati dalla Control Board verso il bus CAN. Quando il microcontrollore invia dati al bus CAN, il Transceiver isola il segnale e lo rende differenziale, pronto per essere inviato. Il segnale CANK_RX gestisce invece la ricezione dei dati dal bus CAN. Attraverso questo segnale, la Control Board riceve informazioni dall'ambiente esterno. I dati ricevuti tramite CANK_RX possono includere comandi di controllo, informazioni sullo stato del sistema o dati di diagnostica. In ricezione, il Transceiver isola e elabora il messaggio differenziale, inviandolo al microcontrollore sotto forma di segnale unico.

Il posizionamento dei componenti della macroarea è vincolato dalla necessità del Transceiver di avere un'alimentazione 5V isolata, la medesima dell'integrato della sezione operativa dell'encoder. Pertanto sulla scheda è possibile trovare queste sezioni operative vicine tra di loro; ne consegue che le connessioni di segnale tra i Transceiver e il microcontrollore risultano più lunghe a causa della loro distanza.

La macroarea della gestione dell'emergenza sulla Control Board è progettata per gestire le condizioni critiche del sistema e garantire la sicurezza operativa in caso di anomalie o guasti. Gli obiettivi della macroarea della gestione dell'emergenza sono:

- Monitorare costantemente i segnali di errore e di alimentazione per rilevare condizioni critiche;
- Attivare le procedure di emergenza come la disattivazione del funzionamento del convertitore o l'interruzione dell'alimentazione, proteggendo così il sistema e prevenendo ulteriori danni. Il coordinamento delle procedure di disattivazione dell'intero sistema viene gestito dall'algoritmo di controllo, descritto nella sezione [5.3](#);
- Interfacciarsi con dispositivi esterni di sicurezza, come interruttori di emergenza fisici (pulsante di stop), per permettere un intervento immediato da parte dell'operatore in caso di pericolo;
- Gestire il ripristino del sistema dopo un'emergenza, garantendo che il sistema torni a uno stato sicuro e funzionale solo quando tutte le condizioni critiche sono state risolte;
- Fornire feedback allo stato del sistema attraverso segnali di emergenza che comunicano con altri moduli della Control Board o sistemi esterni, per avvisare della presenza di una condizione di emergenza.

Questa sezione operativa è in grado di gestire principalmente due condizioni di emergenza: pressione del pulsante di emergenza per intervento dell'operatore esterno o intervento hardware del microcontrollore che rileva delle condizioni critiche. In entrambi i casi, i segnali PG_3V3A e EMG_IN_N, di seguito descritti, vengono forzati a 0V. Inoltre, in questa sezione è prevista la presenza di un connettore ausiliario, il quale viene connesso o sconnesso in base al comportamento di un relay che risponde ai comandi di emergenza di questa sezione operativa. I segnali presenti nella macroarea sono dunque:

- **EMG_IN_N**, segnale di Output. Questo segnale in condizioni normali di esercizio segnala al microcontrollore che il sistema funziona senza errori o guasti. Per azione di un operatore esterno o per azione del microcontrollore tramite il segnale EMG_MCU, in presenza di condizioni critiche il segnale viene portato ad uno stato logico basso che segnala proprio al microcontrollore la presenza di tali condizioni;
- **EMG_MCU**, segnale di Input. Come già anticipato, il segnale gestisce la condizione di emergenza proveniente dall'intervento del microcontrollore. In condizioni normali è ad uno stato logico basso;
- **PG_3V3A**, segnale di Input/Output. Il segnale è già stato descritto nella sezione delle alimentazioni. In condizioni di emergenza tuttavia, questo viene forzato a 0V.

Il posizionamento dei componenti non è vincolato esternamente a richieste o condizioni specifiche. Il connettore ausiliario azionato dal relay può essere utilizzato come interruttore ausiliario all'interno del banco prova.

La macroarea della gestione della sincronizzazione PWM, di clock e di emergenza nella Control Board si occupa di coordinare le operazioni tra la scheda in esame e la scheda di controllo della Machine Under Test. Gli obiettivi della macroarea pertanto sono principalmente:

- Assicurare la sincronizzazione dei segnali PWM tra le due schede di controllo, in modo da mantenere il controllo preciso delle operazioni con frequenze e fasi sincronizzate;
- Gestire la sincronizzazione del clock dei microcontrollori per garantire che le operazioni temporizzate su entrambe le schede siano coordinate con precisione, evitando ad esempio sfasamenti;
- Monitorare e gestire le condizioni di emergenza, attivando meccanismi di sicurezza e spegnimento coordinato in caso di anomalie rilevate su una delle due schede.

I segnali principali che vengono inviati dal microcontrollore della Control Board alla scheda di controllo della Machine Under Test sono:

- **PWM_SYNC**, segnale di Input/Output. Questo segnale di sincronizzazione della modulazione PWM tra le due schede, garantisce che i segnali PWM generati abbiano la stessa frequenza;
- **CLK**, segnale di Input/Output. Esso è utilizzato per sincronizzare i clock dei microcontrollori delle due schede. Grazie a questo segnale, entrambe le schede operano con la stessa temporizzazione, evitando sfasamenti nelle operazioni di controllo e nei cicli di campionamento dei sensori;
- **UART_SYNC, TX_UART, RX_UART**, segnali di Input/Output. Questi segnali gestiscono la sincronizzazione tra i due microcontrollori per lo scambio dati tramite protocollo di comunicazione UART;
- **FAULT**, segnale di Input/Output. Questo è il segnale che avvisa la scheda di controllo di una condizione di errore rilevata sull'altra scheda o viceversa. Questo segnale consente alle schede di coordinare il comportamento del sistema nelle condizioni di emergenza.

Questa sezione operativa non era inizialmente prevista sulla scheda. Il suo inserimento ha portato ad alcune modifiche di posizione di alcune sezioni operative, in particolare il connettore di comunicazione e comando della scheda di servizio, riposizionato nella parte centrale della scheda. La criticità principale affrontata, descritta in seguito nel capitolo 2.3.2, è stata l'alimentazione a 5V della sezione per la conversione dell'alimentazione da 5V a 3.3V dedicata.

La macroarea del controllo driver inverter della Control Board è responsabile della gestione e del controllo delle schede Gate Driver, e di conseguenza dei moduli di potenza, dell'inverter. Gli obiettivi della macroarea si possono riassumere in:

- Trasmettere i segnali PWM ai 3 driver del convertitore, in modo differenziale, per gli switch di potenza sulla stessa gamba di inverter;
- Monitorare il comportamento dell'inverter e dei moduli di potenza, rilevando eventuali guasti e le temperature degli stessi;
- Gestire l'alimentazione dei gate driver tramite segnale dedicato proveniente dalla Control Board;
- Gestire i segnali di attivazione della modulazione PWM dei gate driver e in caso di condizioni critiche o guasto rilevati dal microcontrollore, comandarne il reset.

Pertanto, questa sezione operativa deve gestire numerosi segnali e secondo una semplice logica combinatoria controllare le modulazioni PWM e i reset dei gate driver secondo i segnali inviati dal microcontrollore. Dunque, i segnali presenti nella macroarea del controllo driver inverter, analizzati in Input e Output da un punto di vista di ricezione o trasmissione verso le altre macroaree (e non dai o verso i gate driver) sono:

- **XHS_PWM e XLS_PWM, con X = A, B, C**, segnali di Input. Questi segnali rappresentano le funzioni di commutazione PWM generate dal microcontrollore per comandare la commutazione dei MOSFETs alti e bassi della stessa gamba di inverter. Una volta ricevuti dal microcontrollore, questi vengono posti in modo differenziale e inviati al connettore di ciascuna fase, per un totale di 4 segnali PWM per fase;
- **X_FAULT, con X = A, B, C**, segnali di Output. Questi segnalano la presenza di un guasto nei moduli dell'inverter. Al connettore arrivano in modo differenziale e, dopo un opportuno filtraggio e condizionamento, sono inviati al microcontrollore;
- **X_RTD, con X = A, B, C**, segnali di Output. Questi segnali monitorano la temperatura dei moduli di ciascuna fase e utilizzati per assicurarsi che l'inverter non

si surriscaldi durante il funzionamento. Così come gli X_FAULT, al connettore arrivano in modo differenziale e dopo essere filtrati e condizionati, sono inviati al microcontrollore;

- **X_PSDIS, con X = A, B, C**, segnali di Input. Questi segnali gestiscono l'alimentazione di ogni gate driver e arrivano direttamente dal microcontrollore.
- **PWM_EN_N, RESET_N e PG_3V3A**, segnali di Input. Questi segnali sono gestiti secondo una logica combinatoria per abilitare o meno la modulazione PWM dei MOSFETs o, in caso di guasto rilevato dal microcontrollore, il reset degli stessi. La logica viene gestita come mostrato in Tabella 2.2, facendo presente che i segnali PWM_EN_OUT e RESET_OUT sono invece quelli inviati ai connettori gate driver e che ne comandano il funzionamento. Questi segnali gestiscono l'alimentazione di ogni gate driver.

Stato	Segnali	Valori
Modulazione PWM Attiva	PWM_EN_N	0V
	PWM_EN_OUT	5V
	PG_3V3A	3.3V
Modulazione PWM non attiva	PWM_EN_N	3.3V
	PWM_EN_OUT	0V
	PG_3V3A	3.3V
	Oppure: PG_3V3A	0V
Condizioni Normali	RESET_N	3.3V
	RESET_OUT	0V
	PG_3V3A	3.3V
Driver Reset Dopo Fault	RESET_N	0V
	RESET_OUT	5V
	PG_3V3A	3.3V

Tabella 2.2: Tabella della Logica Enable Drivers.

Il posizionamento della macroarea è strettamente vincolato dalle connessioni per i gate driver dei moduli di potenza, posti nella parte inferiore della scheda.

Infine, la sezione operativa del microcontrollore. La macroarea rappresenta il nucleo logico e di controllo dell'intero sistema, responsabile della gestione, elaborazione e coordinamento di tutti i segnali di controllo e feedback. Gli obiettivi della macroarea in sintesi sono:

- Elaborare e gestire i segnali di controllo e feedback come corrente, tensione, temperatura, coppia, posizione e velocità;
- Acquisire dati moduli di potenza per garantire il corretto funzionamento del sistema, adattandolo in tempo reale alle condizioni operative;
- Gestire la comunicazione con altre schede o sistemi software per coordinare le operazioni sincronizzandone le attività, per simulazioni e scambio dati in tempo reale;
- Garantire la protezione del sistema, monitorando i segnali di emergenza e di guasto e intervenendo in caso di anomalie.
- Gestire un algoritmo di controllo ad elevate prestazioni dinamiche per assicurare ogni condizione di funzionamento.

I segnali gestiti dal microcontrollore sono sostanzialmente quelli descritti finora. D'altra parte, il pinout è stato già preparato nei lavori di tesi precedenti [1], seppur con qualche modifica apportata dai nuovi componenti introdotti. La macroarea, oltre alla presenza del microcontrollore, è caratterizzata da un oscillatore [4] per la definizione di una frequenza di clock esterna, un pulsante di reset, connettori e integrati per la gestione dei protocolli di comunicazione. Tutti i componenti si trovano nella parte centrale della scheda per facilitare le connessioni dei vari segnali in arrivo o in partenza dal microcontrollore.

2.2.2 Sezioni Operative della Scheda di Servizio

Di seguito si analizzano nel dettaglio tutte le sezioni operative della scheda di servizio. Lo scopo dunque è far luce sulle varie funzioni che la scheda deve essere in grado di attuare, essendo comandata dalla scheda di controllo.

La macroarea della precarica all'interno della DC Side Board è una delle sezioni più importanti per garantire la sicurezza e la corretta gestione dell'alimentazione del convertitore. La sua funzione principale è quella di controllare il processo di carica iniziale dei condensatori del DC Link quando il convertitore viene alimentato, evitando che si verifichino picchi di corrente pericolosi all'accensione. Quest'ultimi sono generati dalla variazione istantanea di tensione ai capi del DC Link scarico che si avrebbe dal collegamento di questo direttamente ad un generatore di tensione. Gli obiettivi della macroarea della precarica possono essere suddivisi in alcuni punti chiave:

- Caricare i condensatori del DC Link fino a un livello di tensione sicuro prima di attivare il contattore principale, ovvero il Kilovac, che connette l'alimentazione principale al sistema;
- Proteggere il sistema di potenza e garantire che la tensione sia applicata gradualmente, monitorandola continuamente durante il processo di precarica.

La precarica fisicamente viene realizzata comandando due IGBT in antiserie e tramite una resistenza PTC. Al fine della corretta integrazione della scheda nel banco prova è necessario riportare alcune caratteristiche principali della sezione di precarica, come il valore della resistenza e della costante di tempo (Tabella 2.3):

Nome	Valore	[u.m.]
Resistenza PTC	560	Ω
Costante di tempo	168	<i>ms</i>

Tabella 2.3: Caratteristiche Principali della Precarica.

La macroarea della precarica coinvolge vari segnali, sia di input che di output, che coordinano il processo e assicurano che funzioni in modo sicuro ed efficace.

- **PRE_ON**, segnale di Input. Questo segnale arriva dalla Control Board e attiva il processo di precarica. Questo comando è il trigger per avviare l'intera operazione e garantisce che il sistema sia pronto prima di attivare il contattore principale;
- **DC_in**, segnale di Input. L'alimentazione esterna del DC Link è connessa alla scheda di servizio tramite un connettore specifico. In particolare, il segnale DC_in

è definito dal polo positivo dell'alimentazione esterna. Quando il segnale di precarica viene attivato, il terzo e ultimo segnale di potenza di questa sezione, P_BUS, viene connesso al segnale DC_in tramite il circuito di precarica, alimentando il DC Link, ed essendo il contattore principale aperto durante questa fase;

→ **P_BUS**, segnale di Output. Come anticipato precedentemente, questo segnale di potenza definisce il polo positivo dell'alimentazione esterna durante la fase di precarica. Una volta terminata, il DC Link sarà alimentato direttamente tramite il Kilovac, ossia il contattore principale.

La sezione operativa della scarica d'altra parte, gestisce il processo di dissipazione sicura dell'energia residua immagazzinata nei condensatori del DC Link al momento dello spegnimento del sistema o in caso di guasto. Così come riportato per la precarica, gli obiettivi fondamentali di questa macroarea sono:

- Garantire che l'energia accumulata nel DC Link venga scaricata in modo controllato quando il processo di scarica viene comandato dalla Control Board o a seguito di un guasto;
- Ridurre i rischi per l'operatore che interviene sul sistema dopo lo spegnimento o il guasto, eliminando la possibilità di shock elettrici.

Le funzionalità di questa sezione sono assicurate dalla presenza di un D-MOSFETs e di una robusta resistenza rivestita in cemento. L'integrazione della scheda nel banco prova considera ancora le caratteristiche della scarica riportate in Tabella 2.4:

Nome	Valore	[u.m.]
Resistenza	56	Ω
Tempo di scarica	1	secondi

Tabella 2.4: Caratteristiche Principali della Scarica.

Come per la precarica, anche la scarica coinvolge una serie di segnali che coordinano il processo e assicurano che funzioni in maniera sicura ed efficiente. Questi segnali possono essere di input o di output a seconda della loro funzione e delle interazioni tra la DC Side Board e la Control Board.

→ **DSG_ON**, segnale di Input. Questo segnale viene inviato dalla Control Board alla scheda di servizio per attivare il processo di scarica quando il sistema viene spento. Esso rappresenta l'inizio del processo di scarica e deve essere attivato in modo sincrono con lo spegnimento del sistema. La gestione della sequenzialità di apertura del contatto principale e di chiusura del d-mosfet risulta dunque critica ed è opportunamente gestita dall'algoritmo di controllo;

→ **P_BUS**, segnale di Input. In questa sezione operativa questo segnale di potenza è gestito come un segnale di input, il quale, connesso al polo positivo del DC Link, una volta chiuso il d-mosfet porta alla scarica dell'energia accumulata all'interno dei condensatori tramite la resistenza di scarica.

La sezione operativa dei relè e del comando ventola gestisce l'attivazione e la disattivazione di componenti ausiliari, in particolare la ventola del motore e la pompa dell'acqua del circuito di raffreddamento, e una ventola ausiliaria che può essere usata nel banco prova. Gli obiettivi principali di questa sezione sono:

- Controllare una ventola di raffreddamento per mantenere il sistema entro le temperature operative sicure;
- Gestire l'attivazione di relè di protezione, consentendo di isolare parti del circuito o di interrompere il funzionamento di determinati componenti in caso di condizioni anomale o di spegnimento del sistema;
- Garantire la sicurezza del sistema, disattivando o attivando in modo controllato i dispositivi secondo la logica di controllo definita dalla Control Board.

I segnali che fanno parte di questa macroarea sono:

→ **FAN_ON**, segnale di Input. Questo segnale proviene dalla Control Board e attiva il circuito che comanda la ventola di raffreddamento ausiliaria. Quando la temperatura dei componenti o del sistema raggiunge una soglia critica, la Control Board invia il comando, attivando il funzionamento della stessa;

→ **RELE_1 e RELE_2**, segnali di Input. Questi segnali di input provenienti dalla Control Board comandano i due relè distinti che vengono attivati quando è necessario isolare o attivare particolari sezioni del circuito in base alle condizioni operative o di sicurezza. I relè sono normalmente aperti, pertanto il comando porta alla loro chiusura fintantoché attivo.

La macroarea del Kilovac sulla DC Side Board è stata precedentemente progettata per gestire il contattore Kilovac, che funge da contattore principale tra la fonte di alimentazione e il sistema di potenza. La sua corretta apertura o chiusura, comandata tramite l'algoritmo di controllo, deve essere opportunamente coordinata con quelle delle fasi di precarica o scarica. In definitiva, gli obiettivi della sezione del Kilovac sono:

- Connettere o disconnettere la sorgente di potenza principale al sistema in modo sicuro e controllato;
- Gestire la transizione tra le fasi di precarica e funzionamento operativo, attivando il Kilovac solo quando i condensatori del DC Link sono correttamente caricati;
- Isolare il sistema in condizioni di emergenza o durante la fase di scarica, prevenendo danni ai componenti o rischi per l'operatore.

Come verrà spiegato nel capitolo 5.1.2, un'importante modifica è stata introdotta durante la validazione della scheda, quale la saldatura del jumper che consente di alimentare la bobina del Kilovac non più da un'alimentazione esterna, ma direttamente dai 12V della scheda di servizio. I segnali che vengono gestiti in questa macroarea sono:

- **PWR_ON**, segnale di Input. Questo segnale viene inviato dalla Control Board per attivare il Kilovac, collegando la fonte di alimentazione principale al sistema. Come spiegato successivamente nella sezione 5.3, il segnale viene generato solo dopo che il processo di precarica è stato completato con successo, ovvero quando i condensatori del DC Link sono caricati. L'attivazione del Kilovac avviene dunque in maniera sicura, evitando sovracorrenti improvvise;
- **KVAC_+ e KVAC_ON_-**, segnali di Output. Questi alimentano la bobina del contattore a 12V in maniera continua, provocandone la chiusura fintantoché la stessa rimane alimentata;
- **PWR_ON_+ e PWR_ON_-**, segnali di Input. In precedenza alla saldatura del jumper, questi segnali consentivano l'alimentazione esterna dedicata della bobina del Kilovac tramite il connettore ad essi legato. A seguito della chiusura del jumper, come anticipato, questi due segnali portano l'alimentazione 12V direttamente dalla scheda ai segnali KVAC_+ e KVAC_ON-.

Infine, la sezione dell'alimentazione della scheda. L'obiettivo principale di questa sezione:

- Fornire alimentazione stabile e regolata a tutte le aree della DC Side Board, assicurando che i componenti ricevano la tensione e la corrente richieste per funzionare in modo corretto.

Montati sulla scheda, sono due i connettori presenti per la sua corretta alimentazione. Il connettore di bassa potenza a 12-24V e quello di alta potenza a 600-650V. L'alimentazione a 5V proviene invece dalla Control Board tramite il connettore di interazione tra le due schede, posto al centro di quella di servizio. Il segnale principale della macroarea dell'alimentazione è:

- **DC_IN**, segnale di Input. Il segnale DC-IN rappresenta l'alimentazione principale proveniente dalla fonte di potenza esterna. Questo segnale gioca un ruolo chiave durante la fase di precarica, come già discusso precedentemente.

2.3 Processo di Routing della Scheda di Controllo

Di seguito è possibile trovare la descrizione specifica di tutte le tecniche, strumenti e vincoli che sono stati adoperati per il processo di sbroglio della scheda di controllo. Come già anticipato, lo stato iniziale della Control Board prevedeva la sola disposizione dei componenti principali sulla scheda, tuttavia già organizzati in sezione operative distinte. Non solo, ma il progetto di tesi antecedente considerava già una struttura del PCB a 4 layer. L'obiettivo di questa sezione introduttiva è dunque quello di dare un contesto generale al processo di sbroglio, definendo da una parte le caratteristiche principali del software utilizzato, dall'altra le fasi che lo hanno caratterizzato.

Il processo di routing di un circuito stampato è sostanzialmente il processo attraverso il quale si stabiliscono i percorsi fisici che i segnali elettrici seguiranno tra i componenti su un circuito stampato; questi percorsi prendono il nome di piste, e sono delle connessioni realizzate in rame. La corretta realizzazione di un processo di sbroglio è molto importante per la corretta integrazione della scheda in un sistema più complesso come quello di un banco prova, in quanto ne determina l'affidabilità, le performance e la compatibilità elettromagnetica del circuito. Tale processo di creazione non prevede soltanto la presenza di piste, ma anche di vie (fori di connessione tra layer), piani di massa e di alimentazione, piazzole (piccole aree metalliche comprensive di connessioni simultanee di più componenti) rispettando al contempo le specifiche del progetto e le regole di design del PCB. Riassumendo, gli obiettivi principali del processo di sbroglio sono:

- **Ottimizzazione delle connessioni elettriche.** L'obiettivo principale è assicurarsi che i segnali raggiungano i componenti corretti con la minima resistenza, induttanza e interferenza, e nel minor spazio possibile, minimizzando così perdite e interferenze;
- **Ottimizzazione dello spazio.** Lo spazio a disposizione nella scheda per il posizionamento di tutti i componenti può essere limitato; pertanto, occorre sia utilizzare lo spazio della scheda in modo ottimale durante la fase di posizionamento delle sezioni operative, sia pianificare il loro posizionamento in base ai segnali che queste devono scambiarsi;
- **Gestione termica.** È necessario garantire che i componenti con un consumo energetico più elevato, come alcuni stadi di conversione o alcuni integrati, non si surriscaldino durante il loro funzionamento compromettendo l'integrità generale del sistema;
- **Gestire interferenze elettromagnetiche** per evitare che segnali ad alta frequenza disturbino i componenti circostanti;

- Assicurare che nei **piani di alimentazione e di massa**, i differenti potenziali e riferimenti siano isolati elettricamente tra di loro;
- **Posizionamento controllato di vie, piazzole, dimensioni diverse delle piste e testpoint** per assicurare la correttezza del processo di sbroglio, evitando interferenze o connessioni involontarie.

Una volta definite le caratteristiche generali del processo di sbroglio, di seguito sono riportate le fasi principali che ne hanno definito lo svolgimento. Queste fasi saranno riprese e approfondite più nel dettaglio nella sezione 2.3.1, spiegando effettivamente cosa è stato fatto per ciascuna fase, insieme alle tecniche utilizzate. Le fasi del processo di Routing della Control Board sono dunque:

1. Individuazione di tutte le macroaree nella scheda;
2. Posizionamento corretto dei componenti di ciascuna macroarea;
3. Individuazione della posizione del microcontrollore;
4. Organizzazione dei 4 layer presenti, stabilendo i ruoli di ognuno;
5. Macroarea delle Alimentazione come prima sezione operativa da sbrogliare, in quanto consente di individuare nella scheda quali alimentazioni servono a quali componenti;
6. Cominciare il processo di sbroglio delle altre sezioni operative partendo dai componenti più esterni della scheda;
7. Sbroglio dei componenti più interni e avvicinamento progressivo delle piste dei segnali da connettere al microcontrollore verso quest'ultimo;
8. Sbroglio del microcontrollore;
9. Contemporaneamente ai processi 5-8, adattamento progressivo delle diverse aree di massa e potenziali rispettivamente sui layer di ground e di alimentazione, in base alle richieste dei componenti;
10. Intensificazione di vie, piazzole, piste di dimensioni differenti e testpoint nelle aree che ne richiedono una intensificazione;
11. Aggiunta di Rules nel menù dedicato per rispettare i vincoli di distanza delle piste o di connessione delle piazzole ai componenti;
12. Connessioni finali delle aree a stesso potenziale o ground di riferimento per i layer dedicati;

13. Sistemazione scritte e nomenclature dei componenti, dei connettori e delle alimentazioni;
14. Verifica correttezza del posizionamento dei fori di centraggio scheda;
15. Validazione delle connessioni e correzione degli errori rilevati.

Il software utilizzato per il processo di sbroglio è stato Altium Designer. Altium è un software molto avanzato e complesso per la progettazione di circuiti stampati. Comprende infatti tutti gli strumenti necessari per la progettazione di una scheda elettronica, dagli schematici circuitali al layout del PCB. La sezione di editing del PCB consente di posizionare i componenti e creare le piste. Offre strumenti per il routing, la gestione dei piani di massa, l'inserimento di vie e altri elementi necessari per lo sbroglio anticipati precedentemente. Non solo, ma consente di visualizzare il layout del PCB in 3D, così da ottenere una visione realistica della scheda finita, permettendo di verificare collisioni fisiche tra componenti 3D o scritte. Attraverso il Design Rule Check, Altium Designer include un sistema di verifica delle regole di design, che analizza il layout e segnala eventuali violazioni di regole di routing, spaziatura, larghezza delle piste e altre specifiche, come verrà analizzato successivamente.

Prima di passare alla sezione dedicata alla descrizione specifica delle fasi dello sbroglio, si riportano di seguito i menù principali del software utilizzati per questo processo di Routing. Il primo e il più semplice, il menù con i comandi di base in Figura 2.6:



Figura 2.6: Menù delle Funzioni Base di Altium.

Questo permette di usufruire delle funzioni più semplici e base dell'intero processo di sbroglio, come il Routing Manuale, per tracciare le piste in modo preciso, specialmente per segnali critici, il posizionamento delle vie, per connettere piste su strati diversi del PCB o per connettere i pad dei componenti agli strati di ground o alimentazione desiderati, il posizionamento dei poligoni o piazzole, per facilitare la connessione di più componenti contemporaneamente sotto la stessa net o per gestire termicamente delle zone a più elevato consumo energetico. Sono poi presenti dei comandi generici di posizionamento e scelta dei componenti o di tracciamento piste non lineari.

Il menù delle Rules consente di impostare tutte le regole di larghezza minima delle piste, spaziatura tra le piste, impostazioni delle vie, modalità connessione dei poligoni, e altre specifiche che aiutano a rispettare i requisiti del progetto. Queste regole vengono verificate automaticamente durante lo sbroglio e ogni violazione viene segnalata, permettendo al progettista di correggere immediatamente gli errori. Ogni regola è altamente personalizzabile e può essere applicata solo a specifiche parti del PCB o componenti; non solo, ma è anche possibile impostare la priorità delle regole per risolvere conflitti, stabilendo quali regole hanno la precedenza su altre. In Figura 2.7 come appare il menù all'utente:

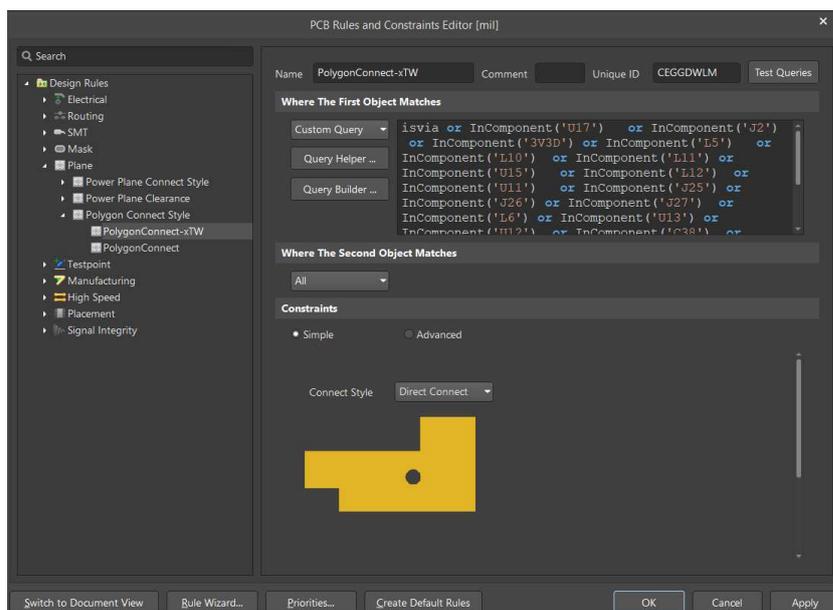


Figura 2.7: Menù delle Regole Utente.

Infine, il menù della gestione dei Poligoni, chiamato Polygon Manager, consente nello specifico di gestire e configurare i poligoni presenti sul PCB in modo centralizzato. Attraverso questo menù, si possono visualizzare, modificare e ottimizzare i vari poligoni che sono già stati creati, senza dover selezionare ciascun poligono manualmente sulla scheda. Il Polygon Manager mostra tutti i poligoni presenti nel progetto, inclusi quelli su vari strati, e consente di modificarne le proprietà, come lo stile di connessione ai pad dei componenti (thermal relief o direct connection), la modalità di riempimento e le priorità di Repour, o ripristino del poligono. In Figura 2.8 come si presenta il menù solo per il primo layer del PCB.

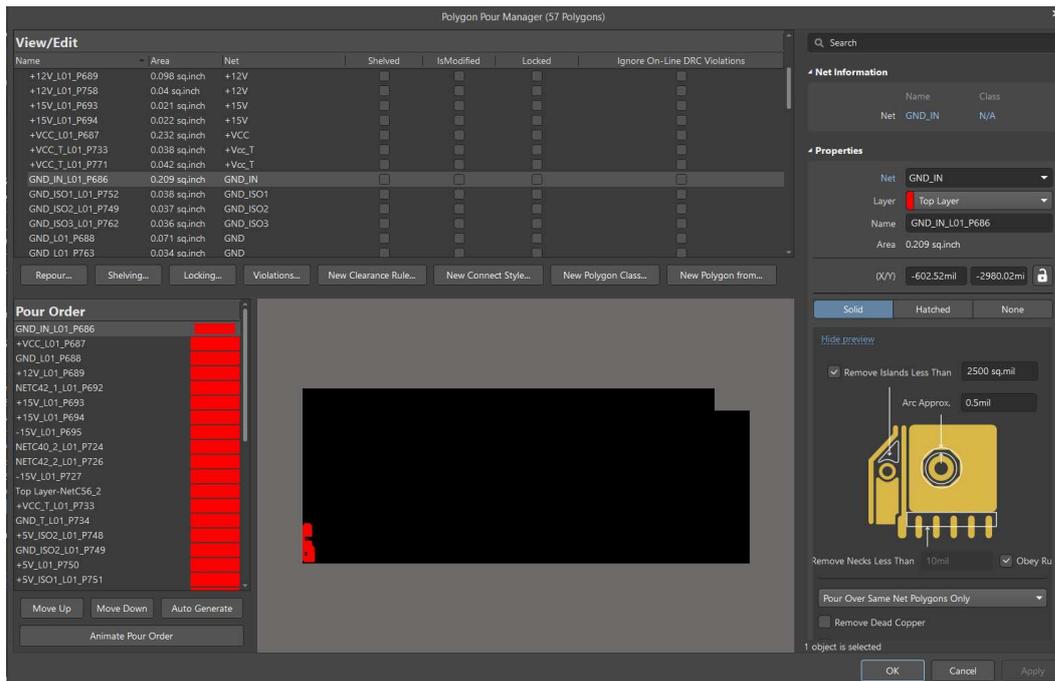


Figura 2.8: Menù della Gestione Centralizzata dei Poligoni.

2.3.1 Fasi e Tecniche del processo di Routing

Come già anticipato nella sezione precedente, il processo di sbroglio della Control Board è stato affrontato in maniera ordinata portando a termine tutte le fasi elencate. L'obiettivo di questa sezione è la descrizione completa di tutte le tecniche utilizzate durante l'intero processo di Routing, fase dopo fase. L'ordinamento proposto precedentemente serve da una parte a dare un ordine allo sbroglio della scheda, ma dall'altra a giustificare e comprendere le scelte che sono state prese durante il processo, da quelle più semplici, come la disposizione di alcuni componenti, a quelle più complesse, come il rispetto di determinati vincoli. In Figura 2.9 si riporta quindi lo stato finale delle scheda dopo l'intero processo di sbroglio, utile per visualizzare direttamente tutte le sue sezioni e riferirvi i passaggi più significativi delle fasi del processo.

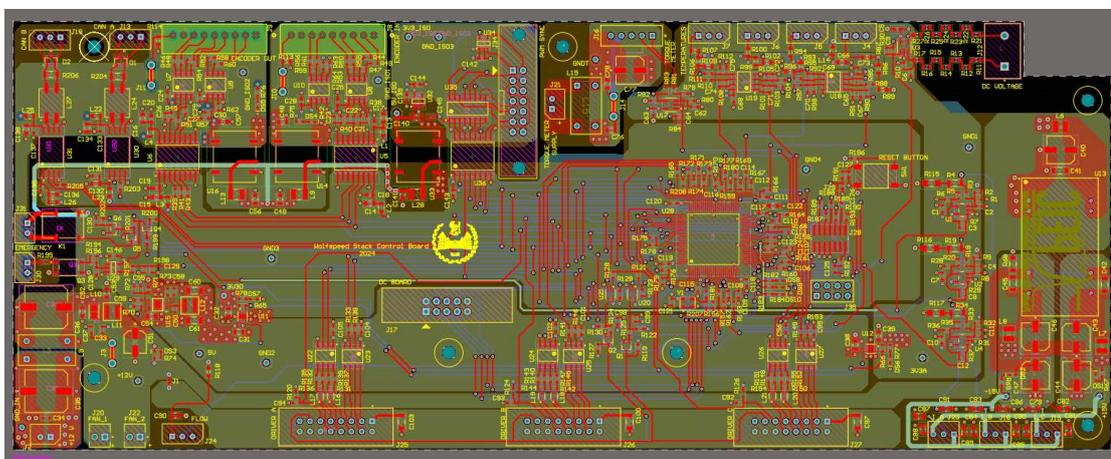


Figura 2.9: Sbroglio Completo del PCB di Controllo.

Le prime tre fasi elencate nella sezione 2.3 riguardano la disposizione delle macroaree, dei loro componenti e in particolar modo quella del microcontrollore. Al termine di ogni descrizione delle macroaree funzionali del capitolo 2.2.1 sono state fornite informazioni circa le motivazioni o vincoli che definiscono il posizionamento delle macroaree; l'obiettivo di questo paragrafo non è quello di riprendere queste motivazioni, ma descrivere, dopo che la posizione delle aree è stata già definita, quali sono gli accorgimenti che l'utente deve considerare per definire se la disposizione generale delle stesse (e dei componenti per ciascuna) nella scheda sia sensata. Nel momento in cui tutti i componenti sono presenti nella scheda, è necessario comprendere se la disposizione di tutte le sezioni sia sensata. Tra gli accorgimenti generali che è possibile considerare si deve:

- Valutare se le macroaree che devono comunicare con specifici segnali risultano distanti e, se la disposizione lo consente, di avvicinarle quanto possibile;

- Valutare se le macroaree che necessitano di alimentazioni dedicate sono poste in prossimità degli appositi stadi di conversione;
- Valutare se macroaree che necessitano delle stesse tensioni di alimentazioni o riferimenti di ground sono poste in prossimità di questi o tra di loro;
- Valutare la posizione ottimale dei connettori, in relazione alle connessioni che saranno effettuate con l'ambiente esterno;
- Valutare la posizione ottimale del microcontrollore. Più la sua posizione è centrale nella scheda, più semplice sarà la gestione delle connessioni di tutti i segnali che dovrà elaborare.

In secondo luogo occorre verificare la disposizione dei componenti per ciascuna macroarea. In questa fase si è deciso di posizionare tutti i componenti SMD sulla parte superiore della scheda; la disposizione iniziale dei componenti è quasi sicuramente soggetta a variazioni durante le fasi di Routing, specialmente durante l'inserimento di piste, piazzole o vie. Affinché il posizionamento iniziale dei componenti risulti sensato e, durante le fasi appena citate, subisca solamente minori variazioni, è opportuno:

- Verificare che i condensatori di disaccoppiamento di circuiti integrati o operazionali siano disposti correttamente nelle loro vicinanze;
- Verificare che filtri in ingresso o uscita di sezioni di alimentazione o circuiti integrati abbiano tutti i componenti disposti a breve distanza;
- Verificare che tutti i filtri dei segnali in ingresso al microcontrollore siano posti in prossimità dei pin dedicati;
- Verificare che i LED di segnalazione delle diverse tensioni nella scheda siano connessi ai potenziali corretti;
- Verificare che i componenti non si sovrappongano fra di loro o con i fori previsti sulla scheda.

La fase 4 riguarda invece l'organizzazione dei quattro layer disponibili per il processo di sbroglio della scheda. Come già anticipato, è stato deciso di non posizionare componenti nella parte inferiore della scheda; pertanto, il ruolo di ciascun layer è di seguito riportato:

- **Layer 1.** Connessione tramite piste o poligoni. In particolare, connessioni tramite piste verticali, per quanto possibile;
- **Layer 2.** Layer dedicato ai riferimenti a massa. Realizzato solamente tramite poligoni;

- **Layer 3.** Layer dedicato alle alimentazioni di diverso potenziale, realizzato tramite poligoni e piste;
- **Layer 4.** Connessione tramite piste. In particolare, connessioni perlopiù tramite piste orizzontali.

La divisione dei layer 1 e 4 a connessioni verticali o orizzontali aiuta a semplificare il layout complessivo, ridurre le interferenze tra le piste e ottimizzare il routing dei segnali. Non solo, ma il vantaggio principale risiede nella minimizzazione delle intersezioni tra le piste, poiché non soggette a sovrapposizione o incrocio nello stesso piano. Ne consegue una diretta riduzione del bisogno di usare vie per cambiare strato e la resistenza introdotta da ognuna di queste. Specialmente in aree molto dense di connessioni, come quella del microcontrollore, questa tecnica è di estrema utilità. Un ultimo vantaggio si ha anche da un punto di vista progettuale, in cui un layout ordinato e realizzato con questa tecnica rende più facile tenere traccia del percorso di uno specifico segnale; non solo, ma in fase finale di validazione software è più semplice risalire a determinati errori.

In Figura 2.10 e Figura 2.11 si riporta lo stato finale dei layer 1 e 4. Il primo strato è caratterizzato dalla presenza non solo delle piste e delle piazzole, ma anche dei pad dei vari componenti, non presenti sullo strato 4.

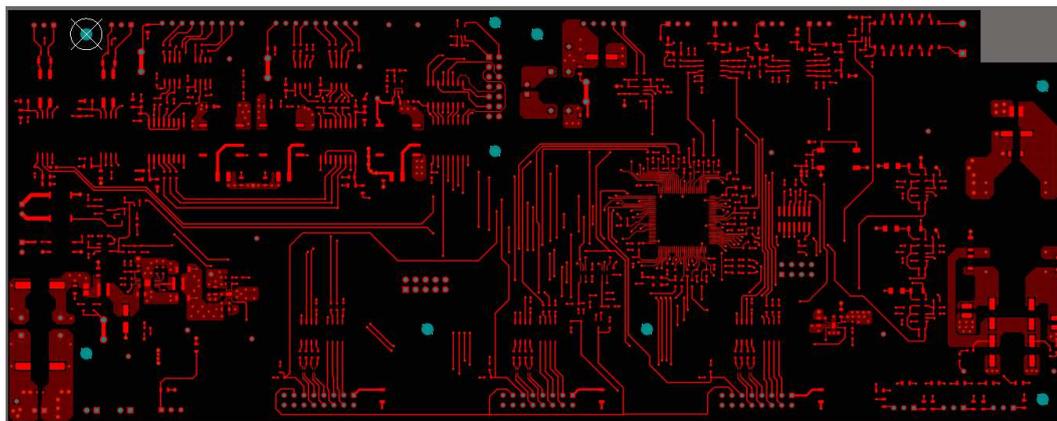


Figura 2.10: Routing del Layer 1.

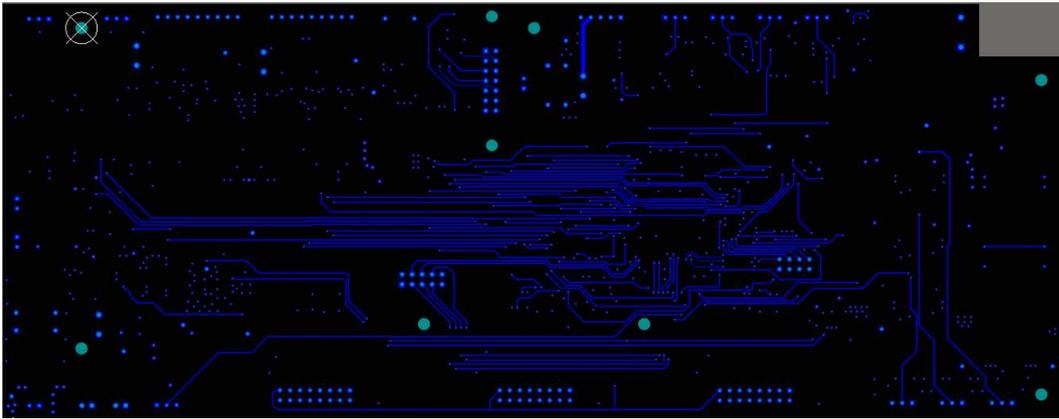


Figura 2.11: Routing del Layer 4.

L'utilizzo di un layer dedicato ai riferimenti di ground e di uno dedicato alle alimentazioni a tensioni diverse è una divisione molto pratica per diversi motivi legati sia all'integrità del segnale, sia alla distribuzione efficiente della corrente. Realizzato unicamente con poligoni, ossia grandi aree di rame a stesso potenziale e a bassa impedenza, un intero layer di massa permette di avere più riferimenti di GND stabili e uniformi su tutta la scheda. Questo è essenziale per tutti i componenti che richiedono diversi riferimenti di massa dedicati, per garantire corrette misurazioni e funzionamento del circuito. D'altra parte, il layer dedicato alle diverse alimentazioni è stato realizzato usando maggiormente poligoni; in alcune aree sono state realizzate piste di alimentazione a sezione più ampia, riducendo così la resistenza e le perdite di potenza.

In Figura 2.12 e Figura 2.13 si riporta quindi lo stato finale dei layer 2 e 3:

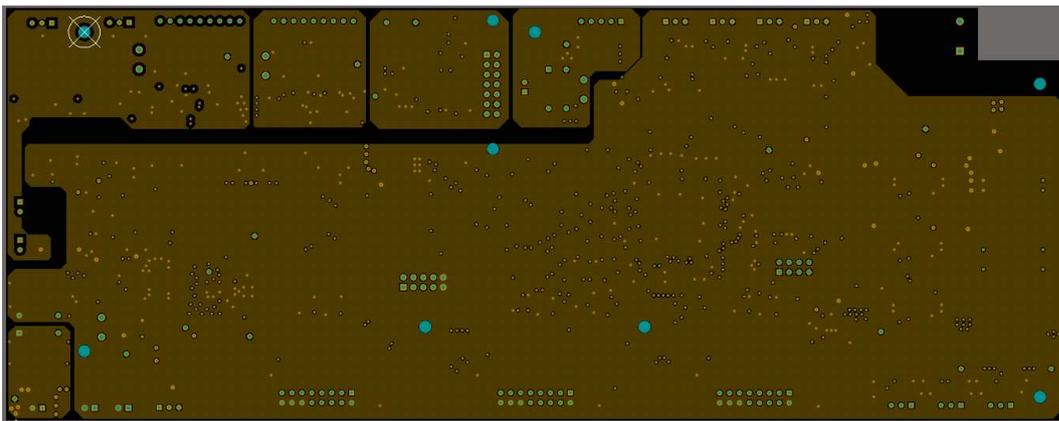


Figura 2.12: Routing del Layer 2.

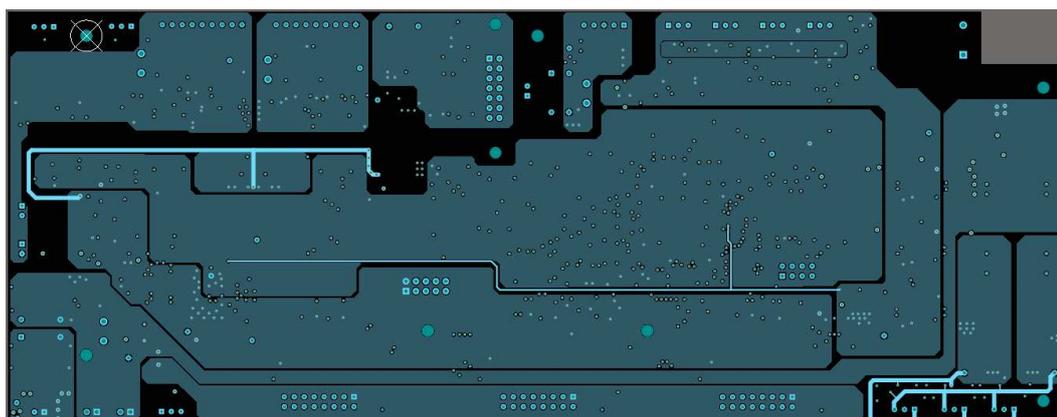


Figura 2.13: Routing del Layer 3.

Infine, per ulteriore chiarezza, si riporta in Tabella 2.5: un elenco di tutte le alimentazioni e i riferimenti di ground presenti su ciascun strato:

Riferimenti di Massa	Alimentazioni
GND	Vcc
GND_IN	12V
GND_ISO_1	12V_PWR
GND_ISO_2	+15V, -15V
GND_ISO_3	Vcc_T
GND_T	5V
	5V_ISO_1
	5V_ISO_2
	3.3V_A
	3.3V_D
	3.3V_ISO
	3.3V_PT

Tabella 2.5: Livelli di Tensione e GND Presenti nei Layer.

Le fasi 5-10 si concentrano invece sul processo di sbroglio vero e proprio, ossia le connessioni dei componenti e l'espansione dei poligoni nei layer di alimentazioni e riferimenti di massa. Pertanto, l'obiettivo di questa sezione è la completa descrizione delle tecniche utilizzate nella disposizione di piste, vie e poligoni, nonché dello sviluppo progressivo del Routing della scheda. Innanzitutto, come già anticipato nell'ordinamento in fasi dello sbroglio, quest'ultimo coinvolge inizialmente i componenti più esterni della scheda, per poi avvicinarsi man mano verso il suo interno.

Risulta favorevole iniziare proprio dalla macroarea delle alimentazioni, sparsa per la scheda in tutti i suoi stadi di conversione; iniziare da questa sezione operativa permette infatti di identificare la disposizione generale dei riferimenti di massa e dei diversi livelli di tensione richiesti dalle macroaree della scheda. Ciò consente di avviare parallelamente la costruzione dei poligoni dei layer 2 e 3, per alimentare correttamente i componenti della scheda. Le criticità fronteggiate durante questo processo, come la connessione delle alimentazioni agli stadi di conversione che le richiedono come input, sono discusse nella sezione dedicata, capitolo [2.3.2](#).

Una volta terminate le connessioni dei componenti più esterni, come i connettori, si procede con lo sbroglio ordinato macroarea per macroarea. L'obiettivo di questo processo è l'avvicinamento progressivo dei segnali al microcontrollore, posto al centro della scheda; solamente con un processo di Routing ordinato e utilizzando i layer 1 e 2 per le connessioni orizzontali e verticali in sua prossimità, è possibile completare lo sbroglio senza intersezioni o intrecci di segnale. La disposizione di molti componenti durante lo sbroglio subisce numerose variazioni, dovute al posizionamento di piste, vie o poligoni per una migliore gestione termica. Il riordinamento dei componenti deve comunque essere eseguito secondo una logica riconducibile a quanto descritto in precedenza.

Le piste costituiscono la modalità di connessione base del processo di Routing. Le piste costituiscono i percorsi di connessione tra i componenti o tra i componenti e i layer di ground o alimentazione. In questo progetto di sbroglio sono state adoperate unicamente piste rettilinee, e non curvilinee. Inoltre, possono contribuire alla gestione termica del circuito; progettando piste più larghe per componenti che dissipano molta energia, si facilita la conduzione del calore, aiutando a distribuire e dissipare meglio il calore generato dai componenti attivi. Nel software di progettazione Altium Designer, le piste possono essere tracciate e modificate rapidamente, agevolando le modifiche nel layout del PCB. Si possono regolare facilmente dimensione, forma e percorso per adattarle efficacemente alle specifiche di progetto.

L'uso di piste di diverse dimensioni è una pratica base nella progettazione di circuiti stampati, e ha diversi scopi fondamentali legati principalmente a caratteristiche elettriche e di gestione termica. La larghezza delle piste influisce sulla quantità di corrente che una pista può trasportare, sull'integrità del segnale e sulla dissipazione del calore; le piste che trasportano correnti più elevate, come gli stadi di conversione delle alimentazioni e alcuni circuiti integrati, devono essere più larghe per evitare surriscaldamenti e garantire che possano trasportare la corrente senza eccessive perdite resistive. Per tutti gli altri componenti, generalmente quelli che gestiscono segnali di controllo o logici, si possono usare piste più strette. È possibile anche variare dinamicamente lungo lo stesso tratto la dimensione della pista; ciò consente di soddisfare alle esigenze di gestione dello spazio di aree affollate o componenti più piccoli, e, allo stesso tempo dopo che la

connessione al componente è stata effettuata, riportare ad una dimensione maggiore la pista beneficiando dei vantaggi sopra descritti. In Altium Designer, le dimensioni delle piste possono essere impostate in base a regole personalizzate. Nel progetto in esame, le piste hanno le seguenti dimensioni:

- **50 mil**, per le connessioni delle alimentazioni e di alcuni connettori;
- **30 mil**, per le connessioni di alcuni connettori;
- **25 mil**, per la connessione di una alimentazione;
- **20 mil**, per le connessioni di segnale standard;
- **10 mil**, per le connessioni di segnale più piccole.

Le vie sono sostanzialmente dei fori placcati in rame che permettono la connessione elettrica tra i diversi layer della scheda. In un PCB come quello in esame, formato da più strati, trovano largo impiego per l'ottimizzazione dello spazio e la connessione diretta delle piste ai layer di alimentazione o ground. Se un layer è congestionato dalla presenza di componenti o piste, è possibile spostare un segnale su un altro layer tramite una via, evitando incroci o cortocircuiti. Non solo, ma le vie possono essere anche utilizzate per dissipare il calore generato dai componenti. La gestione termica viene ottimizzata dall'uso combinato delle vie e dei poligoni nell'intorno dei componenti che dissipano più potenza. Un'intensificazione locale delle vie, ad esempio in uno stadio di conversione dell'alimentazione, consente dunque di connettere un poligono con stesso potenziale (o riferimento di massa) al layer dedicato, per una più efficace dissipazione di calore tramite più connessioni in parallelo, come mostrato in Figura 2.14:

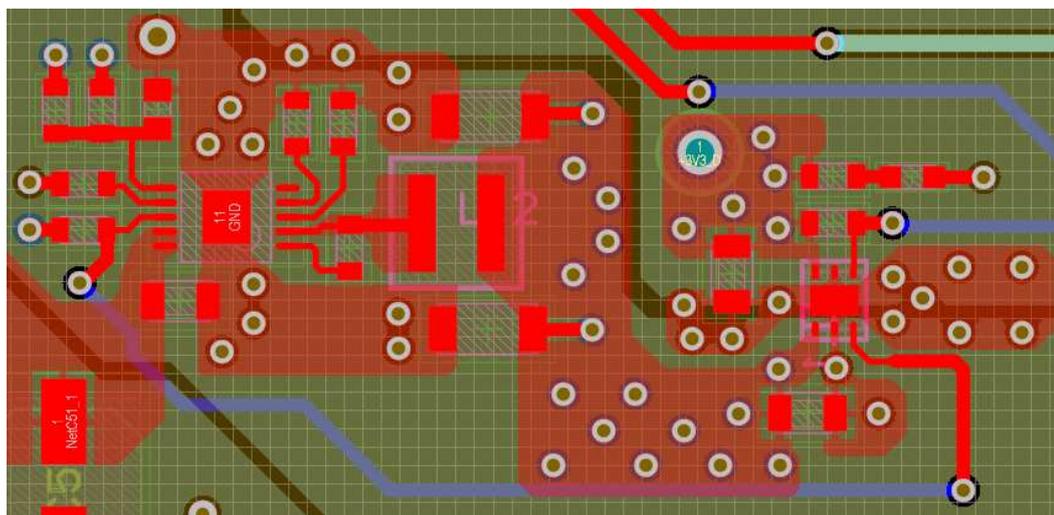


Figura 2.14: Esempio di Intensificazione delle Vie.

Questo tipo di connessioni in parallelo tramite vie permettono anche di migliorare le distribuzioni delle alimentazioni e la stabilità dei riferimenti di massa, riducendo i problemi di rumore e interferenza. Esistono varie tipologie di vie. Le Through-Hole Via (Via Passante) collegano tutti gli strati del PCB. Le Blind Via (Via Cieca) collegano uno strato esterno a uno o più strati interni, senza attraversare l'intero PCB. Le Buried Via (Via Interrata) collegano solo gli strati interni, senza apparire sugli strati esterni. È utilizzata per PCB molto complessi, non riguardano progetti come quello analizzato. Altium Designer, ad esempio, permette di impostare regole specifiche per ogni tipo di via, adattandole alle esigenze del circuito.

La Control Board ha richiesto principalmente l'utilizzo di sole vie cieche, per connettere o i componenti agli strati 2 e 3, o per far passare i segnali tra gli strati 1 e 4. In particolare, sono state utilizzate solamente due dimensioni di vie:

- Vie cieche di 0.85mm in diametro esterno, per esigenze di spazio;
- Vie cieche di 1.27mm in diametro esterno, quando possibile, per una gestione termica e della corrente migliore.

I poligoni sono invece aree di rame che coprono superfici più ampie della scheda e sono utilizzati principalmente per:

- Gestire le alimentazioni e i riferimenti nei layer dedicati;
- Gestire la dissipazione di calore per i componenti o macroaree caratterizzate da un maggior consumo energetico, come le sezioni di alimentazione o particolari circuiti integrati;
- Connettere insieme diversi componenti appartenenti alla stessa net, per ottimizzare lo spazio utilizzato.

I poligoni sono dunque delle particolari connessioni in rame caratterizzate da un resistenza inferiore rispetto alle semplici piste. Essi fungono anche da schermo contro le interferenze elettromagnetiche, migliorando l'integrità dei segnali. Altium Designer gestisce il posizionamento e controllo dei poligoni tramite il menù dedicato; non solo, ma permette di definire importanti vincoli di layout che ne controllano la disposizione nella scheda. La sezione successiva si occupa proprio di analizzare più nel dettaglio l'insieme di regole e vincoli senza i quali, specialmente per i poligoni, l'integrità complessiva della scheda e dello sbroglio sarebbe compromessa. In Figura 2.15 si riporta un esempio della disposizione dei poligoni in questa applicazione, in particolare per lo stadio di conversione dell'alimentazione da 12V a +15V e -15V:

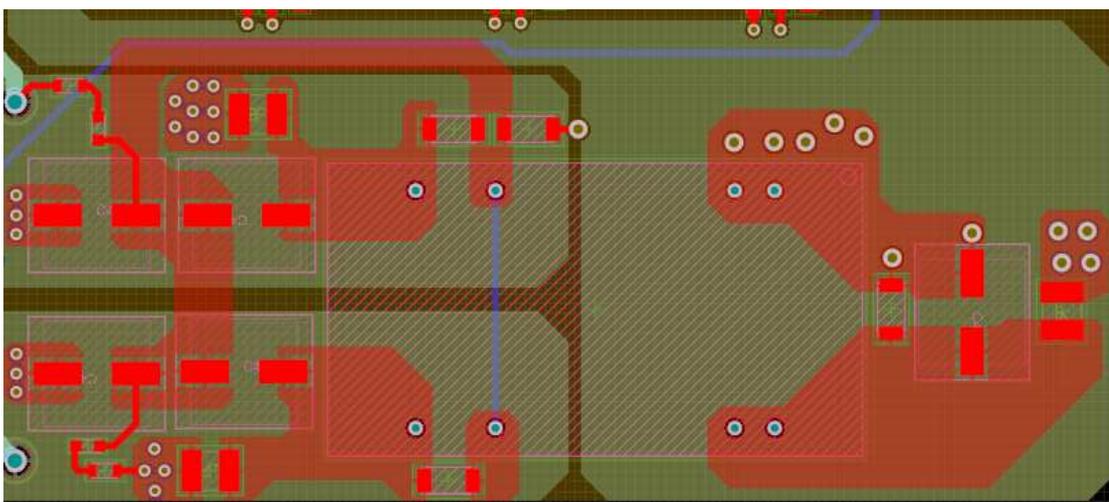


Figura 2.15: Esempio di Utilizzo di Poligoni.

La fase numero 11 del processo di Routing è stata dedicata alla definizione e rispetto di alcuni vincoli di sbroglio legati principalmente alle disposizioni di piste e poligoni. Come già accennato nella sezione 2.3, Altium Designer prevede un menù dedicato di Rules. All'interno di questo l'utente può inserire manualmente regole e vincoli che devono essere rispettati durante lo sbroglio. La scrittura di queste regole viene effettuata secondo una nomenclatura specifica, applicabile componente per componente o considerando gruppi di entità. Nel progetto di Routing della scheda in esame, sono state aggiunte manualmente 4 tipologie di Rules, oltre ai vincoli da rispettare già citati finora (non delle vere e proprie Rules, bensì delle norme da rispettare per un corretto processo di sbroglio).

La prima tipologia di vincolo riguarda lo smussamento degli angoli vivi dei poligoni. Questo vincolo non è stato inserito sottoforma di Rule nel menù dedicato, ma riguarda comunque questa fase del processo. Lo smussamento degli angoli vivi dei poligoni permette una migliore distribuzione del calore, in quanto si evita la concentrazione di calore in punti localizzati, come gli spigoli. Non solo, ma gli angoli smussati riducono anche la probabilità di formazione di cricche e punti di stress durante la fabbricazione e l'uso del PCB. Infatti, gli angoli vivi sono più difficili da realizzare con precisione, specialmente nelle tecniche di produzione del PCB. Un esempio di smussamento è riportato in Figura 2.16, in cui è possibile valutare lo smussamento dei poligoni presenti nei layer 1,2 e 3:

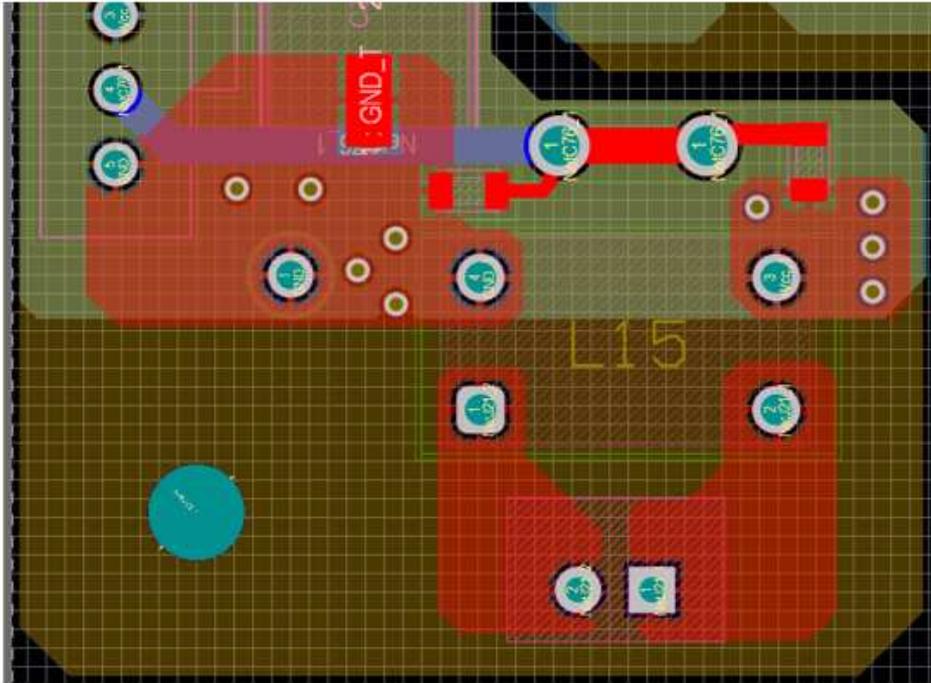


Figura 2.16: Esempio di Smussamento dei Poligoni.

La seconda tipologia di vincolo, questa volta inserito manualmente nel menù dedicato, riguarda il rispetto delle distanze tra i poligoni e tra le piste (esistono anche alcune sezioni in cui il rispetto del vincolo riguarda una pista e uno o più poligoni). Distanze insufficienti tra piste o poligoni a potenziale molto diverso possono causare cortocircuiti, interferenze elettromagnetiche o compromettere l'integrità del segnale. Durante il processo di fabbricazione, mantenere delle distanze adeguate aiuta ad evitare difetti di produzione come cortocircuiti accidentali.

Il PCB in esame è caratterizzato da una distanza base, chiamata clearance, tra piste di circa 10mil. Il rispetto di questo vincolo è particolarmente critico nella sezione operativa del microcontrollore, in cui le piste sono già realizzate col diametro minimo di 10mil, e i pin del microcontrollore non permettono distanze elevate tra le tracce. In Figura 2.17 è mostrato un addensamento critico delle piste proprio in questa zona:

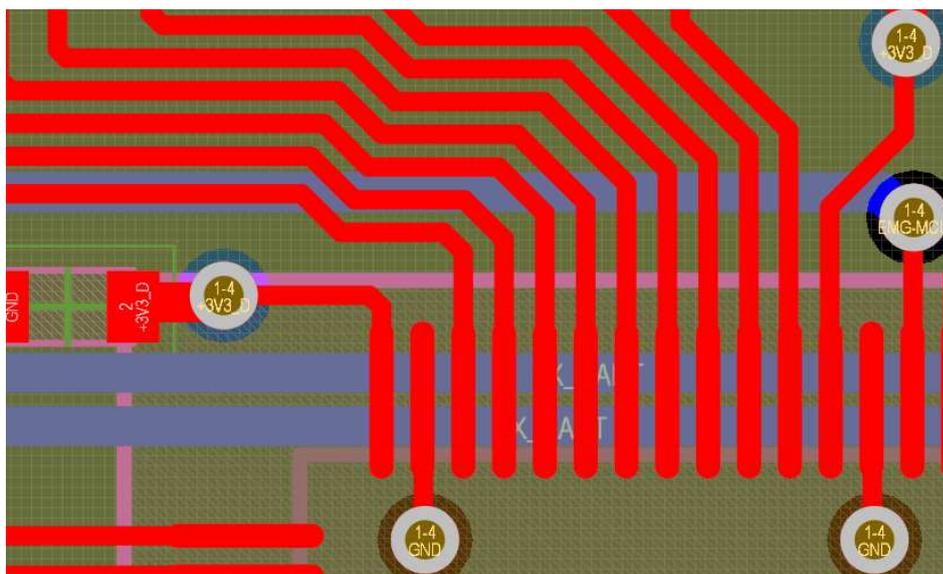


Figura 2.17: Esempio di Distanza Minima tra le Piste.

Per quanto riguarda il vincolo di clearance tra poligoni, specialmente nei layer di massa e di alimentazione è possibile valutarne la criticità. Nel PCB in esame, la distanza base dei poligoni di questi due layer è di 15mil. Tuttavia, nella maggior parte dei casi il rispetto di questo vincolo è stato ampiamente soddisfatto durante il posizionamento dei poligoni dei due layer, considerando distanze fra essi maggiori di 15mil. In Figura 2.18 si riporta un esempio del rispetto del vincolo:

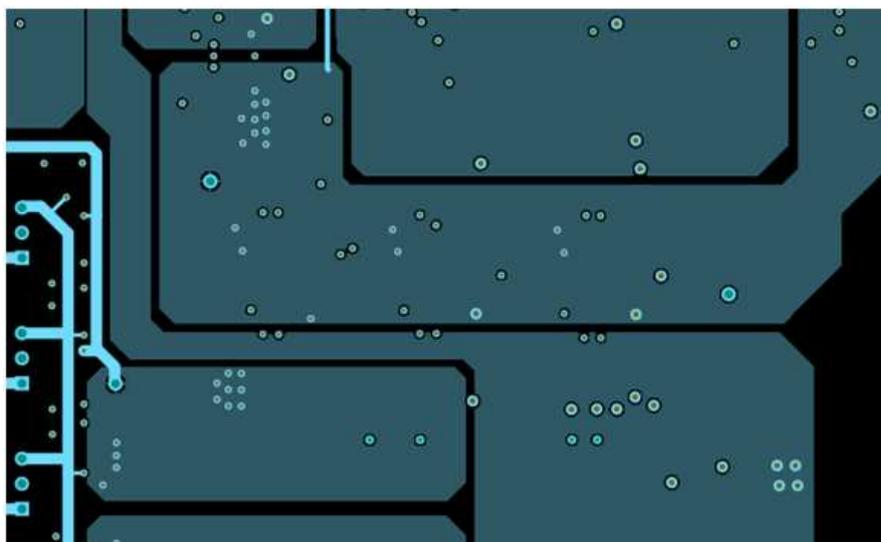


Figura 2.18: Esempio di Distanza Minima tra Poligoni.

L'ultima tipologia di vincolo da rispettare in questa fase è la differenza tra Thermal Relief e la connessione completa dei poligoni ai componenti. Sostanzialmente essa riguarda il modo in cui i terminali dei componenti sono collegati ai poligoni. Il Thermal Relief è generalmente preferito per connessioni non soggette al passaggio di alte correnti. La connessione completa è invece utilizzata per componenti di potenza o per sezioni del circuito che devono dissipare molto calore, come alcune sezioni di conversione dell'alimentazione.

Il thermal relief è una tecnica di connessione che collega la piazzola ai pad dei componenti tramite piccole piste poste a 90 gradi l'una con l'altra, piuttosto che con una connessione solida. Questi bracci riducono la quantità di rame che collega direttamente la piazzola al poligono. I vantaggi principali sono legati alla facilità di saldatura e di connessione, mentre lo svantaggio principale deriva dalla minore efficienza nella dissipazione del calore.

La connessione completa collega direttamente la piazzola ai pad del componente, senza utilizzare rami di thermal relief. Questo tipo di connessione permette un trasferimento di calore e di corrente ottimale tra la piazzola e il poligono, con rischio di stress termico se non opportunamente preventivato. Proprio per questo motivo questo tipo di connessione viene definita componente per componente nel menù delle Rules. Di seguito, in Figura 2.19 si riporta un esempio di thermal relief e di connessione completa:

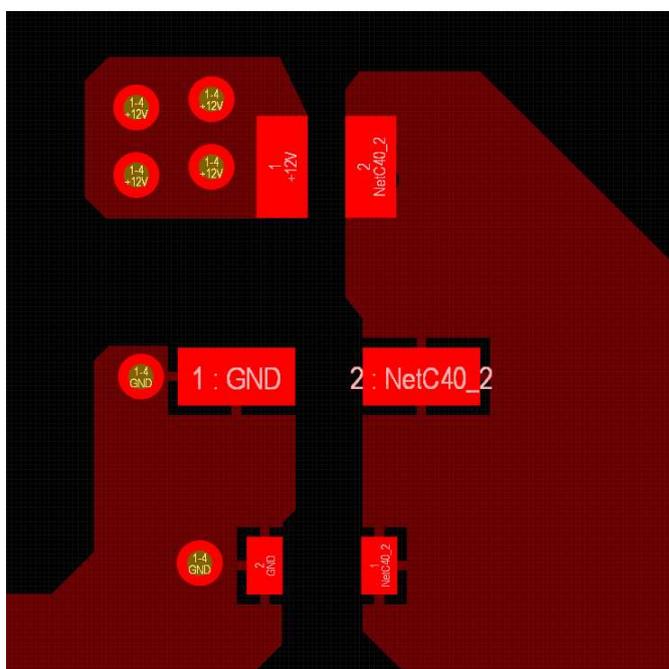


Figura 2.19: Differenza tra Thermal Relief e Connessione Completa.

Infine, le fasi 12-15 riguardano gli accorgimenti finali che è necessario effettuare per chiudere il processo di sbroglio del PCB. In primo luogo, occorre completare i layer dedicati alle alimentazioni e ai riferimenti di massa. Questa operazione è stata affrontata una volta che tutti i componenti sono stati connessi ai poligoni a diverso potenziale nei layer 2 e 3 tramite vie cieche o piste dedicate. Durante questa fase è necessario connettere tutti i poligoni con stesso potenziale senza che uno di questi rimanga flottante su un layer; tale operazione, specialmente per il layer delle alimentazioni, risulta complicata se la scheda è caratterizzata dalla presenza di numerose piazzole a diverso potenziale. Tuttavia, una tecnica utile adottata per risolvere lo sbroglio di queste aree è stata l'utilizzo di piste a grande diametro, le quali hanno permesso la connessione di poligoni a stesso potenziale posizionati ad elevate distanze sulla scheda. In Figura 2.20 si riporta un esempio di quanto descritto, in particolare per la connessione dei poligoni a 5V:

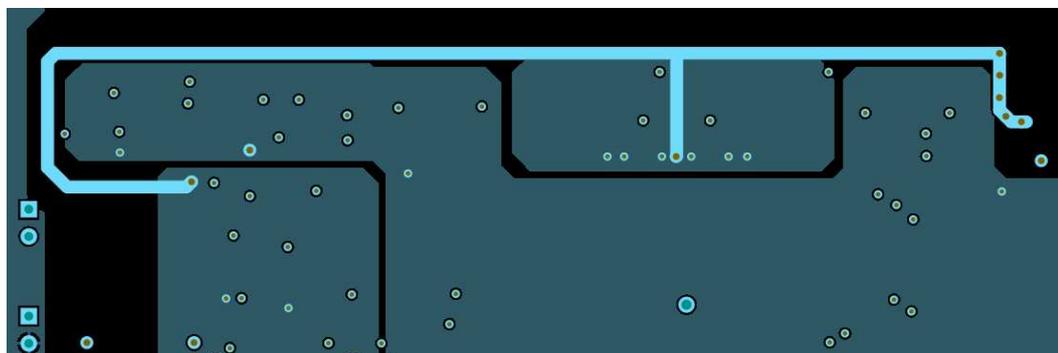


Figura 2.20: Pista di collegamento per Poligoni a 5V.

Un'ulteriore fase finale riguarda il posizionamento corretto delle scritte sulla scheda. Le scritte riguardano principalmente i componenti e le funzioni generali di ogni connettore. Per quanto riguarda i componenti, le scritte sono state poste solo in orizzontale o in verticale, con lo stesso orientamento; nel PCB in esame è stata utilizzata solo una dimensione caratteristica:

- 1mm di **Altezza** e 0.2mm di **Spessore**.

Per quanto riguarda le scritte dei connettori, oltre alla generica funzione di ciascuno è stato indicato per i connettori di alimentazione il polo positivo.

Successivamente, è stata verificata la corretta disposizione dei fori di fissaggio scheda al convertitore Wolfspeed. Nella sezione successiva, la 2.3.2, sono analizzate più nel dettaglio le modalità con cui questa criticità è stata affrontata. Il software Altium Designer, una volta terminato il processo di sbroglio, consente di verificare la presenza di errori tramite un menù dedicato.

2.3.2 Criticità e Validazione

Il capitolo proposto si pone l'obiettivo di analizzare nel dettaglio tutte le criticità che sono state affrontate durante il processo di sbroglio, e che sono state parzialmente menzionate nelle sezioni precedenti. L'analisi delle tecniche utilizzate per affrontare e superare tale criticità. L'utilità di questa sezione risiede nell'analisi di alcune problematiche che possono verificarsi durante un processo di sbroglio e come queste possono essere superate.

Tra le problematiche più ricorrenti che si riscontrano nel Routing di una scheda di controllo di questo tipo, sulla quale è prevista la presenza di un microcontrollore, vi è lo sbroglio dei segnali destinati proprio a questo componente. L'elevato numero di segnali che il microcontrollore deve elaborare determina sia una congestione locale delle piste, e sia un affollamento di componenti di filtraggio RC nell'intorno dei pin del microcontrollore. Le possibili soluzioni sono dunque:

- Rispetto delle Clearance tra le piste;
- Utilizzo di Layer 1 e 4 per connessioni verticali e orizzontali;
- Utilizzo di piste con diametro minimo di 10mil;
- Utilizzo di vie cieche per portare i segnali direttamente ai pin corretti sfruttando i due layer delle connessioni.

In Figura 2.21 si riporta lo sbroglio completo della sezione operativa del microcontrollore, effettuato rispettando i punti sopra descritti:

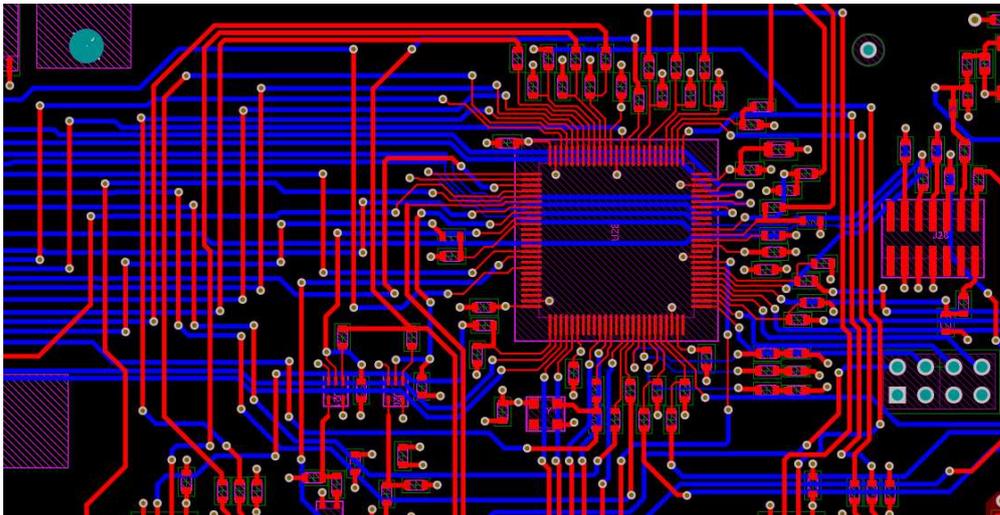


Figura 2.21: Sbroglio Completo del Microcontrollore.

Il management termico e delle connessioni dei vari stadi di conversione delle alimentazioni sparsi per la scheda riguarda in particolare alcuni collegamenti di alimentazione effettuati per componenti che si trovano a grandi distanze gli uni dagli altri.

Le macroaree dell'encoder e della sincronizzazione PWM richiedono nelle loro vicinanze degli stadi di conversione dell'alimentazione che come input ricevono piste a 5V. La prima criticità affrontata riguarda appunto le modalità con cui questi input sono stati sbrogliati; come è possibile valutare in Figura 2.20, presentata nella sezione precedente 2.3.1, una pista di diametro massimo 50mil è stata utilizzata per soddisfare queste esigenze.

Similmente a quanto appena descritto, le sezioni operative dell'Emergenza e del microcontrollore necessitano di un'alimentazione a 3.3V_A. Pertanto, una pista dedicata che attraversa l'intera scheda è stata predisposta con un diametro di 25mil, rispettando i vincoli di clearance tra i poligoni adiacenti, sempre nel layer 3. Il percorso effettuato dalla pista in esame è riportato in Figura 2.22:



Figura 2.22: Percorso della pista 3V3_A.

Lo stadio di conversione 12V – 15V è posizionato al capo opposto rispetto allo stadio di conversione Vcc – 12V; pertanto anche questa connessione è soggetta alla medesima criticità affrontata precedentemente. Tuttavia, per questo tipo di alimentazione si è preferito utilizzare una connessione tramite poligono esteso piuttosto di una pista di grande diametro, per minimizzarne l'impedenza e ottimizzare la gestione termica di questa connessione, a potenziale 12V.

In Figura 2.23 si riporta lo stato di questa connessione. Viceversa, nelle vicinanze di questo stadio di conversione dell'alimentazione, la connessione dei potenziali a +15V e -15V, richiesti dai connettori del feedback di corrente per alimentarne i sensori ad effetto Hall, avviene tramite delle piste di diametro 50mil, similmente a quanto effettuato per la pista a 5V, sempre sul layer 3.

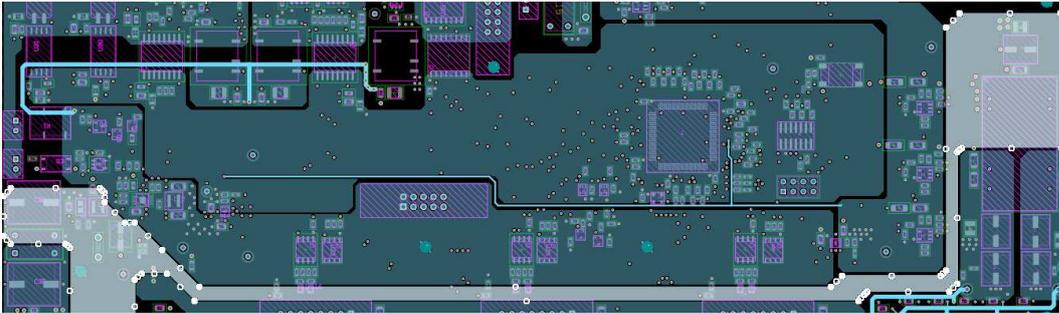


Figura 2.23: Percorso del Poligono a 12V.

Un'ulteriore connessione critica affrontata durante il processo di sbroglio riguarda il segnale PG_3V3A. In Figura 2.24 si riporta la connessione tramite piste e vie di questo segnale, scambiato tra le macroaree di emergenza, microcontrollore, alimentazione e driver MOSFETs. Trattandosi di una connessione di segnale, sono stati utilizzati i layer dedicati, 1 e 4.



Figura 2.24: Percorso del Segnale PG_3V3A.

L'ultima criticità affrontata prima della validazione della scheda è stata la verifica della corretta disposizione dei fori di fissaggio scheda. È noto dal capitolo 1 che la scheda di controllo sia destinata al fissaggio sopra l'inverter Wolfspeed; non solo, ma è anche

noto che essa sostituisce la scheda di controllo precedentemente fornita. Tuttavia, seppur le dimensioni e la forma della nuova Control Board sono differenti dalla precedente, la posizione dei fori di fissaggio sul convertitore sono ovviamente gli stessi. Pertanto, la loro disposizione costituisce una fase critica del processo, affrontata in due diverse modalità.

La prima modalità consiste nella calibrazione della loro posa sulla scheda confrontandola con le posizioni degli stessi sulla scheda di controllo precedente. Questa operazione è stata condotta utilizzando file PDF e Gerber delle schede; una volta sincronizzato il sistema di riferimento sulle due schede, la posa dei fori è automatica considerando le loro coordinate (x,y) a partire dall'origine (ad esempio, l'origine è stata piazzata sul primo foro in alto a sinistra della scheda).

La seconda modalità di verifica consiste nello stampaggio del file PDF in scala 1:1 della scheda di controllo, con confronto diretto e fisico con l'inverter Wolfspeed. Se il posizionamento dei fori è corretto, l'incastro del foglio sull'inverter avviene combaciando la posizione di questi.

Successivamente, terminato il processo di sbroglio, il software Altium Designer permette di valutare la presenza di errori di progettazione tramite un menù dedicato. Di seguito si riportano brevemente gli errori più frequenti di questo progetto di sbroglio:

- Sovrapposizione componenti;
- Dead Copper, ossia residui di piste non connesse o erroneamente posizionate;
- Componenti specchiati;
- Connessioni mancanti tra componenti della stessa net;
- Distanze e vincoli di clearance non rispettati;
- Sovrapposizione di vie.

Una volta corretti tutti gli errori, il processo di sbroglio può dichiararsi terminato, previa ulteriore controllo per ispezione visiva e rispetto della coerenza generale del Routing. Ritenuto soddisfacente, il modello può essere mandato in produzione e i file principali PDF e BOM della scheda possono essere generati direttamente da Altium Designer.

Capitolo 3

Layout meccanico

Il terzo capitolo del progetto di tesi presentato è incentrato sulla realizzazione del layout meccanico del sistema unificato. Nello specifico, le sezioni che seguono trattano tutte le metodologie e le fasi progettuali che hanno caratterizzato lo sviluppo di una struttura meccanica che contenga e sostenga tutti i componenti del banco prova, dalla sua modellazione tridimensionale CAD alla sua realizzazione fisica. Pertanto, l'obiettivo principale di questo capitolo è la completa descrizione sia macroscopica del layout meccanico, sia microscopica, comprensiva di tutti quei componenti elettromeccanici che svolgono un ruolo fondamentale all'interno del sistema e, per questa ragione, considerati in questa fase progettuale.

La prima descrizione riguarda lo stato globale del layout, dunque come si presenta la scatola contenitiva e come è posizionata nel banco prova. Come anticipato nella sezione introduttiva 1, il progetto di tesi qui presentato si concentra sulla realizzazione di un sistema unificato di controllo motore per un banco prova specifico, fisicamente presente in laboratorio. Ne consegue che lo stato globale del layout meccanico è fortemente soggetto a vincoli progettuali che riguardano la sua realizzazione fisica, come sarà spiegato più nel dettaglio nella sezione 3.1. L'approccio e le metodologie utilizzate nelle fasi iniziali di modellazione meccanica 3D devono rispettare questi vincoli, non solo per poter consentire fisicamente la sua realizzazione, ma una volta realizzato, per poter essere "accoppiato" con la struttura meccanica del banco prova già presente.

La seconda descrizione riguarda invece i componenti singoli che fanno parte del layout meccanico realizzato. Per ognuno di questi, nelle sezioni dedicate 3.2.1 e 3.2.2, si definisce il ruolo di ciascuno all'interno del sistema, le tecniche utilizzate per la modellazione tridimensionale, eventuali criticità affrontate e in conclusione brevi informazioni sul componente reale scelto. L'obiettivo principale è quindi la descrizione completa delle motivazioni che risiedono dietro la scelta di ognuno di questi.

Infine, in sezione 3.3 segue la descrizione del castello sul quale poggia la scatola contenitiva e attraverso il quale è possibile integrarla nella struttura meccanica del banco prova. Non solo, ma il capitolo si chiude presentando i processi finali dello sviluppo del layout meccanico, come la creazione dei file di foratura e quotatura, indispensabili per la realizzazione fisica dell'assieme.

Le fasi che hanno caratterizzato la realizzazione del modello tridimensionale sono molteplici; una volta definito l'ingombro fisico del banco prova e, di conseguenza, le dimensioni della scatola, è possibile riassumere lo sviluppo del progetto nel modo seguente:

1. Modellazione tridimensionale della scatola contenitiva, pareti e cerniere;
2. Definizione dei componenti interni alla scatola;
3. Modellazione dei componenti Interni;
4. Definizione delle stato delle connessioni In-Out e dei connettori necessari per la loro realizzazione;
5. Modellazione dei connettori In-Out (o componenti Esterni);
6. Definizione e modellazione del Cooling Unit;
7. Modellazione del castello;
8. Generazione file di foratura e di quotatura di lamiere e profili ad L.

Le sezioni che seguono hanno l'obiettivo di approfondire ciascuna fase del processo di sviluppo del layout, permettendo una visione completa e specifica del progetto meccanico.

Il software utilizzato in questa fase del progetto di tesi è stato SolidWorks 3D, un software di modellazione tridimensionale parametrica, ossia per la realizzazione di modelli CAD dettagliati, simulazioni e disegni tecnici di oggetti e strutture meccaniche. Uno dei vantaggi principali di SolidWorks è la creazione di modelli tridimensionali definiti da parametri, come dimensioni o geometrie. Se un parametro viene modificato, il modello si aggiorna automaticamente, mantenendo la coerenza della "parte" (singolo componente) o "assieme" (insieme di più componenti). Non solo, ma permette anche di generare automaticamente disegni bidimensionali dai modelli 3D, completi di viste, quote, tolleranze e altri dettagli necessari per la produzione.

L'obiettivo principale è la creazione di un assieme, composto dal sistema scatola, comprensivo di tutti i componenti interni ed esterni, dal castello e dal banco prova. In particolare, l'assieme del banco prova è stato già fornito modellizzato e pronto per essere inserito nell'assieme globale.

La creazione di un assieme prevede innanzitutto la realizzazione delle parti che lo compongono. Ciascuna parte è stata creata a partire da uno "schizzo" bidimensionale creato su uno dei 3 piani coordinati, mostrati in figura 3.1:

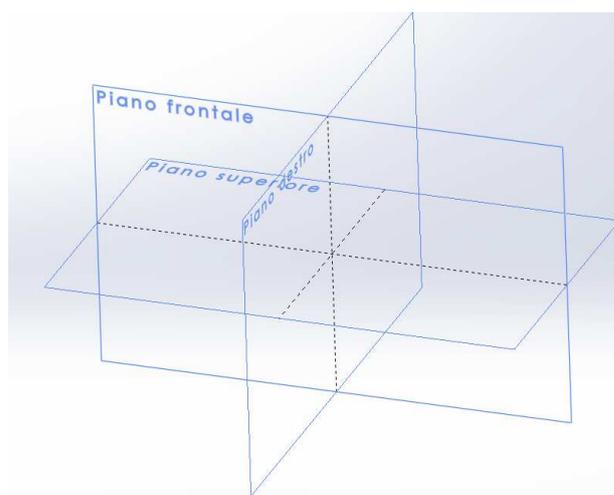


Figura 3.1: Vista dei 3 Piani Coordinati.

Una volta creato lo schizzo del componente, ad esempio, la sua geometria vista dal piano superiore, si passa all' "estrusione" dello schizzo, ossia la sua estensione lungo una direzione predefinita per la realizzazione di un modello tridimensionale. In figura 3.2 si riportano alcune funzioni base per la creazione di schizzi ed estrusioni utilizzate nel progetto di tesi:

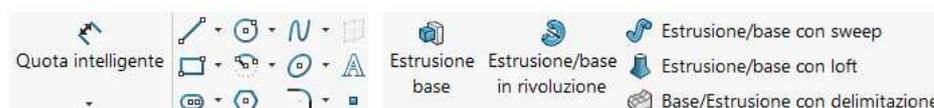


Figura 3.2: Menù di base SolidWorks 3D.

Il menù di sinistra si riferisce alla creazione di forme predefinite per il disegno dello schizzo bidimensionale, mentre il menù di destra fa riferimento al tipo di estrusione che si vuole utilizzare.

Infine, per riferimento generale di ciò che sarà discusso nelle prossime sezioni, si presenta in figura 3.3 lo stato finale dell'assieme completo del sistema unificato in due viste, comprensivo del banco prova, tuttavia in assenza delle connessioni fisiche elettriche ed idrauliche tra i componenti:

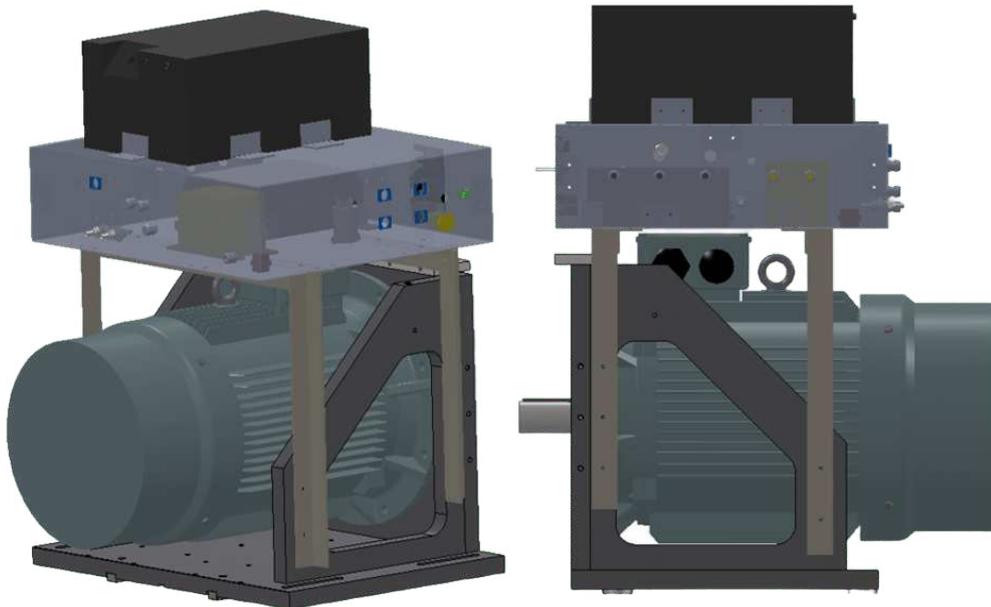


Figura 3.3: Assieme Globale del Layout Meccanico.

3.1 CAD Meccanico della Scatola

L'obiettivo di questa sezione è la descrizione del processo di sviluppo della scatola contenitiva in alluminio, comprensivo di tecniche, metodologie, vincoli e criticità affrontati durante la sua progettazione CAD. Non solo, oltre la modellazione tridimensionale della scatola segue anche la presentazione delle lamiere e profili ad L realmente acquistati per la realizzazione del progetto, al fine di analizzarne nello specifico dimensioni e materiale.

Il contenimento dei componenti elettromeccanici e delle schede elettroniche all'interno di una scatola metallica è un passaggio fondamentale per garantire sicurezza e funzionalità del sistema unificato; infatti, la scatola assicura non solo che ogni componente sia protetto dall'ambiente esterno, ma anche che il sistema nel suo insieme possa operare senza interferenze, creando quindi un ambiente isolato. Pertanto, la realizzazione di un layout meccanico di questo tipo, specifico per un banco prova esistente, è proprio una fase di progettazione imprescindibile, in sintesi per:

- **Assicurare isolamento elettrico:** La scatola isola fisicamente i componenti a più alta tensione, prevenendo contatti accidentali che potrebbero causare scosse elettriche pericolose per gli operatori, sia in condizioni di normale esercizio e sia in condizioni di guasto;
- **Riduzione Interferenze:** All'interno di un laboratorio in cui sono presenti diverse apparecchiature elettriche ed elettroniche, un layout di questo tipo contiene e riduce le interferenze elettromagnetiche generate dai componenti elettronici ad alta frequenza posti al suo interno, proteggendo i dispositivi circostanti;
- **Riparo dai danni fisici:** Previene urti accidentali, cadute di oggetti o contatti con attrezzi che potrebbero danneggiare le schede o i componenti sensibili;
- **Compattezza e Ordine:** Racchiudere tutti i componenti in un'unica struttura facilita l'organizzazione del banco prova e riduce il rischio di connessioni disordinate;
- **Dissipazione del calore:** Concentrare tutti i componenti che hanno bisogno di ventilazione o raffreddamento in un unico ambiente consente di realizzare un management termico localizzato e più efficiente, soprattutto per le connessioni idrauliche.

La prima fase di progettazione della scatola contenitiva risiede nella definizione dell'ingombro fisico all'interno del banco prova. Come accennato nella parte introduttiva 3, un aspetto fondamentale nel processo di sviluppo è la considerazione dei vincoli presenti; in questa fase di sviluppo il vincolo principale è proprio l'ingombro della scatola rapportato alle dimensioni del banco. Si è considerato quindi un ingombro totale le cui dimensioni principali sono riassunte in tabella 3.1:

Dimensione	Valore	[u.m.]
Lunghezza , come dimensione parallela all'asse dell'albero motore	650	mm
Larghezza , come dimensione ortogonale all'asse dell'albero motore	750	mm
Altezza	200	mm
Volume	97.5	dm ³
Spessore Lamiera	3	mm

Tabella 3.1: Tabella delle Dimensioni della Scatola.

La scatola è dunque caratterizzata da una costruzione rettangolare; la motivazione principale risiede nella realizzazione di una struttura che non sporgesse eccessivamente in senso ortogonale all'asse dell'albero motore ma in particolar modo in senso assiale, per non comprometterne eccessivamente lo sforzo meccanico causando deformazioni permanenti nella parte posteriore della scatola.

In conformità alle lamiere esistenti in mercato, le cui dimensioni soddisfano le richieste progettuali, è stato deciso di modellare la scatola contenitiva con uno spessore delle pareti di 3 mm; ne consegue che, come discusso successivamente e riportato in figura 3.4, la composizione ad incastro delle pareti richiede che un lato, ad esempio quello parallelo all'asse albero motore, venga realizzato con una lunghezza di 644 mm e non 650 mm, poiché da considerarsi lo spessore di 3 mm delle due pareti che lo racchiudono.

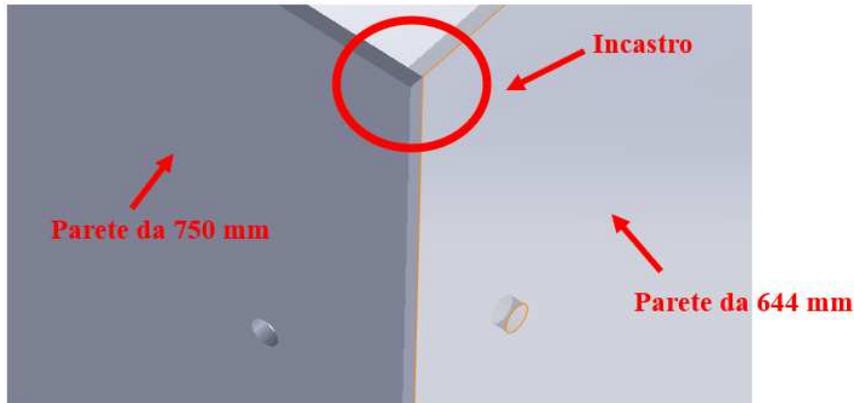


Figura 3.4: Particolare dell’Incastro di due facce Ortogonali.

Infine, il materiale scelto per le pareti è l’alluminio, resistente e versatile, in grado di resistere agli urti, agli agenti atmosferici e alla corrosione. I due strati esterni di ciascuna lamiera sono realizzati in alluminio e sono riempiti da una composizione di poliestere.

Definito dunque l’ingombro e le caratteristiche principali della scatola, si è affrontata la seconda fase del suo processo di sviluppo, tema centrale di questa sezione, ossia la modellazione CAD. Innanzitutto, ogni lamiera è stata creata a partire dal suo schizzo bidimensionale con le dimensioni di lunghezza, larghezza o altezza riportate in tabella (attenzione quanto definito precedentemente in figura 3.4); successivamente ogni schizzo è stato estruso con spessore di 3 mm, realizzando la parete tridimensionale. Praticati gli accoppiamenti, lo stato finale esploso della scatola è riportato in figura 3.5:

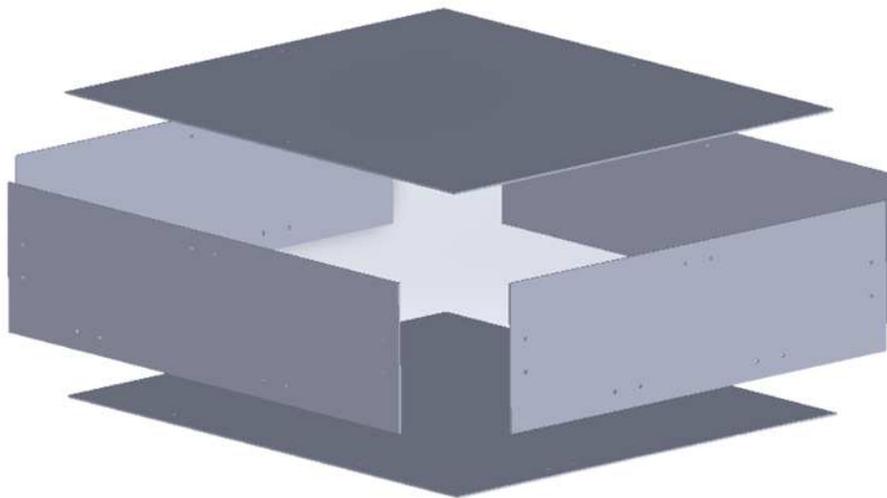


Figura 3.5: Vista Esplosa della Scatola Senza Componenti.

Le forature presenti in figura sono state realizzate con lo strumento SolidWorks “Creazione GUIDATA Fori”; la loro disposizione segue la posizione delle cerniere di alluminio il cui compito nel layout meccanico è la tenuta delle pareti, ossia la realizzazione fisica del loro accoppiamento.

Le cerniere sono ottenute a partire da profili ad L in alluminio opportunamente sezionati al fine di ottenere le lunghezze desiderate. Come mostrato successivamente, i profili realmente acquistati presentano tutti lo stesso spessore e dimensioni, impiegati nell’assieme per ogni necessità di tenuta o fissaggio di componenti. Le cerniere presenti all’interno di questo primo assieme di scatola hanno caratteristiche e dimensioni riassunti in figura 3.6; tuttavia, occorre considerare che:

1. Tutte le cerniere tranne quelle per il fissaggio della parete superiore hanno 4 forature non filettate M5;
2. Le cerniere per il fissaggio della parete superiore hanno 2 forature non filettate M5 e due forature filettate M4, per un montaggio e smontaggio della parete più dinamico;
3. Le forature praticate sulla parete inferiore sono tutte a testa svasata (anche quelle che saranno effettuate successivamente e non solo per le cerniere), per rendere la parte inferiore della scatola quanto più possibile priva di impurità o discontinuità superficiali.

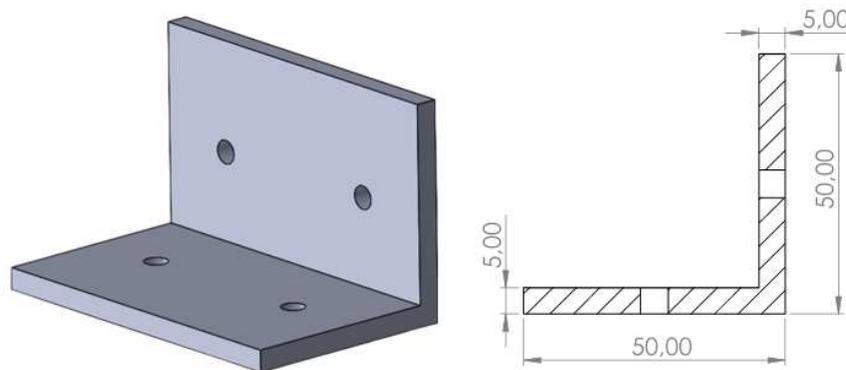


Figura 3.6: CAD e Quotatura Semplice di un Profilo ad L per Cerniera.

La lunghezza di ciascuna cerniera per la tenuta delle pareti della scatola è di 80 mm. Anche per i profili ad L il materiale scelto per i profili ad L è l’alluminio, in particolare la lega 6082, di media resistenza.

In figura 3.7 si riporta lo stato finale della scatola comprensiva di pareti e cerniere sopra descritte, senza ancora la presenza dei componenti interni; l'assieme realizzato rappresenta dunque l'involucro al cui interno alloggiavano tutti i componenti elettromeccanici. Non solo, ma l'assieme verrà modificato nelle fasi successive dello sviluppo del layout meccanico per la realizzazione delle forature nelle pareti per l'inserimento dei connettori di ingresso e uscita.

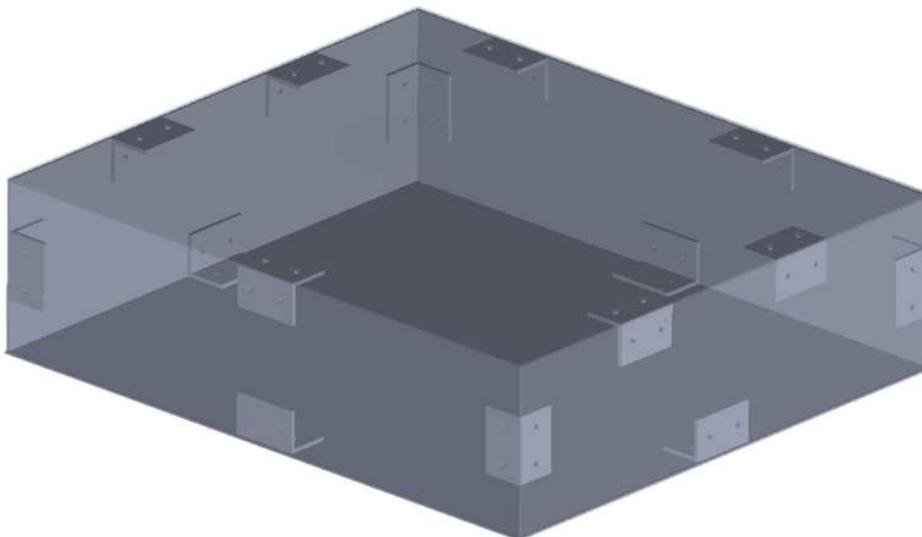


Figura 3.7: Vista Completa della Scatola Chiusa e con le Cerniere.

In conclusione, si presentano le caratteristiche principali dei componenti scelti per la realizzazione fisica del layout, quali le lamiere e i profili ad L in alluminio.

Le lamiere in alluminio scelte sono i **Fogli Compositi RS PRO, 1200mm x 1200mm x 3mm**, con codice RS 778-1696 [5]. I fogli si adattano a tanti utilizzi, principalmente rivestimenti; si presentano dunque come due fogli quadrati di spessore 3 mm, da tagliare secondo le dimensioni specifiche di progetto. L'area totale necessaria secondo il layout meccanico è di 1.5326 m², pertanto è stato necessario acquistare due fogli di alluminio con un'area totale di 2.88 m². La criticità principale affrontata durante la scelta della lamiera è stata la definizione dello spessore; inizialmente la modellazione tridimensionale della scatola è stata effettuata con uno spessore di 4 mm. Non essendo presente in mercato una lamiera adatta a questa applicazione con spessore di 4 mm, è stato deciso di utilizzare lamiere da 3 mm, come discusso finora. Il software di CAD SolidWorks permette la parametrizzazione delle dimensioni dell'assieme, consentendo la modifica dello spessore di tutte le pareti in maniera automatica, rispettando i vincoli di accoppiamento tra le stesse e le cerniere.

I profili angolari ad L acquistati sono gli **Angolari metallici 6082-T6 RS PRO in Alluminio, 1m x 50mm x 50mm x 5mm**, con codice RS 136-8750 [6]. Questi profili si adattano a tutti i progetti strutturali, in particolare per applicazioni di tenuta. La lunghezza totale necessaria sia per le cerniere, sia per i profili di fissaggio dei componenti discussi nella sezione 3.2.1, è di 5.88 m; pertanto, è stato deciso di acquistare due lotti, ciascuno da 5 profili di lunghezza totale di 1 metro. I profili non presentano alcuna foratura, le quali saranno applicate successivamente secondo i disegni progettuali descritti in sezione 3.3.2.

3.2 Integrazione dei Componenti e Stato delle Connessioni

Il paragrafo che segue si propone di analizzare in dettaglio lo stato dei componenti presenti nel layout meccanico dell'azionamento. Pertanto, l'analisi è affrontata in due filoni principali:

1. L'integrazione dei componenti nel layout;
2. Lo stato delle connessioni.

Il primo introduce i componenti presenti tramite una prospettiva macroscopica; le sezioni 3.2.1 e 3.2.2 analizzano nel dettaglio ogni componente presente, dalla modellazione del singolo alle caratteristiche tecniche. L'obiettivo di questo primo filone serve dunque ad introdurre l'approccio utilizzato per la corretta integrazione di ciascuno nel layout, dalla loro disposizione interna o esterna alle fasi di modellazione.

Il secondo si occupa nel dettaglio di descrivere lo stato delle connessioni interne alla scatola di contenimento. Segue dunque la descrizione degli schemi unifilari e bidimensionali comprensivi di tutti i componenti presenti; l'obiettivo di questo secondo filone è la completa cognizione di ogni connessione presente nel layout, in modo tale che ciascuna sia immediatamente riconoscibile una volta realizzata fisicamente.

In figura 3.8 segue lo stato finale della scatola contenitiva comprensiva di tutti i componenti modellati:

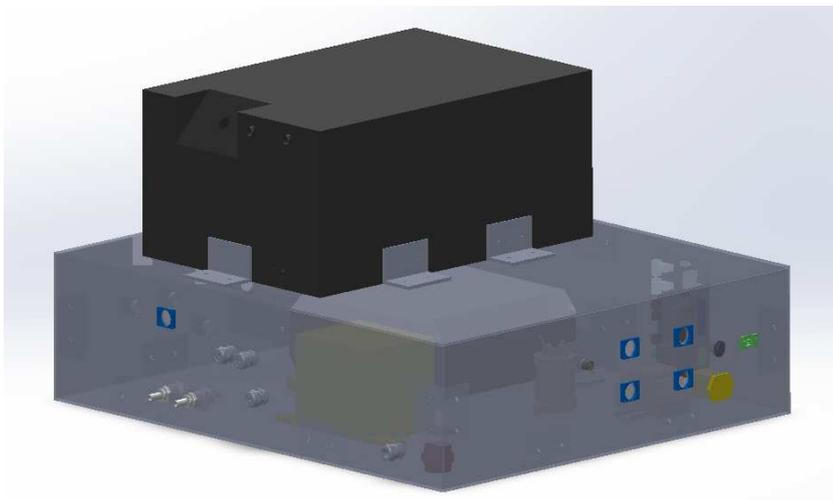


Figura 3.8: Vista della Scatola comprensiva dei Componenti.

Come già anticipato più volte, il layout meccanico realizzato tramite modellazione CAD tridimensionale comprende numerosi componenti elettromeccanici, i quali cooperano per il funzionamento armonico e generale del sistema unificato. Innanzitutto è possibile suddividere i componenti presenti in Interni ed Esterni, per definire una classificazione più ordinata in base alla loro funzione nel layout. Questa divisione è ripresa più volte in questo progetto di tesi e definisce il modo in cui sono descritti nelle sezioni 3.2.1 e 3.2.2.

Per componenti Interni si intendono tutti i dispositivi elettromeccanici posti all'interno della scatola, come il convertitore elettronico di potenza o il contattore principale Kilovac. La disposizione di questi non è per niente casuale; ognuno definisce all'interno della scatola il percorso delle connessioni elettriche effettuate, nonché il modo in cui essi interagiscono tra di loro. La loro posizione definisce anche la superficie della base della scatola, la quale si ricorda essere vincolata all'ingombro totale del banco prova. I componenti Interni non possono essere quindi disposti in modo casuale; una disposizione caratterizzata da una vicinanza eccessiva dei componenti renderebbe le connessioni elettriche difficili da realizzare. I cavi presentano anch'essi un ingombro non trascurabile dettato principalmente da:

una fase di progettazione imprescindibile, in sintesi per:

- **Il tipo e la sezione del cavo**, definito dalle richieste del componente (se di segnale o di potenza). All'aumentare della sezione del cavo aumenta la difficoltà con cui questo è posato all'interno della scatola, dettata dall'incremento della sua rigidità.
- **Lunghezza della connessione**, dovuta a componenti Esterni che richiedono alimentazioni in partenza da morsettiere o componenti posti all'interno della scatola.
- **Disposizione di connessioni vincolate**. Ad esempio, le fasi del motore elettrico, la sua ventola o il torsiometro definiscono delle connessioni che non possono essere variate nello spazio, ossia vincolate ad una specifica parete della scatola.

Per componenti Esterni si intendono invece tutti i dispositivi di connessione, sezionamento o raffreddamento posti nelle pareti della scatola o al di sopra di essa. Anche questi componenti non sono caratterizzati da una disposizione casuale; la maggior parte dei connettori innestati nelle pareti della scatola derivano da un ordinamento pensato a monte del processo di modellazione CAD, per soddisfare tutte le richieste del PCB di controllo (si pensi alla presenza di due connessioni encoder, una di input e una di output, o al segnale proveniente dal flussimetro) e del banco prova nella sua totalità. Pertanto, una volta definita con cura una lista di tutti i segnali o connessioni Input-Output per la scatola, si è passati alla modellazione tridimensionale dei componenti esterni.

Differentemente da quelli interni, essi non definiscono un ingombro particolarmente soffocante nei confronti delle pareti della scatola, pertanto le dimensioni proposte all'inizio del progetto non hanno subito modifiche.

Il processo che definisce la realizzazione CAD di ciascun componente, Interno o Esterno, è la medesima per entrambi e richiama quanto detto in sezione 3; per i componenti più semplici, a partire da uno schizzo bidimensionale, si passa all'estrusione tridimensionale. Quando è necessario si applicano dei fori con la sezione dedicata di "Creazione Guidata Fori" o si applicano dei tagli dell'estruso (tagli tridimensionali). Il livello di dettaglio richiesto in questa fase è il giusto compromesso tra effettiva geometria del pezzo fisico, con precisione dell'ordine del millimetro, e un componente che non sia provvisto di dettagli futili in vista della sua integrazione nel layout complessivo, come colori, scritte o raccordi angolari millimetrici.

I componenti già presenti in laboratorio hanno subito un processo di modellazione CAD "manuale", poiché è stato possibile prenderne le misure caratteristiche direttamente dal pezzo fisico (questo vale per la maggior parte dei componenti Interni e alcuni Esterni); mentre per quei componenti non presenti ancora in laboratorio si è provveduto al download del pezzo già modellato e pronto per essere integrato nel layout.

La ricerca fisica dei componenti non disponibili in laboratorio è stata condotta durante tutte le fasi del processo di realizzazione del layout meccanico, principalmente dal fornitore di componenti industriali ed elettronici **RS Components**. Ultimato il layout si è proceduto con l'acquisto dei componenti.

Infine, per questo primo filone, si presenta in figura 3.9 un esploso della scatola comprensiva di tutti i componenti modellati al termine del processo; la descrizione microscopica di ciascun componente segue nelle sezioni 3.2.1 e 3.2.2. Quest'ultime hanno l'obiettivo di presentare in modo quanto più chiaro possibile la funzione di ciascun componente all'interno del layout, insieme a qualche dettaglio tecnico o criticità nel processo di modellazione; pertanto, consultando direttamente queste sezioni sarà possibile identificare immediatamente il componente cercato con le sue caratteristiche.

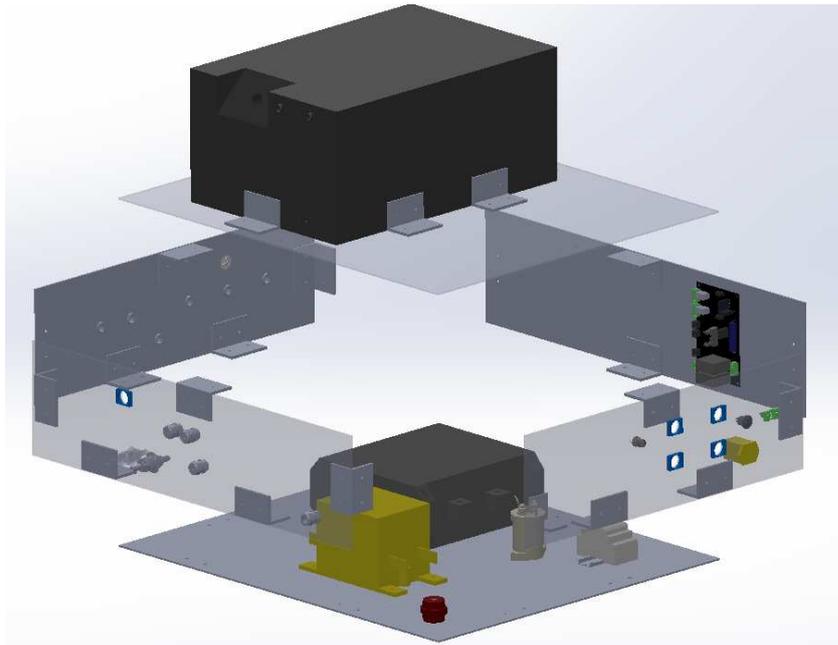


Figura 3.9: Vista Esplosa della Scatola comprensiva dei Componenti.

Il secondo filone riguarda invece lo stato delle connessioni, come già anticipato. In questa paragrafo è possibile trovare tutti gli schemi circuitali atti alla descrizione completa di tutte le connessioni elettriche presenti nel sistema unificato.

Innanzitutto si riporta in figura 3.10 lo schema unifilare della connessione monofase in alternata a 230 V:

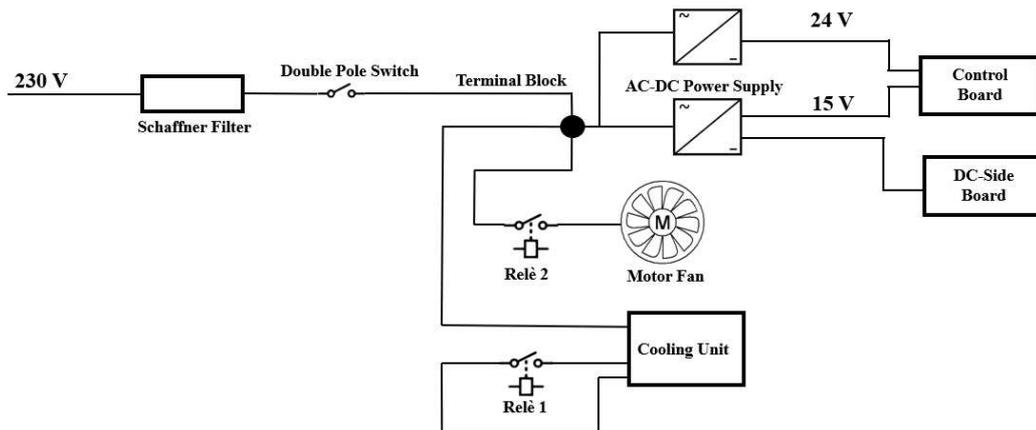


Figura 3.10: Schema Unifilare della Connessione Monofase a 230 V RMS.

L'alimentazione delle schede di Controllo e di Servizio, del torsionmetro, della ventola del motore e della pompa della Cooling Unit proviene da una linea esterna (del laboratorio) monofase in alternata a 230 V RMS. L'alimentazione arriva direttamente al filtro di ingresso Schaffner, poi all'interruttore a bilanciere montato anch'esso a parete, infine alla morsettiera comune. Successivamente, dalla morsettiera tre connessioni sono dirette verso i convertitori AC-DC Power Supply HDR, il quale alimenta il Power Supply NDR per il Torsionmetro, verso il relè 2 della scheda di Servizio (per poi andare direttamente verso la ventola del motore) e verso la pompa della Cooling Unit. Il relè 1 della Service Board serve per l'apertura o chiusura del circuito di raffreddamento, comandato direttamente dalla Control Board. L'alimentazione delle schede elettroniche a 15 V deriva dalla conversione AC-DC del Power Supply HDR, mentre quella a 24 V diretta al torsionmetro deriva dal Power Supply NDR.

In figura 3.11 si riporta dunque lo stato delle connessioni sopra descritte considerando il modello CAD della scatola, comprensivo dei componenti, visto dall'alto:

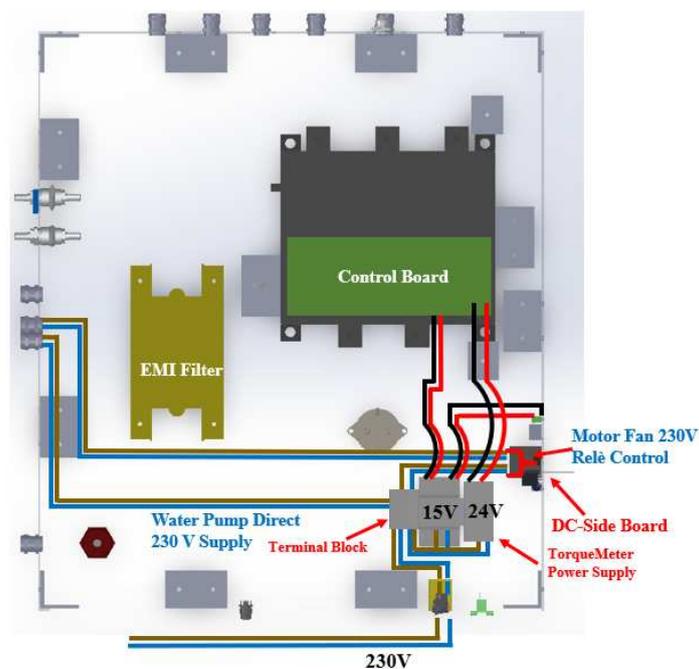


Figura 3.11: Stato delle Connessioni 230 V e 15 V.

Successivamente, si riporta in figura 3.12 lo schema unifilare della connessione monofase in continua a 600 V:

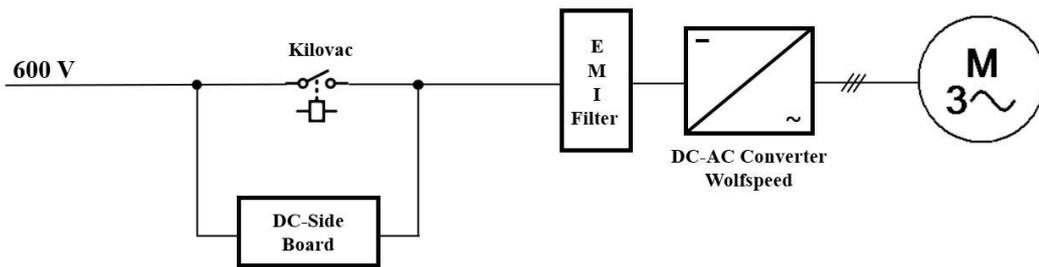


Figura 3.12: Schema Unifilare della Connessione Monofase a 600 V.

A partire da un alimentatore DC esterno a 600 V da laboratorio, la connessione si dirama tra il contattore principale Kilovac e la Scheda di Servizio. Nello specifico, quest'ultime connessioni sono analizzate più nel dettaglio in figura 5.15; infatti, la connessione parallela della scheda permette al sistema di effettuare correttamente le fasi di precarica o scarica. Tramite algoritmo di controllo si comanda l'apertura o la chiusura del contattore principale Kilovac in modo coordinato con le fasi di precarica o scarica; quando il contattore è chiuso, il ramo parallelo della scheda è aperto e viceversa se il contattore è chiuso. Dopo la gestione di queste fasi, la connessione a 600 V arriva al filtro EMI direttamente connesso al kit Wolfspeed.

In figura 3.13 si riporta quindi lo stato della connessione sopra descritta considerando il CAD tridimensionale:

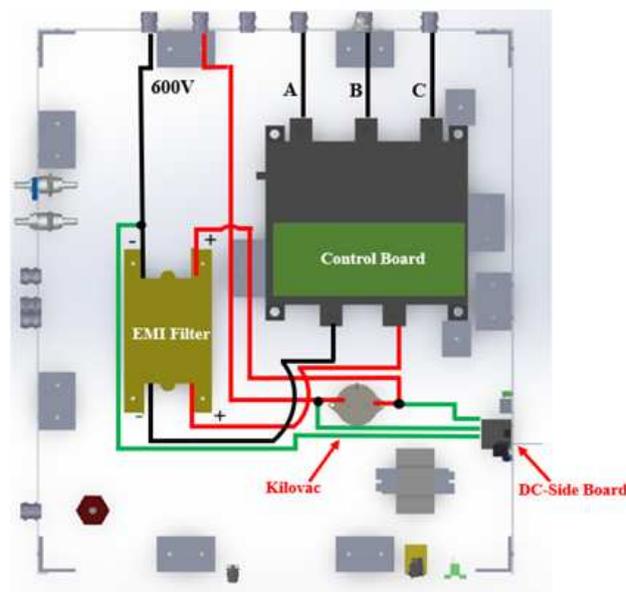


Figura 3.13: Stato delle Connessioni 600 V.

Infine, si riportano in figura 3.14 e 3.15 le connessioni elettriche di segnale e di terra:

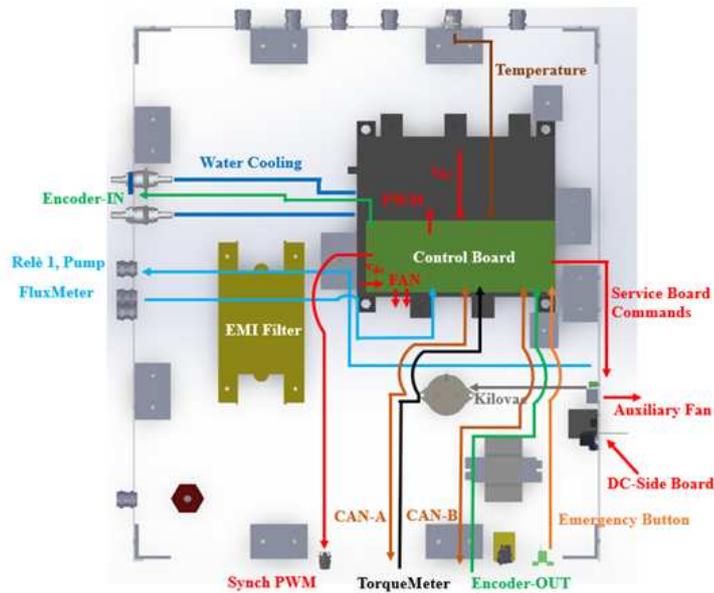


Figura 3.14: Stato delle Connessioni di Segnale.

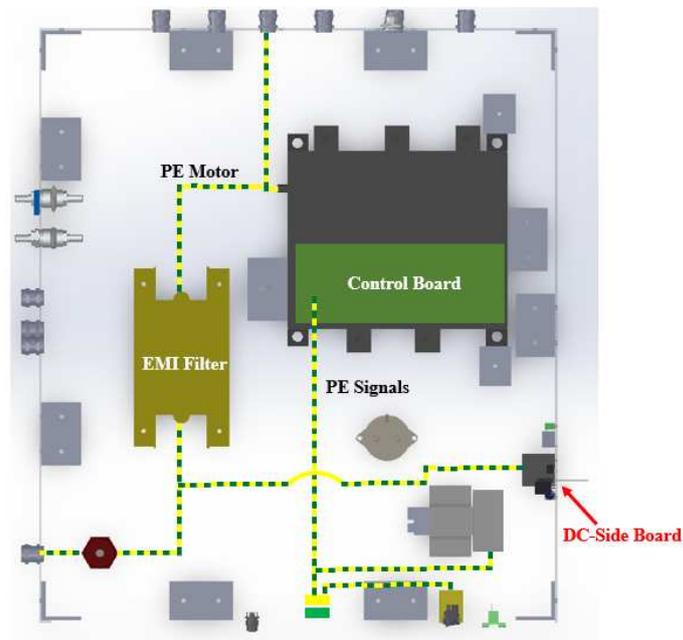


Figura 3.15: Stato delle Connessioni di Terra.

3.2.1 Integrazione dei Componenti Interni

In sezione 3.2 è stata introdotta la differenza tra componenti Interni e componenti Esterni, nonché gli obiettivi di ciascuna sezione che ne descrive le caratteristiche principali. Nello specifico, il processo descrittivo di ciascuno può essere così ordinato e riassunto:

1. Tipo di componente e funzione all'interno dell'assieme;
2. Disposizione nell'assieme;
3. Modello CAD tridimensionale, processo di modellazione o criticità riscontrate;
4. Figura del componente reale e comparazione con modello CAD;
5. Informazioni principali sul componente reale.

Il primo componente presente all'interno della scatola di contenimento è proprio il Device Under Test, ossia il convertitore elettronico di potenza. Come già descritto nel capitolo 1, il kit Wolfspeed CRD300DA12E-XM3 [2] è un inverter trifase da 300 kW. La sua funzione all'interno dell'assieme è adattare l'energia proveniente dall'alimentazione per soddisfare le richieste operative del motore; non solo, ma raccoglie in tempo reale dati e feedback di tensione, corrente, posizione, temperatura e coppia del motore.

La sua disposizione all'interno dell'assieme non è casuale, ma è posto in modo tale che le sue connessioni di fase siano direttamente affacciate alla parete rivolta verso le entrate delle fasi del motore, per facilitare quindi la loro connessione. Privilegiare questo tipo di connessione significa d'altra parte vincolare la posizione di tutte le altre connessioni del DUT, ossia quelle di DC-Link, del raffreddamento a liquido e di terra. Ne consegue che la disposizione dei componenti direttamente connessi al convertitore all'interno della scatola, come il contattore Kilovac, risulta vincolata per quanto descritto.

Si propone in figura 3.16 il confronto tra il modello CAD del kit Wolfspeed e l'oggetto fisico. Il modello CAD è stato realizzato a partire dalle misure prese direttamente sul Device disponibile in laboratorio; la precisione del modello ricade nell'ordine del millimetro e non ha riscontrato criticità particolari. Differentemente dal disegno quotato riportato nel suo datasheet [2], alcune misure o geometrie del kit non rispecchiano quelle reali dell'oggetto, come l'assenza delle alette laterali, fondamentali per la modellazione degli angolari ad L il cui scopo è la tenuta del Device sulla scatola.

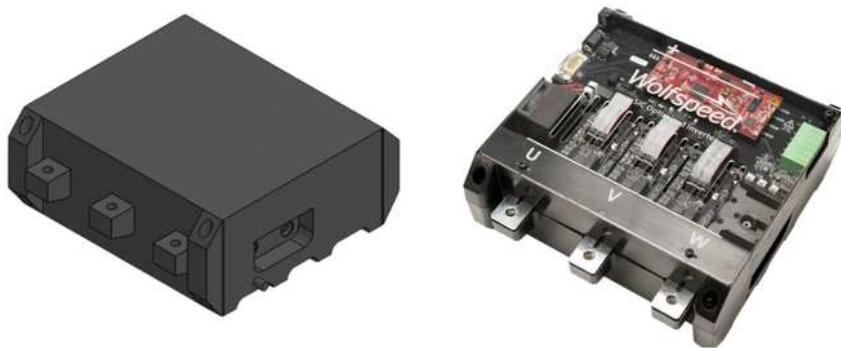


Figura 3.16: Confronto CAD del Wolfspeed.

Come già introdotto nel capitolo introduttivo 1, il kit Wolfspeed è caratterizzato da:

- **Tre moduli di potenza** CAB450M12XM3 [7] di tipo Half Bridge a SiC MOSFETs. I moduli presentano nominalmente tensione Drain-Source di 1200 V e corrente continua Drain-Source di 450 A (Temperatura del modulo a 25°C). In figura 3.17 si riporta uno dei tre moduli presenti nel kit, con lo schema circuitale e con la connessione tipica di ciascun modulo, tramite un bus Laminato predisposto per connettere i terminali positivo e negativo del DC-Link:

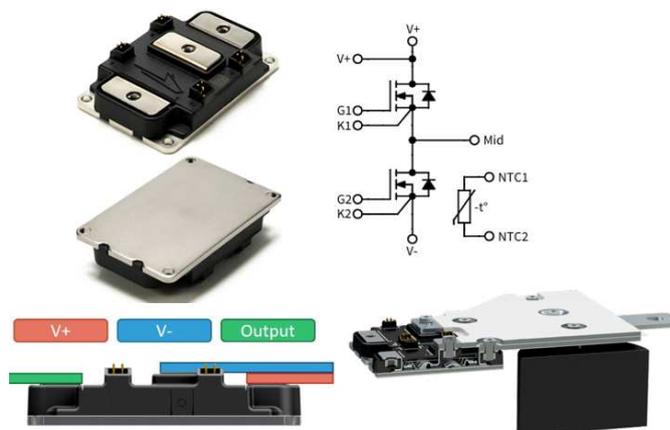


Figura 3.17: Moduli di Potenza del kit Wolfspeed.

- **Il convertitore** sopporta una tensione di DC-Link di 800 V e una corrente di fase efficace di 360 Arms, con frequenza di commutazione a 20 kHz e capacità totale di DC-Link di 300 μF ;

→ **Tre Schede Gate Driver** CGD12HBXMP [8] alimentate direttamente dalla scheda di Controllo e che, tramite quest'ultima, scambia segnali di stato del modulo di riferimento elaborati dal microcontrollore. In figura 3.18 si riporta la scheda Gate Driver in questione:



Figura 3.18: Schede Gate Driver del kit Wolfspeed.

Il secondo componente Interno analizzato è il filtro EMI, ossia il dispositivo al cui interno è presente il circuito progettato per ridurre o eliminare i disturbi elettromagnetici che potrebbero interferire con il funzionamento del sistema. I filtri EMI sono impiegati in molte applicazioni per garantire che i dispositivi rispettino le normative sulla compatibilità elettromagnetica (EMC); in questa applicazione è posto tra la sorgente di alimentazione a 600 V e l'inverter trifase, per la riduzione dei disturbi condotti, di modo comune e differenziale, o radiati.

All'interno dell'assieme il filtro è posizionato nelle vicinanze del convertitore per motivi logistici di spazio; la direzione del filtro è rivolta in modo tale che i terminali di connessione inverter siano orientati verso i terminali di DC-Link del convertitore.

In figura 3.19 si riporta quindi il modello CAD tridimensionale del filtro EMI scelto, ossia lo Schaffner FN2240-150-99-C2222-R99 [9]. Il processo di modellazione non ha subito particolari criticità e il modello è stato costruito a partire dalle misure e disegno quotato riportato nel datasheet [9] del componente.

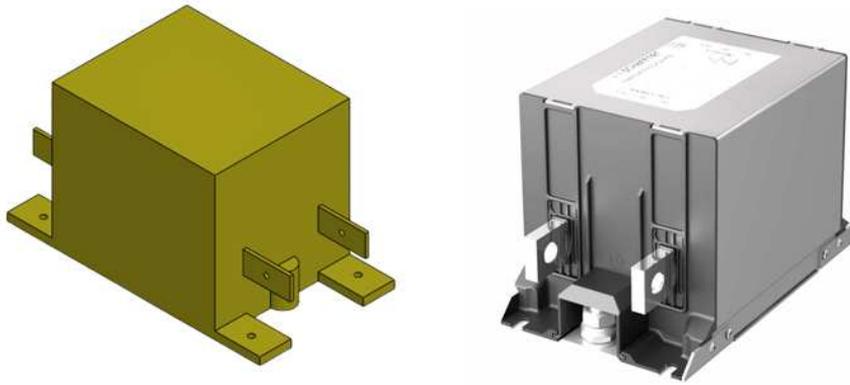


Figura 3.19: Confronto CAD del Filtro EMI.

Le informazioni tecniche principali del componente possono così essere riassunte:

- **Tensione Massima** Continua di 1000 V;
- **Corrente Nominale** di 150 A a 55°C;
- **Capacità** Cy1 e Cy2 di 330 nF;
- **Schema Circuitale** riportato in figura 3.20:

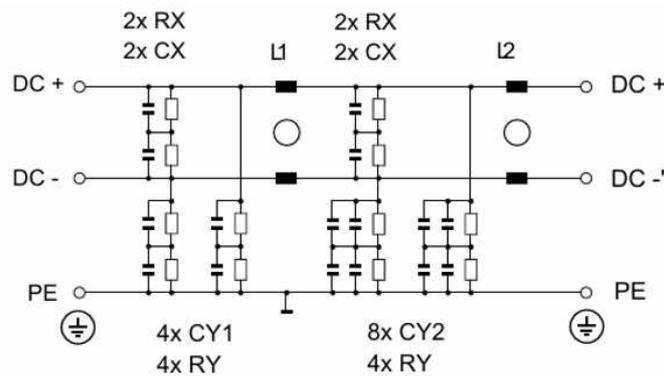


Figura 3.20: Schema Circuitale del Filtro EMI.

Successivamente, si riporta come componente Interno l'assieme formato dalla Barra DIN sulla quale sono montati sia gli alimentatori AC-DC che la morsettiera fase – neutro

230 V per 4 connessioni. Pertanto, la barra DIN serve come guida sulla quale fissare questi componenti all'interno della scatola, mentre l'alimentatore AC-DC HDR-60-15 [10] e AC-DC NDR-75-24 [11] serve per attuare la conversione monofase dalla linea in alternata a 230 V a quella in continua a 15 V per l'alimentazione delle schede elettroniche e a 24 V per l'alimentazione del torsiometro; la morsettiera CODICE277-11098-ND [12] serve invece come blocco terminale per connettere diversi componenti nel layout alla stessa linea monofase a 230 V RMS (figura 3.10).

Poiché la linea a 230 V arriva al pannello di alimentazione della scatola, la posizione dell' assieme è direttamente vincolata alle vicinanze immediate di quest'ultimo, per minimizzare il percorso delle connessioni.

In figura 3.21 si riporta dunque il modello CAD dell'assieme confrontato con quello reale dei componenti montati su barra; il processo di modellazione dei componenti è stato affrontato a partire dalle dimensioni riportate nei datasheet di ciascuno, così come per i precedenti.

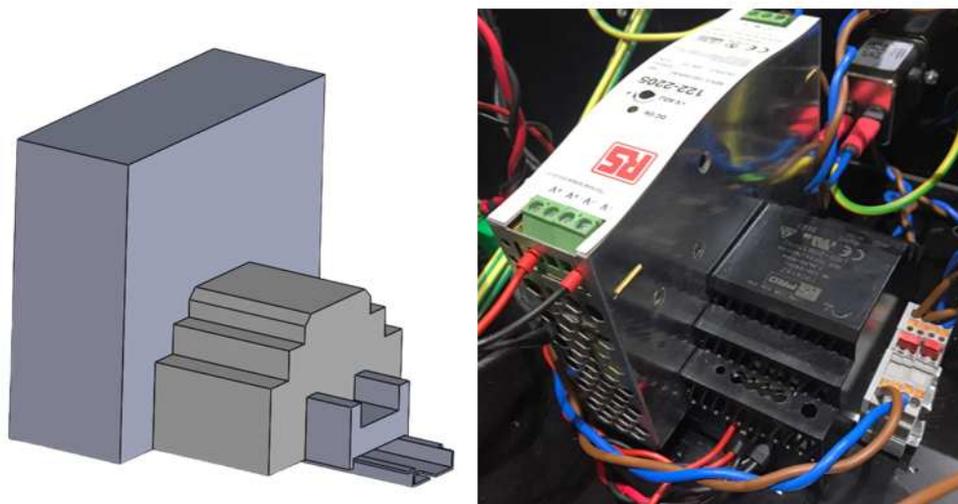


Figura 3.21: Confronto CAD dell'assieme dei Power Supply, Barra DIN e Morsettiera.

Si riportano quindi alcune caratteristiche principali di questo assieme:

- **Barra DIN** da 35 mm x 7.5 mm x 120 mm;
- **Power Supply HDR AC-DC** da Tensione di Input AC 85-264 V RMS a 47-63 Hz, Tensione di Output (2 canali) a 15 V DC, corrente nominale di Input a 1.2 A e di Output di 4 A. Potenza Nominale di 60 W;
- **Power Supply NDR AC-DC** da Tensione di Input AC 90-264 V RMS a 47-63 Hz, Tensione di Output (2 canali) a 24 V DC, corrente nominale di Input a 0.9 A e di Output di 3.2 A. Potenza Nominale di 75 W;
- **Morsettiera** a 4 connessioni monofase fase-neutro a 230 V RMS. Come già mostrato in figura 3.11, le connessioni servono per la ventola motore, per il Power Supply HDR, per la pompa della Cooling Unit e per l'arrivo della linea a 230 V dopo l'interruttore a bilanciere.

Per quanto riguarda invece il contattore principale Kilovac, il componente scelto è quello della serie LEV200 [13] a montaggio inferiore con avvolgimento alimentato a 12 V. Il ruolo di questo componente nell'assieme è stato già discusso nei capitoli precedenti; in breve, la chiusura o l'apertura del contattore avviene in maniera coordinata con le fasi di precarica o scarica del convertitore, comandate dalla scheda di controllo e attuate da quella di servizio.

All'interno della scatola è disposto nelle strette vicinanze sia della scheda di servizio (montata a parete, figura 3.37) che dei terminali di potenza del DC-Link, per minimizzare le connessioni da effettuare. Gli schemi circuitali proposti nella sezione 3.2 descrivono al meglio le connessioni realizzate all'interno della scatola.

Per quanto concerne il modello CAD tridimensionale del componente, non essendo presente fisicamente in laboratorio e non essendo previste delle quotature precise del componente nel datasheet [13], è stato deciso di scaricare un modello CAD già realizzato da TraceParts. In figura 3.22 si riporta la comparazione tra modello CAD e componente reale:

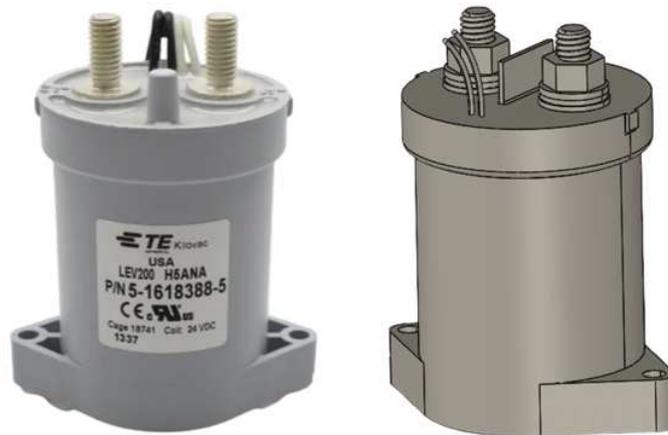


Figura 3.22: Confronto CAD del Contattore Kilovac.

Il contattore presenta alcune caratteristiche elettriche dell'avvolgimento riassunte in:

- **Tensione Nominale** dell'avvolgimento di 12 V;
- **Tensione di Dropout** di 1-2 V;
- **Resistenza** dell'avvolgimento di 11 Ω .

Infine, oltre ai componenti elencati, è prevista la disposizione di un piccolo isolatore da qualche kV, inserito per facilitare la connessione del circuito di terra verso l'ambiente esterno alla scatola e proteggere questa e i componenti nel caso in cui ci sia un guasto nel sistema. In figura 3.23 il modello CAD dell'isolatore realizzato a partire da quelli disponibili in laboratorio:



Figura 3.23: Confronto CAD dell'isolatore.

3.2.2 Integrazione dei Componenti Esterni

L'ordinamento proposto in sezione 3.2.1 è il medesimo anche per i componenti Esterni presentati di seguito. Come descritto in precedenza, per componenti Esterni si intendono tutte le tipologie di connettori a parete (denominati “a pannello”), i profili angolari ad L utilizzati per le tenute dei componenti che non presentano possibilità di fissaggio inferiore (ad esempio, il convertitore) e infine la Cooling Unit.

Il primo connettore a parete è il D-Sub Switchcraft standard a 9 vie [14]. Nel layout elaborato sono presenti 5 connettori D-Sub a 9 vie, nello specifico per le connessioni di Encoder Input e Output, Torsiometro e Canali di comunicazione CAN A e B. A seconda dell'applicazione, il pinout del connettore singolo cambia in base al numero di connessioni necessarie; nel capitolo 5.5 sono riportati i pinout per ciascuna applicazione.

La disposizione dei connettori è stata definita assegnando alla connessione di Input dell'encoder la parete più vicina all'entrata del cavo esterno dell'encoder, ossia quella della ventola del motore; gli altri 4 D-Sub sono montati sul pannello delle alimentazioni, per “centralizzare” le connessioni di segnale che l'operatore deve effettuare in un'area specifica.

Il processo di modellazione tridimensionale CAD è stato condotto a partire dalle dimensioni riportate sul datasheet del componente, utilizzando le tecniche presentate precedentemente. Il modello presenta solamente il rivestimento esterno per il montaggio a pannello, deficitando quindi del connettore di per sé; tuttavia, l'obiettivo in questa fase progettuale è la creazione di un modello abbastanza preciso finalizzato alla definizione dell'ingombro a parete e quindi della geometria del taglio da effettuare. In figura 3.24 si riporta lo stato del modello accompagnato dal componente reale:



Figura 3.24: Confronto CAD del Connettore D-Sub.

Non sono presenti particolari caratteristiche tecniche del componente, all'infuori di quanto riportato in precedenza; si tratta cioè di un connettore a parete femmina-femmina a 9 vie.

Il secondo componente Esterno analizzato e modellato è il Filtro ingresso IEC Schaffner FN9260-6-06 [15]. Questo modulo di ingresso combina un ingresso IEC, ossia una porta di alimentazione standardizzata che permette un collegamento sicuro alla rete elettrica, con un filtro di rete per l'attenuazione di Emissioni Condotte, e con 2 fusibili di protezione contro sovracorrenti. In questa applicazione specifica, questo componente riceve in ingresso la linea monofase a 230 V RMS e garantisce protezione e filtraggio alla stessa.

Il connettore a pannello è montato sulla parete delle alimentazioni, nell'intorno dell'interruttore a bilanciere e del Power Supply HDR, per minimizzare le connessioni da effettuare tra questi componenti.

Il modello CAD del filtro è stato realizzato a partire dalle dimensioni caratteristiche del componente riportate su datasheet. In figura 3.25 il confronto con quello reale:

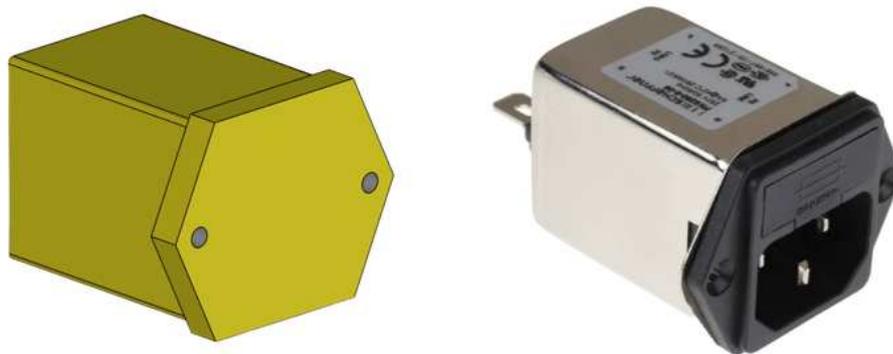


Figura 3.25: Confronto CAD del Filtro Schaffner.

Si riportano quindi alcune caratteristiche elettriche del filtro:

- **Tensione Massima** di 250 VAC, 50/60 Hz;
- **Range di Frequenza** da DC a 400 Hz;
- **Corrente Nominale** di 6 A a 40°C;
- **Schema Circuitale** del Filtro in figura 3.26, con Induttanza L di 0.3 mH, Capacità Cx e Cy di 0.1 μ F e 2.2 nF, Resistenza R di 1000 k Ω :

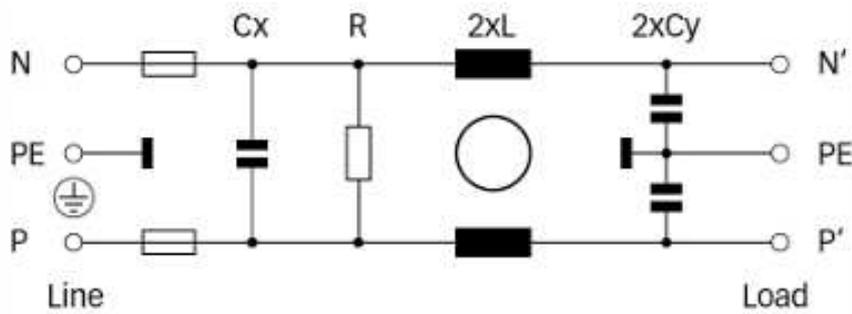


Figura 3.26: Schema Circuitale del Filtro Schaffner.

Presente anch'esso nella stessa parete, l'interruttore a bilanciere APEM MR210R5LBR [16] costituisce l'interruttore principale del sistema. La sua apertura porta dunque alla disalimentazione di tutti i carichi a valle della linea a 230 V, ossia le schede elettroniche, la ventola del motore e la pompa dell'acqua.

Come riportato in figura 3.10, questo interruttore segue direttamente il modulo di ingresso Schaffner e pertanto posto nelle sue immediate vicinanze.

Il modello CAD di questo componente non è stato invece realizzato da zero ma scaricato direttamente completo; questa scelta è stata effettuata per ottenere una precisione maggiore del modello che rispecchiasse l'ingombro millimetrico dell'interruttore. Il componente infatti presenta una piccola tacca laterale di fissaggio per l'incastro a parete; affinché il taglio del laminato potesse essere fatto rispettando questa caratteristica del componente, si è ritenuto necessario adottare un modello preciso già comprensivo della tacca laterale. In figura 3.27 lo stato del modello e del componente:



Figura 3.27: Confronto CAD dell'interruttore a Bilanciere.

Alcune informazioni tecniche del componente:

- **Tensione Nominale** 250 V RMS;
- **Corrente Nominale** 4 A;
- **Corrente Nominale** di 6 A a 40°C;
- **Resistenza contatti** Chiusi 20 mΩ e Aperti 100 MΩ.

Nell'interno dei componenti appena presentati è possibile trovare anche la morsettiera Phoenix Contact a 2 vie 0707109 [17]. Questa morsettiera gestisce la connessione del pulsante di emergenza azionabile dall'operatore esterno in caso di necessità; all'interno della scatola i terminali della morsettiera sono direttamente saldati ai cavi connessi alla scheda di controllo, che, secondo quanto detto in sezione 5.2, gestisce il segnale di Input EMG_MCU.

La morsettiera è posta sempre nella parete di alimentazione, essendo quella che raggruppa le connessioni di segnale più importanti che l'operatore deve gestire.

Il modello CAD è stato realizzato a partire dalle informazioni geometriche presenti nel datasheet del componente, attenționando il fatto che si tratta di una morsettiera ad una via; le dimensioni riportate nel datasheet sono infatti parametrizzate a partire proprio dal numero di vie presenti. In figura 3.28 si riporta dunque il confronto tra il modello CAD:

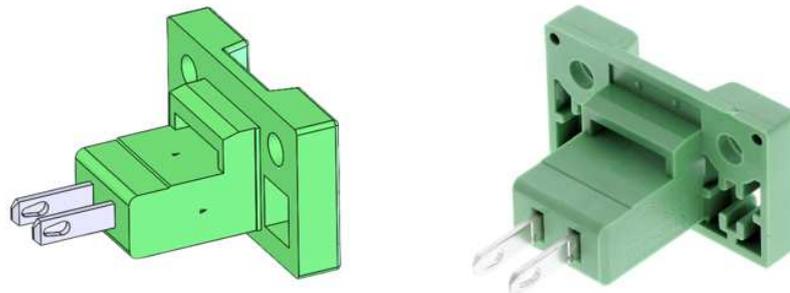


Figura 3.28: Confronto CAD della Morsettiera di Emergenza.

Per quanto riguarda le specifiche del pezzo:

- **Tensione Nominale** di di 630 V;
- **Corrente Nominale** di di 12 A;
- **Numero di contatti** pari a 2.

L'ultimo componente Esterno presente nella parete delle alimentazioni è l'assieme formato dal connettore circolare Binder femmina 12 poli con montaggio a pannello 09-3492-500-12 [18] e il corrispettivo circolare Binder maschio con montaggio su cavo 99-0491-12-12 [19]. L'insieme di questi due componenti permette la connessione dei segnali Input-Output di sincronizzazione PWM con la scheda di controllo del MUT, come discusso in sezione 5.2.

La disposizione di questo componente non è dettata da un particolare vincolo stringente, ma risulta più comodo avere nel pannello delle alimentazioni tutte le connessioni di segnale che l'operatore deve gestire.

Anche i modelli CAD di questi componenti sono stati scaricati da rete già completi, semplicemente poiché facilmente reperibili e con un elevato grado di dettaglio tecnico. In figura 3.29 il modello dei componenti insieme alla connessione di quelli reali:



Figura 3.29: Confronto CAD dell'assieme Connettori Binder.

Per quanto riguarda le principali caratteristiche tecniche:

- **Numero di Poli** pari a 12;
- **Tensione Nominale** di 30 V;
- **Corrente Nominale** di 1 A.

Passando invece al pannello rivolto verso le fasi del motore, un altro assieme simile al precedente è quello formato dal connettore circolare Amphenol Industrial femmina 14 poli con montaggio a pannello FLKC-14EGFS-GCP-001 [20] e il circolare maschio Amphenol Industrial con montaggio su cavo FLKC-14FGMS-GCP-213 [21]. All'interno del layout, questo insieme di componenti serve per gestire i segnali di Input provenienti dai 4 sensori di temperatura verso la scheda di controllo.

L'assieme è disposto nel pannello rivolto verso le fasi del motore poiché minimizza le connessioni necessarie per i sensori disposti sulle fasi dello stesso.

Il modello CAD di questo assieme, così come il precedente, è stato scaricato già completo e dettagliato; in figura 3.30 il confronto tra questi e i componenti reali:



Figura 3.30: Confronto CAD dell'assieme Connettori Amphenol.

Infine, le caratteristiche tecniche principali:

- **Numero di Poli** pari a 14;
- **Tensione Massima** di 800 V;
- **Corrente Nominale** di 2 A.

All'interno del layout meccanico sono presenti diversi Pressacavi, i quali consentono il passaggio dei cavi all'interno della scatola assicurando un'ottima tenuta degli stessi. In particolare, nell'assieme sono presenti due modelli simili di pressacavi, in relazione al range di diametri che li caratterizza; sono stati utilizzati infatti 7 pressacavi RS PRO 303-91-129 [22] da 10 – 14 mm di diametro del cavo e 3 pressacavi RS PRO 303-91-128 [23] da 6 – 12 mm di diametro del cavo, entrambi in nylon. I primi 7 sono adibiti all'installazione e tenuta delle fasi del motore, delle connessioni del DC-Link e per le due connessioni di terra previste nel layout. D'altra parte, i 3 pressacavi di diametro inferiore sono invece destinati all'installazione dei cavi per la ventola del motore, per l'alimentazione della pompa della Cooling Unit e per la sua connessione di controllo dello stato operativo.

La disposizione di tutti e 10 i pressacavi presenti è vincolata dalla posizione fisica nel layout dei cavi destinati a ciascun di essi; in particolare, si è scelto di posizionare una connessione di terra e le connessioni del DC-Link sullo stesso pannello delle fasi del motore, mentre tutti i pressacavi rimanenti sono stati posizionati sulla parete rivolta verso la ventola del motore. Ne consegue che, come analizzato più nel dettaglio in seguito, la Cooling Unit montata al di sopra della scatola è rivolta verso questo pannello, per semplificare e minimizzare le connessioni da effettuare.

I modelli CAD dei pressacavi sono stati scaricati già completi e dettagliati, principalmente a causa della loro complessità geometrica. In figura 3.31 segue il paragone con il componente reale (mostrato solo per il pressacavo da 10 – 14 mm, poiché quello di diametro inferiore è del tutto analogo):



Figura 3.31: Confronto CAD del Pressacavo di Diametro Maggiore.

Non sono presenti particolari caratteristiche tecniche di rilievo, tuttavia occorre considerare che il filetto del pressacavo per entrambi i modelli è un M20, il quale definisce il foro da effettuare nel pannello per il suo alloggiamento.

L'insieme dei connettori da parete si conclude con l'insieme dei componenti idraulici atti alla tenuta e passaggio dell'acqua di raffreddamento, dalla Cooling Unit al convertitore e viceversa; ne consegue che sono presenti due insiemi di componenti idraulici, identici fra di loro. Ciascun insieme è formato da 4 componenti, ossia:

1. Due Portagomma RS PRO 176-2022 [24] da 3/8 di pollice;
2. Una Boccola Riduttore RS PRO 176-1014 [25] Maschio da 1/2 di pollice – Femmina da 3/8 di pollice;
3. Un Raccordo pneumatico LEGRIS LF3000 0902 17 21 [26] Femmina da 1/2 di pollice – Femmina da 3/8 di pollice.

Poiché l'orientamento della Cooling Unit è vincolata per quanto detto precedentemente alla parete della ventola del motore, anche i due assiemi di tenuta dell'acqua sono posizionati nello stesso pannello.

I modelli CAD 3D di tutti i componenti sono stati scaricati già completi e dettagliati, al fine di rispettare quanto più fedelmente possibile le dimensioni dettate dalle filettature coniche idrauliche. Ottenuti tutti i modelli dei 3 componenti si è dapprima creato l'assieme del loro accoppiamento e successivamente lo stesso è stato integrato nel layout complessivo della scatola. In figura 3.32 segue il confronto tra i modelli CAD e l'assieme reale:

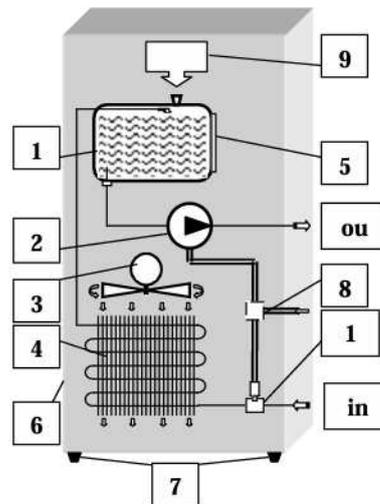


Figura 3.32: Confronto CAD dell'assieme della Connessione Idraulica da Pannello.

Anche per questa tipologia di componenti non sono presenti particolari caratteristiche tecniche di rilievo a parte le filettature, scelte per combaciare le une con le altre assicurando una tenuta quanto più salda possibile.

La Cooling Unit Cosmotec Industrial Cooling EWX20 [14] citata più volte in questa sezione si riferisce in particolare ad un'unità il cui scopo è il raffreddamento ad acqua o tramite miscele acqua/glicole delle macchine utensili che operano in ambienti industriali. In figura 3.33 si riporta lo schema circuitale idraulico dei componenti presenti al suo interno:

1. Serbatoio/i accumulo acqua/miscela.
2. Pompa per l'alimentazione della/e utenza/e.
3. Ventilatore/i raffreddamento della/e batteria/e.
4. Batteria/e raffreddamento.
5. Indicatore livello fluido.
6. Struttura in lamiera.
7. Piedini di supporto o fissaggio.
8. Connessioni elettriche
9. Riempimento
10. Accessori opzionali:
 - /P = Pressostato
 - /FL = Flussostato



SCHEMA LOGICO DI FUNZIONAMENTO

Figura 3.33: Circuito Interno alla Cooling Unit.

Il fluido contenuto nel serbatoio viene aspirato dalla pompa e inviato in pressione al carico da raffreddare. Al ritorno dal convertitore il fluido viene convogliato nei tubi della batteria di raffreddamento che, investita dal flusso d'aria generato dalla ventola ne provoca il raffreddamento; all'uscita della batteria il fluido viene recuperato nel serbatoio. Come già analizzato in precedenza, il convertitore di potenza presenta al suo interno uno scambiatore di calore a liquido per il raffreddamento dei moduli di potenza; la Cooling Unit è dunque adibita al raffreddamento del solo convertitore.

Per quanto riguarda la posizione dell'oggetto, il layout prevede che esso sia collocato al di sopra della scatola e poggi direttamente sul pannello superiore. Come già descritto in precedenza, l'unità è rivolta verso il pannello in cui presenti le entrate di tenuta del fluido di raffreddamento.

Il modello CAD del componente è stato realizzato a partire dalle misure prese direttamente sull'oggetto, poiché disponibile in laboratorio. In figura 3.34 segue il consueto confronto:

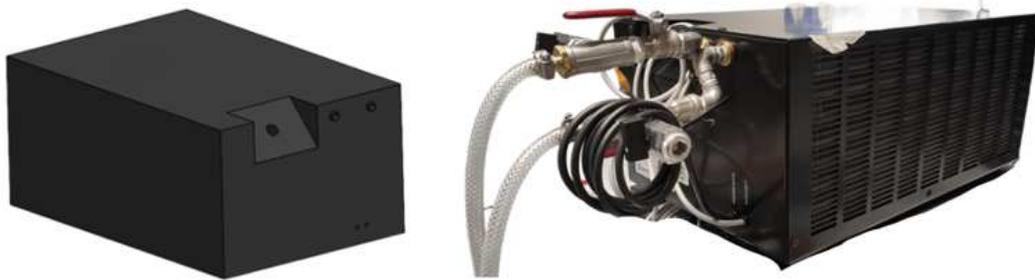


Figura 3.34: Confronto CAD della Cooling Unit.

Le principali caratteristiche tecniche dell'unità sono riassunte in:

- **Potenza Nominale** di 2 kW;
- **Temperatura Massima** dell'acqua di 60 °C;
- **Portata acqua** Minima e Massima di 0.25 – 9 lt/min;
- **Capacità Serbatoio** di 5 lt;
- **Potenza della Pompa** di 300 W, si tratta nello specifico di una pompa centrifuga;
- **Tensione di Alimentazione** della Pompa di 230 V RMS;
- **Peso** di 15 kg.

I profili angolari ad L che assicurano la tenuta del convertitore e della Cooling Unit sono gli stessi descritti in sezione 3.1; la differenza principale risiede nel taglio e nelle dimensioni di ciascuno. In particolare, per l'inverter sono stati utilizzati 4 angolari forati e per l'unità di raffreddamento 6.

Per quanto riguarda la tenuta del convertitore, si riporta in figura 3.35 l'insieme dei modelli CAD del Device, dei profili di tenuta e del pannello inferiore:

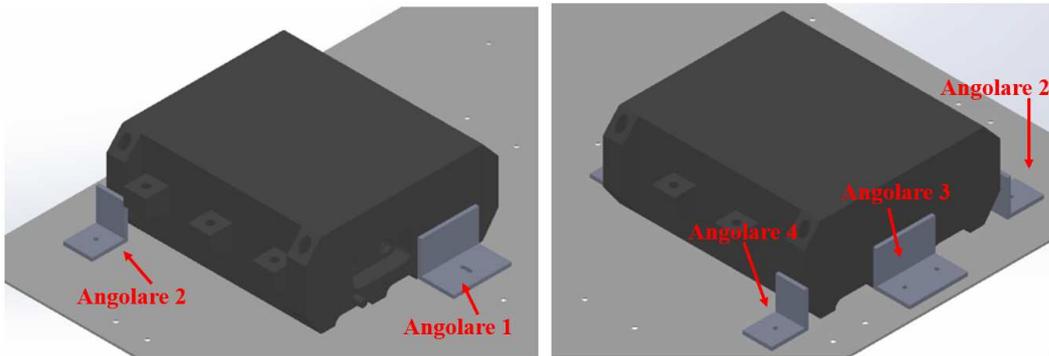


Figura 3.35: Particolare della Tenuta CAD del Wolfspeed.

Da cui:

- **Angolare 1:** Presenta un'asola M5 di 10 mm il cui scopo è l'operazione finale di fissaggio per la tenuta del Device. Il suo scorrimento consente di estrarre o fissare il convertitore al pannello inferiore;
- **Angolare 2 e 4:** Profili tagliati di lunghezza 40 mm (metà rispetto alle cerniere) e con un foro M5 non filettato;
- **Angolare 3:** Similmente alle cerniere, presenta lunghezza di 80 mm e due fori non filettati M5.

Per quanto riguarda la tenuta della Cooling Unit, in figura 3.36 l'insieme del pannello superiore, dell'unità e dei 6 angolari:

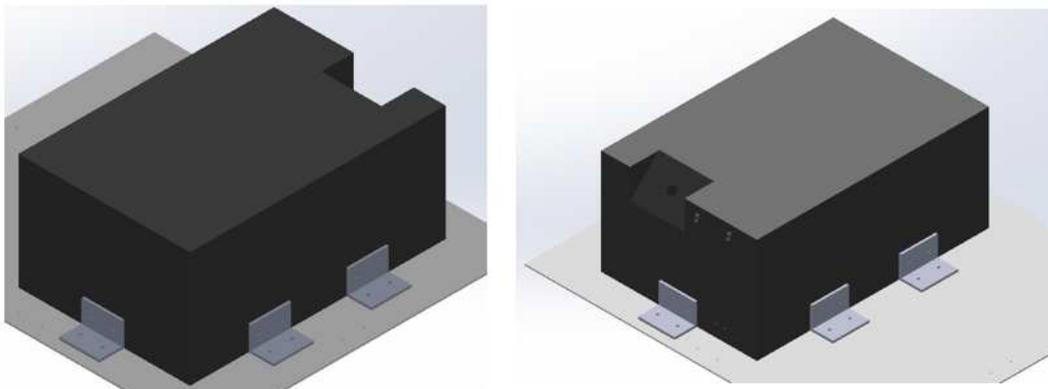


Figura 3.36: Particolare della Tenuta CAD della Cooling Unit.

Da cui i 6 angolari presenti sono tutti uguali e forati sulla base inferiore con fori M5 non filettati e, per una maggiore tenuta dell'oggetto, sono previsti due fori M4 filettati su ciascun angolare per il fissaggio diretto sulle pareti dell'unità.

Lo stato reale del fissaggio dei due dispositivi è invece discusso nel capitolo [5.5](#).

Infine, il PCB di servizio è montato direttamente sul pannello opposto a quello della ventola del motore e disposto nelle strette vicinanze della sezione di alimentazione e del Power Supply HDR; attraverso questo posizionamento è possibile minimizzare le connessioni da effettuare tra le due schede elettroniche, le loro alimentazioni e tra il contattore Kilovac e il PCB di servizio. In figura [3.37](#) si riporta dunque il modello CAD della scheda, ottenuto tramite l'estensione Altium Co-Designer per SolidWorks 3D, direttamente montato sul pannello laterale:

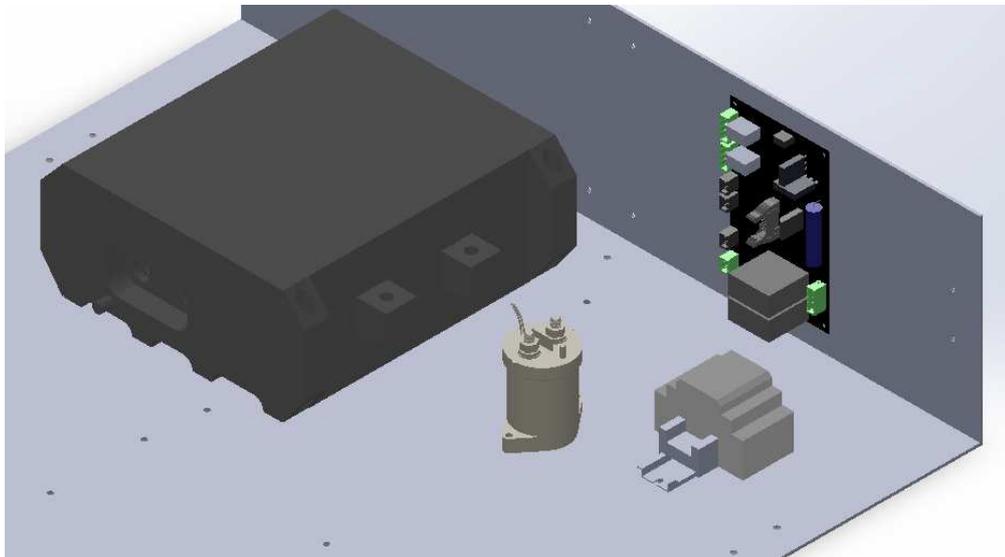


Figura 3.37: Particolare della sezione di Alimentazione Schede Elettroniche.

Lo stato reale dei componenti mostrati in figura, delle loro connessioni e tenute è mostrato nella sezione [5.5](#).

3.3 CAD Meccanico del Banco Prova

3.3.1 Integrazione del Castello

Affinché la scatola contenitiva in alluminio, comprensiva di tutti i componenti analizzati finora, possa essere correttamente integrata nel banco prova, è necessario realizzare un layout meccanico di sostegno strutturale della stessa. Quest'ultimo prende il nome di Castello; esso permette di accoppiare il banco prova e la scatola rispettando i vincoli fisici di ingombro presenti.

Considerare la presenza di una layout di questo tipo risulta vantaggioso nei confronti dell'utente che si interfaccia al banco, poiché ogni connessione di segnale o di potenza necessaria al funzionamento del sistema è di fatto centralizzata in una struttura ben precisa, non ingombrante e montata direttamente sopra il banco prova.

Il processo di realizzazione del Castello inizia tramite la sua modellazione CAD tridimensionale, all'interno dell'assieme costituito dalla scatola, dal banco prova e dal motore. Innanzitutto, occorre considerare che l'ingombro totale del Castello non deve risultare "soffocante" nei confronti del sistema, ossia l'ingombro totale non deve impedire:

- La realizzazione delle connessioni elettriche e idrauliche progettate nella sezione [3.2](#);
- Che l'operatore possa lavorare in sicurezza senza la possibilità di impatto o danneggiamento della struttura;
- Che l'operatore possa accedere a tutte le parti, pannelli o connettori della scatola, ovunque siano posizionati, per manutenzione o modifica delle disposizioni;
- Che la scatola possa essere montata o smontata più volte, assicurandone dunque la facilità di montaggio.

Pertanto, l'obiettivo principale del processo di modellazione tridimensionale è la realizzazione di una struttura che assicuri quanto elencato e che sia al contempo abbastanza robusta da sostenere la scatola e i componenti al suo interno senza il rischio che questa si deformi nel tempo.

Il layout proposto in questa fase è riportato in figura [3.3](#), in sezione [3](#). Il Castello si compone quindi di 6 soli profili angolari ad L [\[6\]](#), i medesimi il cui taglio compone le cerniere della scatola e le tenute del convertitore e unità di raffreddamento. In figura [3.38](#) si presenta una vista esplosa dell'intero assieme SolidWorks:

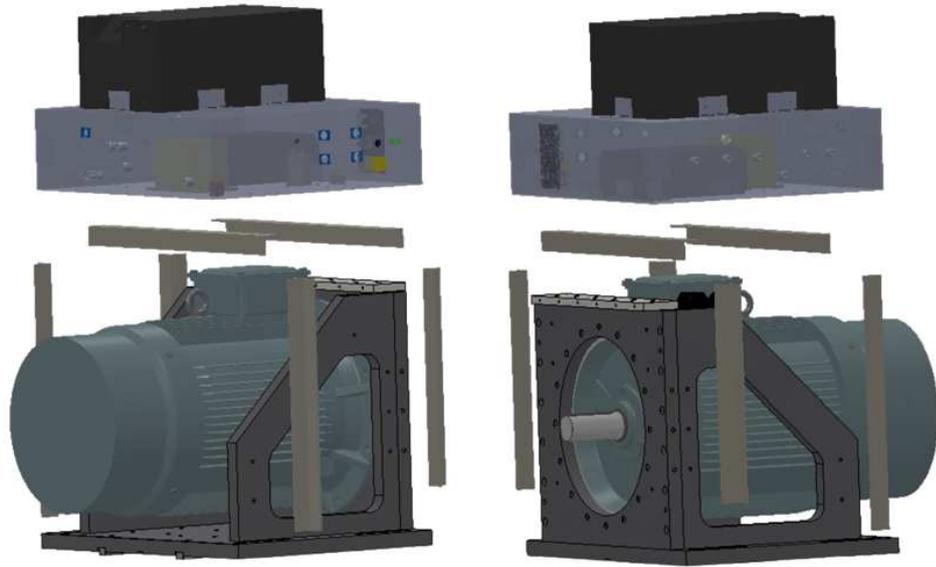


Figura 3.38: Vista Esplosa dell'Assieme Globale.

L'assieme del Castello è composto da:

- **Due profili angolari da 750 mm**, il cui scopo è il sostegno della scatola;
- **Due profili angolari da 640 mm**, accoppiati con un profilo angolare da 750 mm e con il banco nella parte posteriore;
- **Due profili angolari da 550 mm**, accoppiati con un profilo angolare da 750 mm e con il banco nella parte anteriore.

L'accoppiamento del Castello, e quindi dei profili angolari ad L, con i componenti presenti nell'assieme, può essere riassunto in tre fasi:

1. Accoppiamento degli angolari laterali al banco prova;
2. Accoppiamento tra gli angolari laterali e quelli di sostegno orizzontali;
3. Accoppiamento tra gli angolari di sostegno e la scatola.

La prima fase descrive il modo in cui gli angolari da 640 mm e 550 mm sono accoppiati con la struttura meccanica del banco prova. Quest'ultima è formata da un insieme di forature filettate M8, presenti per facilitare la possibilità di accoppiamento del banco con eventuali strutture esterne. Pertanto, agli angolari laterali sono state applicate delle

filettature M8 in corrispondenza di quelle già presenti nel banco; l'accoppiamento tra le forature avviene in modo tale che la scatola, una volta posta al di sopra degli angolari di sostegno, abbia una distanza di "sicurezza" dal motore e dal banco di circa 50 mm. In figura 3.39 si riporta l'accoppiamento di due angolari laterali con le filettature M8 del banco:

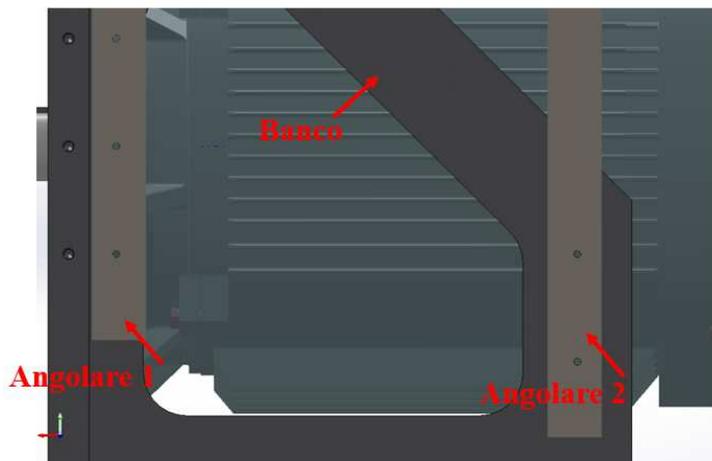


Figura 3.39: Particolare dell'Accoppiamento Angolare e Banco.

La seconda fase descrive invece il modo in cui gli angolari laterali sono accoppiati con quelli orizzontali di sostegno della scatola. Questo tipo di accoppiamento è realizzato ponendo gli angolari di sostegno ortogonalmente rispetto ai laterali e praticando delle filettature M8 di incastro e tenuta dei profili, gli uni con gli altri. In figura 3.40 si riporta il particolare relativo a questo tipo di accoppiamento:

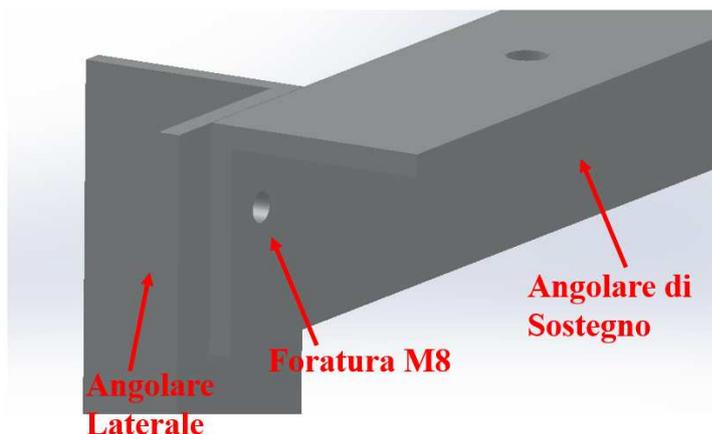


Figura 3.40: Particolare dell'Accoppiamento Angolare Laterale e Angolare di Sostegno.

Infine, la terza fase descrive l'accoppiamento effettuato tra gli angolari di sostegno e la scatola di contenimento. La scatola è direttamente poggiata sui due angolari da 750 mm e fissata ad essi tramite forature M8 praticate lungo tutta la superficie degli angolari rivolta verso la scatola. Così come per tutte le forature praticate sul pannello inferiore della scatola, anche le forature non filettate M8 sono a testa svasata; in figura 3.41 si riporta una vista dall'alto della scatola in cui è possibile valutare come le forature praticate (cerchiate in rosso) siano state realizzate in modo tale da non entrare in conflitto con i componenti presenti all'interno della scatola:

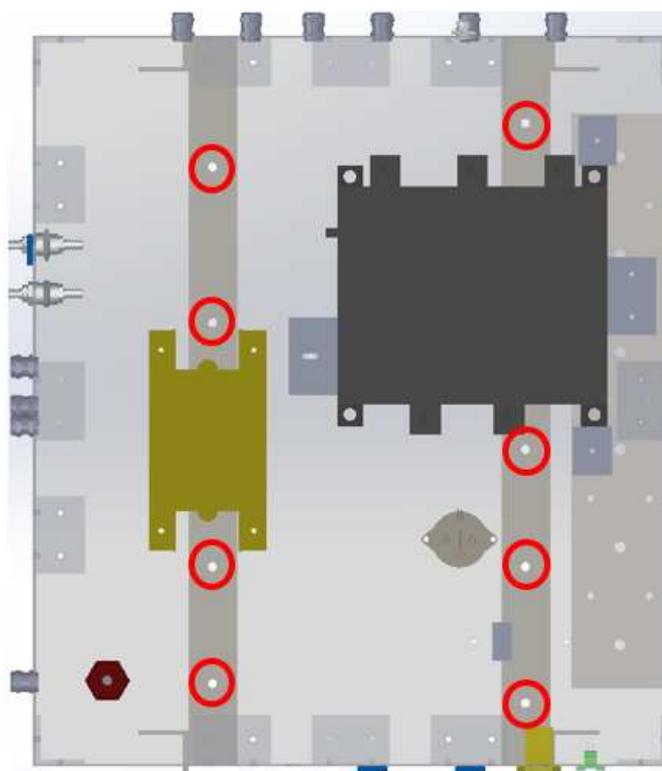


Figura 3.41: Accoppiamento tra Angolare di Sostegno e Scatola.

3.3.2 Generazione del File di Foratura e dei Disegni Quotati

Il processo di sviluppo del layout meccanico del sistema unificato si conclude con la generazione dei file di foratura e dei disegni quotati, indispensabili per la creazione fisica dei pannelli, degli angolari e delle forature applicate a ciascuno. I file descritti in questa sezione non sono stati generati unicamente con l'obiettivo di fornire un supporto di riferimento agli operatori addetti alla creazione dei componenti necessari, ma anche agli utenti che interagiscono con il sistema.

Il File di Foratura è sostanzialmente un file Excel in cui sono riassunte tutte le forature presenti in ciascun pannello e per ogni componente, Interno ed Esterno. Coordinatamente con la numerazione di ogni foro, riportata nei Disegni Quotati, il file di foratura identifica:

- Il pannello di appartenenza;
- Il tipo di foro, ad esempio se filettato, svasato o semplicemente passante;
- Informazioni sul foro, ad esempio la grandezza standard o il diametro;
- La quantità necessaria nel pannello per quel tipo di foro;
- Il tipo di componente associato al singolo o all'insieme di più fori.

In figura 3.42 si riporta un estratto del file comprensivo di quanto appena elencato:

Parete	Numero Quotatura	Tipo Foro	Info Filetto	Quantità	Info Generiche
Lato Ventola	Da 1 a 10	Foratura	M5	10	Fori per Profili Angolari a L per Fissaggio Pareti della Scatola
Lato Alimentazioni	Da 1 a 10	Foratura	M5	10	
Lato Albero Motore	Da 5 a 12	Foratura	M5	8	
Lato Fasi Motore	Da 1 a 10	Foratura	M5	10	
Parete Superiore	Da 1 a 8	Filettatura	M4	8	
Base	Da 1 a 4	Svasatura	M5	14	
	Da 7 a 10	Svasatura	M5		
	Da 15 a 18	Svasatura	M5		
Lato Ventola	24 & 25	Svasatura	M5		
	13	Foratura	∅ 24mm	1	
	11	Foratura	∅ 3.5mm	1	
	12	Foratura	∅ 3.5mm	1	
	16 & 17	Foratura	M20	2	2 Pressacavi M20 per Cavi Cooling
	18	Foratura	M20	1	1 Pressacavo M20 per Ventola Motore
	19	Foratura	M20	1	1 Pressacavo M20 per Terra Ausiliari
14 & 15	Foratura	M20 (1/2 pollice)	2	2 Riduttori Cilindrici 1/2 pollice per Cooling WolfSpeed	

Figura 3.42: Estratto del File Excel delle Forature del Layout.

Il numero totale di forature presenti nell'insieme è quindi riportato a valle del file. In figura 3.43 il computo finale:

Totali	Forature	Filettature	Testa Svasata	Rettangoli
	92	12	27	2

Figura 3.43: Computo Totale del numero di Fori presenti nel Layout.

Per quanto riguarda invece i Disegni Quotati, ciascuna tavola è stata creata utilizzando la funzione “Crea Disegno della Parte” di SolidWorks 3D. Questa funzione apre una sezione del software adibita unicamente alla creazione dei disegni quotati; il menù utilizzato per la loro creazione comprende le funzioni riportate in figura 3.44:

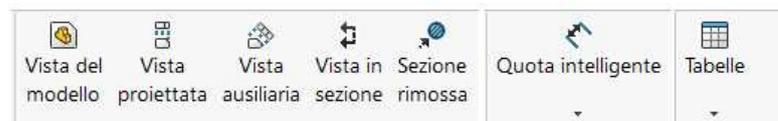


Figura 3.44: Menù di SolidWorks 3D adibito alla creazione dei Disegni Quotati.

Innanzitutto, tramite la Vista del modello è possibile aprire la parte da quotare nel foglio di formato selezionabile dall’utente (nel progetto sono stati utilizzati A4 e A3); successivamente si decide il tipo di prospettiva da utilizzare e le viste presenti. Per tutti i componenti quotati sono state sempre utilizzate proiezioni assonometriche isometriche con viste frontali, dall’alto, laterali e talvolta viste ausiliarie o in sezione. In ogni disegno è presente una prospettiva isometrica tridimensionale del componente, per facilitare la comprensione geometrica del pezzo; non solo, ma è anche presente il numero identificativo della quantità di pezzi da produrre per ciascun componente.

In figura 3.45 si riporta un esempio di disegno quotato per una delle cerniere presenti all’interno della scatola, nello specifico per la tenuta del pannello superiore e quindi con foratura filettata M4:

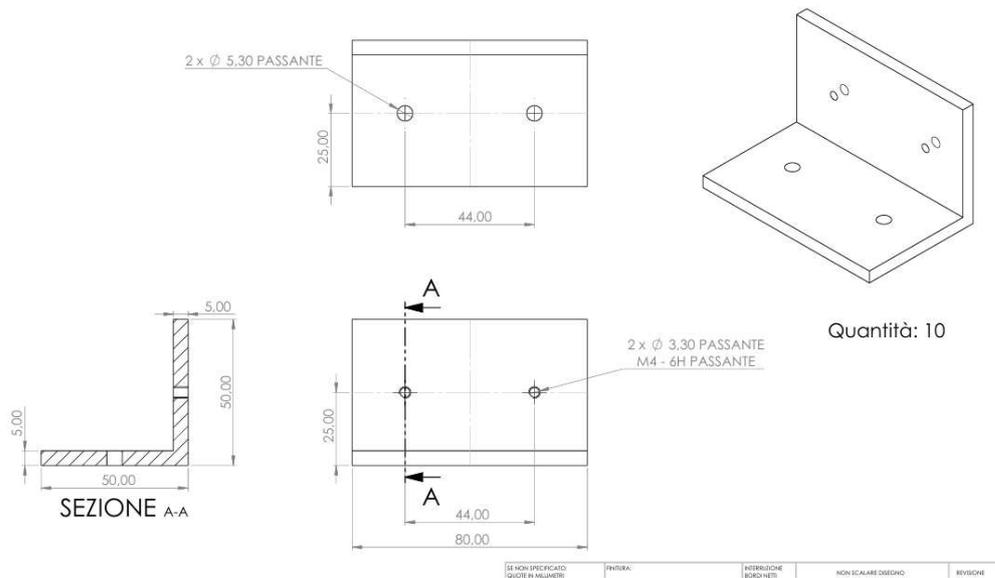


Figura 3.45: Esempio di Disegno Quotato delle Cerniere Filettate.

Il disegno presenta le caratteristiche sopra descritte; non solo, ma tramite la funzione “Quota Intelligente” è stato possibile apporvi tutte le quotature necessarie per la creazione del pezzo. La quotatura è automatica, ossia selezionando lo spigolo da quotare SolidWorks ne valuta automaticamente la lunghezza. Successivamente, tramite dei Label di testo sono state aggiunte delle informazioni testuali che arricchiscono il disegno e specificano informazioni riguardo, ad esempio, le forature o la quantità del componente.

In figura 3.46 si riporta invece il disegno quotato di un pannello della scatola, in particolare quello al quale arrivano tutte le connessioni di alimentazione e di segnale:

Scheda	Loc X	Loc Y	Dimensione
1	25	78	Ø 5,30 PASSANTE
2	25	122	Ø 5,30 PASSANTE
3	178	25	Ø 5,30 PASSANTE
4	222	25	Ø 5,30 PASSANTE
5	300	175	Ø 5,30 PASSANTE
6	344	175	Ø 5,30 PASSANTE
7	422	25	Ø 5,30 PASSANTE
8	466	25	Ø 5,30 PASSANTE
9	619	78	Ø 5,30 PASSANTE
10	619	122	Ø 5,30 PASSANTE
11	264	130	Ø 15,50 PASSANTE
12	332	70,50	Ø 3,50 PASSANTE
13	332	130,50	Ø 3,50 PASSANTE
14	356	89,50	Ø 3,50 PASSANTE
15	356	149,50	Ø 3,50 PASSANTE
16	432	70,50	Ø 3,50 PASSANTE
17	432	130,50	Ø 3,50 PASSANTE
18	456	89,50	Ø 3,50 PASSANTE
19	456	149,50	Ø 3,50 PASSANTE
20	344	80	Ø 24,00 PASSANTE
21	344	140	Ø 24,00 PASSANTE
22	444	80	Ø 24,00 PASSANTE
23	444	140	Ø 24,00 PASSANTE
24	496	57	Ø 3,20 PASSANTE
25	532	57	Ø 3,20 PASSANTE
26	514	110	Ø 20,00 PASSANTE
28	557	116	Ø 3,20 PASSANTE
29	577	116	Ø 3,20 PASSANTE

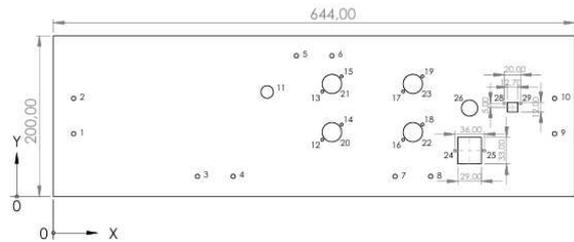


Figura 3.46: Esempio di Disegno Quotato del Pannello delle Alimentazioni.

Dal disegno quotato riportato è possibile notare come non sia presente solamente la vista frontale del pannello, ma anche la tabella contenente le coordinate geometriche di ciascun foro, insieme alle informazioni principali di ognuno necessarie alla loro realizzazione.

La tabella può essere creata automaticamente dalla funzione “Tabelle” riportata nel menù di questa sezione; tuttavia, prima della sua creazione occorre specificare sia la parete del componente in cui sono presenti i fori da caratterizzare, sia la posizione nella vista dell’origine, ovvero il punto a partire dal quale sono generate automaticamente le coordinate (x,y) dei fori. Ad esempio, il pannello in figura presenta l’origine posizionata sul vertice in basso a sinistra sulla vista frontale.

Infine, il taglio del pannello per i componenti Filtro ingresso IEC Schaffner FN9260-6-06 [15] e Morsettiera Phoenix Contact a 2 vie 0707109 [17], ha forma rettangolare. Poiché nel laboratorio di realizzazione dei manufatti non è possibile realizzare delle geometrie di taglio perfettamente rettangolari, sono state praticate delle forature smussate e più circolari che solo successivamente sono state rese conformi alle esigenze di progetto; quest’ultima criticità è affrontata più nel dettaglio nella sezione 5.5.

Capitolo 4

Controllo Motore

La realizzazione di un sistema unificato specifico per un banco prova esistente necessita della stesura di un algoritmo di controllo motore efficace che sia in grado di rispondere alle diverse condizioni di funzionamento desiderate dall'operatore. Il controllo, di coppia o di velocità, deve essere preciso, affidabile e ad elevate prestazioni dinamiche. Il progetto di tesi esplora diverse soluzioni di controllo motore, ma nel dettaglio predilige la stesura ed utilizzo effettivo dell'algoritmo di controllo denominato "Flux Polar Control", o FPC.

Dunque, all'interno di questo capitolo è possibile riscontrare non solo la presenza di richiami delle modalità di studio delle macchine elettriche ac da un punto di vista prevalentemente "controllistico", ma si riporta anche una breve panoramica circa gli algoritmi più basilari di controllo motore ad oggi diffusi ed impiegati nei settori industriali e della trazione elettrica, per poi incentrarsi totalmente sull'analisi dei blocchi funzionali e mappe di controllo che costituiscono l'algoritmo FPC, ovvero il proposito principale di questo capitolo.

L'obiettivo delle analisi che seguono è dapprima fornire un insieme di nozioni di natura controllistica che possa servire da base di partenza per le descrizioni più specifiche degli algoritmi di controllo considerati; non solo, ma il capitolo è fortemente incentrato sullo studio ed implementazione dell'algoritmo FPC.

Per quanto riguarda l'approccio considerato, la prima fase di panoramica sulle macchine ac, la loro modellazione e i controlli base più diffusi è caratterizzata principalmente da una serie di figure e formulazioni finalizzate a fornire delle chiavi di lettura di ciò che è presentato nella seconda. Questa, incentrata sull'analisi dei blocchi funzionali e mappe di controllo dell'FPC, descrive le fasi del processo di sviluppo del controllo fornendo, quando necessario, qualche linea di codice a sostegno di quanto considerato.

I Software adottati per la creazione di blocchi funzionali e delle mappe di controllo sono stati:

- **PLECS** (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation), software utilizzato per la simulazione di circuiti elettronici di potenza e sistemi dinamici, attraverso il quale è stato possibile costruire l'algoritmo di controllo dapprima tramite blocchi e connessioni e successivamente tramite una funzionalità di scripting basata su MATLAB;
- **MATLAB** Script, per la stesura degli algoritmi necessari alla realizzazione delle mappe di controllo, quali Look-Up Tables monodimensionali e bidimensionali. Non solo, ma ai fini della corretta integrazione del controllo FPC, è stato necessario ricavare delle simulazioni di tipo Montecarlo per assicurarne il funzionamento in ogni condizione operativa.

4.1 Richiami di Modellazione Macchine ac e di Algoritmi di Controllo

4.1.1 Modellazione Macchine ac e IPM

La modellazione delle macchine elettriche in corrente alternata (ac) riveste un ruolo fondamentale nell'analisi e nel controllo di motori sincroni o asincroni. Tuttavia, le caratteristiche intrinseche delle macchine ac, ossia la natura trifase delle grandezze elettromagnetiche e la loro dipendenza temporale, rendono complesso lo studio e le simulazioni affrontate per il controllo delle stesse. Per superare queste complessità, si adotta un approccio che trasforma le grandezze del sistema trifase in un sistema di riferimento più semplice, bifase e rotante; operando in questo modo, le grandezze elettriche e magnetiche possono essere riscritte in termini di componenti continue in condizioni stazionarie, preservando il loro "significato" fisico originale. Questa trasformazione, resa possibile attraverso tecniche matematiche, cambia solo il "punto di vista" della grandezza, ovvero il modo in cui la stessa è rappresentata nelle strategie di controllo adottate.

Questa sezione si propone di richiamare i concetti principali della modellazione delle macchine ac, introducendo le trasformazioni necessarie per passare dal dominio trifase al dominio bifase e rotante, discutendone le implicazioni fisiche e matematiche.

Innanzitutto, a seguire si riportano una serie di principi di base della modellazione delle macchine ac, caratterizzati da un approccio di natura controllistico:

- **Trasformazioni dei Sistemi di Riferimento.** In un sistema trifase, le grandezze elettromagnetiche hanno andamento sinusoidale e variabile nel tempo, il che ne rende complesso l'analisi e il controllo. Convertendo le grandezze in un sistema bifase rotante le equazioni elettriche, magnetiche e della coppia elettromagnetica si semplificano notevolmente, trattando grandezze quasi stazionarie nel tempo (e nello spazio). Dal punto di vista dell'algoritmo di controllo, con grandezze continue, è più semplice progettare il funzionamento dei regolatori PI per la regolazione dei sistemi di controllo di coppia (in corrente o in flusso) e velocità. In figura 4.1 si riportano i 3 Sistemi di Riferimento coinvolti nelle trasformazioni descritte in seguito:

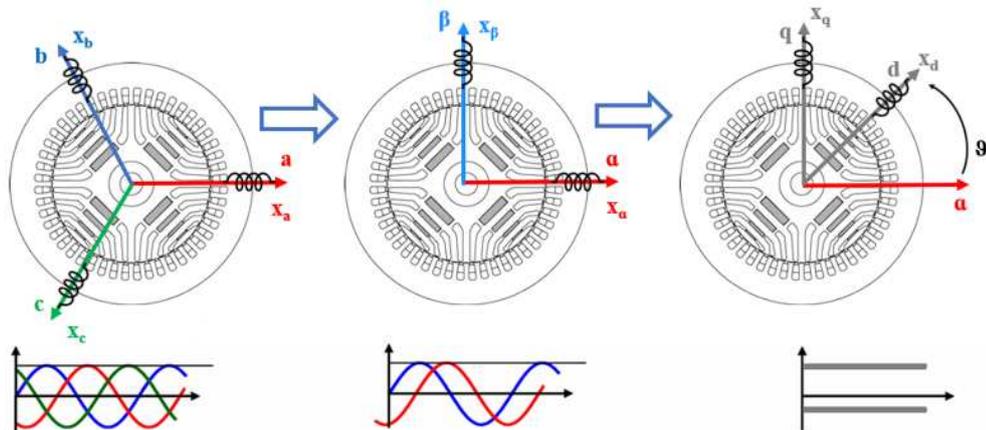


Figura 4.1: Sistemi di Riferimento per la Modellazione delle macchine ac [27].

- Rappresentazione Vettoriale.** Le tre fasi delle macchine elettriche ac sono caratterizzate istantaneamente da valori specifici di grandezze di fase, quali correnti, tensioni e flussi concatenati. Per poterne studiare il comportamento nel tempo, occorre dapprima associare a tali grandezze dei vettori spaziali che, a seconda dell'orientazione dell'asse magnetico di ciascun avvolgimento, presentano una disposizione ben precisa. Ogni vettore ha un significato fisico ben preciso e, ad esempio, tramite la differenza angolare di due particolari vettori è possibile effettuare determinate considerazioni elettromagnetiche.

La “vettorizzazione” delle grandezze di fase (ad esempio le 3 correnti di fase (i_a, i_b, i_c) della macchina) viene effettuata tramite i 3 versori $(\bar{1}, \bar{a}, \bar{a}^2)$ direzionati nello spazio lungo i 3 assi magnetici degli avvolgimenti, disposti a 120° el fra di loro. La somma vettoriale (scalata, spiegato a seguire) delle grandezze di fase ormai vettorizzate $(\bar{x}_a, \bar{x}_b, \bar{x}_c)$ permette di ricavare un unico vettore spaziale “ \bar{X} ” che ha un preciso significato fisico a seconda della grandezza fisica considerata.

Tuttavia, lo stesso vettore spaziale può essere espresso in un sistema di riferimento bifase, come il piano complesso di assi (α, β) , o ancora in un sistema di riferimento bifase rotante. Il significato fisico del vettore non cambia, varia il modo in cui ci si riferisce al vettore, ad esempio le componenti utilizzate nella sua analisi e il loro andamento temporale.

In figura 4.2 segue la rappresentazione vettoriale di un vettore generico, secondo quanto appena descritto, a componenti omopolari nulle (si dimostra che le proiezioni del vettore sugli assi trifase dipende dalla componente omopolare), considerando sia il sistema trifase che bifase non rotante:

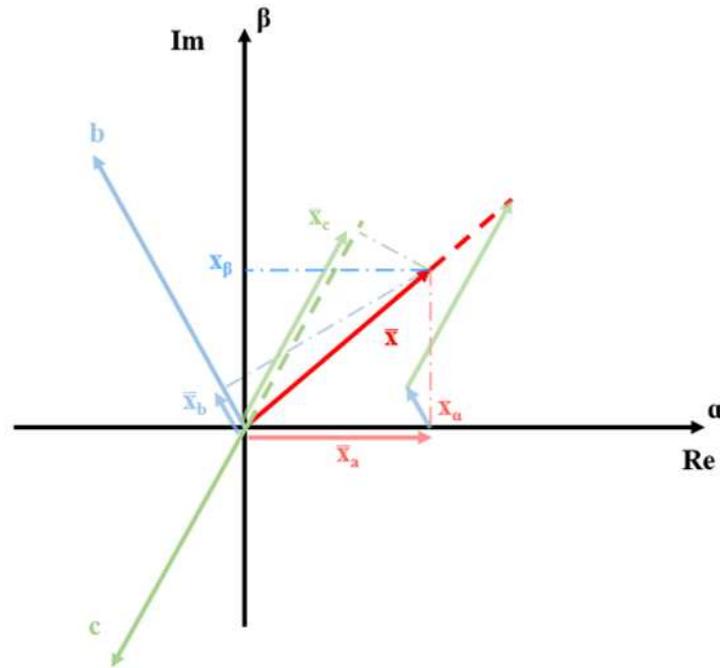


Figura 4.2: Rappresentazione di un Vettore Generico nei due Sistemi di Riferimento.

- **Trasformazione Trifase – Bifase.** Dalla figura 4.2 è possibile notare la criticità principale associata ad una trasformazione di sistema di riferimento trifase – bifase, ossia che la somma vettoriale delle 3 grandezze di fase vettorizzate ($\bar{x}_a, \bar{x}_b, \bar{x}_c$) non restituisce il vettore spaziale “ \bar{X} ” le cui componenti sono proprio le grandezze ($\bar{x}_a, \bar{x}_b, \bar{x}_c$), ma restituisce un vettore di modulo maggiorato di 1.5; la stessa somma effettuata con le componenti del vettore espresse nel sistema bifase ($\bar{x}_\alpha, \bar{x}_\beta$) non altera il modulo del vettore da rappresentare. Affinché nelle analisi di controllo il modulo del vettore spaziale si mantenga invariato nelle trasformazioni effettuate si utilizza una matrice specifica; la trasformazione è più comunemente conosciuta come Trasformata di Clarke. Nella (4.1) si riporta la rappresentazione duale dello stesso vettore spaziale espresso in sistema di riferimento trifase e bifase:

$$\bar{X} = \frac{2}{3} \cdot (x_a + x_b \cdot \bar{a} + x_c \cdot \bar{a}^2) = \bar{x}_\alpha + j \cdot \bar{x}_\beta, \quad \text{con } \bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4.1)$$

- **Significato Fisico.** Come già accennato, i vettori spaziali hanno un determinato significato fisico e non sono solamente degli “strumenti” per le analisi di controllo. Ad esempio, grazie ai vettori di corrente e flusso concatenato è possibile

rappresentare istantaneamente la distribuzione spaziale del campo magnetico nella macchina, o valutare attraverso i vettori di corrente e flusso dei magneti in quale proporzione i due partecipano al concatenamento di flusso negli avvolgimenti;

- **Condizioni Stazionarie e Dinamiche.** Un qualsiasi vettore spaziale associato ad una determinata grandezza elettromagnetica presenta nel tempo un'evoluzione che ne modifica modulo e orientazione spaziale. In particolare:
 - **In condizioni Stazionarie** o di regime ogni vettore spaziale ruota a frequenza angolare costante, pari alla pulsazione elettrica della grandezza, mantenendo inalterato il proprio modulo;
 - **In Transitorio** il vettore spaziale può sia cambiare frequenza angolare e sia cambiare il proprio modulo, definendo delle traiettorie a "spirale" dal punto di vista di un sistema di riferimento esterno e non rotante;
 - Il generico vettore spaziale le cui componenti istantanee di fase formano una terna ordinata e simmetrica variano nel tempo con andamento sinusoidale. Pertanto, applicando la (4.1) si ottiene un **andamento temporale rotante** del vettore spaziale descritto da:

$$\bar{X} = \hat{X} \cdot e^{j\frac{(\omega t)}{2}}, \quad \text{con } \hat{X} \text{ e } \omega = f(t) \quad (4.2)$$

- **Trasformate Utilizzate.** Come già riportato in figura 4.1 e accennato in precedenza, le trasformazioni del sistema di riferimento impiegate nelle analisi di controllo sono essenzialmente due, quella di Clarke e quella di rotazione del sistema di riferimento. Le due trasformate si applicano in termini matriciali direttamente alle equazioni elettriche e magnetiche della macchina elettrica considerata.
 - La **Trasformata Trifase – Bifase** permette la rappresentazione vettoriale delle grandezze in un sistema di riferimento fisso, in cui ancora le componenti presentano andamento sinusoidale sfasato di 90°el. In realtà è presente anche un terzo asse, quello omopolare, ma poiché non coinvolto nella conversione elettromeccanica dell'energia non è considerato ai fini del controllo. La matrice ortogonale di Clarke utilizzata è:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

→ La **Trasformata Bifase Fisso – Bifase Rotante** avviene attraverso una matrice di rotazione in cui l'angolo elettrico utilizzato dipende dal tipo di macchina ac in esame. Nel sistema di riferimento rotante (d, q) le componenti dei vettori spaziali hanno, in condizioni stazionarie, andamento continuo, e lo stesso vettore spaziale nel sistema rotante ha posizione fissa definita da un determinato angolo (variabile in transitorio) definito a partire dall'asse d . La matrice utilizzata per la trasformata è:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- **Anisotropia e Non Linearità Magnetica.** Il comportamento magnetico di una macchina ac dipende sostanzialmente dal tipo di macchina in esame, dalla sua costruzione di rotore e dalla presenza o meno di magneti permanenti. Come descritto nel dettaglio a seguire, il progetto di tesi considera un banco prova caratterizzato da una macchina SMPM-IPM, fortemente non lineare e anisotropa. Pertanto, prima di introdurre i set di equazioni elettromagnetiche impiegate per le analisi di controllo occorre definire le caratteristiche e criticità di una macchina di questo tipo.

→ **Anisotropia.** Per macchina anisotropa si intende un insieme specifico di costruzioni di rotore tali per cui il comportamento magnetico della macchina non è uniforme lungo tutte le direzioni di rotore. Le Barriere di Flusso interne (in materiale non ferromagnetico, ad esempio aria o magneti) ad un rotore di questo tipo causano un forte scompensamento nella distribuzione di Forza Magnetomotrice al suo interno (cadute di f.m.m. per le diverse Riluttanze del circuito ferromagnetico), con importanti differenze di Potenziale Magnetico tra le Barriere e il Ferro di rotore.

Ne consegue che le Induttanze delle tre fasi del motore dipendono dalla posizione istantanea del rotore (dipendenza di 2θ per l'armonica fondamentale); grazie alle trasformazioni del sistema di riferimento in assi (d, q) sincroni a rotore questa dipendenza viene eliminata. Tuttavia, anche in questo sistema di riferimento, le induttanze in assi (d, q) sono diverse fra di loro; in figura 4.3 si riscontra questo comportamento dal fatto che i flussi concatenati $\lambda_q(0, i_q)$ e $\lambda_d(i_d, 0)$ hanno valori molto diversi;

→ **Non Linearità.** Macchine elettriche di questo tipo, a Barriere Interne e con Magnet permanenti, lavorano spesso in condizioni di non linearità magnetica, ossia vicino ai regimi di saturazione magnetica del materiale.

La saturazione magnetica è ovviamente una caratteristica naturale inevitabile del materiale; la presenza di barriere di flusso interne e di magneti permanenti spinge il nucleo ferromagnetico più vicino alla saturazione, specialmente in presenza di carichi più elevati.

Ne consegue che le induttanze, ad esempio direttamente in assi (d, q) , dipendono fortemente dai valori di corrente all'aumentare di quest'ultimi. Non solo, ma a causa dell'interazione tra il campo magnetico principale, dovuto ai magneti permanenti, e il campo magnetico generato dalla corrente nei conduttori, si provoca nella macchina una Reazione di Indotto tale da generare effetti importanti di Magnetizzazione Incrociata. In figura 4.3 è possibile riscontrare quanto appena descritto, sia per gli effetti di saturazione dei flussi concatenati ad elevate correnti, sia per le variazioni di flusso concatenato di un asse dovuto alle variazioni di corrente dell'asse opposto (ad esempio, $\lambda_q(0, i_q) \neq \lambda_q(i_d, i_q)$).

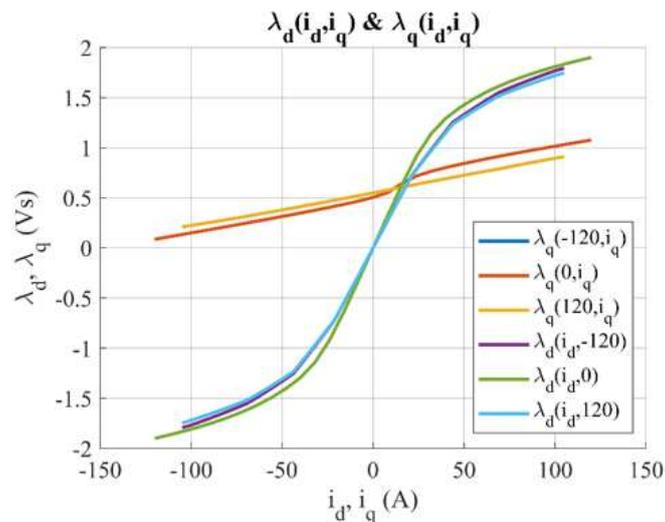


Figura 4.3: Caratteristiche Magnetiche dei Flussi.

- **Direzione dell'asse d.** Per le macchine Sincrone il sistema di riferimento rotante (d, q) può essere orientato lungo la direzione di un qualsiasi vettore spaziale; ciò che cambia è la tecnica di controllo utilizzata e il set di equazioni che descrivono il comportamento elettromagnetico della macchina. Principalmente i due sistemi di riferimento rotanti utilizzati sono quelli orientati lungo i flussi concatenati, di statore o dei magneti permanenti. In figura 4.4 si riportano i due sistemi di riferimento $(d, q)_s$ e (d, q) allineati secondo i due flussi concatenati. Mentre nel

primo caso l'orientazione degli assi è univoca, nel secondo caso può dipendere dalla convenzione adottata. Per la macchina SMPM-IPM oggetto del progetto di tesi, si è preferito adottare, nel secondo caso, una convenzione tipica delle macchine a magneti permanenti interni, chiamata "PM style", in cui l'asse d è orientato lungo il vettore spaziale del flusso dei magneti. Secondo quanto detto in precedenza, a causa dell'anisotropia di rotore, adottando questa convenzione l'Induttanza in asse d risulta inferiore rispetto a quella in asse q . Si noti che δ è il cosiddetto "Angolo di Carico", il quale definisce la posizione angolare del vettore flusso concatenato di statore;

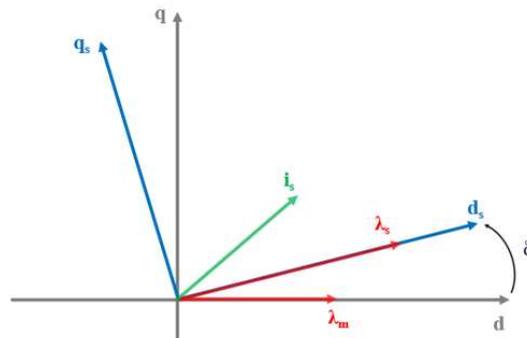


Figura 4.4: Direzionamento dei Sistemi di Riferimento Rotanti.

- **Equazioni utilizzate per le Macchine IPM.** In questa sezione si riportano brevemente i set di equazioni utilizzate nelle analisi di controllo, scritte direttamente in assi (d, q) (con convenzione "PM style") e $(d, q)_s$; le equazioni possono essere divise sostanzialmente in 3 categorie:

→ **Equazioni Elettriche.** Descrivono le relazioni tra correnti, tensioni e forze elettromotrici nei circuiti di statore; sono le equazioni elettriche degli avvolgimenti.

In assi (d, q) di rotore, in forma vettoriale e in componenti si scrivono:

$$\bar{v}_{dq} = R_s \bar{i}_{dq} + \frac{d}{dt} \bar{\lambda}_{dq} + p\omega_m \mathbf{J} \bar{\lambda}_{dq} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - p\omega_m \lambda_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + p\omega_m \lambda_d \end{cases} \quad (4.6)$$

In assi $(d, q)_s$ di statore, applicando ulteriormente una trasformata di rotazione tramite l'angolo di carico δ si ottiene, in forma vettoriale e in componenti:

$$\bar{v}_{dq_s} = R_s \bar{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \bar{\lambda}_{dq_s} + \mathbf{J} \frac{d}{dt} (\theta + \delta) \bar{\lambda}_{dq_s} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} |\bar{\lambda}_s| \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + |\bar{\lambda}_s| \frac{d}{dt} \delta + p \omega_m |\bar{\lambda}_s| \end{cases} \quad (4.8)$$

Dalla (4.8) risulta evidente che la componente in asse d della tensione sia strettamente legata alle variazioni dell'ampiezza del flusso concatenato di statore, mentre la componente in quadratura (asse q) lo è rispetto alle variazioni di Angolo di Carico.

→ **Equazioni Magnetiche.** Descrivono le relazioni tra i flussi concatenati, le correnti che li generano, il flusso generato dai magneti e i fenomeni di Magnetizzazione Incrociata. In generale, le relazioni corrente - flusso sono ricavate sperimentalmente tramite delle Mappe di Flusso, con prove direttamente sul banco; manipolando queste mappe è possibile effettuare le analisi di controllo necessarie. Considerando avvolgimenti distribuiti (induttanze con ridotto contenuto di armoniche spaziali, in cui l'analisi di controllo prende in considerazione solo la fondamentale) il modello magnetico può essere semplificato ammettendo che le induttanze in assi (d, q) dipendano solo dalle correnti.

In assi (d, q) di rotore il modello assume forma:

$$\bar{\lambda}_{dq} = \mathbf{L} \bar{i}_{dq} + \bar{\lambda}_m \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} \lambda_d = L_{dd}(i_d, i_q) \cdot i_d + L_{dq}(i_d, i_q) \cdot i_q + |\bar{\lambda}_m| \\ \lambda_q = L_{qd}(i_d, i_q) \cdot i_d + L_{qq}(i_d, i_q) \cdot i_q \end{cases} \quad (4.10)$$

Mentre in assi $(d, q)_s$ assume forma:

$$\bar{\lambda}_{dq_s} = \mathbf{L} \bar{i}_{dq_s} + \bar{\lambda}_m \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_{dds}(i_{ds}, i_{qs}) \cdot i_{ds} + L_{dq_s}(i_{ds}, i_{qs}) \cdot i_{qs} + |\bar{\lambda}_m| \cos(\delta) \\ \lambda_{qs} = L_{qds}(i_{ds}, i_{qs}) \cdot i_{ds} + L_{qq_s}(i_{ds}, i_{qs}) \cdot i_{qs} - |\bar{\lambda}_m| \sin(\delta) \end{cases} \quad (4.12)$$

→ **Equazioni Meccaniche.** Descrivono il comportamento dinamico del sistema, ovvero la relazione tra la coppia elettromagnetica generata dalla macchina, la coppia resistente applicata dal carico, gli attriti, l'inerzia e la velocità (o meglio, l'accelerazione angolare). L'equazione meccanica valida per qualsiasi macchina elettrica è:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l - T_f \quad (4.13)$$

con T_e Coppia Elettromagnetica, T_l Coppia di Carico e T_f Coppia degli Attriti. La coppia elettromagnetica generata dalla macchina è ricavata a partire dal bilancio di potenza, e in qualsiasi sistema di riferimento (d, q) si esprime come:

$$T = \frac{3}{2} p (\bar{\lambda}_{dq} \wedge \bar{i}_{dq}) \quad (4.14)$$

Nel sistema (d, q) di rotore si esprime più semplicemente ignorando gli effetti di magnetizzazione incrociata come:

$$T = \frac{3}{2} p [(L_{dd} - L_{qq}) \cdot i_d \cdot i_q + |\bar{\lambda}_m| \cdot i_q] \quad (4.15)$$

Mentre nel sistema $(d, q)_s$ di statore, essendo l'asse d_s orientato lungo il flusso concatenato di statore, il prodotto vettoriale si semplifica:

$$T = \frac{3}{2} p |\bar{\lambda}_{dq_s}| \cdot i_{qs} \quad (4.16)$$

4.1.2 Panoramica sugli Algoritmi di Controllo

Gli algoritmi di controllo più diffusi in ambito industriale e della trazione elettrica sono progettati per garantire prestazioni ottimali in tutte le condizioni operative comprese nel range di funzionamento della macchina; il potenziale della macchina deve essere pienamente sfruttato assicurando che ogni punto di lavoro utile venga utilizzato in funzione delle esigenze applicative.

L'obiettivo principale di queste strategie è regolare il funzionamento della macchina sulla base di un riferimento di coppia o di velocità, definito dall'utente o determinato da un sistema esterno (ad esempio, una Driving Machine). Tuttavia, i comportamenti non lineari di molte macchine elettriche porta nelle strategie di controllo delle criticità non trascurabili; gli effetti della saturazione magnetica influenzano significativamente le prestazioni della macchina. Da qui l'esigenza di sviluppare degli algoritmi di controllo sempre più raffinati che a seconda dei contesti garantiscano le prestazioni desiderate anche in queste condizioni.

In questa sezione si introducono le due strategie di controllo che sono state utilizzate nel progetto di tesi, insieme ad una panoramica generale su alcuni algoritmi propedeutici all'analisi del controllo FPC.

La prima strategia di controllo e la più comune in ambito industriale è il **FOC-CVC**, ossia "Field Oriented Control" di tipo "Current Vector Control". Lo schema circuitale dell'algoritmo, scritto anche in C, realizzati entrambi sul software PLECS è riportato in figura 4.5:

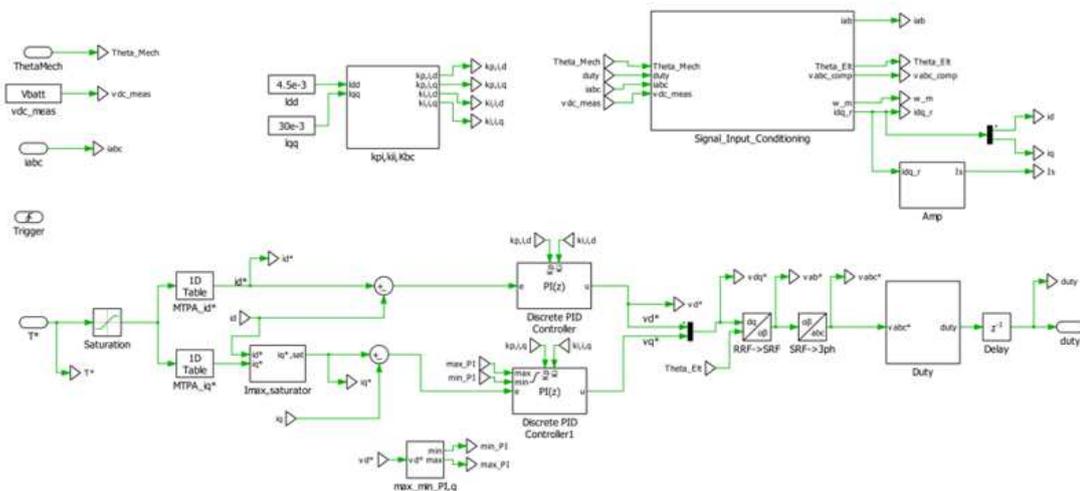


Figura 4.5: Circuito PLECS del controllo FOC-CVC.

Molti dei blocchi presenti nel circuito saranno analizzati più nel dettaglio nella sezione 4.3.1 dedicata al controllo FPC, poiché comuni tra i due.

Questa strategia di controllo ha l'obiettivo di generare la coppia richiesta dal riferimento esterno imponendo nella macchina delle correnti che, al di sotto della Velocità Base, consentano di ottenere una coppia massima pari a quella richiesta dal riferimento stesso (condizione di MTPA, in seguito ripresa). Le correnti imposte sono ricavate tramite delle Look-Up Tables, ossia delle mappe ad una o più dimensioni (a seconda del numero di Input) ricavate in precedenza tramite manipolazioni delle Mappe di Flusso della macchina.

Dal nome stesso, la strategia è implementata in assi (d, q) di rotore, con asse d orientato secondo il flusso concatenato dei magneti; ciò che invece interessa più nello specifico è il fatto che si tratti di un controllo CVC, in cui i regolatori PI del circuito sono tarati facendo riferimento al modello in Corrente della macchina. Nel modello in corrente sono le correnti in assi (d, q) ad essere variabili di stato, il che comporta delle criticità legate alle tarature. Il modello di macchina fa riferimento ad un'unica equazione vettoriale (ottenuta unendo le equazioni vettoriali elettrica e magnetica):

$$\bar{v}_{dq} = R_s \bar{i}_{dq} + \frac{\partial \bar{\lambda}_{dq}}{\partial \bar{i}_{dq}} \cdot \frac{d}{dt} \bar{i}_{dq} + p \omega_m \mathbf{J} (\bar{\lambda}_m + \mathbf{L} \bar{i}_{dq}) \quad (4.17)$$

In cui si introduce il concetto di Induttanza Differenziale, che descrive la relazione locale tra il flusso e la corrente in presenza di un comportamento non lineare del circuito, ovvero in saturazione magnetica:

$$\begin{bmatrix} l_{dd}(i_d, i_q) & l_{dq}(i_d, i_q) \\ l_{qd}(i_d, i_q) & l_{qq}(i_d, i_q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_d(i_d, i_q)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_d(i_d, i_q)}{\partial i_q} \\ \frac{\partial \lambda_q(i_d, i_q)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_q(i_d, i_q)}{\partial i_q} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$l_{eq,d} = l_{dd} - \frac{l_{dq} \cdot l_{qd}}{l_{qq}}, \quad l_{eq,q} = l_{qq} - \frac{l_{dq} \cdot l_{qd}}{l_{dd}} \quad (4.19)$$

Sostituendo le (4.18) e (4.19) nella (4.17) si ottiene un set di equazioni con le correnti come variabili di stato.

I **vantaggi** legati a questo tipo di strategia di controllo sono principalmente dovuti a:

- Le correnti di fase della macchina sono controllate direttamente tramite una coppia di regolatori PI convenzionali, il che aumenta l'affidabilità del sistema se i regolatori sono correttamente tarati, in quanto si evitano pericolose sovracorrenti;

- Gli schemi CVC basati su LUTs presentano una struttura semplice senza richiedere moduli di controllo specifici per garantire la linearità della relazione Coppia – Correnti, seppur strategie con LUT 4-dimensionali siano più difficoltose da ottenere;
- Nessun osservatore di flusso aggiuntivo, il controllo è eseguito su anelli chiusi di corrente, non di flusso.

Gli **svantaggi** invece sono legati a:

- Perdita della Linearità nella relazione Coppia – Correnti, specialmente dopo la Velocità Base per operazioni in Deflussaggio, a causa della non linearità di macchina e saturazione magnetica. Garantire la linearità della relazione vorrebbe dire operare tramite strategie CVC più raffinate in cui compaiono LUT 4-dimensionali o sistemi di controllo a più PI dedicati solamente alle operazioni in MTPV ad alta velocità;
- I guadagni dei regolatori dipendono dal Punto di Funzionamento della macchina in ogni condizione operativa. Ciò implica che in ogni nuova condizione i guadagni devono essere aggiornati con i nuovi valori di Induttanze Differenziali, aumentando il rischio di impostare dei parametri di regolazione che potrebbero portare a fenomeni rischiosi di instabilità.

Un punto di vista opposto rispetto alla prima strategia di controllo presentata è il **FOC-FVC**, ovvero “Field Oriented Control” di tipo “Flux Vector Control”. Questo algoritmo di controllo, non implementato nel progetto di tesi, consente di dare una panoramica più ampia all’insieme delle strategie di controllo in cui è il Flusso concatenato di statore ad essere direttamente controllato.

In modo duale rispetto al CVC, a partire da un riferimento esterno di coppia, tramite delle LUTs ottenute dalla manipolazione delle Mappe di Flusso, rispettando la condizione di MTPA, si ricavano i flussi di riferimento in asse d e in asse q . La taratura dei regolatori PI si basa sul Modello in Flusso della macchina, in cui sono le componenti del flusso ad essere variabili di stato; nell’equazione vettoriale Elettromagnetica non compaiono le induttanze differenziali e i guadagni dei regolatori PI sono indipendenti dal punto di funzionamento della macchina:

$$\bar{v}_{dq} = R_s \bar{i}_{dq} + \frac{d}{dt} \bar{\lambda}_{dq} + p\omega_m \mathbf{J} \bar{\lambda}_{dq} \quad (4.20)$$

Le operazioni in Deflussaggio e in MTPV possono essere integrate tramite delle Leggi che in base alla velocità di rotazione della macchina limitano l'ampiezza del flusso. Gli svantaggi principali sono legati alla necessità di un Osservatore di Flusso che consenta di stimare le componenti del flusso per le retroazioni degli anelli di controllo; non solo, ma non si sfrutta il disaccoppiamento degli assi per le regolazioni simultanee di Coppia e Flusso, ottenibile con strategie di tipo DFVC.

Un passo ulteriore verso il controllo FPC può essere fatto considerando un controllo di tipo **DFVC** in assi $(d, q)_s$ di statore, ossia “Direct Flux Vector Control”. Rispetto alle strategie di controllo precedenti, essendo realizzata in assi sincroni al flusso concatenato di statore, il set di equazioni da considerare per la sua implementazione permette la regolazione del Flusso e della Coppia in modo disaccoppiato; l'obiettivo è la generazione della coppia richiesta dal riferimento tramite il controllo simultaneo dell'ampiezza di flusso e della componente di corrente responsabile della produzione di coppia, la i_{qs} .

Pertanto, l'asse d_s è destinato alla regolazione dell'ampiezza del flusso, il cui riferimento proviene da una LUT il cui Input è la coppia di riferimento e il cui Output è saturato dal valore di flusso massimo ottenibile in Deflussaggio, tramite una legge opportuna basata sulla velocità di rotazione.

L'asse q_s è destinato invece alla regolazione della componente i_{qs} , il cui riferimento proviene dalla legge della coppia espressa in assi $(d, q)_s$ di statore (4.16), in cui l'ampiezza di flusso che compare è quella ricavata dall'asse d_s .

Questa strategia di controllo, più “ibrida” rispetto alle precedenti, si avvicina maggiormente al concetto di controllo Unificato, valido per tutte le macchine ac; la struttura del controllo si adatta bene alle diverse tipologie di macchine, con pochi cambiamenti dei suoi parametri. Per la sua implementazione è necessario ricavare solamente una LUT per il funzionamento in MTPA e le LUTs per l'osservatore di flusso. Non solo, ma l'implementazione in assi $(d, q)_s$ di statore consente di sfruttare questa strategia anche per macchine asincrone, in cui la disposizione degli assi (d, q) di rotore cambia significativamente rispetto alle macchine sincrone. Trattandosi di un controllo misto, il modello di macchina considerato è anch'esso ibrido, in cui le equazioni Elettromagnetiche che ne descrivono il comportamento e impiegate per le tarature dei PI:

$$\frac{d}{dt}\lambda \approx v_{ds} \quad (4.21)$$

$$l_{qs} \cdot \frac{d}{dt}i_{qs} \approx v_{qs} - \omega \cdot \lambda \quad (4.22)$$

I vantaggi di questo tipo di controllo sono molteplici, legati ad esempio alla Linearità della relazione Coppia-Corrente in ogni condizione di funzionamento, dovuto al meccanismo automatico di correzione del flusso oltre la Velocità Base, a partire dalla quale si calcola il valore di corrente. Ma il vantaggio principale risiede nel disaccoppiamento degli assi $(d, q)_s$, non solo per le regolazioni quasi indipendenti di flusso e corrente, ma per le limitazioni degli Output dei regolatori PI, ossia le tensioni di riferimento; mentre quella in asse d_s subisce solamente delle piccole variazioni dovute all'ampiezza del flusso, quella in asse q_s può far fronte alle importanti variazioni di back-emf grazie all'ampio range di tensione prima del limite di saturazione dell'inverter.

Lo svantaggio principale è legato alla presenza dell'osservatore di flusso, dalla presenza di un PI dedicato alla limitazione della corrente in MTPV, e infine alla dipendenza dei guadagni del regolatore PI dedicato all'anello di corrente dall'induttanza differenziale, quindi dal punto di funzionamento.

Le applicazioni di trazione richiedono strategie di controllo più avanzate di quelle utilizzate nelle applicazioni industriali, principalmente per l'utilizzo di macchine che operano in regimi di saturazione, per la necessità di linearità nella relazione Coppia-Correnti e per garantire alte prestazioni dinamiche in ogni condizione di funzionamento, anche in Deflussaggio spinto.

La seconda strategia di controllo implementata nel progetto di tesi risponde e soddisfa tutte le condizioni richieste dalle applicazioni di trazione, e prende il nome di **FPC**, ossia "Flux Polar Control"; in figura 4.6 si riporta lo schema a blocchi dello stesso, la quale traduzione in linguaggio di programmazione C è stata effettuata anch'essa in ambiente PLECS (trasferita poi nell'algoritmo di controllo di sezione 5.3.1). L'analisi dettagliata dei blocchi funzionali che compongono l'algoritmo è presentata nel dettaglio in sezione 4.3.1.

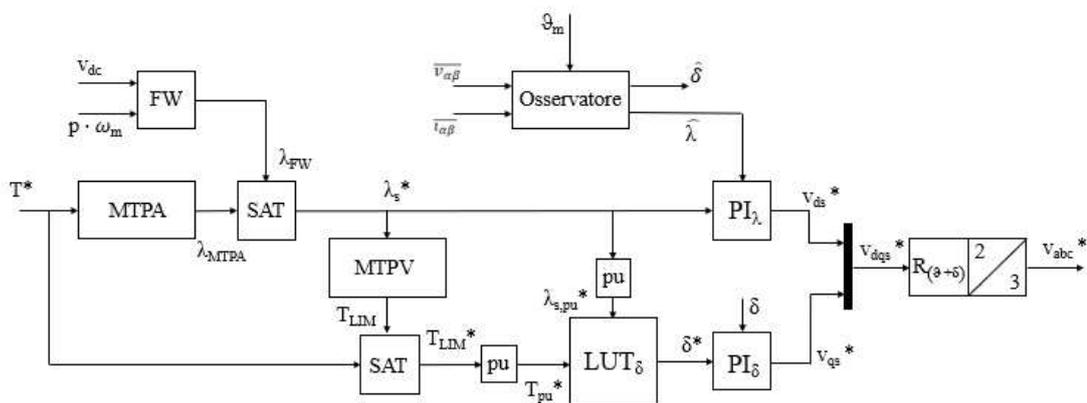


Figura 4.6: Schematico del controllo FPC.

L'obiettivo principale del controllo FPC è la generazione della coppia di riferimento tramite il controllo simultaneo in assi $(d, q)_s$ di statore dell'ampiezza del Flusso Concatenato di Statore e l'Angolo di Carico δ (definito tra il vettore flusso dei magneti e il vettore flusso di statore), tramite una LUT bidimensionale.

In maniera del tutto analoga al controllo DFVC, l'asse d_s regola l'ampiezza del flusso, il cui riferimento proviene da una LUT con Input la coppia di riferimento; l'Output è saturato dal valore di flusso massimo ottenibile in Deflussaggio, tramite una legge opportuna in cui compare la velocità di rotazione. Il valore di flusso ottenuto, non solo è il riferimento dell'anello di controllo, ma satura il valore di riferimento di Coppia al valore massimo ottenibile in condizioni di Deflussaggio.

L'asse q_s è destinato invece alla regolazione dell'Angolo di Carico, ottenuto attraverso una LUT bidimensionale i cui Input sono Coppia di riferimento saturata e flusso di riferimento, entrambi in valori Relativi (nel dettaglio in sezione 4.3.1).

Il modello di macchina utilizzato per la taratura dei guadagni dei PI si basa sulla sola equazione vettoriale Elettrica della macchina scritta in assi $(d, q)_s$ di statore (4.8), dove già compaiono entrambe le variabili di controllo sottoforma di variabili di stato.

I **vantaggi** legati a questo tipo di controllo derivano da:

- Completa assenza per entrambi i regolatori PI di dipendenza dal punto di funzionamento. Come analizzato successivamente, i guadagni dipendono solo dalla frequenza di switch e dall'ampiezza del flusso;
- Elevate prestazioni dinamiche per ogni condizione di funzionamento, in particolare anche in Deflussaggio spinto e MTPV. Non solo, ma sono anche assenti ulteriori regolatori PI per le limitazioni di corrente in MTPV;
- Anche qui, disaccoppiando gli assi tramite controllo in $(d, q)_s$ di statore, la tensione in asse q_s si fa carico di gestire la back-emf e consente di regolare e forzare le variazioni di Angolo di Carico.

Gli **svantaggi** invece sono legati a:

- Presenza osservatore di flusso, con taratura del suo guadagno e LUT per il modello di corrente;
- Assenza di una relazione lineare diretta tra Coppia e Angolo di Carico, il valore di quest'ultimo si ricava tramite una LUT in cui è necessario anche il valore di flusso.

4.2 Ottenimento delle Mappe per FPC

In questa sezione sono contenute tutte le procedure che hanno condotto allo sviluppo delle LUTs e Mappe di Flusso utilizzate dalla strategia di controllo FPC; non solo, ma è stato anche realizzato un test tipo Montecarlo per la validazione degli script Matlab. L'obiettivo della sezione è l'analisi completa degli algoritmi che, a partire dalle Mappe di Flusso ottenute in precedenza tramite dei test dedicati sulla macchina, consentono di ottenere le strutture dati e tabelle numeriche di riferimento che stanno alla base del controllo FPC, motivando le linee di codice sviluppate. In totale, sono stati sviluppati 8 script:

- 2 Script per l'adattamento delle Mappe di Flusso;
- 3 Script per la creazione delle LUTs di controllo;
- 1 Script per il test di validazione Montecarlo;
- 1 Script per la traduzione in file ".h" (libreria per algoritmo di controllo) delle LUTs bidimensionali e monodimensionali.

Innanzitutto, per poter iniziare lo sviluppo degli script Matlab, è stato necessario disporre delle Mappe di Flusso specifiche per la macchina IPM del banco prova. Le mappe sono state ottenute in precedenza con dei test dedicati sul banco; in particolare, le mappe sono state rese disponibili in vari formati, con diverse risoluzioni e per diversi quadranti. Le due Mappe di Flusso necessarie per poter iniziare il processo di creazione delle strutture dati, e rese disponibili sono:

1. **Mappe di Flusso Polari ad 1 Quadrante**, sottoforma di 2 matrici 11 x 11 interpolabili in Modulo e Angolo del vettore Corrente, che restituiscono le componenti del Flusso in assi (d, q) di rotore;
2. **Mappe di Flusso Polari a 4 Quadranti**, sottoforma di 2 matrici 257 x 257 interpolabili in Modulo e Angolo del vettore Corrente, anch'esse restituiscono le componenti di Flusso in (d, q) .

Rese disponibili le Mappe in questione, i primi due Script Matlab, "**Flux_Maps_1Q_Expansion**" e "**Flux_Maps_4Q_Creation**", consentono l'espansione delle stesse, ad una risoluzione qualsiasi opportuna, e la creazione delle Mappe Inverse, interpolabili con le componenti di Flusso e che consentono di ottenere le componenti in assi (d, q) di rotore del vettore di Corrente.

Le due Mappe di Flusso di partenza sono mappe Polari, ossia interpolabili in coordinate polari del vettore Corrente, quindi in ampiezza e angolo. Gli estremi di queste due grandezze sono:

- **Ampiezza del vettore Corrente** da 0 a 160 A per entrambe le Mappe, a 1 Quadrante e 4 Quadranti del piano delle Correnti;
- **Angolo del vettore Corrente** da 85° a 185° per la Mappa ad 1 Quadrante, poiché nel piano delle Correnti il quadrante in cui si sviluppano le componenti (d, q) del vettore per la produzione di Coppia positiva di una macchina IPM è il Secondo (e parzialmente il primo). Mentre l'angolo assume valori da 0 a 360° per la Mappa a 4 Quadranti, se si vuole caratterizzare il comportamento della macchina in ogni sua condizione di funzionamento.

Nel dettaglio, lo script **Flux_Maps_1Q_Expansion** è utilizzato per l'espansione delle Mappe ad 1 Quadrante, con una risoluzione 256×256 , e la creazione delle Mappe Inverse di Corrente.

La prima operazione è condotta attraverso l'oggetto Interpolante “**griddedInterpolant**”, il quale consente l'interpolazione dei dati di Input se organizzati su Griglie Regolari, e non sparsi. Ad esempio, considerando le componenti in assi (d, q) del vettore Corrente, l'interpolazione della matrice di Flusso in asse d può avvenire solamente se le componenti di corrente sono contenute ordinatamente all'interno di 2 Griglie Regolari (una matrice per la corrente in asse d in cui questa si ripete in ordine crescente per Righe e una matrice per la corrente in asse q in cui in cui questa si ripete in ordine crescente per Colonne) e originariamente la Mappa è stata ottenuta a partire dai dati di corrente così organizzati. Si consideri la figura 4.7:

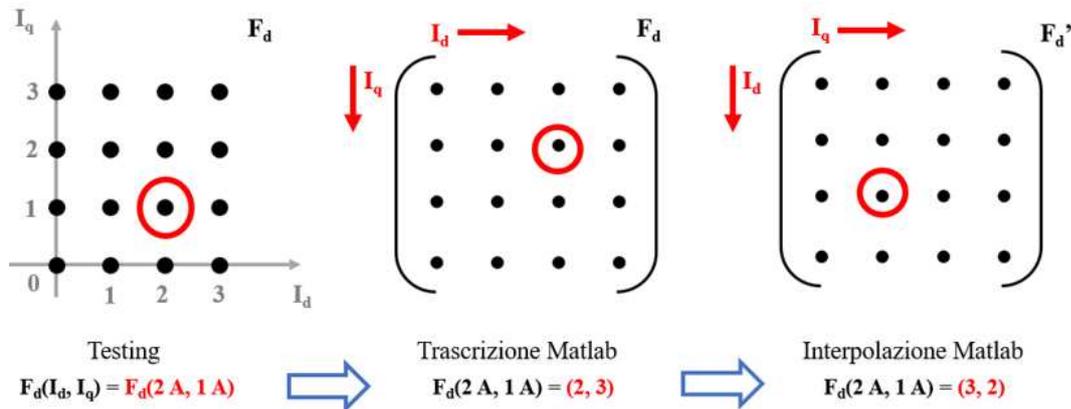


Figura 4.7: Schema della Funzione Matlab “griddedInterpolant”.

All'interno della figura è rappresentata una criticità fondamentale dell'oggetto "griddedInterpolant"; sostanzialmente, quando richiamato nel codice, occorre interpolare la matrice di interesse (nel caso in esame la matrice dei flussi in d e in q) effettuando dapprima una sua trasposizione. La trascrizione Matlab dei dati ottenuti sperimentalmente, rispetta l'ordinamento (x,y) del piano delle correnti, ossia spostandosi per Colonne varia la corrente in asse d , mentre spostandosi per righe varia la corrente in asse q . Ad esempio, il punto associato a 2 A in asse d e 1 A in asse q , cerchiato in rosso, sarà trascritto in Matlab su una matrice il cui elemento corrispondente è presente sulla riga 2 e colonna 3.

L'interpolazione invece avviene dapprima passando all'oggetto "griddedInterpolant" i vettori ordinati di corrente in asse d e in asse q (oppure, con le Polari, ampiezza e angolo), ma quest'ultimo effettua l'interpolazione della matrice associando alla variazione per Righe la componente di corrente in d , e alla variazione per Colonne la componente in q ; queste associazioni sono dunque opposte alla Trascrizione Matlab della matrice. Affinché l'interpolazione avvenga correttamente è necessario trasporre la matrice da interpolare; a seguito dell'interpolazione, il punto associato a 2 A in asse d e 1 A in asse q cerchiato in rosso corrisponde all'elemento in Riga 3 e Colonna 2, ma, se la matrice è stata trasposta, esso corrisponderà proprio allo stesso elemento (allo stesso valore di flusso) della matrice non trasposta. Applicando questa logica e creando dei vettori ordinati di corrente in coordinate polari di grandezza arbitraria, è stato possibile aumentare la risoluzione delle Mappe di Flusso ad 1 Quadrante.

A seguito di questo tipo di interpolazione occorre anche riscrivere le Griglie Regolari Interpolanti (le matrici ordinate delle componenti di corrente) associati alle nuove mappe, tramite l'operatore "**meshgrid**"; le griglie regolari così create, servono per poter identificare tutti i punti della nuova Mappa di Flusso.

La seconda operazione del primo script, destinato alla creazione delle Mappe Inverse di Flusso, utilizza un oggetto interpolante duale, ossia "**scatteredInterpolant**". Le mappe Inverse di flusso permettono di ottenere i valori delle componenti (d, q) di corrente tali da generare nella macchina le componenti (d, q) di flusso utilizzate come Input delle mappe; diversamente dal caso precedente delle mappe Dirette, ciò che si vuole ottenere sono 2 mappe di corrente, quindi 2 matrici di valori sparsi (e non ordinati come nel caso delle Griglie Regolari), da interpolare con 2 Griglie Non Regolari di Flusso, ossia una matrice per la componente in asse d in cui questa si ripete per Righe, e una per la componente in asse q in cui questa si ripete per Colonne, in ordine non crescente.

L'oggetto interpolante "scatteredInterpolant" è utilizzato per strutture di dati sparsi, e non organizzati secondo griglie regolari (non si hanno delle componenti di flusso ordinate in ordine crescente come nel caso delle componenti di corrente). Differentemente dal caso precedente non è necessaria alcuna trasposizione della matrice da interpolare.

Si esegue dapprima una vettorizzazione delle matrici sparse di flusso e delle matrici Regolari di corrente (mappe dirette). Creato l'oggetto interpolante, senza trasposizioni, lo si usa con Input pari alle Griglie Non Regolari di flusso create con l'oggetto "meshgrid", e si ottengono le Mappe Sparse di Corrente. In quest'ultima, spostandosi per Colonne cambia il valore del flusso in asse d , mentre spostandosi per Righe cambia quello in asse q . In figura 4.8 riassunto quanto analizzato:

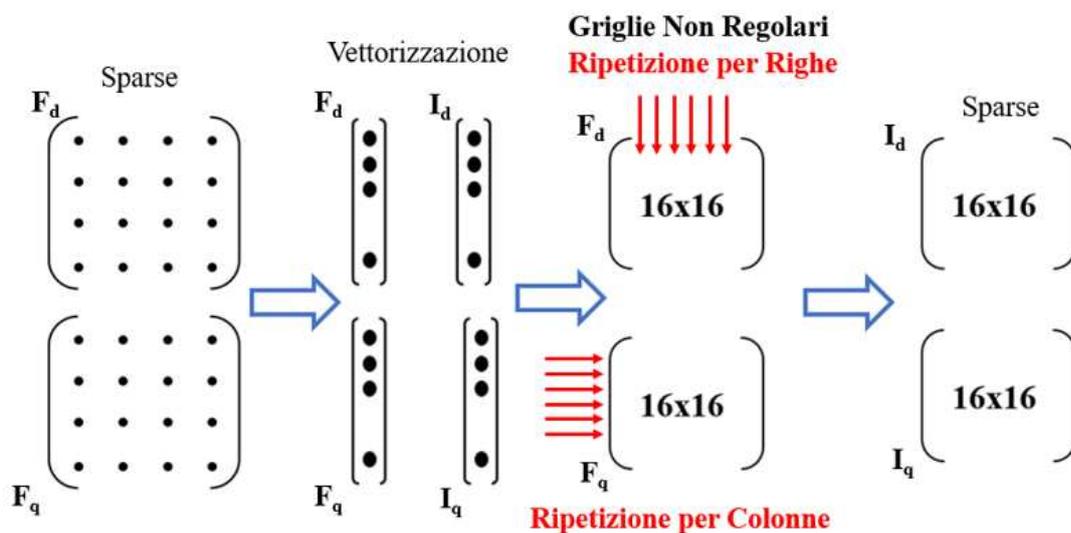


Figura 4.8: Schema della Funzione Matlab "scatteredInterpolant".

Anche le Mappe Inverse sono state ottenute con una risoluzione pari a 256×256 . In figura 4.9 seguono due estratti delle mappe ottenute, a sinistra la Mappa Diretta per la componente in asse d di Flusso, a destra la Mappa Inversa per la componente in asse q di Corrente:

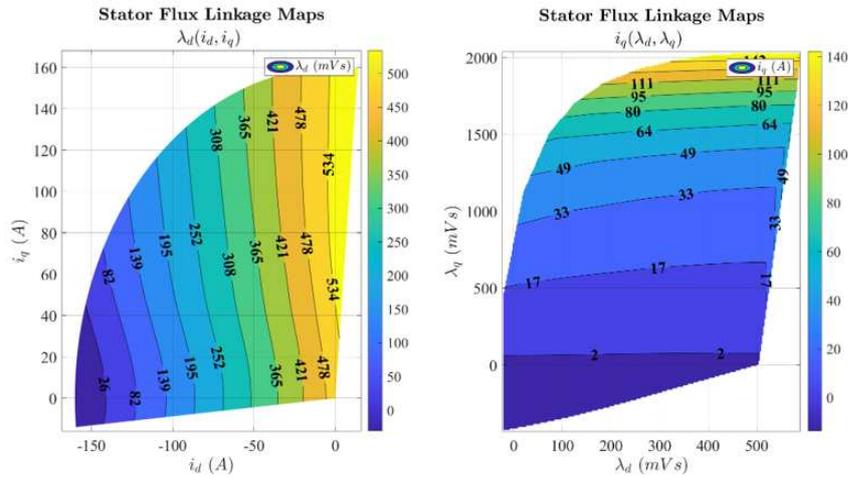


Figura 4.9: Mappe di Flusso Diretta e Inversa ad 1 Quadrante.

Lo script “**Flux_Maps_4Q_Creation**” è stato utilizzato invece per la creazione della Mappe Inverse di Flusso a 4 Quadranti, alla risoluzione scelta dall’utente. Originariamente disponibili le Mappe Dirette Polari a 4 Quadranti con una risoluzione 256 x 256, queste sono state manipolate per ottenere le Inverse con l’oggetto “scatteredInterpolant” sopra descritto. In figura 4.10 si riporta la mappa diretta di flusso in asse q a 4 Quadranti e quella inversa di corrente in asse d a 4 Quadranti:

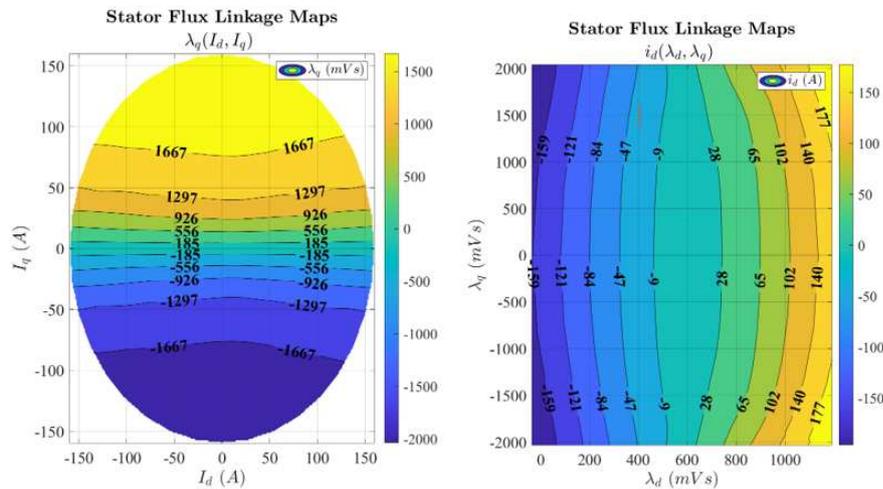


Figura 4.10: Mappe di Flusso Diretta e Inversa a 4 Quadranti.

Il primo script per la creazione delle LUTs di controllo è denominato “**Build_Look_Up_1**”. All’interno dello script è possibile trovare tutte le procedure che, a partire dalle Mappe

di Flusso ad 1 Quadrante ricava le Mappe di Controllo delle variabili elettromagnetiche, applicandovi i limiti di funzionamento.

Innanzitutto, si riporta in figura 4.11 la mappa di Coppia, ovvero le combinazioni dei punti (i_d, i_q) che nel secondo quadrante del piano delle correnti consentono di ottenere valori di coppia elettromagnetica da 0 a 700 Nm.

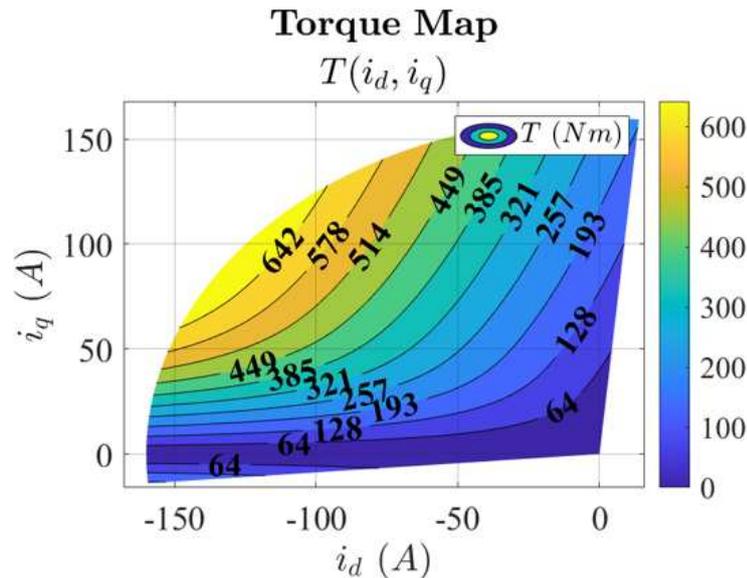
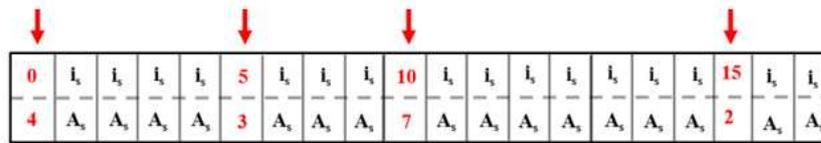


Figura 4.11: Mappa di Coppia nel Piano delle Correnti.

Il primo passo da effettuare per ricavare le Mappe di Controllo di tutte le altre variabili è la definizione dei luoghi di MTPA, CL e MTPV, ossia i limiti di funzionamento del sistema. Tramite la funzione Matlab “**contour**” è possibile ricavare da una Mappa, per ogni curva Iso-Livello, tutte le coppie di punti del piano, in cui la mappa è espressa, che consentono di ottenere un determinato Iso-Livello. La Mappa di Coppia può così essere investigata per ricavare tutte le coppie (I_s, A_s) che permettono di ottenere ogni Iso-Livello della Mappa, con I_s e A_s rispettivamente ampiezza e angolo del vettore Corrente; gli Iso-Livelli sono definiti da 0 a 700 Nm a passi di 5 Nm.

Si ottiene dunque in Output una matrice a due righe denominata “T_iso_Is_As” con una struttura ben precisa, riassunta in figura 4.12:



0	i_s	i_s	i_s	i_s	5	i_s	i_s	i_s	10	i_s	15	i_s	i_s						
4	A_s	A_s	A_s	A_s	3	A_s	A_s	A_s	7	A_s	2	A_s	A_s						

Figura 4.12: Schema della Matrice “T_iso_Is_As”.

La matrice è caratterizzata da una struttura in cui alcune colonne presentano nella prima riga il valore della curva Iso-Livello analizzata, e nella seconda riga il numero di coppie di punti che compongono quel determinato Iso-Livello. In figura in rosso sono mostrate le colonne in questione, mentre nelle restanti sono scritte le coppie (I_s, A_s) nella prima e seconda riga.

Lo script investiga la matrice ottenuta, in particolare:

1. Valuta il **Numero Totale di Iso-Livelli presenti**, anche se ripetuti (è possibile che alcune colonne indicanti l’Iso-Livello ripetano lo stesso valore per altre coppie (I_s, A_s));
2. Conserva in un vettore il **Valore di Coppia di ogni Iso-Livello**, anche se ripetuto;
3. Definisce **quante volte ciascun Iso-Livello si ripete** nella matrice;
4. **Rimuove le colonne indicanti gli Iso-Livelli** e tramite Interpolazione riempie un’ulteriore matrice “T_iso_Fd_Fq” con tutte le Coppie (λ_d, λ_q) che consentono di ottenere ogni Iso-Livello.

In questo modo si ottengono due matrici “T_iso” in cui al posto delle colonne indicanti gli Iso-Livelli sono presenti diciture NaN (“Not a Number”, letteralmente spazi vuoti). A partire da queste due matrici, si ottengono i vettori MTPA e MTPV di ogni grandezza elettromagnetica. Lo script estrapola tutte le componenti di corrente, flusso, coppia e angoli di tutti i punti caratteristici di ogni Iso-Livello di Coppia e conserva in appositi vettori “x_mtpa” e “x_mtpv” un solo valore per ogni grandezza e Iso-Livello, con “x” la grandezza generica. Il valore conservato è, per ogni grandezza elettromagnetica:

- **Per i vettori “x_mtpa”** quello corrispondente al punto di funzionamento a Minima Ampiezza di Corrente, per ogni Iso-Livello;
- **Per i vettori “x_mtpv”** quello corrispondente al punto di funzionamento a Minima Ampiezza di Flusso, per ogni Iso-Livello.

Dopodichè lo script verifica che i punti di funzionamento ottenuti in MTPA e MTPV non violino il vincolo di Corrente Massima, impostata a 150 A e sostituisce agli angoli di carico in MTPV associati a Coppia Nulla il valore di $\frac{\pi}{2}$. Si noti che il vettore di coppia in MTPV può anche essere nullo, se la Corrente Massima considerata è inferiore rispetto alla Corrente Caratteristica del motore (in questo caso la macchina IPM del banco ha una corrente caratteristica superiore rispetto a quella massima di 150 A, pertanto il luogo dei punti MTPV non interessa il Deflussaggio della stessa). In figura 4.13 si riporta nel piano delle correnti la mappa di coppia comprensiva di MTPA e MTPV:

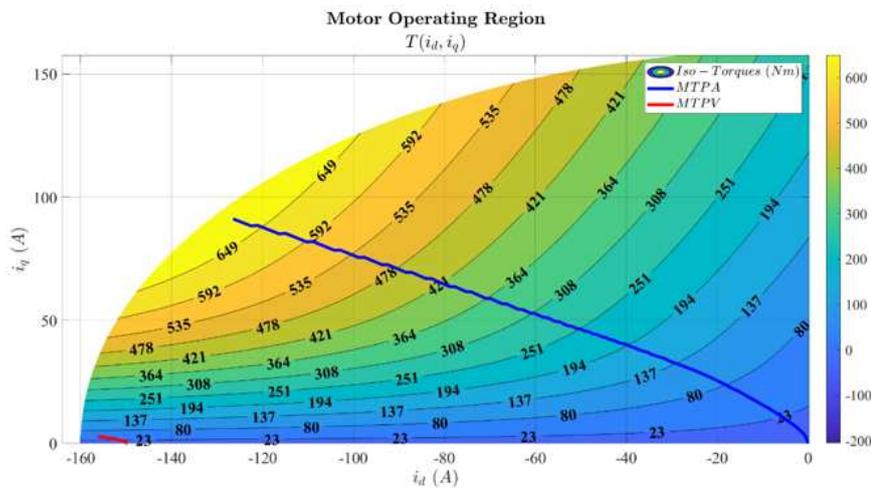


Figura 4.13: Mappa di Coppia con MTPA e MTPV.

Lo step successivo dello script è la determinazione della Mappe di Controllo. Queste interessano tutte le grandezze elettromagnetiche finora considerate, quindi componenti (d, q) di corrente, flusso, le ampiezze di entrambi e gli angoli caratteristici, senza dimenticare la Coppia. Le Mappe di Controllo non sono altro che delle Matrici che per ogni Riga conservano i valori delle grandezze caratterizzanti i punti di funzionamento appartenenti ad ogni Iso-Livello di Coppia Ammissibile, applicati i vincoli di controllo.

Per ricavare le Mappe di Controllo lo script Matlab agisce in questo modo:

1. Ricava il **Numero Totale di Punti per ogni Iso-Livello** dalla matrice “T_iso_Is_As”;
2. **Inizializza le Matrici delle Mappe di Controllo** con Righe pari al numero totale di Iso-Livelli di Coppia e Colonne pari al numero Massimo di punti rilevati allo step precedente;

3. **Estrapola tutte le grandezze elettromagnetiche** di ogni punto di funzionamento appartenente ad ogni Iso-Livello di Coppia e vi **applica i limiti di MTPA, di Corrente Massima e di MTPV**;
4. Salva nelle Matrici delle Mappe di Controllo per ogni Iso-Livello le grandezze rimanenti dopo l'applicazione dei vincoli e **riordina secondo Ampiezza di Flusso crescente** ciascuna riga di tutte le matrici delle grandezze elettromagnetiche, eliminando tutti i punti in cui l'ampiezza di flusso si ripete con stesso valore nella Riga considerata;
5. **Ridimensiona le Mappe di Controllo a seguito dell'applicazione dei vincoli.** Il numero di Righe è pari agli Iso-Livelli di Coppia non nulli e con valore massimo pari all'estremo di MTPA, e numero di Colonne pari al numero massimo di punti di funzionamento tra tutti gli Iso-Livelli considerando come grandezza di riferimento l'ampiezza del flusso.

Segue il processo di **Normalizzazione**. Questo consiste nel ricavare la Mappa di Controllo dell'Ampiezza dei flussi e il vettore degli Iso-Livelli di Coppia Normalizzati; sostanzialmente, la mappa dei flussi si normalizza considerando minimo e massimo valore dell'ampiezza del flusso per ogni riga (ricordando che per ogni Iso-Livello la Mappa è già ordinata in modo crescente di flusso) applicando la (4.28), mentre si applica la (4.27) per il vettore delle coppie normalizzando rispetto al valore massimo in MTPA, in questo caso 650 Nm.

Si consideri dapprima la figura 4.14:

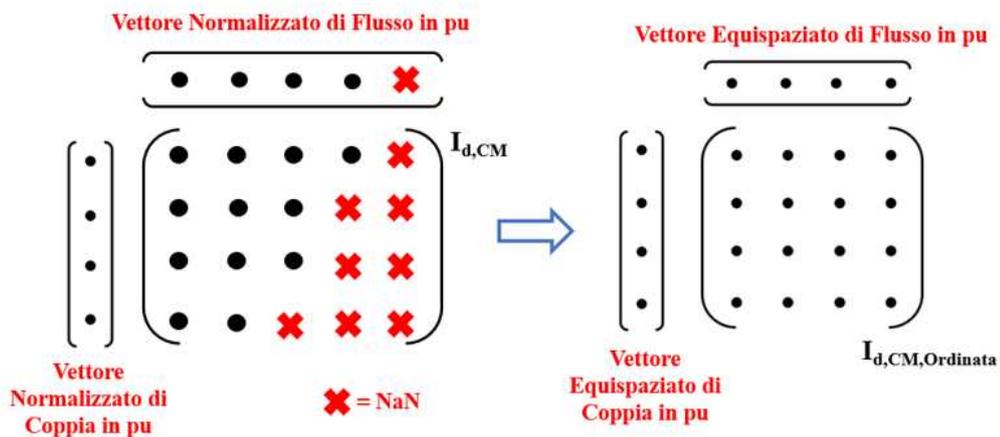


Figura 4.14: Ottenimento delle Mappe di Controllo Quadrate.

Lo schema proposto analizza il processo per il quale le Mappe di Controllo delle grandezze elettromagnetiche, contenenti anche valori NaN, sono utilizzate come matrici di Riferimento dalle quali costruire altre Mappe di Controllo Quadrate (lo schema propone l'esempio della Mappa di Controllo di Corrente in asse d). Quest'ultime si ottengono dall'interpolazione per Riga (per Iso-Livello) delle Mappe originali; l'interpolazione avviene tramite l'oggetto "**interp1**" che come Riferimento di Input si basa sulla "lettura" di ciascuna riga di ogni Mappa originale tramite le righe della Mappa di Flusso Normalizzata, e in Output restituisce una nuova Mappa interpolata dai vettori lineari (creati per questo scopo, contenenti valori da 0 a 1) di Flusso e Coppia generati dal comando "**linespace**".

In breve, l'obiettivo è la creazione di Mappe di Controllo Quadrate di tutte le grandezze per ogni Iso-Livello di Coppia, senza valori NaN, i cui elementi sono ricavati a partire da vettori normalizzati di Flusso e Coppia equispaziati.

Le Mappe di Controllo Ordinate così ottenute interessano tutte le grandezze elettromagnetiche comprese finora nello script ma non viene attuato per le Mappe Ordinate di Ampiezza di Flusso e Coppia, in quanto quest'ultime necessitano di un procedimento simile ma separato. Questo processo prende il nome di "**Ricostruzione**".

La creazione delle Mappe di Controllo Ordinate si basa sulle interpolazioni effettuate tramite dei vettori lineari equispaziati di Coppia e Flusso creati per le Mappe Ordinate delle altre grandezze elettromagnetiche; anche le rimanenti Mappe Ordinate di Flusso e Coppia si "ricostruiscono" a partire da questi vettori:

- La **Mappa di Coppia** tramite l'operatore "meshgrid" eseguito sul vettore ricostruito di coppia, quest'ultimo ottenuto dal prodotto del vettore lineare equispaziato di coppia e il massimo valore di coppia degli Iso-Livelli (è l'inverso della normalizzazione);
- La **Mappa di Flusso** tramite "interp1" fatto sui massimi e minimi flussi per ogni Iso-Livello, basandosi sul vettore ricostruito di coppia. Con questi si pratica la normalizzazione "inversa" di flusso, utilizzando come valori in p.u. il vettore lineare equispaziato di flusso.

Si chiude così lo script numero 1 delle LUTs.

Lo script numero 2, denominato "**Build_Look_Up_2**" consente di ricostruire il luogo dei punti nel piano delle correnti che definisce in Deflussaggio il "raccordo" tra i luoghi di MTPA e MTPV, sfruttando a pieno le potenzialità della macchina. Questo luogo dei punti è il "CL", o "Current Limit", e si trova manipolando i vettori "x_mtpa" e "x_mtpv" che finora, dopo essere stati ricavati per la prima volta, non sono più stati utilizzati.

Lo script pertanto manipola i vettori nei modi seguenti:

1. **Elimina tutti i punti che eccedono il limite di corrente**, impostato a 150 A;
2. Costruisce dei **punti di funzionamento in CL** a partire da quelli di componente di corrente in asse d . Se l'MTPV è incontrato in Deflussaggio, la corrente in asse d in CL va dall'estremo superiore del vettore "Id_mtpv" a quello superiore del vettore "Id_mtpa", viceversa, ed è questo il caso con corrente massima 150 A, il vettore "**Id_CL**" va da "-Imax" all'estremo superiore del vettore "Id_mtpa";
3. **Costruzione di tutti i vettori "x_CL"** a partire da quello di corrente in asse d , noto anche il valore di corrente massima di 150 A;
4. A seconda della presenza o meno dell'MTPV (a seguito dell'applicazione del limite di corrente), si "**raccordano**" **gli estremi** dei vettori "x_CL" con quelli dei "x_mtpa" e "x_mtpv", per non omettere punti di funzionamento.

Termina così anche il secondo script per la determinazione delle LUTs del controllo FPC. Prima di passare al prossimo script, si riportano alcune figure circa la Regione di Funzionamento del motore, una volta che tutti i limiti e vincoli sono stati applicati, e la Mappa di Controllo Normalizzata dell'Angolo di Carico, ossia la LUT bidimensionale utilizzata nel controllo.

In figura 4.15 si riporta dunque la Mappa di Coppia applicati i vincoli di corrente, MTPA e MTPV; a sinistra nel caso in cui la corrente massima, pari a 150 A è inferiore rispetto alla corrente caratteristica e pertanto il luogo dei punti di MTPV non si incontra in Deflussaggio, viceversa a destra nel caso in cui è pari a 160 A e superiore rispetto a quella caratteristica:

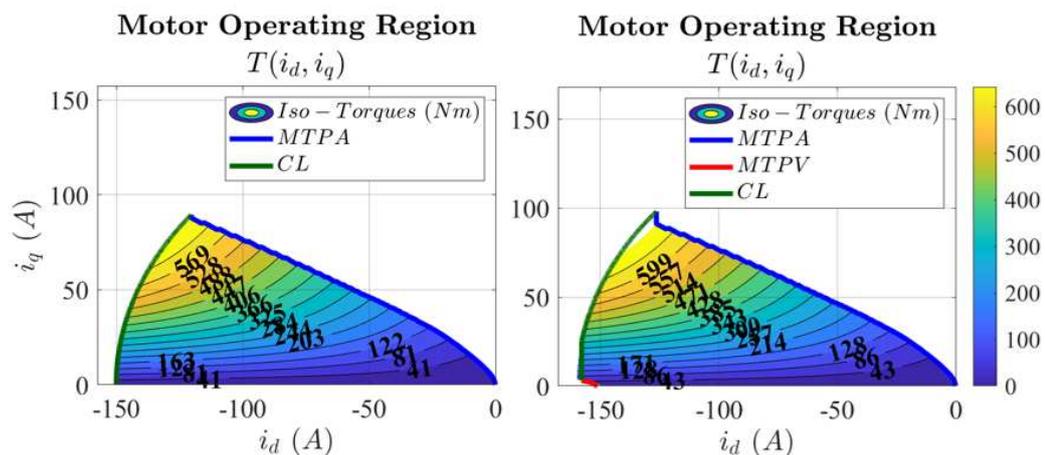


Figura 4.15: Mappa di Coppia con i Limiti di Funzionamento applicati.

Mentre in figura 4.16 lo stato della Mappa di Angolo di Carico prima delle normalizzazioni, con MTPV e senza:

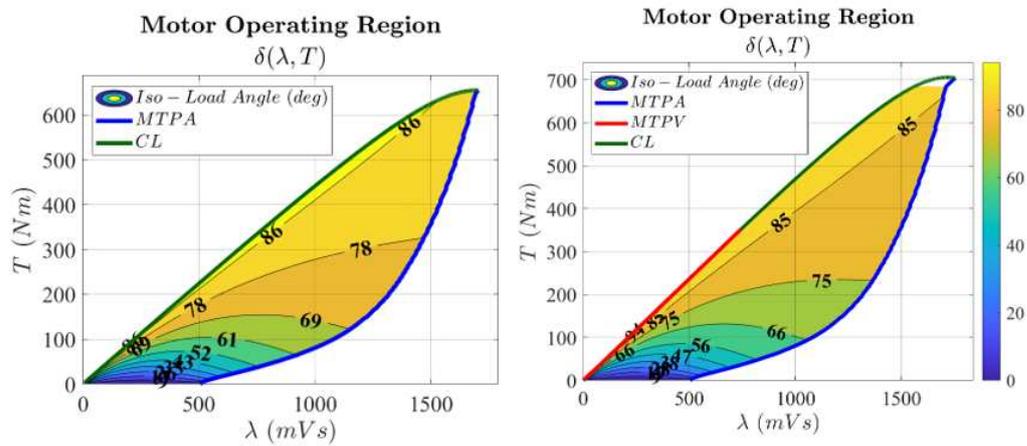


Figura 4.16: Mappa dell'Angolo di Carico prima della Normalizzazione.

E infine in figura 4.17 la Mappa di Angolo di Carico usata come LUT:

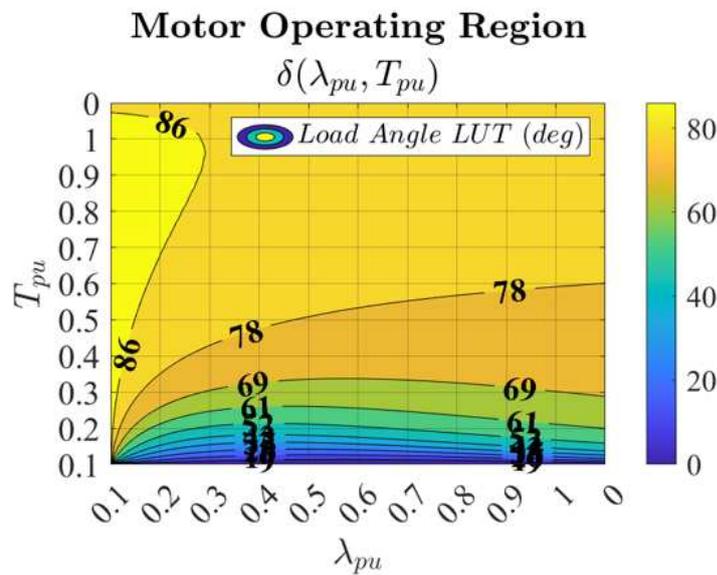


Figura 4.17: Mappa dell'Angolo di Carico.

Lo script 3 denominato “**Build_Look_Up_3**” serve per la creazione delle LUT necessarie nel controllo FPC. La risoluzione scelta per le mappe è di 128 punti, proprio come la mappa di angolo di carico. Lo script costruisce LUT mono e bidimensionali, in particolare:

- Le **LUT monodimensionali** sono state create con l’operatore “interp1”, in cui il vettore in Ascisse, quindi l’interpolante, è creato da zero a passi da 128 con estremi superiori e inferiori definiti, mentre il vettore da interpolare dipende dal tipo di LUT;
- Le **LUT bidimensionali** delle Mappe di Flusso Inverse sono già state create nello script dedicato “Flux_Maps_4Q_Creation”; tuttavia, per completezza si ricavano in questo script anche le Mappe dirette di Flusso a 2 Quadranti, per coppie positive e negative.

L’unico accorgimento da segnalare è nella creazione delle LUT in cui è coinvolto l’MTPV, poiché il luogo dei punti può o meno essere presente in Deflussaggio. Se presente, i vettori coinvolti “x_mtpv” e “x_CL” dapprima si uniscono in un unico vettore, si ordinano in senso crescente, e solo dopo si effettua l’interpolazione.

In figura 4.18 si riportano gli andamenti di tutte e 3 le LUTs necessarie per il controllo FPC:

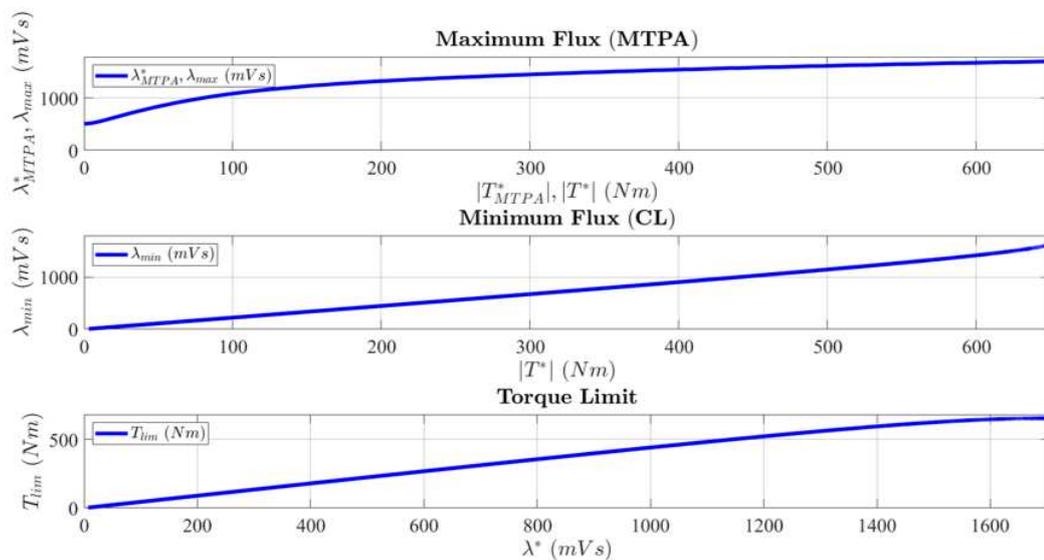


Figura 4.18: Andamenti grafici delle LUTs del controllo FPC.

Lo script Matlab “**Montecarlo_Test**” consente di effettuare una procedura di validazione di tipo Montecarlo, quindi randomica e con un elevato numero di test, il cui

scopo è l'analisi dell'accuratezza della LUT di Angolo di Carico ottenuta e della coppia elettromagnetica prodotta. Lo script genera un insieme molto grande di punti (ω, T^*) che esplora tutte le possibili condizioni di funzionamento da Motore della macchina; per ogni punto di funzionamento si emula il comportamento reale della macchina utilizzando 3 strategie di interpolazione per ricavare la coppia prodotta e si valuta infine l'errore rispetto al riferimento.

Prima di simulare il comportamento reale della macchina, lo script effettua:

1. **L'impostazione dei parametri di macchina e di inverter**, quali velocità di rotazione massima, minima, di base, tensione DC-Link, coppia e potenza massima;
2. **L'Estrazione di 100000 numeri casuali** tra 0 e 1;
3. **La generazione delle coppie casuali** (ω, T^*) a partire dalle 100000 estrazioni;
4. **Il calcolo del Riferimento di Flusso**. Per ogni punto di funzionamento casuale generato, si conserva come riferimento di Flusso il valore più piccolo tra il Flusso Massimo (in MTPA) per la Coppia casuale di riferimento, e quello Limite per la velocità di rotazione casuale generata. Sostanzialmente, è il vincolo di flusso Limite per la velocità di rotazione ad essere più "stringente", perché al di sotto della velocità base il Riferimento di Flusso è quello di MTPA, ossia il flusso massimo per la coppia di riferimento, mentre al di sopra il riferimento di flusso è proprio quello Limite per la velocità di rotazione considerata;
5. **Il calcolo del Riferimento di Coppia**. Per ogni punto di funzionamento si verifica che effettivamente la coppia casuale di riferimento possa essere raggiunta per la velocità di rotazione casuale generata. A tale scopo si confronta la coppia casuale con il limite ottenibile, quest'ultimo generato in MTPV da un'interpolazione in cui si considera il vettore dei flussi minimi (condizione di MTPV);
6. **Il calcolo delle Grandezze Elettromagnetiche**. Per ogni punto di funzionamento si ricavano utilizzando le interpolazioni comprensive dei vettori di Coppia e Flusso di Riferimento Normalizzati, applicate alle Mappe di Controllo Ordinate di fine script "Build_Look_Up_1".

A questo punto si ricavano le coppie elettromagnetiche prodotte per ogni punto di funzionamento tramite 3 strategie diverse, al fine di esprimere quale "modello" della macchina minimizza maggiormente l'errore di coppia.

La prima strategia ricava la coppia a partire dall'angolo di carico e dal flusso di riferimento, la seconda a partire dalle componenti (d, q) di corrente e la terza da quelle (d, q) di flusso. La coppia è sempre ricavata utilizzando la (4.14), mentre nella (4.23) si riporta l'equazione dell'errore di coppia:

$$\epsilon(i) = \frac{T^*(i) - T(i)}{T^*(i)}, \quad \text{con } i \text{ estrazione } i\text{-esima} \quad (4.23)$$

In figura 4.19 si riporta sulla sinistra il piano Coppia-Velocità per l'identificazione di tutti e 100000 i punti di funzionamento analizzati, i quali ricoprono ogni possibile condizione; sulla destra invece i 3 andamenti degli errori per ogni coppia di riferimento presente. Tra le tre strategie adottate, quella in corrente minimizza maggiormente l'errore, mentre quella in flusso e in angolo di carico generano similmente coppie elettromagnetiche di poco superiori rispetto al riferimento:

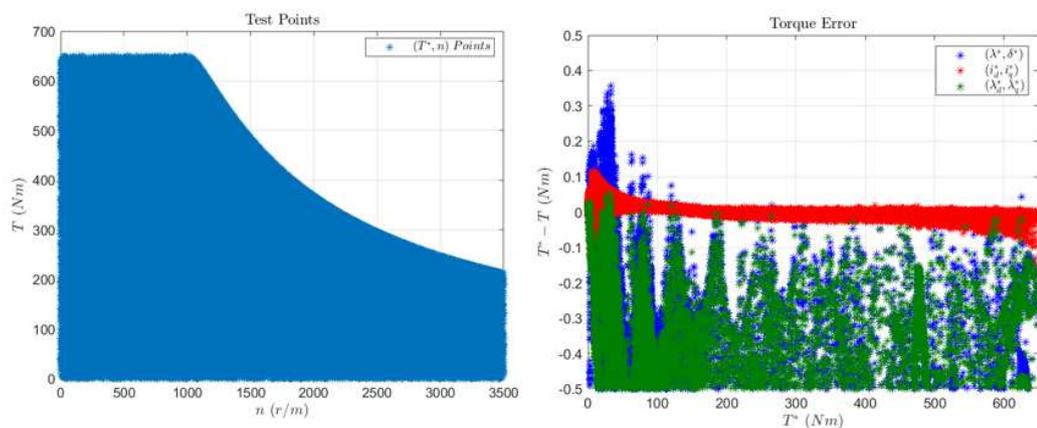


Figura 4.19: Andamenti grafici delle LUTs del controllo FPC.

Infine, lo script Matlab per la traduzione in file “.h” delle LUTs bidimensionali e monodimensionali ottenute è denominato “**Export_to_C**”, il quale viene personalizzato a seconda del tipo di LUT che si vuole generare come libreria. Innanzitutto, per poter immagazzinare i file all’interno del microcontrollore senza appesantirne inutilmente la memoria, si è deciso di riscalare le LUTs ottenute ad una risoluzione di 21 punti. La creazione del file avviene con la funzione “**fopen**”, utilizzata per aprire un file in modalità scrittura in ambiente Matlab; tramite la funzione “**fprintf**” si scrive all’interno del file.

L’obiettivo è la creazione di un file “.h” per ogni LUT da utilizzare nell’algoritmo di controllo; all’interno del file si scrivono:

1. Valore massimo, minimo, step, inverso dello step e numero di punti del **vettore Interpolante**, quindi l’Ascissa della LUT;
2. Tutti i valori in Ordinata della LUT, ossia il **vettore da Interpolare**.

Il file è una libreria che nell'algoritmo di controllo viene consultata tramite una funzione dedicata, la quale applica un'interpolazione lineare al vettore o matrice trascritta nel file, utilizzando le informazioni presenti riguardo il vettore Interpolante. Le LUT bidimensionali si trascrivono utilizzando le stesse funzioni, considerando che in questo caso i vettori Interpolanti sono 2 e le matrici da trascrivere sono anch'esse 2 nello stesso file “.h”.

È importante evidenziare che la trascrizione della matrice nel file avviene rispettando l'ordine della stessa rispetto alle componenti di corrente; spostandosi lungo la stessa Riga varia la corrente in asse d e spostandosi lungo la stessa colonna varia la corrente in asse q . Infatti, anche la funzione che in C richiama nell'algoritmo di controllo l'operazione di interpolazione delle mappe di flusso (per l'osservatore), la componente di corrente in asse q precede quella in asse d , proprio per rispettare l'ordinamento della matrice. La funzione in questione effettua l'interpolazione nelle stesse modalità descritte per “griddedInterpolant”, pertanto, se la corrente in q precede quella in d , l'interpolazione avviene utilizzando la prima per le Righe e la seconda per le Colonne, senza bisogno di trasporre la mappa di flusso.

- **Torque_Reference_Generation**, per la generazione del valore di coppia di riferimento limitato dal massimo valore di coppia ottenibile in condizioni di Deflussaggio;
- **Load_Angle_Reference_Generation**, per la generazione del valore di Angolo di Carico di riferimento a partire dalla LUT bidimensionale i cui ingressi sono i valori relativi di Coppia e Flusso;
- **Polar_Flux_Regulators**, in cui sono presenti i regolatori PI degli anelli di controllo in Flusso e Angolo di Carico;
- **Flux_Observer**, ossia l'osservatore di flusso per la stima del Flusso e Angolo di Carico con cui retroazionare gli anelli di controllo;
- **Duty_Generation**, dedicato alla generazione dei Duty Cycle a partire dai valori di riferimento di tensione in assi $(d, q)_s$ di statore.

Il primo blocco rielabora i segnali provenienti da sensori e trasduttori virtuali, quali le tre correnti di fase, la tensione DC-Link (mantenuta costante nella simulazione a 600 V), la posizione meccanica di rotore e i Duty Cycle del passo precedente; i segnali di Output sono invece le tensioni di fase ricostruite, la velocità di rotazione, l'angolo elettrico di rotore e le componenti di corrente in assi (d, q) di rotore.

All'interno del blocco si trovano 3 sezioni, come mostrato in figura 4.21:

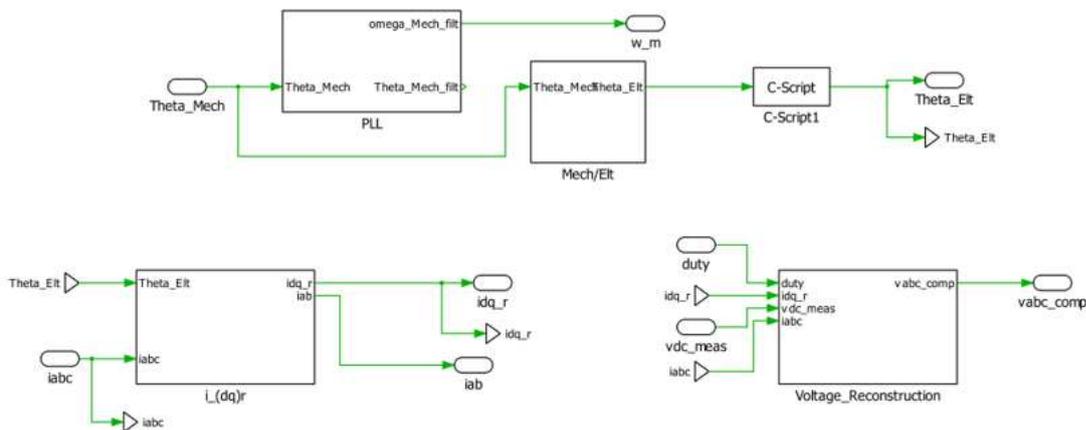


Figura 4.21: Circuito PLECS del Blocco Condizionamento di Segnale.

La prima sezione è un **PLL**, ossia “Phase Locked Loop”, utilizzato per ricavare la velocità di rotazione a partire dalla posizione meccanica di rotore; in questa applicazione,

la struttura del PLL utilizzata prevede l'uso delle funzioni trigonometriche degli angoli, evitando così le discontinuità che si presenterebbero alle variazioni periodiche dell'angolo. Similmente ad un LPF (Filtro Passa Basso) l'angolo ottenuto in uscita è filtrato ma presenta un ritardo non trascurabile che non consente di poter valutare l'angolo elettrico a partire da quest'ultimo, ma occorre utilizzare l'angolo meccanico di input, non processato. I guadagni del PI del PLL sono stati impostati con la (4.24), considerando un Margine di Fase di 60° e una frequenza di Banda di 30 Hz:

$$k_p = \frac{\omega_b \tan(\varphi_m)}{\sqrt{1 + \tan^2(\varphi_m)}} \quad k_i = \frac{\omega_b^2}{\sqrt{1 + \tan^2(\varphi_m)}} \quad (4.24)$$

In figura 4.22 lo schema PLECS del PLL (i blocchi script in figura 4.21 e 4.22 contengono delle linee di codice in C per la saturazione degli angoli a 0 e 2π):

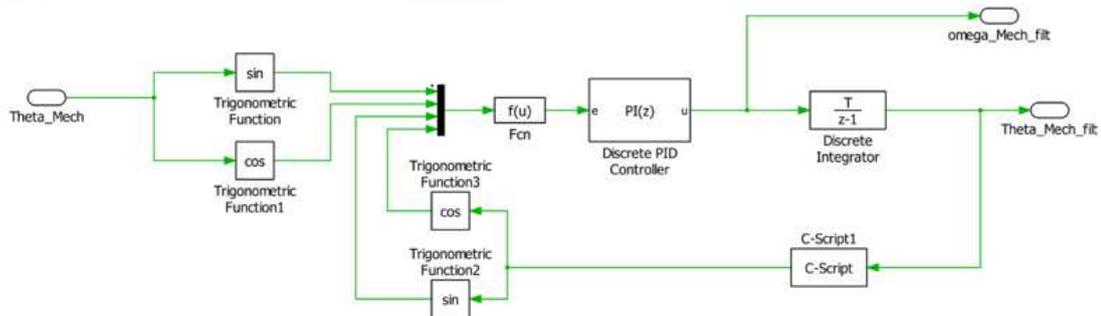


Figura 4.22: Circuito PLECS del Blocco PLL.

Successivamente, il blocco **i_{(dq)r}** consente la determinazione delle componenti in assi (d,q) di rotore delle correnti di fase, utilizzate nell'Osservatore di Flusso, nella legge di saturazione del flusso di riferimento e nella ricostruzione delle tensioni (compensazione della caduta di tensione nell'inverter, nello schema analizzato non ancora introdotto ma discusso nella sezione dedicata 5.6).

Il blocco **Voltage_Reconstruction** ricostruisce i valori ideali (senza compensazione dell'errore di inverter) delle tensioni di fase applicate al motore, a partire dai soli Duty Cycle, utilizzate nella legge di regolazione del flusso in Deflussaggio e MTPV. All'interno del blocco è possibile inserire già la compensazione dell'errore di inverter inserendo i dati ottenuti sperimentalmente nella LUT dedicata. La formulazione ideale applicata è qui proposta:

$$\begin{cases} v_{a,ideal} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2d_a - d_b - d_c) \\ v_{b,ideal} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2d_b - d_a - d_c) \\ v_{c,ideal} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2d_c - d_a - d_b) \end{cases} \quad (4.25)$$

Il secondo blocco, noto il riferimento esterno di coppia, ricava il Flusso concatenato di riferimento tramite la legge di MTPA (come luogo dei punti nel piano dei flussi) per velocità di rotazione inferiori a quella Base, mentre applica la saturazione del riferimento di flusso in operazioni di Deflussaggio per velocità superiori. I segnali di Input, oltre la coppia di riferimento, sono tutti necessari alla legge di saturazione del flusso in Deflussaggio, quali le correnti e tensioni ricostruite di fase, la velocità di rotazione, la tensione DC-Link, mentre l'unico Output è il flusso di riferimento.

La legge, a partire dalle equazioni elettriche in assi (d, q) di rotore e dalla Potenza elettrica istantanea, si scrive:

$$\lambda_{s,max} = k_{FW} \cdot \frac{\sqrt{v_{max}^2 - R_s^2 i_s^2 - \frac{4}{3} R_s P_e}}{|\omega|}, \quad \text{con } k_{FW} \text{ termine conservativo pari a } 0.9 \quad (4.26)$$

In figura 4.23 lo schema del blocco funzionale:

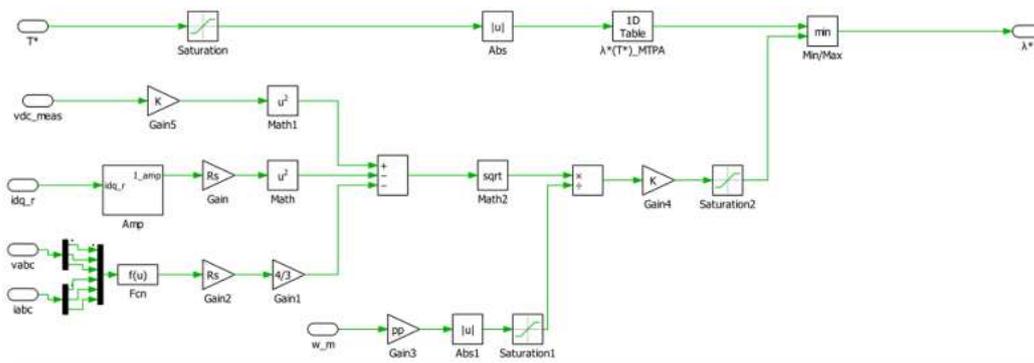


Figura 4.23: Circuito PLECS del Blocco del Flusso di Riferimento.

Con blocco “Function” per ricavare la potenza elettrica dalle componenti istantanee di fase di corrente e tensione. La LUT di MTPA consente di ottenere la relazione diretta Coppia – Ampiezza di Flusso concatenato, ottenuta tramite delle manipolazioni a partire dalla relazione di MTPA nel piano delle correnti.

Il terzo blocco applica semplicemente una saturazione della coppia di riferimento in condizioni di Deflussaggio, tramite l’ampiezza di Flusso di riferimento ottenuta e una LUT di MTPV+CL. I segnali di Input sono Coppia e Flusso, quello di Output la coppia saturata. In figura 4.24 lo schema del blocco interno:

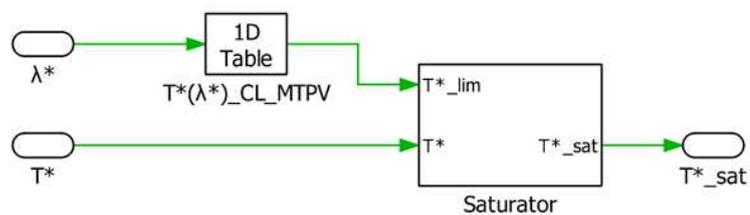


Figura 4.24: Circuito PLECS del Blocco della Coppia di Riferimento.

La LUT viene applicata per valori di velocità di rotazione superiori a quella base; la LUT gestisce entrambi i limiti di corrente e di MTPV, applicati in sequenza durante le operazioni di Deflussaggio ad alta velocità.

Il quarto blocco costituisce il cuore della strategia di controllo, ossia l’ottenimento del riferimento dell’Angolo di Carico (in radianti) a partire dai valori relativi di coppia e flusso di riferimento tramite una LUT bidimensionale, 2 Input e 1 Output; i segnali di ingresso e uscita del blocco sono proprio questi 3. In figura 4.25 si riporta lo schema interno:

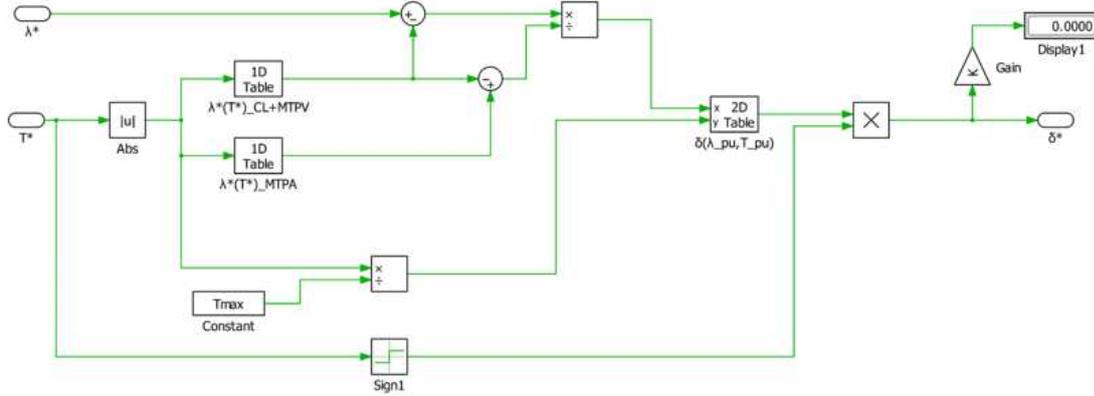


Figura 4.25: Circuito PLECS del Blocco dell'Angolo di Carico di Riferimento.

Innanzitutto si ottengono i valori relativi di Tensione e Flusso di Riferimento. La coppia normalizzata si ottiene dalla (4.27), normalizzata al Massimo valore di Coppia di Sovraccarico, ossia l'estremo valore di coppia ottenibile in MTPA:

$$T_{pu}^* = \frac{T^*}{T_{max}}, \quad \text{con } T_{max} \text{ pari a } 650 \text{ Nm.} \quad (4.27)$$

Per quanto riguarda il flusso si normalizza rispetto a:

$$\lambda_{s,pu}^* = \frac{\lambda_s^* - \lambda_{min}(|T^*|)}{\lambda_{max}(|T^*|) - \lambda_{min}(|T^*|)} \quad (4.28)$$

In cui i valori λ_{max} e λ_{min} ottenuti da due LUT differenti, quella di MTPA (già utilizzata nel blocco funzionale 2) e quella di MTPV+CL (inversa rispetto a quella usata nel blocco funzionale 3), il cui Input è sempre la coppia di riferimento non normalizzata ma espressa in valore assoluto (come descritto in sezione 4.2, le LUTs sono ottenute per coppie positive, poiché i luoghi geometrici di MTPA e MTPV sono simmetrici rispetto l'asse d nel piano delle correnti, validandone l'uso anche per coppie negative).

Il Limite Superiore della normalizzazione, λ_{max} , è ottenuto a partire dalla condizione di MTPA per il valore di coppia saturata attuale, ossia quando il flusso è quello massimo ottenibile per velocità di rotazione inferiore a quella base.

Il Limite inferiore della normalizzazione, λ_{min} , è ottenuto dalla condizione di CL+MTPV, ossia quando il flusso è minimo e massimizza la coppia ottenibile al di sopra della velocità base.

Si ottiene dunque il valore in radianti dell'Angolo di Carico, se necessario anche in gradi, mentre il segno dello stesso si ottiene dal segno della coppia di riferimento.

Il quinto blocco raggruppa i regolatori PI dei due anelli di controllo dell'algoritmo, in flusso e in angolo di carico. Pertanto, i segnali di Input sono valori di riferimento e di feedback dei due anelli, quelli di Output le componenti della tensione nel sistema $(d, q)_s$ di statore. In figura 4.26 lo schema del blocco in PLECS:

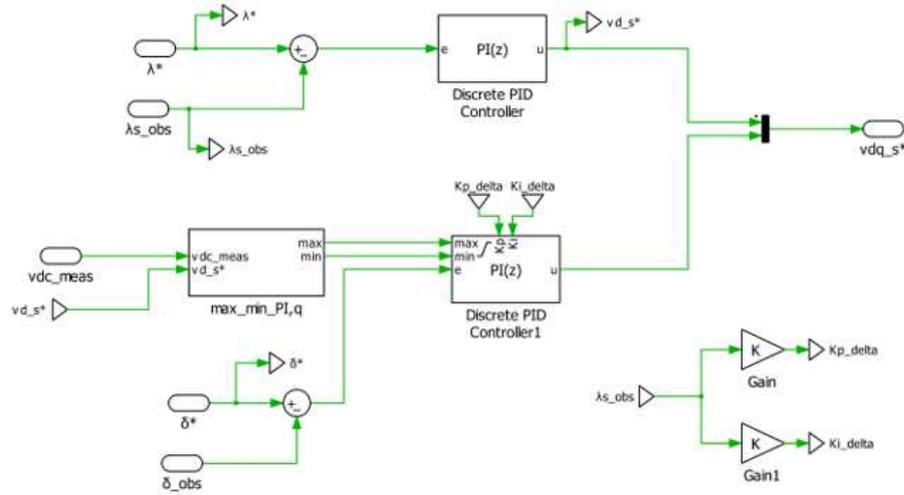


Figura 4.26: Circuito PLECS del Blocco dei Regolatori PI.

Come già descritto in sezione 4.1.2, la taratura dei regolatori PI si basa sul modello di macchina ibrido in cui le variabili di stato sono Flusso concatenato di statore e Angolo di Carico; pertanto, le equazioni differenziali in cui compaiono le variabili di stato sono direttamente quelle elettriche della macchina in assi $(d, q)_s$ di statore:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \lambda \frac{d}{dt} \delta + \omega \lambda \end{cases} \quad (4.29)$$

Dal set di equazioni differenziali di macchina, la taratura dei regolatori PI avviene in modo diretto e senza che i guadagni dipendano dalle induttanze differenziali, ossia dal punto di funzionamento; la frequenza della banda dell'anello di Flusso f_{bw} è di 1000 Hz:

$$\begin{cases} k_{p,\lambda} = 2 \cdot \pi \cdot f_{bw} \\ k_{p,\delta} = k_{p,\lambda} \cdot \hat{\lambda}_s \end{cases} \quad \begin{cases} k_{i,\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{bw}}{N} \\ k_{i,\delta} = k_{i,\lambda} \cdot \hat{\lambda}_s \end{cases} \quad (4.30)$$

Dalla figura 4.26 appare chiara l'assenza di Feed-forward, implementato successivamente nella trascrizione dell'algoritmo in C; dalle equazioni di stato, i disturbi additivi che compaiono nel modello della macchina, sono compensati tramite i due Feed-forward sommati all'uscita dei regolatori e sottratti dai limiti della parte proporzionale. I Feed-forward sono dunque:

$$\begin{cases} V_{ds,ffw} = R_s I_{ds} \\ V_{qs,ffw} = R_s I_{qs} + p\omega_m \lambda_s \end{cases} \quad (4.31)$$

Per quanto riguarda invece i limiti di saturazione delle uscite dei regolatori, ossia le tensioni in assi $(d, q)_s$ di statore, con la tecnica Anti-Windup, si sfrutta uno dei vantaggi principali del controllo FPC, ossia il disaccoppiamento dei “carichi” a cui ciascuna componente di tensione deve far fronte:

$$\begin{cases} V_{ds,lim} = 5 \cdot R_s I_{max} \\ V_{qs,lim} = \sqrt{\frac{V_{dc}^2}{3} - V_{ds,out}^2} \end{cases} \quad (4.32)$$

Come è descritto più nel dettaglio a seguire, il valore di feedback di flusso e di angolo di carico che chiudono gli anelli di controllo corrispondono a quelli ricavati nello step di simulazione (o ISR nell'algoritmo implementato nel MCU) precedente; il valore di riferimento è invece quello calcolato nello step di simulazione attuale.

Il sesto blocco descrive il funzionamento globale dell'Osservatore di Flusso, specifico per l'applicazione motore IPM del banco prova; è assente dunque la componente “unificata” del controllo FPC, in cui piccole modifiche dell'osservatore e del blocco funzionale 1 lo rendono effettivamente applicabile a qualsiasi tipologia di macchina ac (agendo su dei selettori nello schema a blocchi o su poche linee di codice nell'algoritmo in C). L'osservatore necessita dei valori di tensioni di fase compensate, corrente espressa nel sistema (d, q) di rotore, delle correnti di fase e dell'angolo elettrico di rotore; gli Output sono invece Angolo di Carico e Flusso concatenato osservati e l'angolo del vettore Flusso Concatenato di Statore rispetto al sistema di riferimento fisso (α, β) , chiamato θ_s . Quest'ultimo è necessario per la rotazione dei riferimenti di tensione al termine della routine o step di simulazione, per ritornare al sistema di riferimento trifase dal quale si ricavano i Duty Cycle. In figura 4.27 lo schema a blocchi:

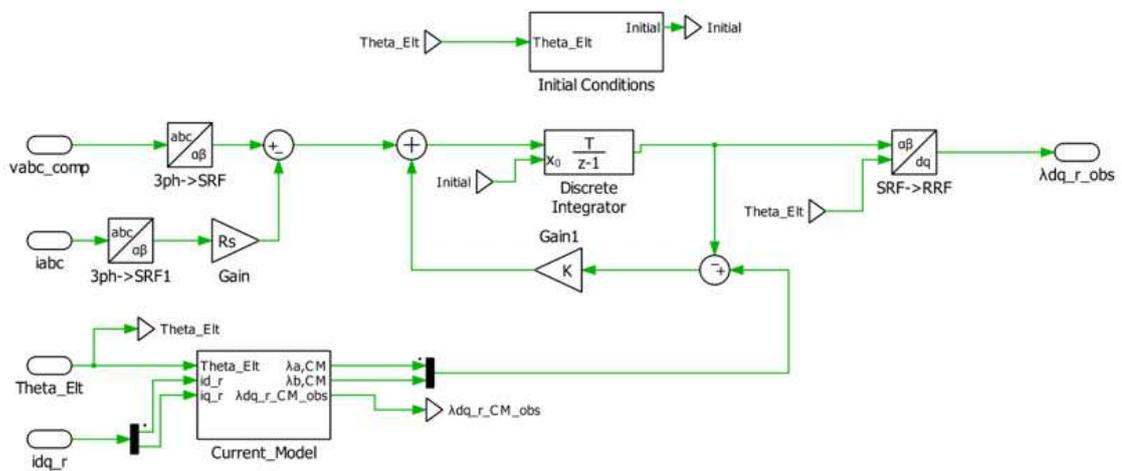


Figura 4.27: Circuito PLECS del Blocco dell'Osservatore di Flusso.

Come anticipato in chiusura del blocco precedente, l'osservatore restituisce in uscita il flusso concatenato (e da questo l'angolo di carico) relativo al passo di simulazione precedente; sostanzialmente, la correzione effettuata sullo Stimatore di Statore si basa sulla differenza tra il flusso stimato dallo Stimatore di Rotore $\lambda_{dq_r_CM_obs}$ e il flusso Osservato (quindi l'Output $\lambda_{dq_r_obs}$) nel passo di simulazione precedente. Il flusso stimato dallo Stimatore di Rotore $\lambda_{dq_r_CM_obs}$ si basa sulle Mappe di Flusso inverse, ricavate sottoforma di 2 LUTs bidimensionali, tramite i valori di corrente in assi (d, q) di rotore ricavati all'inizio della routine ISR o dell'attuale step di simulazione; pertanto, il flusso stimato dalle Mappe di Flusso è anch'esso ottenuto all'attuale passo di simulazione.

Allo step di simulazione attuale il Flusso Concatenato Osservato tramite l'integratore non è quello utilizzato come feedback dell'anello di controllo; questo viene "conservato" allo step attuale e utilizzato nello step successivo. Di seguito si riporta un estratto dell'algoritmo in C sulla struttura dell'osservatore di flusso per meglio comprendere quanto discusso:

```

Fdq_CM.d = read_two_dim_lut(...)
Fdq_CM.q = read_two_dim_lut(...)
_invrrot(Fdq_CM, SinCos_Theta_Elt, Fab_CM);

Fab_OBS = Fab_OBS_km1;

Flux_Feedback_OBS.alpha = w_obs * (Fab_CM.alpha - Fab_OBS.alpha);
Flux_Feedback_OBS.beta = w_obs * (Fab_CM.beta - Fab_OBS.beta);
    
```

```
Fab_OBS_km1.alpha += TS *(vab.alpha - RS * iab.alpha + Flux_Feedback_OBS.alpha);
Fab_OBS_km1.beta += TS *(vab.beta - RS * iab.beta + Flux_Feedback_OBS.beta);
Fab_OBS_km1.amp = sqrt(Fab_OBS_km1.alpha^2 + Fab_OBS_km1.beta^2);
```

Da cui si comprende che “Fab_OBS” è il flusso osservato Output dell’integratore allo step precedente (k-1) (eguagliato a “Fab_OBS_km1” prima che il nuovo Output del regolatore si computato) e utilizzato come feedback di controllo.

La condizione iniziale dell’integratore si ricava dalle linee di codice che seguono, in quanto il funzionamento dell’osservatore si basa sulle componenti (α, β) e occorre considerare l’effetto del flusso dei magneti sugli assi all’inizio dell’integrazione:

```
Fab_OBS_km1.alpha = FM * SinCos_Theta_Elt.cos;
Fab_OBS_km1.beta = FM * SinCos_Theta_Elt.sin;
```

L’osservatore invece è impostato ad una banda di 10 Hz. A partire dal Flusso Osservato nello step precedente si ricava l’Angolo di Carico e con quello osservato allo step attuale l’Angolo di flusso rispetto al sistema (α, β) , per motivi espressi nel blocco funzionale successivo:

$$\delta = \arctan(\hat{\lambda}_q, \hat{\lambda}_d) \quad (4.33)$$

$$\cos(\theta_s) = \frac{\hat{\lambda}_\alpha}{\hat{\lambda}} \quad \sin(\theta_s) = \frac{\hat{\lambda}_\beta}{\hat{\lambda}} \quad (4.34)$$

L’ultimo blocco permette di ricavare i Duty Cycle a partire dalle tensioni di riferimento Output dei regolatori PI. Gli Input necessari sono le tensioni in questione, la tensione DC-Link, l’angolo di flusso in (α, β) e la velocità di rotazione del motore; gli Output sono i Duty Cycle. In figura 4.28 lo schema PLECS del blocco:

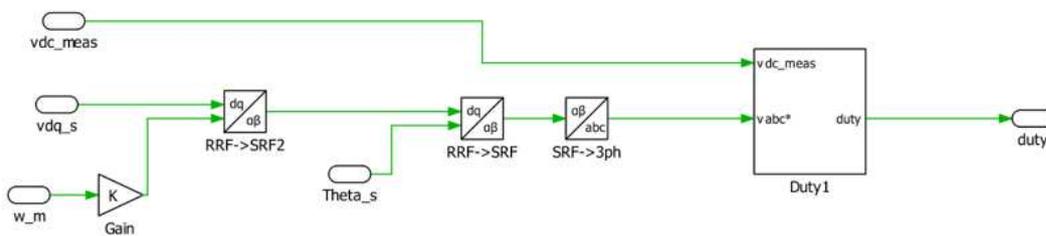


Figura 4.28: Circuito PLECS del Blocco della Generazione Duty Cycle.

Dallo schema presentato si evince la presenza di due trasformate di rotazione; la prima, tramite l'angolo di flusso nel sistema (α, β) e la seconda tramite tecnica di "Phase Advance".

La prima rotazione serve per riferire il vettore tensione al sistema (α, β) fisso di statore; poiché le componenti di tensione sono calcolate a fine ISR o step di simulazione (k), e attuate all'inizio del prossimo step o routine (k+1), è necessario che la trasformata avvenga con un **angolo "predittivo"**. Il sistema di riferimento $(d, q)_s$ di statore dal quale effettuare la rotazione, non è quello dello step attuale (k), bensì quello dello step (k+1), proprio perché si sta effettuando una rotazione sulle tensioni di riferimento attuate allo step di simulazione (k+1). Se l'angolo di flusso rispetto al riferimento (α, β) è stato calcolato con le componenti (α, β) del vettore Flusso calcolato allo step attuale (k), quindi denominato con Fab_OBS_km1 nello script precedente, allora la rotazione è eseguita correttamente.

La seconda rotazione aiuta nella **compensazione del ritardo di attuazione** delle tensioni da parte del convertitore, di circa metà periodo di commutazione se si utilizza la logica predittiva appena enunciata sull'angolo di flusso (altrimenti, in controllo FOC in assi (d, q) di rotore il ritardo è di 1.5 periodo di commutazione). La tecnica di Phase Advance permette di far fronte a questo ritardo, applicando una seconda rotazione con un angolo che dipende dalle Pulsazione del sistema di riferimento $(d, q)_s$, da ricavare tramite un apposito PLL all'uscita dell'osservatore di flusso; tuttavia, poiché per il motore in esame, di tipo IPM, è possibile confondere quest'ultima con la pulsazione elettrica di rotore, si utilizza direttamente la velocità di rotazione senza l'impiego di un ulteriore PLL:

$$\theta_{PA} = 0.5 \cdot T_s \cdot \omega_s \quad (4.35)$$

Infine, i Duty Cycle si ricavano dalle tensioni di riferimento di fase considerando una tecnica di modulazione PWM con iniezione di terza armonica. Al termine del calcolo, per lo schema a blocchi PLECS occorre inserire un ritardo digitale di 1 step per simulare il ritardo di attuazione dei Duty:

$$\begin{cases} d_a = \frac{1}{2} + \frac{v_a + v_{zs}}{V_{dc}} \\ d_b = \frac{1}{2} + \frac{v_b + v_{zs}}{V_{dc}} \\ d_c = \frac{1}{2} + \frac{v_c + v_{zs}}{V_{dc}} \end{cases} \quad \text{con } v_{zs} = \frac{v_{mean}}{2} \quad (4.36)$$

All'interno del blocco Torque_Speed_Control sono presenti 3 differenti tipologie di test che sono stati effettuati nella simulazione, tutti a tensione DC-Link pari a 600 V. In figura 4.30 lo stato interno del blocco:

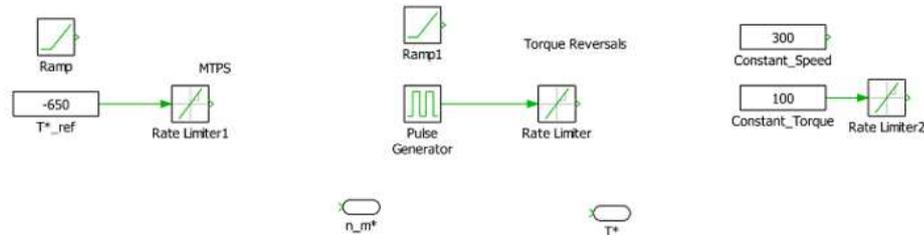


Figura 4.30: Circuito PLECS del Controllo Coppia-Velocità.

Da sinistra verso destra, connettendo appositamente ai due Output di Coppia e Velocità di Riferimento, si possono effettuare:

1. **MTPS** con funzionamento da Motore o Generatore;
2. **Test di Alta Dinamica di Coppia**, in cui la stessa viene fatta variare tra Massimo Positivo e Negativo in breve tempo;
3. **Test a Coppia e Velocità Variabile in tempo reale** da parte dell'utente.

Il primo test condotto sul sistema consiste nella variazione a Rampa della velocità di rotazione del motore da 0 a 3500 r/min, imponendo simultaneamente una coppia di riferimento pari a quella Massima, in funzionamento da Motore o da Generatore. Se il controllo FPC è impostato correttamente, la macchina è in grado di sfruttare a pieno le sue potenzialità in ogni punto di funzionamento, al di sotto della velocità base di circa 1000 r/min seguendo la legge di MTPA, al di sopra della stessa seguendo dapprima il Limite di Corrente e successivamente la legge di MTPV. Ciò che ci si aspetta è che la coppia durante tutto il test sia pari al massimo valore che la macchina è in grado di generare per quel valore di velocità di rotazione, ossia segua il luogo dei punti chiamato MTPS.

In figura 4.31 i risultati della simulazione da Motore per le grandezze Meccaniche:

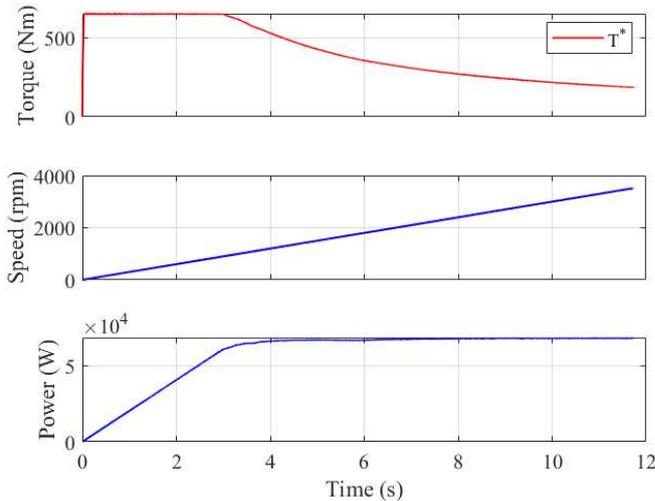


Figura 4.31: Test MTPS da Motore: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.

Dalle quali è possibile valutare:

→ Per la **Coppia** l'andamento tipico di MTPS per una macchina IPM, con decadimento inversamente proporzionale alla velocità in condizioni di Deflussaggio, ovvero superata la velocità base di:

$$n_{\text{base}} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3} \cdot pp \cdot \lambda_{\text{max}}} \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 1.7} \cdot \frac{60}{2\pi} = 972 \text{ rpm} \quad (4.37)$$

→ Per la **Potenza**, nella fase a coppia costante cresce con andamento lineare, mentre superata la velocità base è possibile sfruttare a pieno la regione a Potenza Costante.

In figura 4.32 i risultati della simulazione da Motore per le grandezze di controllo:

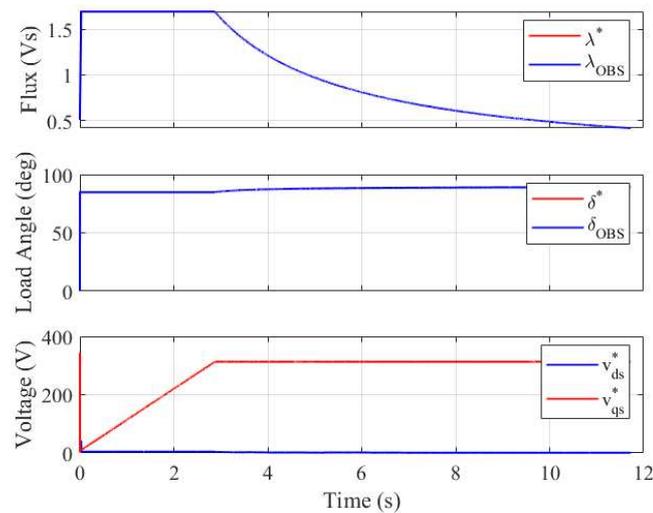


Figura 4.32: Test MTPS da Motore: Flusso, Angolo di Carico e Tensioni $(d, q)_s$ nel tempo.

Dalle quali emerge che:

- Il **Flusso Osservato** segue l'andamento di quello di riferimento, dapprima costante e pari al valore massimo ottenibile in MTPA. In Deflussaggio, raggiunto il limite di saturazione della tensione dell'inverter (pari a $\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}$, ossia a 346 V) per poter fornire coppia a velocità di rotazione superiori a quella base occorre ridurre il flusso concatenato nella macchina, seguendo le condizioni di Current Limit e MTPV;
- **L'angolo di Carico Osservato** segue anch'esso quello di riferimento, dapprima costante e pari al valore in condizioni di MTPA (nel piano dei Flussi il vettore è orientato sull'MTPA con un angolo di circa 85°), mentre in Deflussaggio l'angolo cresce fino a circa 89° (vicino alla condizione ideale di MTPV in cui è pari a 90°). Non solo, ma angoli di carico così vicini all'asse in quadratura del piano dei flussi, indica un aspetto fondamentale della macchina, ossia che il rapporto flusso dei magneti-flusso prodotto dalle correnti è molto più sbilanciato verso il secondo, quindi la coppia totale prodotta sarà dovuta principalmente alla componente di "Riluttanza" della macchina, e non ai magneti che contribuiscono in più piccola parte;
- **Le Tensioni di Riferimento** invece confermano quanto detto precedentemente, ossia che gestiscono in modo disaccoppiato le variazioni di flusso, adibite all'asse d_s limitato solo dalla caduta resistiva, e la back-emf, adibita all'asse q_s e limitata dalla tensione massima ottenibile (legata dinamicamente alla tensione in asse d_s).

In figura 4.33 i risultati della simulazione da Motore per i confronti tra le variabili Reali (ottenute tramite Probe Virtuali) e quelle Osservate:

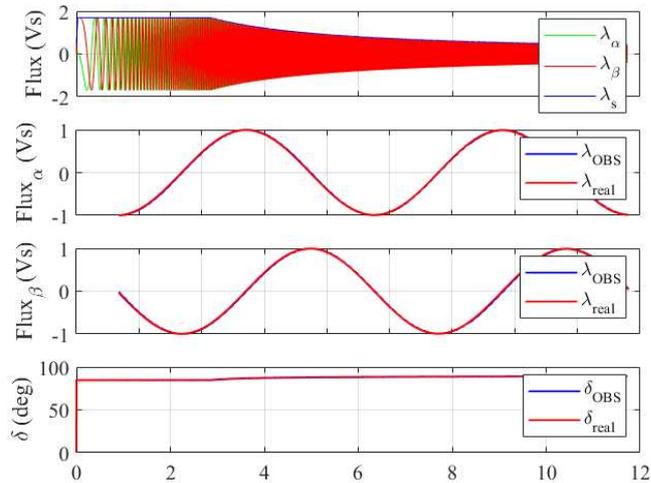


Figura 4.33: Test MTPS da Motore: Flussi (α, β) e Angolo di Carico "Reali" e Osservati nel tempo.

Dalla quale risulta che le variabili osservate ripercorrono perfettamente quelle “reali” ottenute da Probe Virtuali, mentre in (α, β) le componenti di flusso aumentano man mano in frequenza all’aumentare della velocità di rotazione del motore (sempre in quadratura tra di loro).

Di seguito si riportano gli andamenti delle grandezze ottenute con la simulazione da Generatore; la differenza più importante risiede nella quantità di flusso che si ottiene in queste condizioni, maggiore rispetto a quello che si ottiene in funzionamento da motore. Infatti, da Generatore le cadute resistive consentono di ottenere più back-emf per la stessa velocità di rotazione del motore e tensione DC-Link, essendo la potenza entrante quella meccanica necessariamente comprensiva delle perdite del sistema. In figura 4.34 i risultati ottenuti per la simulazione da Generatore per le grandezze meccaniche:

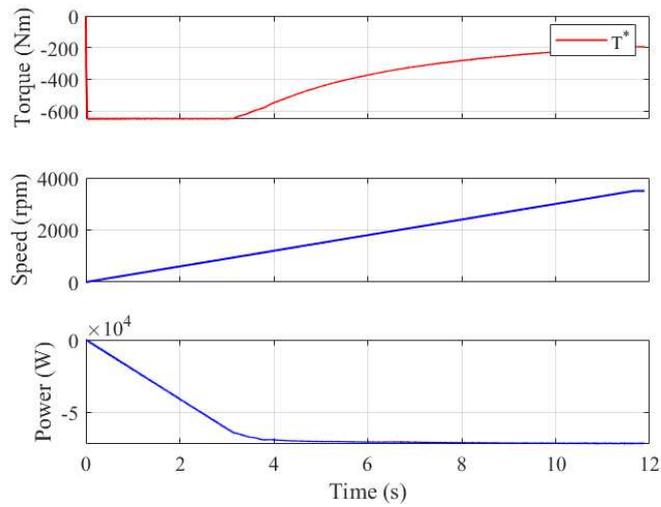


Figura 4.34: Test MTPS da Generatore: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.

Mentre per le grandezze di controllo in figura 4.35:

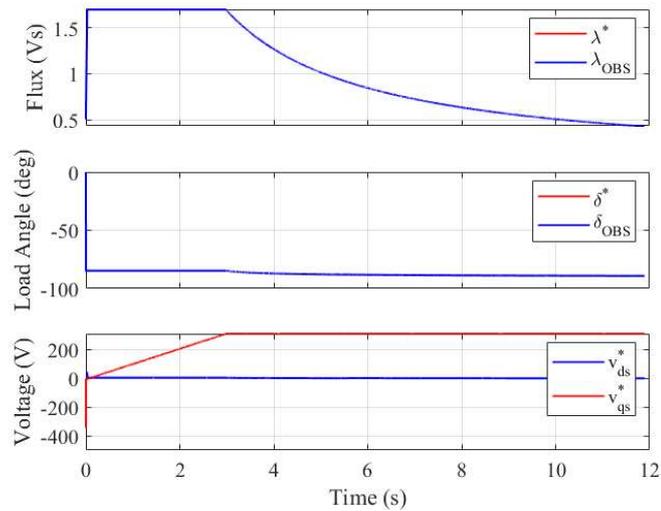


Figura 4.35: Test MTPS da Generatore: Flusso, Angolo di Carico e Tensioni $(d, q)_s$ nel tempo.

Il secondo test condotto sul sistema consiste nella variazione dinamica di coppia a 4 Hz, con uno Slew Rate di circa 12 Nm/ms, ovvero la coppia passa dall'estremo positivo di 650 Nm a quello negativo di -650 Nm in 100 ms. La velocità di rotazione è sempre

impostata a rampa fino al valore massimo di 3500 r/min. I valori di frequenza e Slew Rate di coppia sono stati scelti in modo da stressare il controllo FPC per convalidarne l'accuratezza in condizioni dinamiche spinte e per ottenere coppia costante per qualche millisecondo ad ogni nuovo valore positivo o negativo raggiunto.

I risultati ottenuti per le grandezze meccaniche mostrati in figura 4.36:

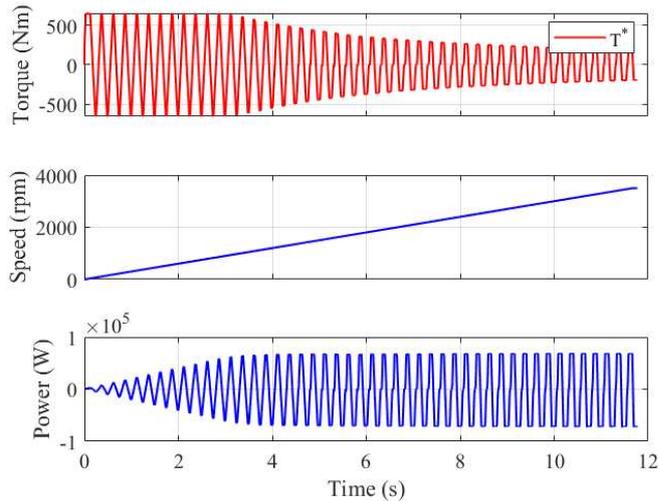


Figura 4.36: Test Dinamico: Coppia, Velocità e Potenza nel tempo.

Mentre per le grandezze di controllo in figura 4.37:

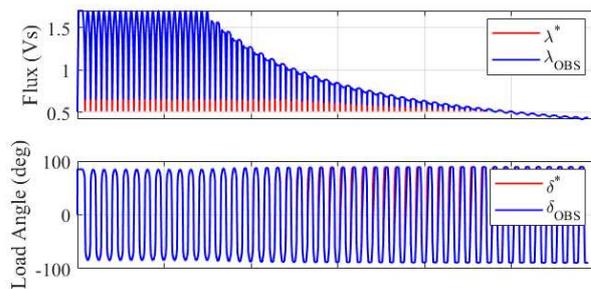


Figura 4.37: Test Dinamico: Flusso e Angolo di Carico nel tempo.

Da cui il flusso rimane sempre positivo essendo il valore target in MTPA e CL+MTPV lo stesso in Motore o Generatore, tuttavia con delle diminuzioni del riferimento durante le variazioni di coppia tra il valore massimo (valore assoluto) e lo zero. D'altra parte l'angolo di carico segue il segno della coppia portando il vettore flusso a ruotare di quasi 180° in Deflussaggio tra Motore e Generatore.

Infine, la terza simulazione effettuata consiste nella verifica dell' accuratezza della regolazione di coppia in condizioni stazionarie. Sostanzialmente, la coppia viene fatta variare tra valore massimo e minimo con frequenza molto bassa, aspettando le condizioni di regime per diverse velocità di rotazione. Per semplicità si riportano solamente due test eseguiti a velocità di rotazione inferiore e superiore rispetto a quella base, rispettivamente di 700 rpm e 2000 rpm. La coppia varia invece da -650 Nm a 650 Nm a passi di 100 Nm nel primo caso, mentre in Deflussaggio da -350 Nm a 350 Nm circa, ossia i massimi valori ottenibili a quella velocità di rotazione. In figura 4.38 i test eseguiti:

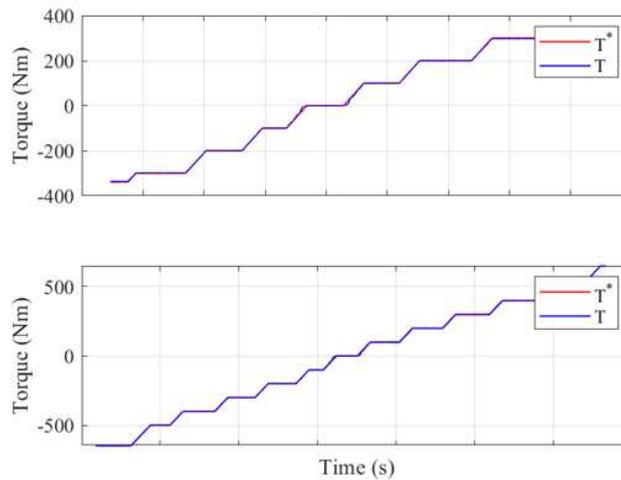


Figura 4.38: Test di Accuratezza, step di Coppia a 700 e 2000 rpm.

Capitolo 5

Assemblaggio e Validazione Sperimentale

Il capitolo conclusivo del progetto di tesi riguarda l'assemblaggio del sistema unificato e la validazione sperimentale dei suoi componenti. Questo passaggio finale mira a verificare come le diverse unità progettate interagiscono fra loro in modo efficiente, per garantire prestazioni ottimali del banco prova e soddisfare i requisiti di sicurezza e affidabilità.

L'obiettivo dell'assemblaggio del sistema è duplice: da un lato, assicurare una corretta configurazione e interconnessione tra le diverse schede e sottosistemi, e dall'altro, eseguire test sperimentali per valutare la funzionalità e l'efficacia delle soluzioni progettuali. Questo capitolo descrive dunque l'approccio seguito per l'assemblaggio fisico e le metodologie impiegate nei test di validazione. Il processo di testing è fondamentale per verificare il corretto funzionamento dei singoli componenti e del sistema complessivo e per garantire che quest'ultimo sia pronto per essere utilizzato nel contesto del laboratorio, rispondendo a tutte le specifiche e alle condizioni di sicurezza previste.

Rispetto alle fasi progettuali analizzate finora, quest'ultima è stata affrontata con un approccio molto più pratico, direttamente in laboratorio. Un approccio di questo tipo non riguarda unicamente una metodologia necessaria per questa fase del progetto, ma anche un'occasione di apprendimento e miglioramento continuo, dove si possono identificare eventuali aree di miglioramento e ottimizzare ulteriormente il sistema. Non solo, ma sono state approfondite diverse tecniche pratiche di assemblaggio e validazione, dalla saldatura delle schede elettroniche al montaggio dei pannelli in alluminio della scatola che racchiude il sistema.

Di fondamentale importanza è stato l'approccio sistematico e ordinato delle fasi che hanno caratterizzato ogni momento della realizzazione finale del sistema unificato. Nei capitoli successivi segue dunque la descrizione completa di queste fasi per tutti quei componenti del sistema che rivestono nel banco prova un ruolo fondamentale. Per ognuno di questi infatti, prima di iniziare il processo di test e validazione, è stata compilata una lista di task e obiettivi che ne scandiscono lo sviluppo.

5.1 Scheda di Servizio

5.1.1 Assemblaggio della Scheda di Servizio

Come già menzionato nella sezione 2.1, la scheda di servizio è stata già ultimata anche nello sbroglio nei lavori di tesi precedenti [1]. Non solo, ma anche la sua produzione in quattro copie è stata precedentemente ordinata. Pertanto, di seguito in figura 5.1 si riporta lo stato iniziale della stessa al termine della produzione:

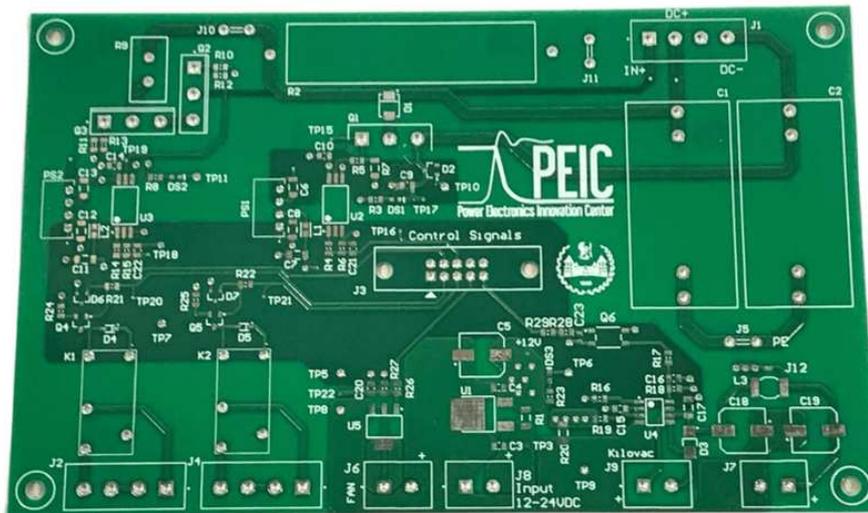


Figura 5.1: Stato iniziale della Scheda di Servizio.

Da come è possibile notare in figura, ultimata la sua produzione, la scheda si presenta priva di qualsiasi componente montato. Terminata l'ispezione visiva della scheda per accettarsi dell'assenza di difetti di produzione superficiali, si definiscono le fasi che ne hanno caratterizzato l'assemblaggio:

1. Disposizione del file BOM e ordinamento dei componenti;
2. Preparazione degli strumenti necessari per l'assemblaggio dei componenti SMD;
3. Framing della scheda e stesura della pasta saldante;
4. Montaggio componenti SMD;
5. Cottura della scheda;
6. Preparazione strumenti necessari per la saldatura dei componenti Through Hole;

7. Saldatura dei componenti Through Hole;
8. Verifica per ispezione visiva del corretto assemblaggio di ogni componente.

La prima fase del processo di assemblaggio della scheda di servizio è la disposizione del file BOM della scheda per il corretto ordinamento dei componenti. Un file BOM (Bill of Materials) è un documento Excel che elenca tutti i componenti necessari per l'assemblaggio di un PCB o per altri progetti hardware che coinvolgono una serie di componenti elettrici. In figura 5.2 si riporta un estratto di questo file:

Designator	Comment	Footprint	Value	Quantity
C1, C2	R413W41004000M	R413W41004000M	1uF	2
C3, C4, C15	C	0805-M	100nF	3
C5, C18, C19	EEE-FT1E471AP	FP-FTF-MFG	470uF	3
C6, C7, C8, C11, C12, C	C	1206-M	4u7F	7
C9	C	0805-M	220nF	1
C10, C14	C	0805-M	470nF	2
C16, C20	C	0805-M	10nF	2
C21, C22	C	0805-M	NM	2
C23	C	0603-M	N.M.	1

Figura 5.2: Estratto BOM della Scheda di Servizio.

Il file BOM contiene dunque per ogni componente il codice identificativo univoco, una descrizione o commento, la quantità, il valore con l'unità di misura e package o dimensioni. Il file BOM è fondamentale per garantire che tutti i componenti siano disponibili al momento dell'assemblaggio; non solo, ma permette il loro corretto ordinamento una volta disponibili. Quest'ultima operazione è stata affrontata verificando inizialmente che ogni componente fosse disponibile nelle quantità e nel valore, e successivamente ordinando i componenti per tipologia (resistenze con resistenze, condensatori con condensatori, ecc...) in ordine crescente o decrescente per valore. Nel momento in cui i componenti sono richiesti per essere montati sulla scheda, questo tipo di ordinamento preliminare permette di identificare prontamente il componente necessario.

La seconda fase riguarda invece la preparazione degli strumenti necessari per l'assemblaggio dei componenti SMD, ossia "Surface Mount Devices"; questi sono componenti elettronici progettati per essere montati direttamente sulla superficie del PCB senza la necessità di fori passanti. In figura 5.3 sono presentati gli strumenti utilizzati in questa fase del processo di assemblaggio:



Figura 5.3: Strumenti utilizzati nelle fasi di Assemblaggio.

L'insieme degli strumenti utilizzati e presentati in figura comprende:

- Telaio per Framing scheda;
- Spatola per la stesura della pasta saldante;
- Pasta saldante;
- Componenti SMD.

Il telaio per il framing della scheda contiene una lastra in alluminio fornita dal produttore del PCB nella quale sono ricavati degli intagli corrispondenti ai pad dei componenti SMD sulla scheda; come descritto nella fase successiva, essi consentono alla pasta saldante di essere posizionata unicamente in corrispondenza dei pad effettivamente presenti sul PCB. D'altra parte, le spatole per la stesura della pasta sono disponibili in varie forme e dimensioni, a seconda delle esigenze di stesura. Per questo tipo di applicazione è stata scelta una spatola di larghezza inferiore rispetto a quelle utilizzate per più grandi PCB, utilizzata spalmando la pasta saldante lungo il lato corto della stessa. Infine, la pasta saldante adoperata è composta da una miscela di particelle di lega metallica (tipicamente stagno) immerse in un flussante. Una volta depositata sui pad del PCB, i componenti SMD sono posizionati sulla pasta prima di passare attraverso il processo di riscaldamento o cottura, in cui questa si scioglie saldandoli sulla superficie della scheda.

La terza fase comprende nel dettaglio il framing della scheda e la stesura della pasta. In figura 5.4 si riporta lo stato della scheda una volta montata sul telaio, con il livello superiore rivolto verso la lamina in alluminio descritta precedentemente:

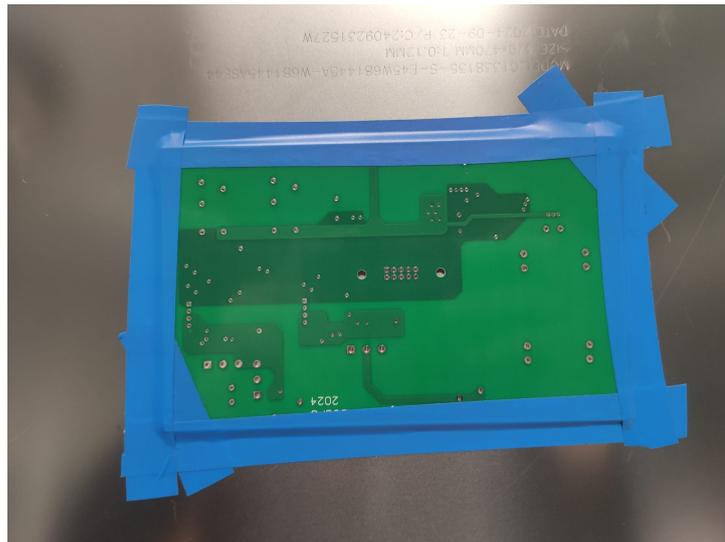


Figura 5.4: Framing della Scheda di Servizio.

Il posizionamento della scheda sul telaio deve essere effettuato in maniera precisa e coordinata con la lamina di alluminio; in particolare, come già accennato, gli intagli praticati su quest'ultima devono combaciare con i pad dei componenti sulla scheda. Il fissaggio si può praticare semplicemente con nastro adesivo. Successivamente, si pratica la stesura tramite spatola della pasta saldante; quest'ultima risulta abbastanza porosa e solida, ma tramite la spatola si può facilmente stendere sul PCB. La stesura si ritiene terminata quando, per ispezione visiva, tutte le piazzole e pad dei componenti sono rivestiti da sufficiente pasta senza sbavature, come riportato in figura 5.5:

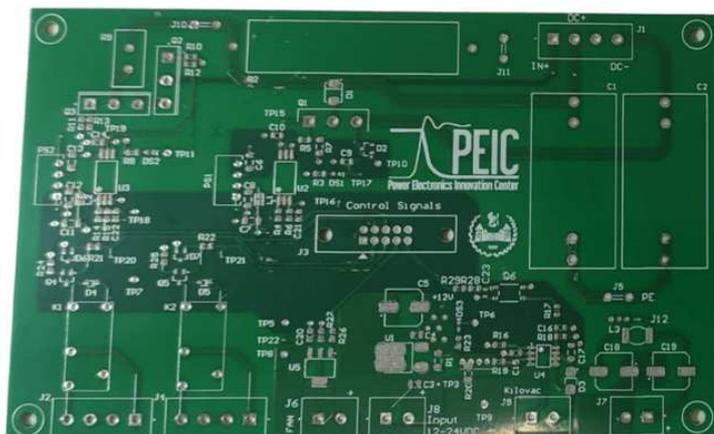


Figura 5.5: Scheda di Servizio dopo Stesura della Pasta Saldante.

Rispetto allo stato precedente riportato in figura 5.1, qui è possibile notare la presenza della pasta saldante nei pad dei componenti SMD, in grigio.

La quarta fase del processo riguarda quindi il posizionamento dei componenti SMD. Sfruttando l'aderenza della pasta saldante, è possibile posizionarvi sopra i componenti in modo ordinato seguendo il contenuto della lista BOM. Un ulteriore aiuto utilizzato per identificare prontamente la posizione dei componenti è stato il software Altium Designer, con la sua funzione di ricerca degli stessi sul PCB.

Pertanto, seguendo l'ordinamento della BOM, la scheda al termine del posizionamento dei componenti SMD si presenta come riportato in figura 5.6:



Figura 5.6: Scheda di Servizio dopo Posizionamento Componenti SMD.

La quinta fase fa riferimento alla cottura della scheda una volta che tutti e soli i componenti SMD vi sono stati posizionati. Il processo di cottura prevede innanzitutto il posizionamento corretto della scheda nello sportello dedicato, attenzionando che non vi sia possibilità di scorrimento di questa al suo interno. La fase di cottura prevede un ciclo standard per questa scheda come riportato nel grafico in figura 5.7:

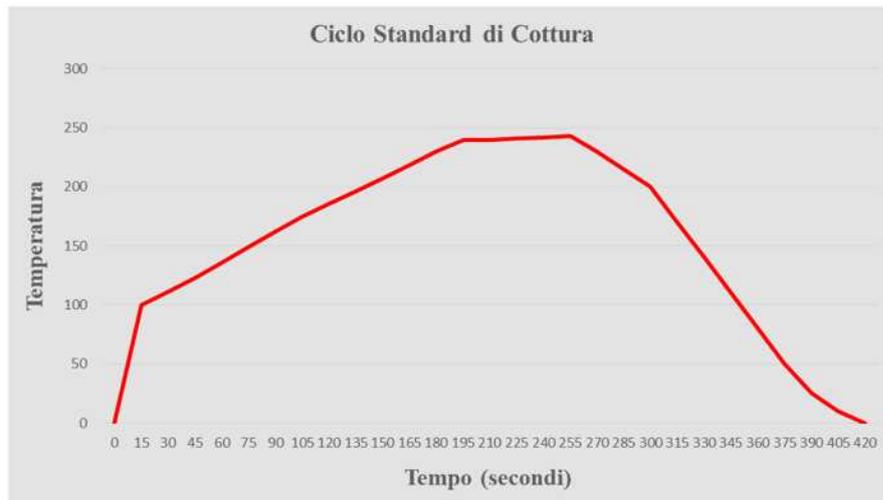


Figura 5.7: Ciclo di Cottura per PCB.

Terminato il ciclo di cottura dopo circa sette minuti, è possibile rimuovere la scheda dal forno e per ispezione visiva controllare possibili spostamenti indesiderati dei componenti a seguito del restringimento della pasta saldante alle elevate temperature. Come riportato in figura 5.8, durante il processo di cottura di una delle schede DC Side, un condensatore elettrolitico (C19) ha riscontrato quanto appena discusso; il suo riposizionamento è avvenuto tramite saldatura a mano sulla superficie del PCB del collegamento tra il pad del componente e il suo terminale non combaciante.

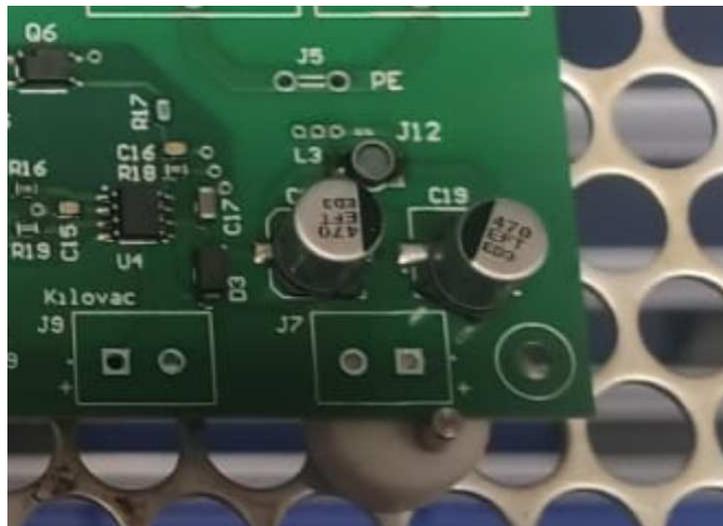


Figura 5.8: Spostamento Condensatore durante Processo di Cottura.

La sesta fase prevede la preparazione di tutti gli strumenti necessari alla saldatura dei componenti THT (Through Hole Technology), ossia dotati di pin o terminali che vengono inseriti attraverso i fori ricavati sul PCB e saldati sul lato opposto. Gli strumenti utilizzati, riportati in figura 5.9, sono stati:

- Stazioni di saldatura a stagno con diverse punte;
- Fili di stagno con diversi diametri;
- Stringa di rame per pulizia di saldature errate;
- Prodotti chimici di pulizia saldatura con spazzola;
- Componenti Through Hole.



Figura 5.9: Strumenti Utilizzati per Processo di Saldatura Componenti THT.

Le stazioni di saldatura utilizzate sono state prevalentemente quelle a punta piccola per la saldatura di componenti più piccoli coordinatamente con filo di stagno di diametro inferiore, e punta grande per la maggior parte dei componenti rimanenti coordinatamente con filo di stagno di diametro più grande. Non solo, talvolta per l'eliminazione di bolle di stagno non desiderate si è ricorso all'utilizzo di un saldatore aspirante. Per quanto riguarda l'eliminazione di tracce di stagno e depositi dello stesso sulla superficie del PCB si è utilizzata la stringa di rame mostrata in figura; quest'ultima permette la rimozioni di tali residui applicandovi il saldatore; il calore si trasferisce attraverso la treccia di

rame, sciogliendo lo stagno presente sul PCB. Il rame, essendo un buon conduttore, attrae lo stagno sciolto per capillarità, separandolo dai pad o dalle piazzole della scheda. Infine, il prodotto chimico di pulizia serve appunto per la rimozione finale delle impurità superficiali lasciate dal processo di saldatura; spruzzandone una giusta quantità sul PCB e utilizzandovi la spazzola presente, si riesce a pulirne la superficie definitivamente.

Le ultime due fasi del processo riguardano la saldatura dei componenti Through Hole e la verifica del corretto assemblaggio di ogni componente. Di seguito si riportano alcuni accorgimenti che sono stati presi in considerazione durante questa fase:

- Posizionamento dei connettori in modo che i futuri attacchi siano rivolti verso l'esterno della scheda e non verso l'interno;
- Posizionamento generale dei componenti quanto più centrato e dritto possibile;
- Posizionamento dei Transistor identificando tramite datasheet a che terminale corrisponde ciascuna gamba;
- Saldature effettuate sulla parte inferiore della scheda;
- Connettori con tanti pin specifici collocati allineando la freccia di riferimento con quella riportata sul footprint presente sulla scheda;
- Taglio finale dei terminali di ciascun componente una volta saldati, affinché non sporgano eccessivamente sulla parte inferiore del PCB.

Successivamente, si verifica per ispezione visiva che non vi siano errori di montaggio o componenti disallineati; tramite l'aspiratore è possibile sia rimuovere gli eccessi e impurità di stagno presenti, sia dissaldare componenti per sostituirli o raddrizzarli. Se l'assemblaggio della scheda risulta eseguito correttamente, si passa alla pulizia tramite prodotto chimico e spazzola come prima menzionato.

Il processo di assemblaggio della DC Side board è stato condotto per un totale di tre schede, utilizzando per tutte l'ordinamento proposto finora. Terminata la fase di assemblaggio, segue la sezione di verifica e validazione sperimentale della stessa. In figura 5.10 si riporta infine lo stato del PCB terminato l'assemblaggio:



Figura 5.10: Stato Finale della Service Board.

5.1.2 Test e Validazione della Scheda di Servizio

In questa sezione si presenta una dettagliata analisi del processo di validazione sperimentale della DC Side Board, una volta assemblata, per ogni sua macroarea funzionale. Le tecniche di validazione utilizzate per questa fase del progetto sono state molteplici; la ridondanza dei test per determinate sezioni operative, sfruttando anche strumentazioni diverse, consente da una parte di assicurare che ogni sezione operativa della scheda funzioni correttamente in accordo alle decisioni progettuali, dall'altra consente di rispettare i requisiti principali di integrazione della scheda nel banco prova, ossia l'affidabilità e la sicurezza del sistema.

Come già anticipato nella sezione introduttiva 5, i processi di assemblaggio e validazione dei componenti principali del sistema unificato sono caratterizzati tutti dal medesimo approccio ordinato in fasi precedentemente concordate; gradualmente, si utilizzano strumentazioni sempre più complesse, costituendo dunque una sequenza progressiva di procedure di testing sempre più precisa, fino alla completa validazione del componente.

Pertanto, le fasi del processo di validazione sperimentale della scheda di servizio sono state:

1. Creazione connettore di alimentazione principale;
2. Saldatura jumper di connessione alimentazione da scheda a contattore principale kilovac;
3. Alimentazione della scheda e verifica accensione LED;
4. Alimentazione 5V scheda;
5. Programmazione STM32 Nucleo-64 STMicroelectronics;
6. Connessione alimentazione 5V da Nucleo Board;
7. Connessione pin Nucleo Board a connettore di interfaccia tra la Dc Side board e la Control Board;
8. Verifica funzionamento Relè 1 e 2;
9. Verifica funzionamento Fan ausiliario;
10. Verifica funzionamento Kilovac;
11. Connessione scheda di servizio ad alimentatore esterno a 40V;
12. Verifica funzionamento Precarica;

13. Verifica funzionamento Scarica;
14. Acquisizioni tramite oscilloscopio della tensione DC-Link (a bassa tensione) durante le fasi di precarica e scarica;
15. Creazione finale del connettore di interfaccia tra la DC Side Board e la Control Board.

La fase 1 riguarda nello specifico la creazione del connettore dell'alimentazione 12V principale della scheda. Al fine di migliorare l'efficienza e la pulizia dell'alimentazione, rendendo il sistema meno suscettibile al rumore e ai disturbi elettromagnetici, i cavi di ground e di polo positivo sono stati twistati tra di loro, utilizzando un trapano. Affinché sia possibile l'alimentazione della scheda, è necessario dapprima chiudere i cavi all'interno del connettore maschio; questa operazione è stata condotta semplicemente attraverso un cacciavite. In figura 5.11 si riporta lo stato finale del cavo di alimentazione:



Figura 5.11: Cavo di Alimentazione della Service Board.

La seconda fase del processo di validazione descrive invece un'operazione più delicata effettuata per le ragioni espresse nel capitolo 2.2.2, in particolare riguardo la descrizione dei segnali “KVAC_+” e “KVAC_ON_-”. La saldatura del Jumper presente sulla superficie del PCB consente quindi di alimentare direttamente dalla scheda la bobina a 12V responsabile della chiusura continua del contattore principale del sistema, ossia il Kilovac. La saldatura è stata praticata utilizzando il filo di stagno di diametro inferiore, essendo il Jumper un componente più piccolo.

La terza fase riguarda la diretta alimentazione a 12V del PCB. Tramite un alimentatore da banco opportunamente impostato su questo valore di tensione, è possibile tramite il connettore costruito in precedenza alimentare direttamente la scheda. Il primo passo per un'opportuna validazione di questa fase è la verifica della corretta accensione

dei tre LED di alimentazione del PCB; i LED riguardano nello specifico l'alimentazione 12V, le conversioni 12V – 15V_H e 12V – 15V_L. Il LED riguardante l'alimentazione 5V della scheda in questa fase di test è dunque spento, poiché quest'ultima alimentazione deriva soltanto dal connettore di interfaccia tra il PCB e la scheda di controllo.

La quarta fase del processo di validazione riguarda unicamente la verifica dell'alimentazione rimanente, ossia quella dei 5V. Come già accennato, essa deriva dal connettore di interfaccia; pertanto, tramite due cavi ausiliari (utilizzati unicamente in questa fase specifica di verifica) sia applica la connessione dei pin di alimentazione 5V e ground del connettore di interfaccia alla seconda uscita in bassa tensione dell'alimentatore da banco. Di seguito in figura 5.12 si riporta lo stato della scheda con tutte le alimentazioni connesse e i 3 LED accesi:

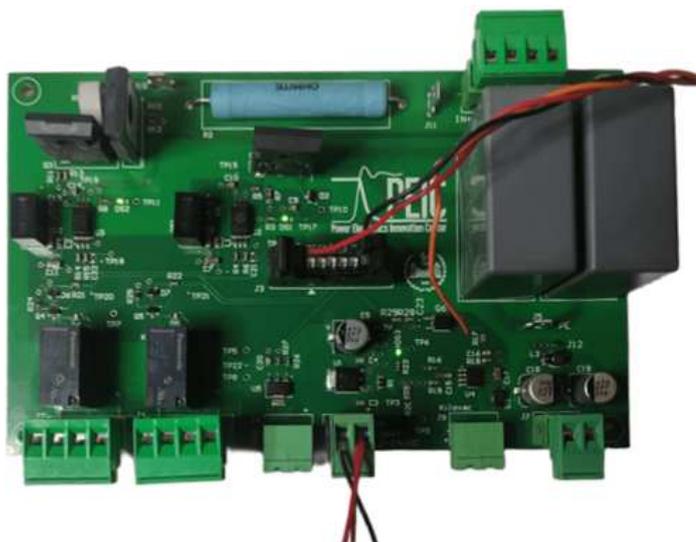


Figura 5.12: Stato della Scheda di Servizio dopo la sua Alimentazione.

La quinta fase del processo di validazione riguarda la programmazione della scheda STM32 Nucleo-64 STMicroelectronics, ossia una scheda di sviluppo prodotta da STMicroelectronics. Le schede Nucleo-64 utilizzano microcontrollori della famiglia STM32 progettate con un microcontrollore a 64-pin.

La programmazione avviene connettendo direttamente la Nucleo Board ad un computer in cui è installato STM32CubeIDE, ossia l'ambiente di sviluppo integrato ufficiale di STMicroelectronics, per programmare i microcontrollori STM32. Il compilatore permette innanzitutto di programmare le funzionalità di ciascun pin del microcontrollore; in figura 5.13 si riporta il pinout impostato per questo microcontrollore, in cui i pin di comando scheda di servizio sono stati inseriti manualmente come Digital GPIO Outputs:

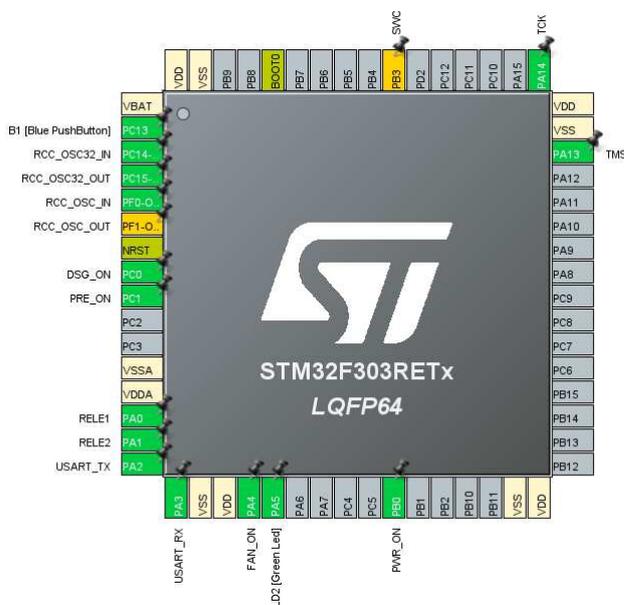


Figura 5.13: Pinout della Nucleo Board.

La programmazione del microcontrollore è stata affrontata semplicemente assegnando della variabili per ciascuna operazione di verifica da eseguire e, direttamente nel file Source Main.c, senza alcuna chiamata di Interrupt Service Routine, cambiando manualmente in fase di debug lo stato logico del pin GPIO ad alto a basso o viceversa.

La fase 6 e 7 riguardano l'accoppiamento tra la Nucleo Board e la scheda di servizio. L'accoppiamento è stato effettuato attraverso connettori maschio-femmina per singoli pin tra le due schede; definiti i pin GPIO Output della nucleo board corrispondenti ai segnali di attivazione delle sezioni operative della DC Side board, il collegamento tra i connettori è diretto. In figura 5.14 è riportata la connessione eseguita:

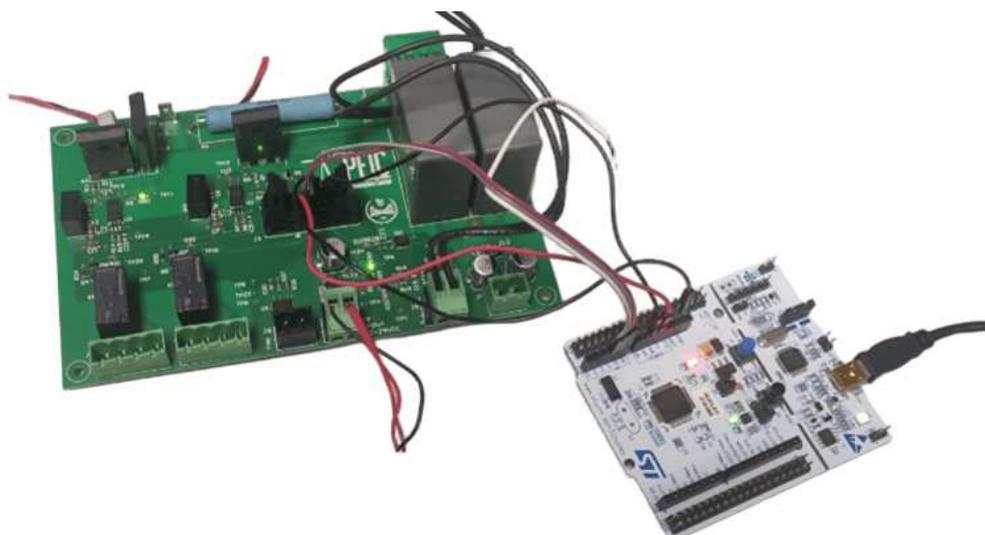


Figura 5.14: Accoppiamento Nucleo Board con Service Board.

Con la fase 8 inizia dunque il processo di validazione vero e proprio di ciascuna sezione operativa. Le prime macroaree testate sono state quelle relative ai Relè 1 e 2; ai capi di ciascun connettore non è stata apportata nessuna connessione specifica. Infatti, la correttezza del loro funzionamento è stata verificata da una parte attraverso l'utilizzo del multimetro, dall'altra attraverso il riconoscimento sonoro della loro chiusura. Nello specifico, il multimetro è stato utilizzato per verificare che alla ricezione del comando di chiusura (si ricordi che come anticipato in sezione 2.2.2 i relè sono normalmente aperti) i terminali 1 e 4 dei connettori siano posti in cortocircuito.

Successivamente, con la fase 9 si è verificata la correttezza di funzionamento della sezione operativa Fan Ausiliario. Il connettore relativo all'azionamento della ventola ausiliaria di questa macroarea alimenta quest'ultima con una tensione continua di 12V; pertanto, per valutarne il funzionamento, è stata utilizzata un'apposita ventola.

La validazione sperimentale del contattore principale Kilovac avviene nella fase 10. Il comando di alimentazione bobina del contattore, affinché avvenga la sua chiusura, deve essere continuo; similmente a quanto effettuato nella fase precedente, il kilovac è stato fisicamente connesso attraverso il connettore dedicato e, attraverso il multimetro, è stato verificato che ai terminali del connettore vi fosse alimentazione continua a 12V.

I processi di validazione delle fasi di precarica e scarica sono stati soggetti ad operazioni più delicate, valutando infine l'andamento temporale della tensione al DC-Link tramite oscilloscopio. Innanzitutto, si presenta in figura 5.15 lo stato delle connessioni che caratterizzano il connettore principale di tensione DC-Link della scheda di servizio:

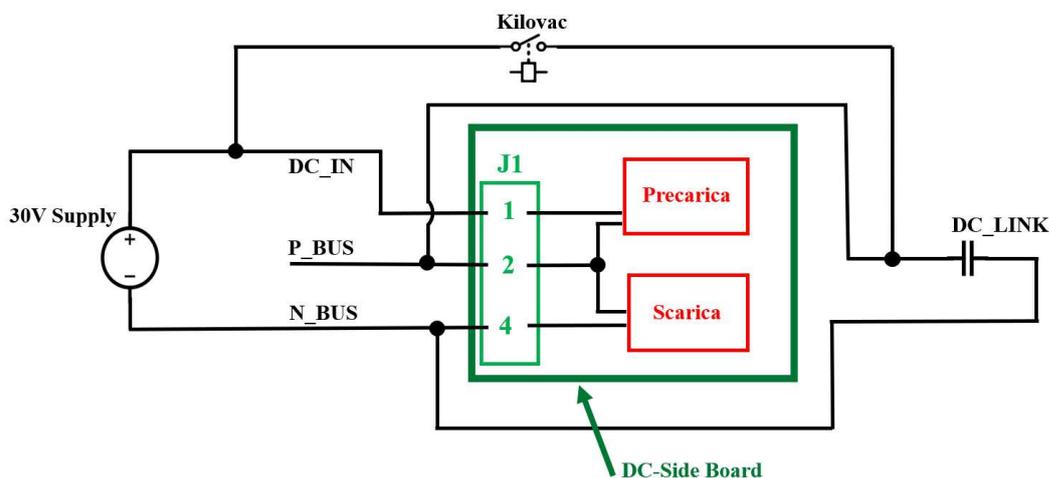


Figura 5.15: Stato delle Connessioni del Connettore di Potenza della Service Board.

La fase di precarica, azionata dal segnale dedicato, attraverso gli IGBT in antiserie montati sulla scheda di servizio pone in cortocircuito i terminali 1 e 2, rispettivamente le connessioni DC_IN e P_BUS, come descritto nella sezione 2.2.2. Viceversa, durante la fase di scarica, i terminali 2 e 4 vengono chiusi sulla resistenza di scarica, nel momento in cui il segnale dedicato viene ricevuto dalla Control Board. Come mostrato in figura, il testing di queste funzioni è stato effettuato a bassa tensione, con un alimentatore esterno posto a 30V.

Il processo di validazione sperimentale è stato condotto collegando un banco di condensatori elettrolitici da 3 mF, per simulare la presenza del DC-Link e valutare tramite oscilloscopio l'andamento della tensione nelle due fasi; l'oscilloscopio è stato connesso ai terminali 2 e 4, così come il banco di condensatori. In figura 5.16 si riporta lo stato finale delle connessioni della scheda di servizio per tutte le fasi verificate, comprensivo del banco di condensatori, ventola e kilovac:

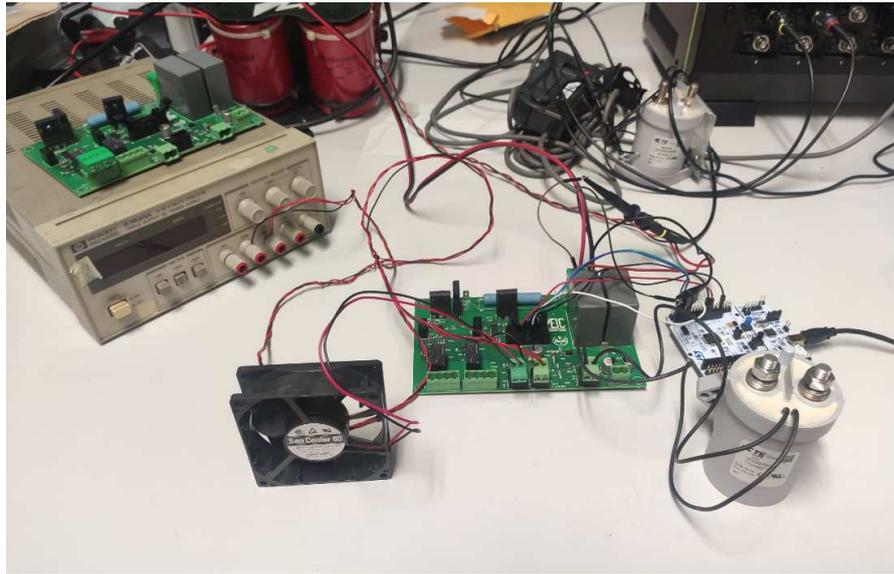


Figura 5.16: Stato delle Connessioni della Scheda per tutte le Fasi.

Successivamente, in figura 5.17, seguono le forme d'onda di tensione durante la fase di precarica e scarica, tipiche di un sistema RC. Le costanti di tempo differiscono da quelle tipiche del DC-Link del sistema globale, proprio per l'utilizzo di un banco di condensatori di prova. Poco prima della fase di scarica è possibile notare un lento andamento decrescente della tensione dovuto alla disattivazione del comando di precarica prima dell'attivazione di quello di scarica.

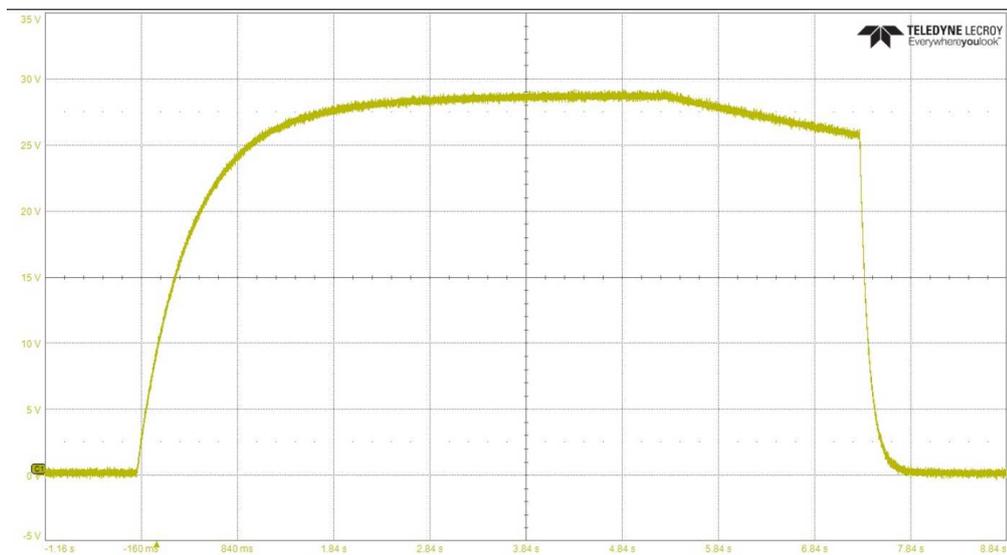


Figura 5.17: Forme d'onda della Tensione DC-Link in Precarica e Scarica.

Infine, l'ultima fase del processo da validazione della scheda di servizio riguarda la creazione del connettore dedicato alla comunicazione Control Board – DC Side Board. Il connettore è caratterizzato da 10 terminali; di questi, due sono di ground e due di alimentazione a 5V. I cavi sono stati connessi ai connettori maschi tramite un utensile specifico di pinzatura, senza che questi venissero privati del loro isolamento. Successivamente i cavi di alimentazione e ground sono stati twistati a coppie (riduzione rumore e interferenze); dopodiché tutti e 10 i cavi sono stati twistati tra di loro. Una volta selezionata la garza di contenimento generale di tutti i cavi, essa vi è stata applicata insieme al termorestringente che, applicatovi del calore, riduce il suo diametro serrando la garza e i cavi. La stessa operazione viene fatta all'estremità opposta dei cavi, realizzando il connettore. D'altra parte, durante le operazioni di connessione dei cavi a ciascun connettore maschio, occorre prestare attenzione al loro corretto ordinamento, diverso tra le due schede. Si riporta in figura 5.18 lo stato finale del connettore realizzato, di lunghezza sufficiente per permettere la connessione tra le due schede all'interno della scatola di contenimento del sistema unificato.



Figura 5.18: Cavo e Connettore per scambio Segnali DC Side Board e Control Board.

5.2 Scheda di Controllo

Rispetto alla scheda di Servizio, la scheda di Controllo comprende un numero di componenti SMD e THT assai maggiore; per questa ragione l'assemblaggio della Control Board non è stato affrontato in laboratorio, ma la realizzazione della stessa è stata affidata ad un produttore esterno. Non solo, ma la presenza sia del microcontrollore, sia di componenti SMD le cui dimensioni rientrano nell'ordine del millimetro, renderebbero troppo delicato un processo di assemblaggio di un PCB le cui prestazioni e funzionalità sono di estrema importanza in un contesto di integrazione del tipo affrontato in questo progetto di tesi. Inoltre, la commissione di produzione della scheda prevede la realizzazione di due PCB identici, sia per garantire la ridondanza e incrementare il livello di sicurezza, permettendo di disporre di un ricambio immediato nel caso in cui uno dei due PCB non funzionasse correttamente, sia per disporre in laboratorio di una Control Board identica e funzionante per una diversa applicazione.

Lo stato della Control Board al termine della sua produzione è riportato in figura 5.19:



Figura 5.19: Stato della Scheda di Controllo al termine della sua produzione.

L'ispezione visiva delle scheda non riporta la presenza di impurità superficiali, componenti non saldati correttamente o mancanti.

D'altra parte, durante la fase di produzione della scheda, il produttore esterno ha segnalato la presenza di due componenti specchiati nel documento Altium contenente lo sbroglio del PCB; i componenti in questione sono i Regolatori Lineari di Tensione TPS7A2633DRVR [28] della Texas Instruments, la cui funzione è la conversione tra i livelli di tensione 5 V – 3.3 V.

La causa di questo errore è da ricercare nel documento Altium in cui i due componenti in questione presentano Footprint ribaltato di 180 gradi. In figura 5.20 si riporta lo stato dei Footprint del componente nel caso corretto e in quello ribaltato:

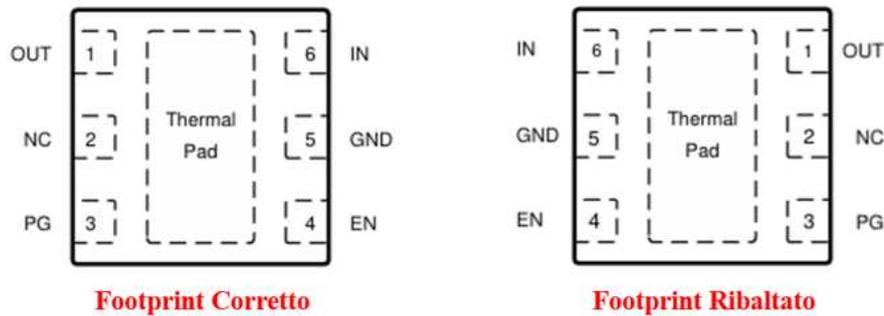


Figura 5.20: Confronto Footprint Regolatore TPS7A2633DRVR [28] Giusto e Ribaltato.

Pertanto, l'ordine delle schede è stato commissionato al produttore non prevedendo la presenza dei regolatori; infatti, le schede di controllo al termine della loro produzione deficitano dei regolatori.

La criticità è stata affrontata ricercando dei regolatori lineari che potessero attuare lo stesso stadio di conversione le cui dimensioni, pin e footprint combaciassero quanto più possibile ai regolatori eliminati. È necessario ricercare un componente con caratteristiche analoghe non solo per ottenere il tipo di conversione richiesta, ma anche perché i componenti connessi ai pin dei regolatori non più utilizzati, sono comunque presenti nella scheda; non solo, ma le piazzole adibite alla saldatura dei vecchi regolatori hanno una dimensione e geometria che non può più essere cambiata.

Il componente sostitutivo scelto è il Regolatore Lineare TLV75533PDBVR [29], della stessa casa produttrice dei regolatori precedenti, ossia la Texas Instruments. Ricercare dei regolatori dello stesso produttore è importante per assicurare che il componente si comporti quanto più similmente possibile al regolatore sostituito. Tuttavia, sono presenti differenze non trascurabili, dovute principalmente alla conformazione del componente, il cui Footprint è riportato in figura 5.21:

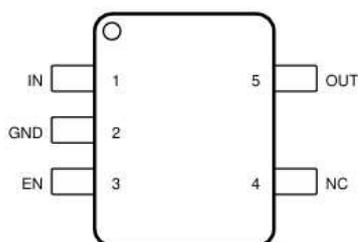


Figura 5.21: Footprint del Nuovo Regolatore Lineare TLV75533PDBVR [29].

Le differenze principali riguardano:

- **Il numero di pin**, pari a 5 e non a 6;
- **Thermal Pad** assente;
- **Pin** sporgenti, facilmente accessibili;
- **Power Good Pin** assente.

Nelle sezioni 2.2.1 si è discusso delle caratteristiche e funzionamento del segnale **PG_3V3A**, considerando tuttavia la presenza del precedente regolatore di tensione. Il nuovo componente non possiede un pin di Power Good, pertanto sia il segnale **PG_3V3A** che il **PG_3V3D** sono sempre portati ad uno stato logico alto tramite le resistenze di Pull-Up connesse all'Output di 3.3 V; ne consegue che i segnali di Power Good non potranno più essere controllati nel loro stato logico dai regolatori lineari.

Tuttavia, così come descritto in sezione 2.2.1, anche in questo caso l'attivazione del BJT, presente nella sezione operativa della gestione dell'emergenza, a seguito di un guasto rilevato via software o dell'intervento dall'operatore esterno tramite pulsante di emergenza, forza anche in questo caso, con il nuovo regolatore lineare, il segnale **PG_3V3A** ad uno stato logico basso, senza compromettere il funzionamento del regolatore e disalimentando invece le schede Gate Driver del convertitore tramite la logica descritta in tabella 2.2.

Le altre differenze riportate nell'elenco si riferiscono principalmente al modo in cui i nuovi regolatori sono stati saldati sulla scheda; la presenza di pin sporgenti consente infatti di adattare meglio il componente alle piazzole già presenti sul PCB e, quando necessario, di saldare tramite piste di stagno superficiali i pin del regolatore ai terminali dei componenti SMD che lo circondano.

In figura 5.22 si riporta quindi lo stato del PCB con i nuovi regolatori saldati:

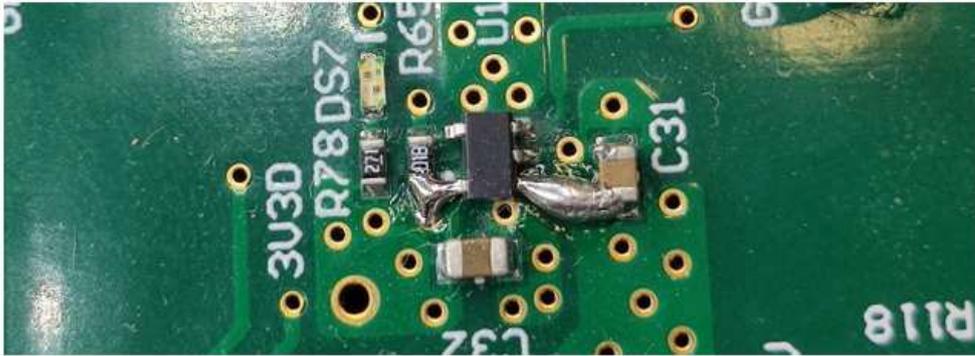


Figura 5.22: Scheda di Controllo comprensiva dei nuovi Regolatori.

Prima di affrontare il processo di saldatura dei nuovi componenti, le piazzole di stagno precedenti, le quali destinate ad accogliere i regolatori sostituiti, sono state raschiate per eliminare lo stagno presente, al fine di non creare dei cortocircuiti accidentali tra i pin dei nuovi regolatori; non solo, ma prima di apporvi i nuovi componenti, delle piccole quantità di stagno sono state applicate in corrispondenza dei nuovi pin. Procedendo in questo modo, quando necessario sono state realizzate delle piste superficiali di stagno, non praticate invece quando i pin del regolatore si sono adatti direttamente alle piazzole precedenti.. Ovviamente, l'orientamento dei pin dei nuovi componenti è tale da rispettare le connessioni di Input, Output e GND.

Nelle sezioni successive è approfondito tutto il processo di montaggio su convertitore, validazione e testing sperimentale della scheda di controllo, nonché la configurazione e inizializzazione di tutte le periferiche del microcontrollore utilizzate in questa applicazione. Pertanto, l'obiettivo principale delle sezioni che seguono è la completa descrizione delle fasi che consentono la validazione sperimentale della scheda, con un approccio molto pratico e strumentazione di laboratorio specifica.

Differentemente dalla scheda di servizio, le sezioni operative da convalidare sono molto più numerose, a partire dalle sole alimentazioni della scheda. Verificare che tutte queste adempiano alle loro funzioni, operino in modo coordinato e non presentino criticità è fondamentale per assicurare la corretta integrazione della scheda nel sistema unificato, evitando malfunzionamenti pericolosi per gli utenti e l'ambiente circostante, in particolar modo per il convertitore di potenza. Ne consegue che l'approccio principale per questo tipo di validazioni è stato quello di testing della scheda inizialmente sconnessa da ogni tipo di componente esterno del sistema (a parte le sole alimentazioni), e, man mano che ogni sezione operativa rispondeva correttamente agli stimoli impartiti, si sono praticate

sempre più connessioni con componenti esterni, come la scheda di servizio, le schede Gate driver, i sensori di corrente o carichi esterni da laboratorio.

Pertanto, a seguire si riportano tutte le fasi del processo di testing della scheda di controllo, approfondite nel dettaglio nelle sezioni successive:

1. Creazione connettore di alimentazione principale e di emergenza;
2. Saldatura jumper di connessione alimentazione da scheda a connettori schede Gate Driver;
3. Saldatura dei cavi provvisori per alimentazione esterna 3.3 V (regolatori di tensione nuovi non ancora saldati);
4. Alimentazione della scheda e verifica accensione LED;
5. Saldatura dei nuovi regolatori di tensione e verifica del loro funzionamento;
6. Montaggio su Convertitore della scheda;
7. Verifica alimentazione e accensione LED del microcontrollore con pinout semplice di solo clock e LED;
8. Configurazione specifica del microcontrollore;
9. Generazione segnali PWM, controllo delle schede Gate Driver e loro connessione;
10. Validazioni della acquisizioni di corrente, tensione, temperatura e creazione dei connettori necessari;
11. Verifica funzioni ausiliarie di ventole convertitore, Service Board, torsiometro e relè di emergenza.

5.2.1 Accensione della Scheda e Montaggio su Convertitore

Innanzitutto, terminata l'ispezione visiva del PCB di controllo e consolidata la mancanza dei regolatori di tensione appartenenti allo stadio di conversione 5 V – 3.3 V, la prima fase del processo di testing e validazione della scheda è la creazione del connettore principale di alimentazione.

Tuttavia, affinché sia possibile l'inserimento dei cavi all'interno del connettore, è necessario chiudere gli stessi in capicorda a crimpare, ossia una categoria specifica di capicorda progettati per essere fissati ai cavi tramite una crimpatura, un processo di compressione meccanica che assicura il collegamento elettrico e meccanico tra il cavo e il terminale. Il processo di crimpatura viene effettuato tramite un'apposita pinza. In figura 5.23 si riporta lo stato finale del cavo con focus sul capicorda:



Figura 5.23: Cavo di Alimentazione della Scheda di Controllo.

Il connettore di emergenza viene invece realizzato seguendo le stesse caratteristiche di quello di alimentazione; la differenza principale risiede nella chiusura in cortocircuito dei terminali opposti al connettore. Infatti, come descritto in sezione 2.2.1, affinché le condizioni di normale esercizio siano assicurate e replicate per il corretto funzionamento del sistema, il connettore di emergenza rappresenta un contatto normalmente chiuso, il quale passa in interdizione solamente per azione esterna di un operatore sul pulsante di emergenza. La condizione di chiusura del contatto si replica quindi ponendo in cortocircuito i terminali dei cavi; l'assenza di questa condizione porterebbe infatti ad uno stato logico basso sia il segnale **EMG_IN_N** che il **PG_3V3A**. Il primo di quest'ultimi segnalerebbe al microcontrollore (in questa fase non ancora configurato) la presenza costante di un errore per attivazione del pulsante di emergenza, mentre il secondo, come detto più volte in sezione 2.2.1 e 5.2, non inciderebbe sul comportamento dei regolatori

di tensione ma disalimenterebbe la trasmissione dei segnali PWM alle schede Gate Driver.

La seconda fase riguarda la saldatura del jumper di alimentazione delle schede Gate Driver del convertitore. Posto nelle vicinanze della macroarea del controllo driver inverter, il jumper da saldare permette la connessione tra i poligoni 12V e 12V_PWR nel layer delle alimentazioni; infatti, l'assenza di questa connessione porterebbe al completo isolamento del poligono 12V_PWR, e quindi alla disalimentazione delle schede Gate Driver.

Il processo di saldatura è stato effettuato nelle stesse modalità di quanto effettuato in sezione 5.1.2, per la saldatura del jumper di alimentazione della bobina del contattore principale Kilovac. Quindi, una piccola traccia di stagno è stata applicata sulla superficie del PCB al di sopra del componente.

La terza fase del processo è essenziale per sopperire, momentaneamente, alla mancanza dei regolatori lineari di tensione sostitutivi. Pertanto, al fine di validare la sezione operativa delle alimentazioni della scheda, tre cavi sono stati impiegati per consentire l'alimentazione diretta dei poligoni 3.3V_A e 3.3V_D, isolati dai restanti per l'assenza dei regolatori di tensione. L'alimentazione avviene utilizzando un cavo per il GND, comune a tutti i componenti alimentati a 3.3V_A e 3.3V_D; due cavi posti in parallelo sono stati invece utilizzati per l'alimentazione dei poligoni a 3.3 V, direttamente da alimentatore da banco.

In figura 5.24 è possibile notare lo stato della scheda con i cavi in questione direttamente saldati sui testing point disponibili (si tratta di saldature temporanee, rimosse appena applicati i nuovi regolatori di tensione):

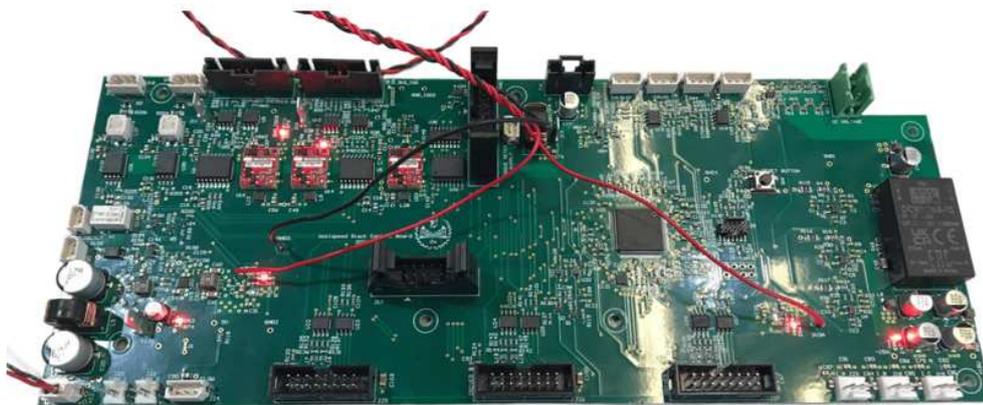


Figura 5.24: Stato della Control Board comprensiva dei Cavi di Alimentazione Temporanei.

La quarta fase riguarda quindi l'alimentazione della scheda per confermare l'accensione di tutti i LED presenti di segnalazione. L'accensione degli 8 LED montati indica che gli stadi di conversione delle alimentazioni presenti funzionano correttamente; non solo, ma ciò è indice dell'assenza di discrepanze tra le interconnessioni effettuate durante il processo di sbroglio della scheda. L'assenza di flickering dei LED indica anche un'alimentazione stabile e con valori circa quelli di progetto.

La quinta fase del processo interessa invece la saldatura dei nuovi regolatori di tensione e la verifica del loro corretto funzionamento. Il processo di saldatura utilizzato è già stato descritto nella sezione 5.2 precedente; attraverso un multimetro è possibile innanzitutto verificare il loro funzionamento "locale", senza ancora l'alimentazione della scheda, mentre solo successivamente, una volta che i nuovi componenti sono stati correttamente saldati e validati, è possibile alimentare nuovamente la scheda tramite il connettore principale.

Pertanto, dopo che ciascun regolatore è stato saldato sul PCB, tramite il multimetro è possibile verificare la continuità dei segnali a 3.3 V di Output e di Power Good, quest'ultimi tenuti costantemente ad uno stato logico alto per quanto detto precedentemente 5.2. Dopodiché, si alimenta direttamente tramite connettore principale la scheda e si verifica che tutti e gli 8 LED presenti si accendano correttamente, senza fenomeni di instabilità o flickering.

Tutte le fasi affrontate finora sono state condotte senza la realizzazione e applicazione di alcun connettore all'infuori di quello di alimentazione e emergenza; l'assenza di connessioni esterne a sensori, ventole o altre schede è fondamentale per assicurare che il processo di testing possa avvenire in sicurezza, sia per la scheda di controllo che per i dispositivi esterni. Un malfunzionamento di una sezione operativa o una connessione effettuata ad una macroarea non ancora convalidata potrebbe portare al danneggiamento dei dispositivi coinvolti.

La sesta fase che caratterizza questa sezione è quella di montaggio della scheda sul convertitore. Come già anticipato precedentemente in sezione 1.1, un processo cardine del progetto di tesi è la sostituzione della scheda di controllo precedente, per insufficienze di connessioni di feedback e di microcontrollore, con la nuova scheda di controllo direttamente montata sul convertitore. Tuttavia, l'alloggiamento previsto sul kit Wolfspeed CRD300DA12E-XM3 [2] è specifico nella conformazione geometrica per la scheda di controllo precedente. Pertanto, come descritto in sezione 2.3.2, la nuova Control Board prevede una disposizione di fori M3 combaciante con quella ricavata sulla superficie del kit inverter per il fissaggio della scheda di controllo precedente. In figura 5.25 si riporta lo stato del kit una volta privato della precedente Control Board:

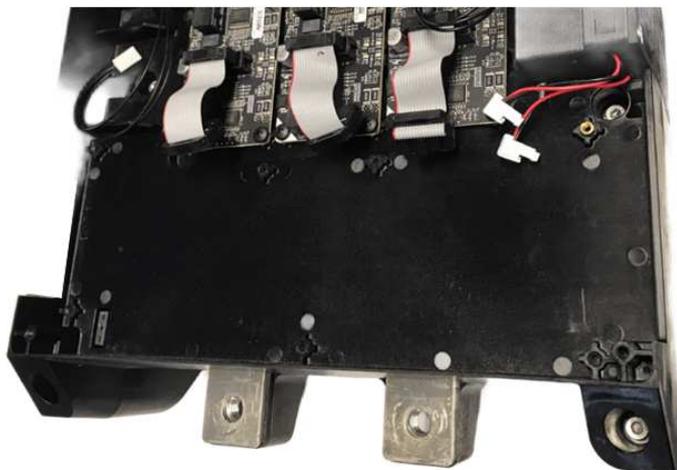


Figura 5.25: Kit Inverter Wolfspeed privato della precedente Control Board.

Tuttavia, la nuova Control Board presenta delle dimensioni maggiori rispetto alla precedente, pertanto il fissaggio sullo stesso livello del kit non può essere effettuato, ovvero è necessario praticare un rialzo di qualche centimetro affinché non vi sia interferenza tra gli oggetti.

Il rialzo è realizzato utilizzando degli Spessori Filettati Maschi e Femmina, M3, disponibili in laboratorio; l'applicazione di due spessori per ciascun foro consente di ottenere un'altezza ottimale di 3 cm circa. In particolare, il rialzo di 3 cm consente da una parte di non avere interferenze geometriche tra gli spigoli del PCB e del kit Wolfspeed, dall'altra di praticare le connessioni previste per le schede Gate Driver, per le ventole del convertitore e per i sensori di corrente; infatti, quest'ultime non godono di connessioni particolarmente estese, pertanto se il rialzo effettuato risulta eccessivo i terminali potrebbero non riuscire a connettersi con il PCB.

Gli spessori filettati maschi sono stati connessi al kit inverter tramite l'utilizzo di Inserti Filettati, anch'essi disponibili in laboratorio. Gli inserti filettati utilizzati, di tipo M3, sono dei piccoli componenti progettati per creare una filettatura all'interno di materiali o che non presentano una filettatura di base, o che non presentano una robustezza tale da reggere una filettatura. Nel caso specifico del kit Wolfspeed, gli inserti filettati sono stati utilizzati poiché necessario non compromettere la filettatura durante i test eseguiti nelle fasi di applicazione o rimozione frequente di viti e spessori filettati. In figura 5.26 un esempio degli spessori e inserti utilizzati:



Figura 5.26: Spessori e Inserti Filettati utilizzati in fase di Montaggio della Control Board.

L'applicazione degli inserti sulla plastica del kit inverter è stata effettuata per fusione della stessa tramite il saldatore da banco del laboratorio, e compressione diretta dell'inserto sul foro destinato ad accogliere la precedente Control Board; l'operazione descritta deve essere condotta ponendo attenzione all'orientazione dell'inserto nel foro, ossia quanto più possibile concentrico con il foro già presente, affinché gli spessori montati sull'inserto non risultino inclinati su un lato qualsiasi, compromettendo il montaggio del PCB. Nello specifico, l'inclinazione di uno o più spessori filettati potrebbe creare uno scompenso meccanico nella scheda, portando nel tempo ad una sua deformazione. In figura 5.27 si riporta un esempio di fissaggio dell'inserto sul convertitore:



Figura 5.27: Particolare dell'Inserto Filettato Montato sul kit Wolfspeed.

Infine, il fissaggio del PCB avviene attraverso l'applicazione di viti M3 in modo tale che la scheda sia "chiusa" tra la vite e lo spessore filettato femmina. Poiché la soluzione adottata è di fatto permanente, il fissaggio finale del PCB è forzato con coppia di serraggio tale da sia resistere a urti o vibrazioni, sia tale da non provocare deformazioni nella scheda.

In figura 5.28 lo stato finale della Control Board montata sul kit Wolfspeed:

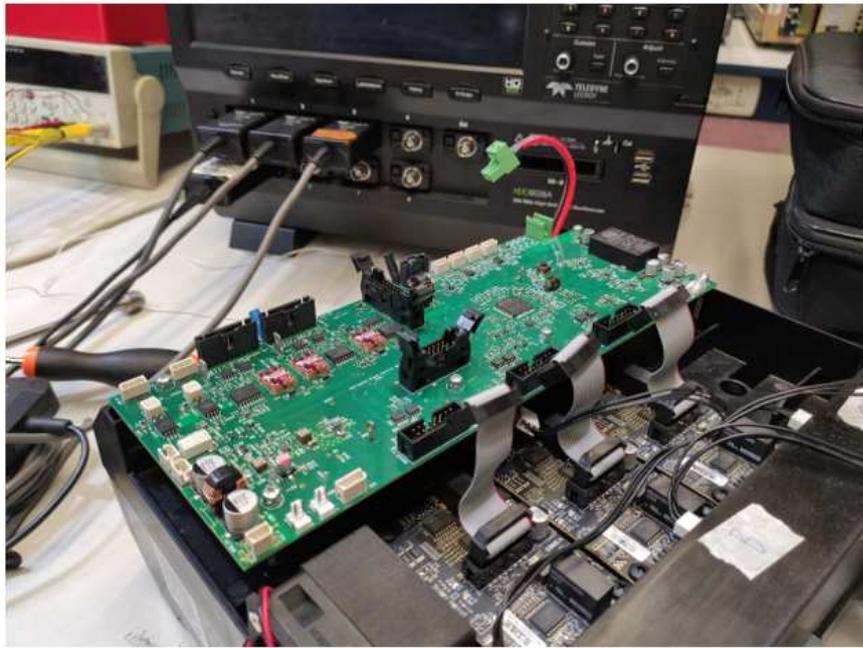


Figura 5.28: Stato Finale della Control Board Montata sul kit Inverter.

5.2.2 Configurazione del Microcontrollore

L'obiettivo di questa sezione è la descrizione specifica delle fasi 7 e 8 del processo di testing e validazione della scheda di Controllo, entrambe incentrate sulla configurazione del microcontrollore montato su di essa. Si ricorda infatti che una delle motivazioni che hanno condotto alla realizzazione di una nuova Control Board era l'assenza di un microcontrollore direttamente montato sul PCB, in quanto nella precedente scheda di controllo quest'ultimo allocato su una Evaluation Board Texas Instruments separata dal resto della scheda, limitandone la versatilità nell'interazione con componenti esterni. Non solo, ma l'ambiente di sviluppo prediletto in laboratorio è quello sviluppato da STMicroelectronics, pertanto nella nuova Control Board è stato integrato un microcontrollore di questa casa produttrice.

Il microcontrollore in esame è il STM32 G474 VET6 LQFP100 [30], il quale presenta delle caratteristiche tecniche specifiche per applicazioni di Controllo Motore, così riassunte:

- **Part Number** del Device, da cui:
 - **STM32**, identifica la famiglia di microcontrollori prodotta da STMicroelectronics, basata su architettura Arm Cortex-M4 a 32-bit RISC;
 - **G474**, dove "G" indica la famiglia STM32G, progettata per applicazioni di controllo e prestazioni avanzate, in particolare con funzionalità DSP ("Digital Signal Processing" è un insieme di tecniche per l'elaborazione di segnali digitali) e FPU ("Floating Point Unit" è un'unità hardware dedicata al calcolo in virgola mobile per operazioni matematiche rapide e precise) per applicazioni di controllo motore, alimentatori e altro, mentre "474" indica una configurazione particolare di periferiche e prestazioni, ad esempio, frequenza operativa, memoria e caratteristiche tecniche;
 - **VET6**, in cui "V" indica il package del microcontrollore, di tipo LQFP100, "E" indica la quantità di Flash Memory integrata, ossia 512 KB, "T" è un indice della temperatura operativa, tipicamente tra -40°C e +85°C, e "6" riguarda il tipo di e gamma di tensioni di alimentazione, tra 1.71 V - 3.6 V;
 - **LQFP100**, ossia "Low-Profile Quad Flat Package", un package piatto con 100 pin esposti su quattro lati.
- **Frequenza di Clock Massima** di 170 MHz;
- **Flash Memory** di 512 KB;
- **S-RAM** di 128 KB;

- **Registri e Bus di Dati** a 32 bit;
- **17 Timers** tra:
 - **1 HRTIM**, ossia “High Resolution Timer”, contatore avanzato progettato per applicazioni che richiedono una risoluzione temporale estremamente alta, con una risoluzione massima di 184 picosecondi, ottenuta tramite clock ad alta frequenza, ottimizzato per generare segnali PWM di precisione e sincronizzare eventi critici;
 - **9 General Purpose Timers**, di cui 2 a 32 bit e a 16 bit, versatili per funzioni di base come temporizzazione, contatori e generazione di segnali PWM;
 - **3 Advanced Control Timers**, progettati specificamente per il controllo motore, con contatori a 16 bit, supportano la generazione di PWM ad alta precisione;
 - **1 Low Power Timer**, ottimizzato per funzionare in modalità a basso consumo, con contatore a 16 bit, alimentato da sorgenti di clock a bassa frequenza;
 - **2 Basic Timers**, contatori a 16 bit progettati per funzioni di base come generazione di eventi o temporizzazioni semplici. Non hanno canali avanzati come input capture o output compare;
 - **1 SysTick Timer**, progettato principalmente per implementare un sistema operativo o per temporizzazioni rapide del software, è un contatore decrementale a 24 bit per ritardi di precisione e task periodici o funzioni di base come cronometri software o timeout;
 - **1 Independent Watchdog Timer**, contatore decrementale a 12 bit che funziona indipendentemente dal clock principale del microcontrollore. Questo continua a funzionare anche se il microcontrollore è bloccato o se il clock principale si guasta, utilizzato quando il sistema deve essere protetto contro malfunzionamenti imprevisti senza dipendere dal clock principale del microcontrollore;
 - **1 Window Watchdog Timer**, Watchdog più avanzato che include una finestra temporale, ossia il reset del timer deve avvenire solo in un intervallo specifico di tempo, per scenari in cui si vuole un controllo più rigoroso sul momento del reset, evitando reset troppo frequenti.
- **Interface di Comunicazione** diverse, tra USART, UART, FDCAN, USB e SPI;
- **5 SAR ADC**, veloci a 12 bit, utilizzate per leggere segnali analogici, come quelli provenienti da sensori (temperatura, corrente, tensione), e convertirli in valori digitali che il microcontrollore può elaborare;

- **4 DAC** a 12 bit, solitamente utilizzate per generare segnali analogici a partire da dati digitali, come nel caso della generazione di audio, ma non adoperate in questo progetto di tesi;
- **86 GPIO Pins**, divisi in 7 Porte, dalla “A” alla “G”. Nello specifico, dalla porta “A” alla “E” sono configurabili 16 pin per porta (da 0 a 15), mentre per la “F” sono configurabili solo 5 pin (0,1,2,9,10) e per la “G” solamente il pin 10.

Ovviamente, il processo di sbroglio effettuato in sezione 2.3.1 può essere realizzato solamente se il Pinout del microcontrollore è già completo; nel lavoro di tesi precedente [1] questo processo è stato già ultimato e, come discusso anche precedentemente, vi sono state apportate delle modifiche minime per quanto riguarda l’inserimento di altri segnali di sincronizzazione. Tuttavia, la fase 7 del processo di testing e validazione della scheda è finalizzata solamente all’accensione del microcontrollore, in particolare dei suoi LED di segnalazione di corretta alimentazione e funzionamento.

Pertanto, ancora in questa fase non si adotta il pinout precedentemente completato, ma si effettua una configurazione semplice di pochi pin inizializzando un nuovo progetto STM32CubeIDE, similmente a quanto effettuato in sezione 5.1.2 per la programmazione della scheda STM32 Nucleo-64 utilizzata nel processo di validazione della Service Board.

La configurazione iniziale del microcontrollore eseguita per la fase 7 prevede l’inizializzazione del microcontrollore con le caratteristiche seguenti:

- 3 LED di segnalazione, **LED_1**, **LED_2** e **LED_3**, configurati come GPIO Digital Output ai pin PC2, PC3 e PF2;
- 2 Pin di Debug, **SWCLK_JTCK-SWCLK** e **SWDIO_JTMS-SWDIO** (pin PA14 e PA13), impostati per le operazioni di debug, test e programmazione del microcontrollore, temporizzati tramite il SysTick Timer;
- 1 Pin di Temporizzazione dei Clock, **PF0-OSC_IN** (pin PF0), del modulo hardware **RCC**. Il modulo hardware RCC (“Reset and Clock Control”) gestisce la generazione e distribuzione dei segnali di clock a tutte le periferiche del microcontrollore, inclusi CPU e memoria. Permette di configurare e ottimizzare la sorgente di clock per bilanciare prestazioni e consumo energetico; il modulo supporta infatti diverse sorgenti di clock:
 - **HSE**, “High-Speed External”, ossia un oscillatore esterno da 8 MHz per applicazioni che richiedono alta precisione. È la sorgente di clock utilizzata per questa applicazione;

- **HSI**, “High-Speed Internal”, ossia un oscillatore interno da 16 MHz, utile come sorgente di clock predefinita;
- **LSE**, “Low-Speed External”, ovvero un cristallo esterno a bassa frequenza di 32.768 kHz, spesso usato per l’RTC;
- **LSI**, “Low-Speed Internal”, ovvero un oscillatore interno a bassa frequenza a 32 kHz, utilizzato come sorgente di backup per l’RTC o per Watchdog;
- **PLL**, “Phase-Locked Loop”, un circuito moltiplicatore-divisore che permette di generare frequenze di clock elevate a partire da una sorgente di base (il target di frequenza di clock per tutte le periferiche è di 170 MHz).

Questa configurazione di base è del tutto priva di ISR (Interrupt Service Routine) o di funzioni specifiche; le poche linee di codice, scritte direttamente nel file main.c, servono unicamente a stabilire che il microcontrollore sia alimentato correttamente e risponda alle basilari istruzioni di accensione e spegnimento dei LED. Quest’ultime sono così riportate per il LED 1:

```
if (counter < 170000){
HAL_GPIO_WritePin(LED_1_GPIO_Port, LED_1_Pin, 0);
counter++;}
else{
HAL_GPIO_WritePin(LED_1_GPIO_Port, LED_1_Pin, 0); }
if(counter == 170000*2) counter = 0;
```

Il codice, scritto all’interno del Loop infinito del file main.c, comanda l’accensione dei LED a intermittenza. Poiché assente una ISR chiamata ad un intervallo di tempo specifico, la variabile intera “counter” è aggiornata ad un valore non definito di impulsi di clock (170 MHz); con un valore di Threshold per lo spegnimento di 170000, e di accensione di 340000, sperimentalmente i LED lampeggiano circa ogni secondo.

Verificato dunque il funzionamento del microcontrollore, ad un livello base di controllo, è stato possibile passare alla fase successiva del processo di testing, ossia la configurazione e inizializzazione di tutte le periferiche necessarie per l’algoritmo di controllo motore implementato. Come già menzionato, innanzitutto occorre considerare il pinout del Device definito e completato in precedenza; in figura 5.29 si riporta l’interfaccia STM32CubeIDE comprensiva del pinout del Device:

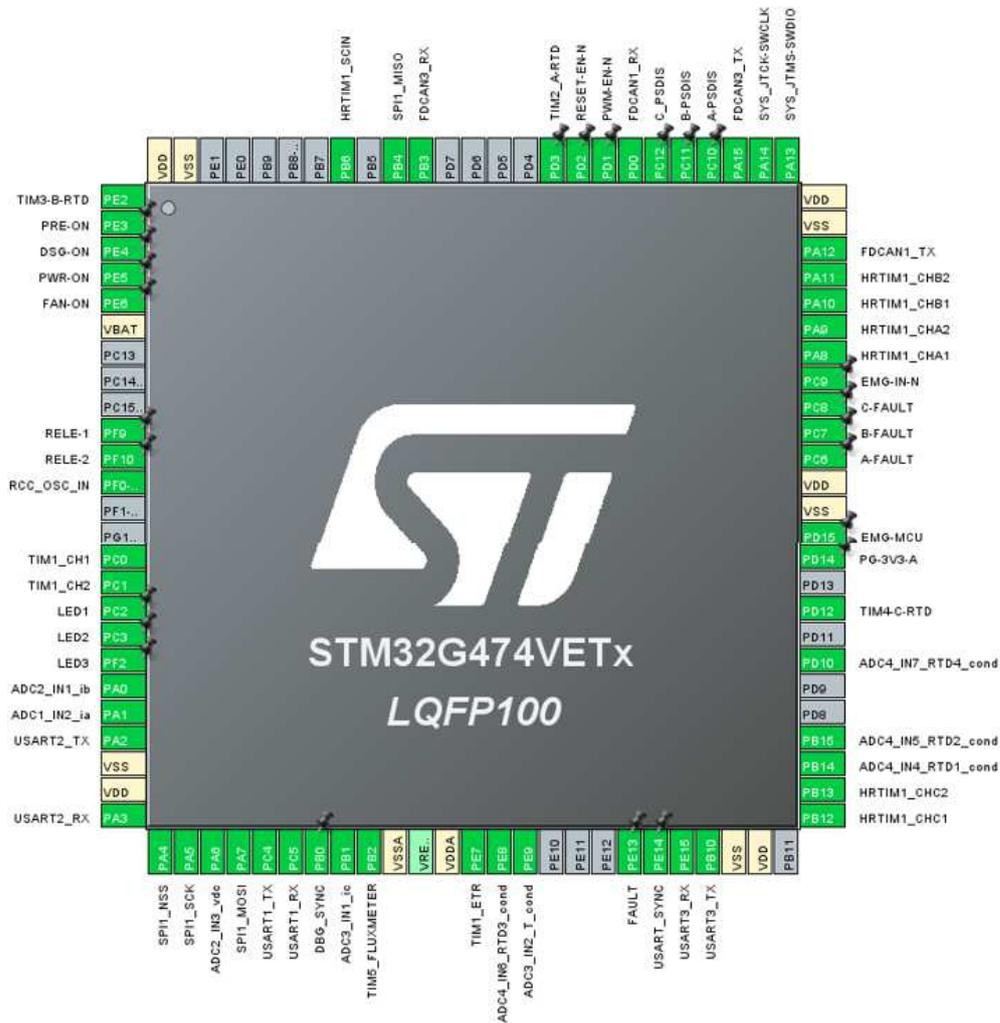


Figura 5.29: Pinout Completo del Microcontrollore.

A seguire si riportano le configurazioni di ciascuna periferica del microcontrollore utilizzata nel progetto di tesi, insieme ad una breve descrizione di ognuna e del ruolo all'interno dell'algoritmo di controllo e del sistema. L'obiettivo di ogni descrizione è la definizione completa della periferica, motivando le decisioni che hanno condotto alla configurazione dei parametri più importanti di ognuna, coordinatamente con Datasheet [31] e Reference Manual [32]. L'ordinamento seguito è quello proposto dal software STM32CubeIDE, in particolare dai suoi menù; in questo modo risulta più semplice identificare la posizione di ogni periferica all'interno del software per future modifiche che possono esservi apportate.

La prima configurazione riguarda il Clock Tree, ossia l'interfaccia dedicata alla distribuzione dei segnali di clock alle diverse periferiche, all'interno del menù "Clock Configuration". Tramite questo menù è possibile:

- Configurare frequenze specifiche per ogni periferica;
- Impostare la sorgente principale di clock, se HSI o HSE;
- Impostare la sorgente secondaria di clock, ad esempio per il Watchdog, tra LSI e LSE;
- Configurare i divisori e i moltiplicatori del PLL (PLLM, PLLN, PLLP, ecc.) in modo che il clock finale (SYSCLK) rispetti i limiti del microcontrollore, ossia 170 MHz di frequenza.

L'obiettivo è l'utilizzo del segnale di clock principale generato dall'oscillatore esterno ASEMB-8.000MHZ-LC-T [4] (descritto più dettagliatamente di seguito) a 8 MHz. Pertanto, il Clock Tree è stato configurato con le seguenti caratteristiche:

- **Frequenza di clock** per ogni periferica a 170 MHz;
- **HSE** come sorgente principale di clock, a 8 MHz;
- **LSI** come sorgente secondaria di clock, per Watchdog, a 32 kHz;
- **Moltiplicatori del PLL** impostati con i valori riportati in figura 5.30:

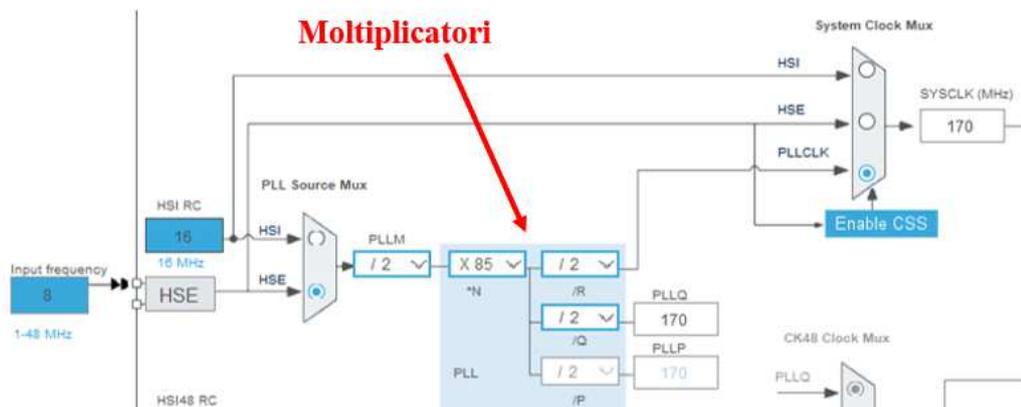


Figura 5.30: Estratto del Clock Tree del Microcontrollore.

Passando invece al menù “Pinout & Configuration” è possibile configurare tutte le periferiche del microcontrollore. Il menù è composto a sua volta da sottomenù, ciascuno comprensivo di un insieme di periferiche da caratterizzare, organizzati per funzioni o specifiche (ad esempio periferiche analogiche, timers o periferiche di “core” di sistema).

Il sottomenù “System Core” prevede la configurazione delle periferiche DMA, GPIO, IWDG, NVIC, RCC, SYS e WWDG. Nel progetto di tesi sono state configurate solamente le GPIO, IWDG, NVIC, RCC e SYS.

Espandendo la voce GPIO, raggruppati per periferiche, è possibile assegnare a ciascun pin del microcontrollore la funzione desiderata; questa operazione, denominata Pinout, è già stata ultimata precedentemente.

D’altra parte, selezionando la voce di raggruppamento dei pin per periferiche, risulta più facile la configurazione (o modifica futura) di ciascun pin considerando la periferica di destinazione, come mostrato in figura 5.31:



Figura 5.31: Organizzazione del menù "GPIO Mode and Configuration".

La sezione dei pin GPIO (General Purpose Input Output) è suddivisa principalmente in due categorie, i pin impostati come GPIO Digital Outputs e quelli come External Interrupts.

I pin impostati come GPIO Digital Outputs hanno queste caratteristiche principali:

- **Output Level Low**, ossia il valore logico predefinito del segnale digitale è Low (livello logico basso) finché via software non si modifica lo stato del pin;
- **Output Push-Pull**, per segnali digitali bidirezionali, ossia il pin non è flottante e può avere attivamente sia uno stato logico alto, quindi può fornire corrente al carico, e sia uno basso, quindi può assorbirla;
- **No Pull-Up e No Pull-Down**, infatti, essendo configurato come segnale digitale di Output, il valore del pin viene controllato attivamente dal circuito di output del microcontrollore (selezionato Push-Pull). Se fosse configurato come segnale di Input, le resistenze Pull-Up e Pull-Down diventano rilevanti, in quanto il microcontrollore non guida attivamente il livello del pin e serve un circuito per stabilire

il suo livello logico quando non ci sono segnali esterni che ne definiscano il valore (ad esempio potrebbe oscillare a causa di interferenze esterne).

I pin impostati come External Interrupts hanno la funzione principale di generare delle ISR di tipo Asincrono, ad esempio, per la gestione di routine critiche di guasto. Assegnare ad un pin GPIO questa funzione significa definire la sua connessione come una **“EXTI line”**, ossia una linea di “External Interrupt/Event Controller”. Le caratteristiche principali di questi pin sono riscontrabili nel Reference Manual e di seguito riassunte:

- Le EXTI line sono delle connessioni hardware interne al microcontrollore in grado di generare delle ISR asincrone o eventi tramite un “Edge Detect Circuit”, un circuito interno di rilevamento di fronti di salita o discesa del segnale di Input;
- Le linee EXTI Configurabili di tipo GPIO (ossia connesse a pin GPIO) sono in totale 16;
- Ciascuna EXTI line può essere connessa a molteplici GPIO Pin e a porte GPIO diverse. Ciò che definisce il numero della linea EXTI è il bit di ciascuna porta GPIO, come mostrato in figura 5.32:

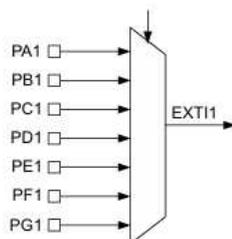


Figura 5.32: Singola EXTI line connessa a 7 GPIO Pins.

- Un determinato evento o Interrupt può essere generato o da una singola linea EXTI, la quale raggruppa più connessioni GPIO, o da insiemi di linee EXTI. Il raggruppamento delle linee EXTI non può essere deciso dall'utente, dipende dall'architettura del microcontrollore. Ciò viene fatto per limitare il numero di ISR necessarie e ridurre la complessità dell'architettura;
- Gli Interrupt vengono gestiti secondo una gerarchia di priorità configurabile nella NVIC (approfondita successivamente). Questo significa che un Interrupt con priorità più alta può interrompere una ISR di priorità più bassa, ad esempio per gestire un guasto durante la routine di controllo motore. In figura 5.33 si riporta un

estratto della tabella NVIC del Reference Manual per la gestione degli Interrupt generati dalle linee EXTI (in cui è possibile notare che le linee 5-9 e 10-15 sono raggruppate per generare lo stesso, e unico, evento/ISR):

Position	Priority	Type of priority	Acronym	Description	Address
6	13	Settable	EXTI0	EXTI Line0 interrupt	0x0000 0058
7	14	Settable	EXTI1	EXTI Line1 interrupt	0x0000 005C
8	15	Settable	EXTI2	EXTI Line2 interrupt	0x0000 0060
9	16	Settable	EXTI3	EXTI Line3 interrupt	0x0000 0064
10	17	Settable	EXTI4	EXTI Line4 interrupt	0x0000 0068
23	30	Settable	EXTI9_5	EXTI Line[9:5] interrupts	0x0000 009C
40	47	Settable	EXTI15_10	EXTI line[15:10] interrupts	0x0000 00E0

Figura 5.33: Priorità degli Interrupt generati dalle EXTI lines.

- Le linee EXTI possono essere configurate per attivare un Interrupt in risposta a un evento hardware come un fronte di salita, un fronte di discesa o entrambi del segnale di input di un GPIO pin connesso ad una delle linee EXTI.

Passando invece ai GPIO Pin configurati come External Interrupts in questo progetto di tesi, si ha:

- **PC6, PC7, PC8, PC9** per la gestione dei segnali **X_FAULT**, con **X = A, B, C**, e **EMG_IN_N**, spiegati in sezione 2.2.1. Tutti e 4 i segnali sono configurati con rilevamento di un Fronte di Discesa, poiché per tutti in assenza di guasto il segnale è normalmente ad uno stato logico alto. Secondo quanto detto in precedenza questi 4 GPIO Pin sono assegnati a 4 differenti EXTI line (dalla 6 alla 9) ma l'Interrupt generato è un solo per tutti i segnali ed è comandato dall'insieme di queste 4 linee EXTI, ossia da **EXTI9_5** (figura 5.33);
- Inizialmente anche il segnale **PG_3V3A**, associato al Pin **PD14**, comandava una ISR; tuttavia, a seguito di quanto discusso in sezione 5.2, il segnale è sempre ad uno stato logico alto e non può più comandare alcun evento;
- **PE13** per la gestione del segnale **FAULT**, scambiato tra le schede di controllo della D.M. e della M.U.T. Seppur non ancora integrato, è possibile configurare il pin per la rilevazione di un errore sulla scheda di controllo della M.U.T. su fronte d'onda di salita o discesa. Anch'esso non risulta configurato ma vi può essere associata una singola ISR comandata dall'insieme delle EXTI line 10-15, ovvero la **EXTI15_10**.

La sezione dei Pin ADC si configura molto semplicemente a patto di conoscere già quante e quali ADC utilizzare. Le caratteristiche principali dei Pin configurati in questo modo sono:

- **Analog Mode**, ovvero il circuito digitale del pin è disabilitato, lasciando solo il percorso interno verso la SAR ADC attivo. Non solo, ma in queste condizioni il GPIO Pin è configurato in Alta-Impedenza, ossia il microcontrollore non esercita alcun controllo attivo sul segnale che riceve, quest'ultimo guidato unicamente dal circuito esterno (ad esempio un sensore di corrente);
- **No Pull-Up e No Pull-Down**, infatti in questo caso l'ADC lavora con segnali analogici continui. Le resistenze Pull-Up o Pull-Down, che agiscono come carichi resistivi, influenzerebbero il segnale analogico, alterando il valore che l'ADC deve convertire.

Successivamente, la sezione dei Pin di tutte le altre periferiche attive nel progetto, quindi HRTIM, TIM, SPI, FDCAN e USART configura i pin necessari al funzionamento di ciascuna. Le caratteristiche principali di questi pin sono:

- **Alternate Function Mode**, il pin non viene usato come un Input o Output generico, ma è assegnato ad una periferica interna specifica del microcontrollore;
- **No Pull-Up e No Pull-Down**, poiché le resistenze di Pull-Up o Pull-Down non sono necessarie in quanto è il segnale che guida il livello logico del pin in modo chiaro. Il circuito di Pull-Up o Pull-Down potrebbe solo alterare il comportamento del segnale o introdurre distorsioni, specialmente per segnali a più alta frequenza.

Per terminare la configurazione dei Pin del microcontrollore occorre impostare quelli dedicati al debug, programmazione, alimentazione, ground, temporizzazione. I segnali di debug e programmazione sono gli stessi descritti in precedenza, ossia **SWCLK_JTCK-SWCLK** e **SWDIO_JTMS-SWDIO** (pin PA14 e PA13). I pin di alimentazione e ground si impostano automaticamente alla creazione del progetto. Infine, il pin di temporizzazione è anch'esso quello descritto in precedenza, ovvero **PF0-OSC_IN** (pin PF0).

I sottomenù “SYS Mode and Configuration” e “RCC Mode and Configuration” consentono invece di configurare alcune funzionalità sistemiche del microcontrollore, ovvero quelle che non sono direttamente legate a periferiche specifiche ma sono invece fondamentali per il funzionamento del sistema, e alcune opzioni specifiche relative al sistema di clock del microcontrollore.

Tramite il SYS Mode and Configuration è stato possibile impostare:

- **Il debug** tramite l'interfaccia SWD, permettendo di utilizzare strumenti di debug STM come il debugger hardware STLINK-V3SET [33]. Il Serial Wire Debug (SWD) è un protocollo di debug per la programmazione del dispositivo tramite una connessione a 2 fili (una linea **SWCLK** di clock per sincronizzare i dati e una linea **SWDIO** bidirezionale per trasferire dati e comandi.), riducendo il numero di connessioni necessarie rispetto al JTAG, che richiede almeno 4-5 linee;
- **System Wake-Up**, non configurate, per impostare segnali di risveglio per far uscire il microcontrollore da modalità di basso consumo;
- **Timebase Source**, ovvero il timer usato come base temporale per le funzioni di sistema, temporizzazioni o delay. Il timer utilizzato è il **SysTick Timer**.

Tramite il RCC Mode and Configuration è stato invece possibile configurare:

- **Sorgente dell' HSE**, in questo caso impostata a “**Bypass Clock Source**”. Infatti, l'oscillatore ASEMB-8.000MHZ-LC-T [4] genera un segnale di clock digitale ad onda quadra con frequenza a 8 MHz già pronto per essere utilizzato dal microcontrollore, senza la necessità di un circuito oscillatore interno. Per questo motivo l'HSE è configurato come Bypass Clock Source, disabilitando il circuito oscillatore interno. Se come sorgente esterna di clock si utilizzasse un Cristallo al Quarzo, bisognerebbe impostare l'HSE con la funzione “Crystal/Ceramic Resonator” per attivare il circuito oscillatore interno, in quanto non genererebbe un segnale già pronto per essere utilizzato come temporizzatore;
- **Timebase Source**, sorgente dell' LSE, in questo progetto di tesi disabilitata. Per abilitarlo valgono le stesse considerazioni appena fatte sull'HSE.

Il sottomenù “IWDG Mode and Configuration” permette invece di impostare l'Independent Watchdog Timer dell'ISR principale di controllo motore. Sostanzialmente si tratta di un contatore decrementale con:

- **Sorgente di clock** LSI a 32 kHz;
- **Prescaler** impostato a 4, ossia frequenza effettiva del contatore f_{IWDG} pari a:

$$f_{IWDG} = \frac{LSI}{Prescaler} = \frac{32000}{4} = 8 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

→ **Down Counter Reload Value** impostato a 4, ossia tempo di Timeout T_{Timeout} dell'ISR pari a:

$$T_{\text{Timeout}} = \frac{\text{Reload Value} + 1}{f_{\text{IWDG}}} = \frac{4 + 1}{8000} = 625 \mu\text{s} \quad (5.2)$$

→ **Window Value** impostato a 4095. Anche l'IWDG ha una configurazione opzionale per la finestra di refresh in una finestra specifica (tipico del WWDG); impostata a 4095 equivale a disabilitare la funzionalità di finestra, rendendo di fatto il Watchdog ricaricabile in qualsiasi momento.

L'ultimo sottomenù, il "NVIC Mode and Configuration", del menù System Core analizzato finora, consente di impostare e gestire le priorità di ciascun Interrupt generabile dal microcontrollore. L'NVIC è infatti la periferica hardware che gestisce e controlla le interruzioni nel sistema, la loro priorità, quale interruzione ha la precedenza quando più interruzioni sono pronte per essere gestite. La configurazione di questo menù è avvenuta considerando che:

- **Il Sistema di Priorità** è stato impostato a 4 bit per le Pre-Emption Priority, ossia quelle che determinano quale interruzione può interrompere un'altra (un valore più basso significa maggiore priorità), e 0 bit per le SUB-Emption Priority, ossia quelle che gestiscono l'ordine di esecuzione delle interruzioni che hanno la stessa priorità. In particolare, sono così previsti 16 livelli di priorità (4 bit) e assenza di gerarchia secondaria tra Interrupt a stessa priorità (0 bit, quindi si esegue la prima ISR che viene chiamata senza che venga interrotta da una seconda ISR a stessa priorità);
- **DMA Request Forzato**, in breve riguarda la forzatura delle interruzioni generate dai canali DMA (non utilizzati in questo progetto di tesi). Le interruzioni sono generate per segnalare eventi che riguardano il processo di trasferimento dati e a seconda delle necessità si può forzare la loro interruzione via software;
- **ISR Principale di Controllo Motore** a priorità Bassa di livello 3, generata dall'HRTIM TIMA Global Interrupt;
- **ISR Secondaria di Trasmissione Messaggi CAN** a priorità Bassa di livello 3, generata dal TIM7 Global Interrupt;
- **ISR Secondaria di Gestione Termica** a priorità Bassa di livello 6, generata dal TIM8 Update Interrupt;

- **ISR Principale di Guasto** a priorità Alta di livello 0, generata dalla EXTI line [9-5];
- **IRQ (Interrupt Request)** generato da tutte e 4 le ISR, ovvero tutti gli Interrupt generano un segnale che richiede l'utilizzo immediato della CPU nel momento in cui l'ISR associata viene eseguita;
- **ISR Abilitate Automaticamente** alla generazione del codice o inizializzazione della periferica, quindi non è necessario inizializzare nel codice l'inizio delle ISR.

Il secondo menù utilizzato per la configurazione del microcontrollore è quello denominato "Analog", il quale permette di inizializzare e configurare tutte le periferiche del microcontrollore che hanno a che fare con segnali analogici, come le ADC, DAC, Comparatori e Amplificatori Operazionali.

Il progetto di tesi richiede la configurazione delle sole unità ADC, per la conversione dei segnali di feedback provenienti dai sensori presenti nel sistema unificato. Le caratteristiche delle ADC utilizzate per la conversione dei segnali analogici sono di seguito riportate:

- **4 unità ADC** utilizzate per i 3 segnali di corrente di fase, la tensione del DC-Link, i 4 sensori di temperatura e il torsionmetro;
- I **canali** di ciascuna ADC per ogni segnale citato sono definiti nella fase di Pinout del microcontrollore, a seconda del Pin scelto e delle connessioni interne dovute all'architettura del device. Pertanto, in tabella 5.1 i canali utilizzati e i Pin assegnati sono stati:

ADC	Canale	Pin	Segnale
1	2	PA1	Corrente Fase a
2	1	PA0	Corrente Fase b
2	3	PA6	Tensione DC-Link
3	1	PB1	Corrente Fase c
3	2	PE9	Torsionmetro
4	4	PB14	Sensore 1
4	5	PB15	Sensore 2
4	6	PE8	Sensore 3
4	7	PD10	Sensore 4

Tabella 5.1: Tabella dei segnali ADC.

- Tutte le ADC lavorano in modo **Indipendente** l'una dall'altra. Nonostante il Trigger Event sia lo stesso per tutte e 4 le unità, ognuna esegue le conversioni in modo autonomo, senza sincronizzarsi o interagire con le altre;

- **Risoluzione della Conversione** a 12 bit, quindi una con una scala di valori da 0 a 4095;
- **Frequenza di clock** proveniente dal System Clock a 170 MHz, ma tramite l'opzione "Synchronous Clock Mode Divided by 4" si imposta una frequenza effettiva della periferica di:

$$f_{ADC} = \frac{f_{CLK}}{PRESC} = \frac{170000000}{4} = 42.5 \text{ MHz} \quad (5.3)$$

- **Sampling Time** per tutte le conversioni delle ADC di 6.5 ADC Clock Cycle;
- **Tempo totale della singola conversione:**

$$T_{CONV} = (6.5 + 12.5) \times \text{ADC Clock Cycle} = 19 \times \frac{1}{f_{ADC}} = 0.447 \mu s \quad (5.4)$$

- Tutte conversioni sono di tipo **Injected** (anche quando l'ADC gestisce una sola conversione), ovvero, nel momento in cui viene rilevato il trigger di inizio conversione, l'unità effettua le conversioni in sequenza e scrive i risultati nei registri dedicati;
- Tutte le conversioni sono di tipo **Single**, quindi terminata la sequenza di conversioni da effettuare l'ADC aspetta il prossimo Trigger Event per iniziare la conversione della prossima sequenza. In figura 5.34, dal Reference Manual, come avviene il tipo di conversione configurata, con "EOC" flag di fine singola conversione, "EOS" flag di fine sequenza di conversione, e "ADSTART" durata totale della conversione:

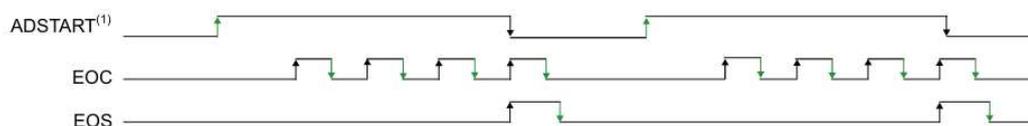


Figura 5.34: Conversione di tipo Single Injected [32].

- Trigger Event per l’inizio delle sequenze di conversione è il **Trigger Event 2 del HRTIM** (associato al Timer A);
- **“Scan Conversion Mode”** abilitata per ADC con una sequenza di conversioni (più di una conversione, rispettivamente la 2, 3 e 4) consente di far “leggere” automaticamente il segnale da convertire nel canale successivo;
- **Fine della Conversione** segnalata tramite il bit JEOS (Injected End of Sequence), flag che posto uguale a 1 via Hardware per segnalare la fine della totale sequenza di conversioni e posto nuovamente pari a 1 via Software per “ricaricarne” il valore, ossia segnalare al microcontrollore che la fine delle conversioni è stata rilevata dall’utente;
- **“Overrun Data Overwritten”** il quale indica che l’unità può riscrivere liberamente i risultati della nuova sequenza di conversioni se i precedenti non sono ancora stati letti.

Il terzo e penultimo menù configurato è il “Timer”, il quale si occupa della configurazione e inizializzazione dei timer impiegati nel progetto di tesi. La scheda di Controllo necessita di diversi timer per la gestione dei segnali in ingresso provenienti dai sensori o per la generazione di quelli PWM, così come riassunto in tabella 5.2:

Timer	Canale	Tipo di Timer	Utilizzo
HRTIM	A1, A2, B1, B2, C1, C2	High Resolution	Generazione PWM
Timer 1	Ch1, Ch2, ETR	Advanced Control	Lettura Encoder
Timer 2	Ch1	General Purpose	Lettura Temperatura Modulo A
Timer 3	Ch1	General Purpose	Lettura Temperatura Modulo B
Timer 4	Ch1	General Purpose	Lettura Temperatura Modulo C
Timer 5	Ch1	General Purpose	Lettura Flussimetro
Timer 7	\	Basic	Generazione ISR CAN A Tx
Timer 8	\	Advanced Control	Generazione ISR Gestione Termica

Tabella 5.2: Tabella dei Timer e loro utilizzo.

L'High Resolution Timer è impiegato dunque per la generazione dei segnali PWM del sistema di controllo. Differentemente da contatori di tipo Advanced Control la generazione dei segnali di output che controllano la commutazione degli switch di potenza del convertitore non avviene per confronto diretto del Duty Cycle, ricavato nel codice di controllo, con il valore del contatore di tipo “up-down”, ossia con la portante a forma triangolare. Piuttosto, essendo l'HRTIM un contatore di tipo “up”, quindi a dente di sega, è necessario adottare una strategia diversa per la generazione delle funzioni di commutazione dei moduli di potenza. Pertanto, le caratteristiche principali del timer e della sua configurazione sono riportate di seguito:

- L'HRTIM consiste in **1 Mater Timer e 6 Slave Timers**, quest'ultimi dalla A alla F possono operare in maniera sincrona o indipendente;
- Tutti e 7 i contatori hanno una **risoluzione** di 16 bit e sono contatori di tipo “up”, quindi a **dente di sega**;
- Ciascun Slave Timer ha **2 Capture Units e 4 Compare Units**, per un numero totale di Output pari a 12;
- Gli **Output sono Complementari** a 2 a 2 per i 6 Slave Timer che li controllano, con possibilità di inserimento di Dead Time;
- **Frequenza di clock** del timer pari a 170 MHz (tramite moltiplicatori interni è possibile arrivare a frequenze “equivalenti” molto più alte, non necessarie ai fini del progetto, dove equivalenti indica che il contatore non opera effettivamente a tali frequenze ma presenta una risoluzione nella generazione o controllo di segnali fino a 184 ps);
- Presente un **Pin di Sincronizzazione PWM** del HRTIM con schede di controllo esterne, ad esempio quella della M.U.T.;
- Frequenza di Switch del sistema pari a 20 kHz, diversa dalla frequenza di Sampling del microcontrollore (o frequenza di ISR) pari a 10 kHz, quindi un **Repetition Counter** pari a:

$$\text{Rep_Count} = \frac{f_{\text{SW}}}{f_{\text{ISR}}} - 1 = \frac{20000}{10000} - 1 = 1 \quad (5.5)$$

Da cui segue, come mostrato in figura 5.35, che con un valore unitario di Repetition Counter (HRTIM_REPxR) l'Overflow Event, il quale per il Timer Slave A genera l'ISR di controllo motore, è generato raggiungendo due volte il valore di ARR:

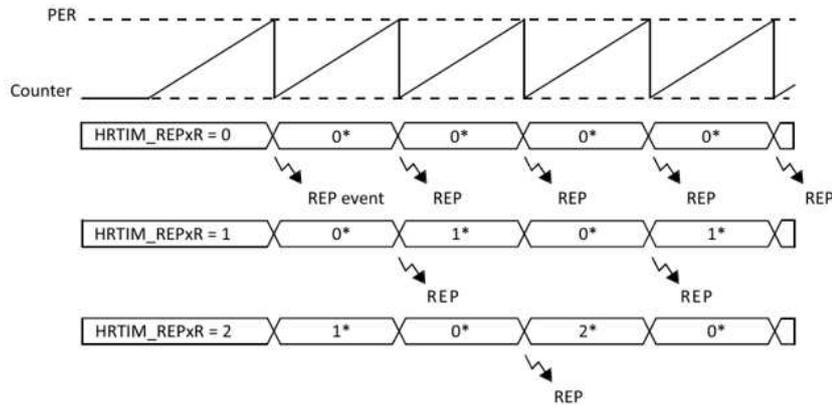


Figura 5.35: Repetition Counter per l’HRTIM Timer A [32].

→ L’**ARR**, ossia il valore massimo del contatore, pari a:

$$ARR = \frac{f_{\text{Clock}}}{f_{\text{ISR}}} = \frac{170000000}{10000} = 17000 \quad (5.6)$$

→ **Continuous Free-Running Mode**, quindi il contatore continua ad incrementarsi ciclicamente senza mai arrestarsi, “ricaricandosi” all’ARR senza che vi sia un comando specifico;

→ **Master Timer** funziona solo da Sincronizzatore di Clock per gli Slave Timer (1 Trigger Source Active), non sono presenti configurazioni “Compare” per il Master;

→ **Slave Timer A, B e C** configurati con:

- **Preload Mode Enabled**, ossia i registri del timer sono aggiornati in modo “differito” rispetto al momento in cui i nuovi valori sono scritti e salvati in un registro “shadow”. I nuovi valori vengono aggiornati ed utilizzati solo al verificarsi di un evento specifico, come l’OverFlow Event del contatore;
- **Repetition Update Enabled**, per garantire che l’update dei registri venga effettuato al Repetition Event generato ad ogni OverFlow Event;

→ Inserzione di **Deadtime** tra gli Output complementari 1 e 2 di ogni Slave Timer, per evitare che gli switch di potenza di ciascun ramo del convertitore siano in conduzione contemporaneamente, condizione che causerebbe un cortocircuito tra

alimentazione e massa. Il tempo morto è stato configurato in modalità Asimmetrica con Ritardo sulla funzione di commutazione di ON, figura 5.36; il Deadtime di Salita e di Discesa hanno lo stesso valore, in cui la frequenza di clock generatrice è impostata a 170 MHz:

$$t_{DTG} = t_{HRTIM} = 5.89 \text{ ns} \quad (5.7)$$

$$t_{DTx} = DTx[8 : 0] \times t_{DTG} = 500 \text{ ns}, \quad \text{con } x = R,F \text{ e } DTx[8:0] = 85 \quad (5.8)$$

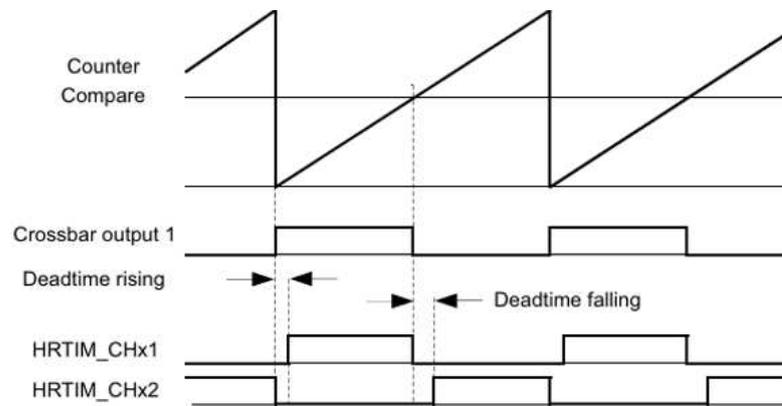


Figura 5.36: Deadtime Asimmetrico di Salita e Discesa [32].

→ **Generazione segnali di Output complementari**, con tempo morto, tramite Compare Unit 1 e 2 per ogni Slave Timer. Come già accennato, trattandosi di una portante a dente di sega e non triangolare, è necessario adottare una strategia specifica di generazione segnali di Output; in particolare, l'HRTIM è definito da 2 registri di Compare, all'interno dei quali sono salvati via firmware due valori ricavati a partire dal Duty Cycle, singolo e ottenuto anch'esso nel codice di controllo. Pertanto, occorre definire due importanti operazioni, quella di generazione dei valori inseriti all'interno dei due registri, e quella attraverso la quale si possono ricavare le funzioni di commutazione:

1. **Compare Register Values**, ricavati da una logica specifica secondo la quale la portante, a dente di sega, è "divisa" rispetto al suo valore centrale, ossia:

$$ARR_{Half} = \frac{ARR}{2} = 8500 \quad (5.9)$$

A partire da questo valore centrale e dal Duty Cycle ricavato nel firmware, si ottengono i valori da inserire nei registri, considerando lo schema di figura 5.37:

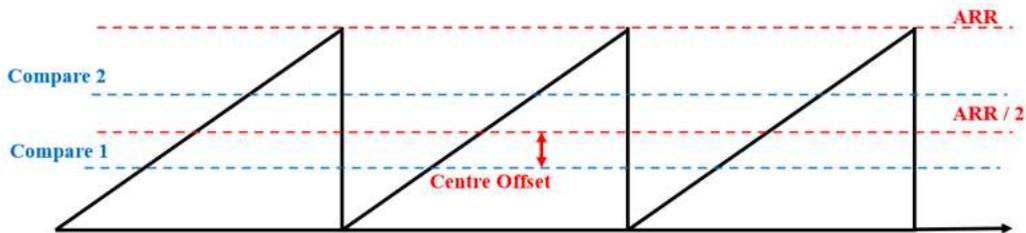


Figura 5.37: Rappresentazione dei Compare Registers Values nell'HRTIM.

$$Centre_Offset = Duty \times ARR_Half \quad (5.10)$$

$$Compare_1 = ARR_Half - Centre_Offset \quad (5.11)$$

$$Compare_2 = ARR_Half + Centre_Offset \quad (5.12)$$

2. **Output Values**, ovvero le funzioni di commutazione alle quali è applicato il Dead Time, sono segnali ricavati tramite il confronto tra i valori scritti all'interno dei due Compare Registers e il valore del contatore. Si ricorda infatti che i Duty Cycle, e quindi i valori dei Compare Registers, sono calcolati alla fine della ISR corrente e applicati all'inizio (OverFlow Event) della successiva. Nel momento in cui, all'interno di quest'ultima, il valore del contatore Eguaglia quello scritto nel Compare 1, la funzione di commutazione del Canale 1 assume polarità Positiva con Dead Time opportuno (complementarmente la funzione di commutazione del Canale 2 assume polarità Negativa). Appena il valore del contatore Eguaglia quello scritto all'interno del Compare 2 Register, l'output del Canale 1 assume polarità Negativa e, complementarmente con Dead Time quello del Canale 2 assume polarità Positiva. Quanto detto è riassunto in figura 5.38, in cui HRTIM_CMP1AR e HRTIM_CMP2AR sono i valori scritti nei Compare Registers nella ISR corrente, e HRTIM_CHA1 il valore dell'Output del Canale 1:

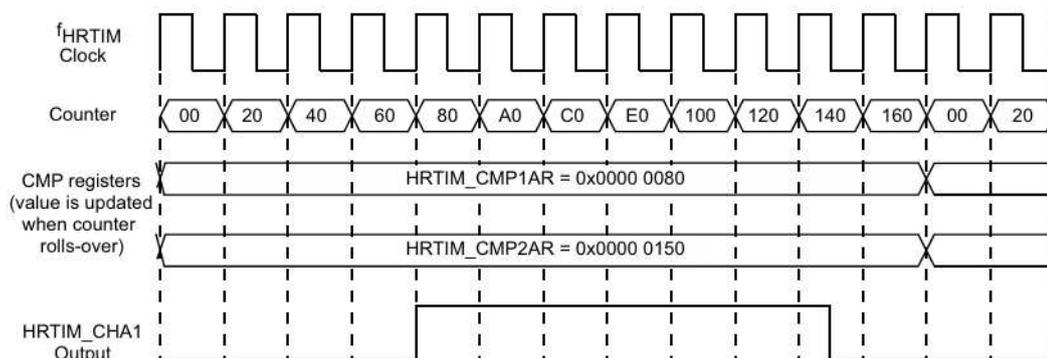


Figura 5.38: Generazione della Funzione di Commutazione a partire dai Compare Register Values [32].

- Come già introdotto nella sezione “NVIC Mode and Configuration”, l’ISR principale di controllo motore, a bassa priorità di livello 3, è generata dall’HRTIM TIMA Global Interrupt. Nel dettaglio si tratta del “**Period Event**” (PER) del Timer Slave A del High Resolution Timer, ovvero l’Overflow Event già citato precedentemente. Nel momento in cui il contatore raggiunge il suo ARR si genera un evento Trigger (ogni due Overflow Events) che innesca l’ISR e le conversioni (indipendenti) delle unità ADC.

Dalla tabella 5.2 il contatore 1, di tipo Advanced Motor Control, è dedicato alla lettura e interpretazione dei segnali provenienti dall’Encoder. Il Timer è impostato quindi in “Encoder Mode + index”, quindi specifico per l’applicazione richiesta. Quando il contatore è configurato in questo modo, si ha nello specifico:

- Un funzionamento da contatore incrementale per leggere i segnali di un **Encoder Incrementale**, o in Quadratura, con il supporto del segnale di indice per rilevarne la posizione di riferimento;
- Il timer utilizza 3 Input, di cui due per decodificare i segnali **A_MCU** e **B_MCU** (sezione 2.2.1), sfasati di 90 gradi, per determinare verso di rotazione e velocità (quest’ultima via Firmware), e uno **Z_MCU** di reset del contatore;
- Quando un timer è configurato in Encoder Mode, il comportamento del contatore è equivalente a quello di un timer alimentato da un **clock esterno**, ma con la particolarità che il contatore viene aggiornato tramite i fronti dei segnali **A_MCU** e **B_MCU**;
- **Risoluzione** del contatore a 16 bit, conteggio a **dente di sega**;

→ Configurazione dell'**Indice**:

- **Reset del contatore** ad ogni rilevazione del segnale sul Fronte di Salita e qualsiasi sia la direzione di rotazione del rotore;
- **Rilevazione dell'indice** quando i segnali A e B sono entrambi a livello alto, ossia $AB = 11$.

→ Configurazione dei **Segnali A e B**, in quadratura:

- **Polarità** dei segnali Positiva, quindi in Input ai canali dedicati del Timer non vengono scambiati di polarità;
- Encoder Mode con **update del contatore** su Entrambi i Fronti di salita e discesa dei segnali A e B;

→ In figura 5.39 si riporta la modalità di conteggio del timer aggiornata su entrambi i fronti; è possibile anche notare il cambio del **verso di rotazione**, segnalato con il flag DIR bit, rilevato dal cambio di sequenza dei segnali A (tim_ti1) e B (tim_ti2):

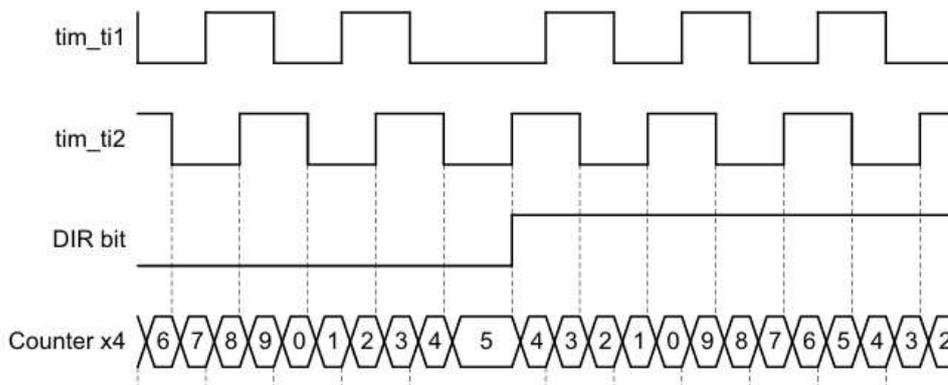


Figura 5.39: Funzionamento Timer 1 in Encoder Mode + index [32].

I General Purpose Timer 2, 3, 4 e 5 presentano caratteristiche simili e sono utilizzati tutti con funzione **PWM Input Capture Direct Mode**, per la rilevazione dei Periodi e Duty Cycle dei segnali in ingresso su ciascun canale.

I timer 2 e 5 sono contatori a 32 bit, mentre i 3 e 4 a 16 bit; la risoluzione non influisce in modo particolare sulle rilevazioni dei segnali associati a questi contatori, trattandosi relativamente di basse frequenze. Tuttavia è una differenza importante da tenere in considerazione per possibili modifiche del progetto.

Differentemente dal Timer 1, impostato in Encoder Mode, in PWM Input Capture Mode il contatore misura il tempo trascorso tra due Fronti di Salita successivi del segnale; in particolare, dopo una serie di filtri applicati per eliminare eventuale rumore presente, si ha:

- **La Capture Unit 1** registra il valore del contatore del timer al momento del Fronte di Salita e ne fa un Reset azzerandolo, consentendo in questo modo la misura del Periodo del segnale (ancora da condizionare);
- Contemporaneamente, la **Capture Unit 2** registra il valore del contatore quando si presenta il Fronte di Discesa, senza resettare il counter, per poter valutare il Duty Cycle del segnale. Tuttavia, quest'ultimo valore non è stato utilizzato nel progetto.
- Per poter utilizzare questa modalità di timer è necessario impostare il contatore in:
 - “Slave Mode” configurata in **Reset Mode** e sorgente di Trigger impostata sul “**TI1FP1**”, ossia il segnale in ingresso sul Canale 1;
 - **Channel 1** impostato in “Input Capture Direct Mode”, perché cattura direttamente il segnale associato, senza ulteriori manipolazioni;
 - **Channel 2** impostato in “Input Capture Direct Mode from Remap”, perché il canale “manipola” il segnale dall’interno del Timer, non da un pin Esterno come per il canale 1.

In figura 5.40 si riassume quanto specificato, considerando che `tim_ti1` è il segnale esterno, `TIMx_CNT` il contatore e `TIMx_CCR1-2` i valori scritti nei Capture Registers. Per condizionare il valore scritto nel Capture Register 1 e ottenere dunque il Periodo del segnale di Input basta moltiplicare per il periodo di clock del timer:

$$T_{IN} = TIMx_CCR1 \times T_{clock}, \quad \text{con } T_{clock} \text{ pari a } 5.89 \text{ ns} \quad (5.13)$$

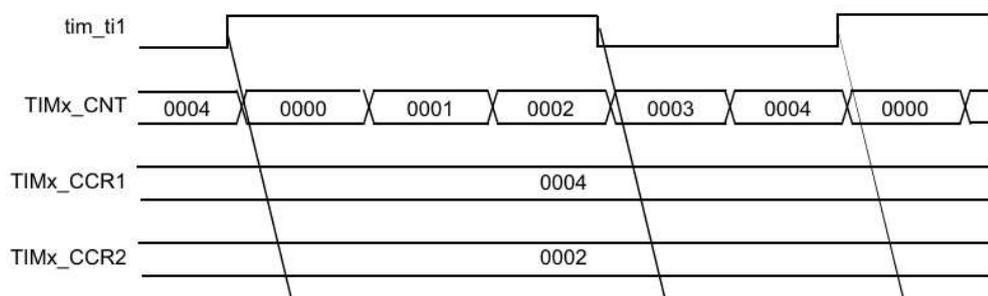


Figura 5.40: Comportamento dei Timer in PWM Input Capture Mode [32].

Infine, la sezione dei Timer si chiude con brevi specifiche del timer 7 e 8, utilizzati per la generazione delle ISR Secondarie di Trasmissione Messaggi CAN e Gestione Termica, a priorità Bassa di livello 3 introdotta precedentemente.

Trattandosi di un Basic Timer, il Timer 7 è utilizzato solamente per la generazione di un Interrupt ad ogni OverFlow Event del contatore, le cui caratteristiche:

- Contatore a **dente di sega**, con una **risoluzione** di 16 bit;
- **Prescaler** posto pari a 999, al fine di ottenere una routine di Trasmissione Messaggi CAN ogni 50 ms:

$$f_{clock_PSC} = \frac{f_{clock}}{PSC + 1} = \frac{170000000}{1000} = 170 \text{ kHz} \quad (5.14)$$

$$T_{Tx_CAN} = \frac{ARR}{f_{clock_PSC}} = \frac{8500}{170000} = 50 \text{ ms} \quad (5.15)$$

Il Timer 8 invece è un Advanced Control Timer utilizzato semplicemente per la generazione di un Interrupt ad ogni OverFlow Event, similmente al Timer 7:

- Contatore a **dente di sega**, con una **risoluzione** di 16 bit;
- **Prescaler** posto pari a 999, al fine di ottenere una routine di Gestione Termica ogni 1 ms:

$$f_{clock_PSC} = \frac{f_{clock}}{PSC + 1} = \frac{170000000}{1000} = 170 \text{ kHz} \quad (5.16)$$

$$T_{Thermal} = \frac{ARR}{f_{clock_PSC}} = \frac{170}{170000} = 1 \text{ ms} \quad (5.17)$$

L'ultimo menù utilizzato per la configurazione del microcontrollore è il “Connectivity” Menù. Dal nome stesso, tramite questa sezione è possibile impostare le funzionalità delle interfacce e periferiche dedicate alla comunicazione e protocolli che consentono al microcontrollore di comunicare con altri dispositivi o sistemi esterni. Le periferiche configurate nel progetto sono tre, la FDCAN (“Flexible Data Rate CAN”, un’evoluzione rispetto al CAN, per velocità, efficienza e capacità di trasferimento dati superiori), la SPI e la USART.

Per quanto riguarda la prima interfaccia, sono state configurate due comunicazioni FDCAN, la 1 e la 3 (in relazione al Pinout eseguito). Questo standard seriale è utilizzato per la trasmissione e ricezione di messaggi legati al codice di controllo, in dettaglio in sezione 5.3.2; sostanzialmente la comunicazione riguarda segnali di feedback, di stato o del tipo di controllo motore da attuare. Di seguito alcune considerazioni riguardo la configurazione della periferica:

- **Formato** FDCAN classico, con velocità e dimensioni dati standard per trasmissione e ricezione dati, senza alcuna ritrasmissione automatica dei messaggi dei messaggi non trasmessi correttamente;
- **Nessuna pausa** tra due messaggi trasmessi consecutivamente, la trasmissione avviene immediatamente;
- Trasmissione e Ricezione dei Messaggi in modalità **FIFO**, “First In First Out”, quindi in ordine di arrivo o di trasmissione uno alla volta;
- “**Time Quantum**” nominale pari a 100 ns, ossia la più piccola unità di tempo utilizzata per la sincronizzazione e la segmentazione temporale di un bit (3 fasi, la sincronizzazione, il segmento 1 e il segmento 2);
- “**Nominal Time for One Bit**”, rappresenta il tempo che un bit impiega a passare sulla rete, in trasmissione e ricezione. Dipende dal Time Quantum e dalle lunghezze temporali delle 3 fasi sopra citate; con un Time Quantum di 100 ns esso ha un valore di 1000 ns, quindi un bit ricevuto o trasmesso ogni 1000 nanosecondi. Non solo, ma il suo inverso rappresenta il **Bit Rate**, ossia la quantità di bit che vengono inviati o ricevuti ogni secondo:

$$Bit_Rate = \frac{1}{Time_Quantum} = \frac{1}{1000\text{ ns}} = 1\text{ Mbit/s} \quad (5.18)$$

La gestione della routine di trasmissione e ricezione, con i filtri applicati ai messaggi e la logica FIFO applicatavi, è descritta nel dettaglio in sezione 5.3.2.

Le interfacce SPI e USART non sono state configurate nel dettaglio e la loro inizializzazione è stata effettuata principalmente per consentire la comunicazione tra il microcontrollore e i dispositivi esterni.

In particolare, la comunicazione sincrona SPI potrebbe consentire lo scambio dati con periferiche esterne tipo sensori, moduli di memoria, display e altri dispositivi; è un protocollo seriale ideale per dispositivi che richiedono velocità di trasferimento elevate

o per interfacciarsi con moduli di rete. Nella Control Board non è stato montato il connettore necessario per l'interfaccia, ma lo sbroglio dei segnali è completo e pronto per interfacciarsi con quest'ultimo.

Infine, la comunicazione tramite protocollo USART, configurata per avvenire attraverso tre canali, ciascuno con un Pin di Trasmissione e uno di Ricezione, consente di stabilire una connessione funzionale tra il microcontrollore, il debugger-programmatore ST-Link e il PC; non solo, ma può essere utilizzata per comunicare, sincronizzarsi e trasmettere dati con la scheda di controllo della M.U.T., non ancora presente e pertanto non ancora configurata.

Senza addentrarsi nella configurazione parametrica del protocollo, ciò a cui i canali Tx e Rx delle interfacce USART 1 e 2 sono destinati è:

- **Debugging e Programmazione**, tramite i segnali SYS_JTMS_SWDIO, SYS_JTCK_SWCLK, NRST, DBG_SYNC, fondamentali per l'interfaccia SWD usata dall'ST-Link per caricare il firmware e per il debug in tempo reale, per il reset controllato in avvio e per le operazioni di sincronizzazione;
- **Comunicazione verso il PC**, tramite _TX, USART1_TX e USART1_RX, passando per l'ST-Link.

5.2.3 Test e Validazione della Scheda di Controllo

Terminata la configurazione del microcontrollore, seguendo l'ordinamento proposto in sezione 5.2, il processo di validazione della Control Board si chiude con le operazioni di testing che possono esservi condotte avendo a disposizione e funzionanti le periferiche e interfacce del microcontrollore. L'obiettivo di questa sezione è presentare dunque i test effettuati sulla scheda per la generazione dei segnali PWM, per l'acquisizione dei segnali analogici di feedback e per la validazione delle funzioni ausiliarie; l'approccio utilizzato in questa ultima fase di validazione è lo stesso descritto precedentemente, ossia testing della scheda inizialmente scollegata, e man mano si integra il PCB con il convertitore applicando sempre più connessioni con i dispositivi di feedback e controllo. Tuttavia, in questa sezione non sarà ancora mostrato il codice C utilizzato nella routine di controllo, oggetto della sezione 5.3; quando necessario, saranno riportati estratti di codice esplicativi delle routine eseguite per le operazioni di testing.

La fase 9 anticipata in precedenza riguarda la generazione dei segnali PWM, il controllo delle schede Gate Driver e loro connessione al PCB di controllo.

La configurazione dell'High Resolution Timer e dei tre Slave Timer, ciascuno adibito alla generazione delle funzioni di commutazione complementari di una gamba di inverter, permette direttamente la rilevazione dei segnali di output ai connettori delle schede Gate Driver. Tramite un oscilloscopio è possibile quindi rilevare i segnali ponendo il riferimento comune delle sonde al Testing Point connesso al GND della scheda.

La generazione dei segnali PWM avviene a seguito di due abilitazioni:

- Le prima eseguita sul file `main.c` del codice di controllo, nello specifico riguardo l'abilitazione del Master Timer, dei tre Slave Timers e del Period Event del Timer A (trigger dell'ISR principale di controllo);
- La seconda eseguita sul file `stm32g4xx_it.c`, ossia il file che gestisce le ISR del codice. Nella sezione dedicata alla ISR generata dal Timer A, si applica l'abilitazione degli Output dei 3 Slave Timers.

Lato Firmware, selezionati dei Duty Cycle costanti di prova e realizzata la macro che a partire da questi genera i valori da riportare nei Compare Registers dell'HRTIM secondo quanto discusso in sezione 5.2.2, le 3 funzioni di commutazione, per i 3 switch di potenza superiori in ciascuna gamba del convertitore, ottenute in oscilloscopio sono riportate in figura 5.41. In giallo la funzione di commutazione associata a Duty Cycle pari a 0.8, in rosso pari a 0.5 e in blu pari a 0.2; l'ampiezza dei segnali è di 3.3 V.

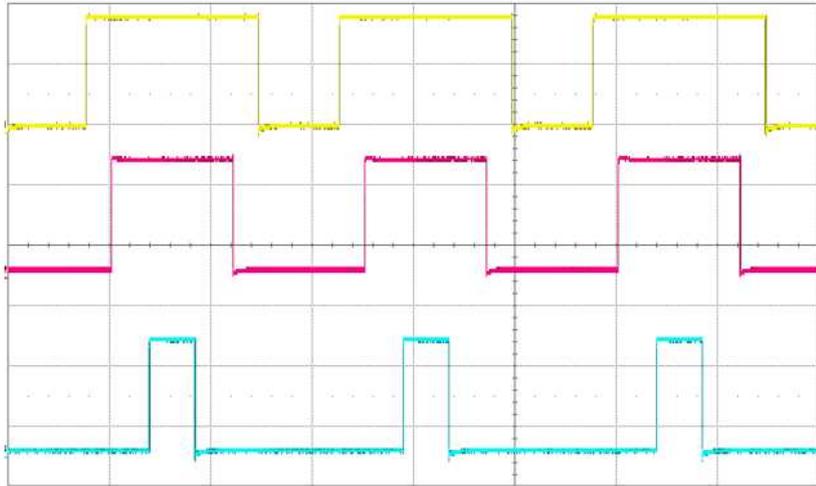


Figura 5.41: Funzioni di Commutazione per gli Switch Superiori delle tre Gambe di Inverter.

Affinché si possa apprezzare invece il Dead Time di 1 μ s inserito tra le funzioni di commutazione complementari della singola gamba di inverter, per lo switch superiore e inferiore, si riportano in figura 5.42 i segnali di output complementari con inserzione di tempo morto:

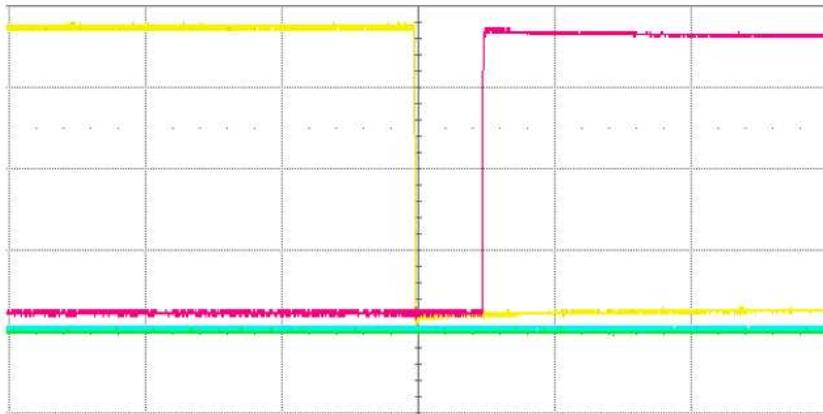


Figura 5.42: Particolare del Tempo Morto tra le Funzioni di Commutazione Complementari.

Oltre ai segnali complementari di ciascuna gamba di inverter, è stato verificato che ai connettori delle schede Gate Driver arrivassero correttamente i segnali legati

all'alimentazione a 12 V (specifica per i connettori), al Reset e all'abilitazione della modulazione, ossia i segnali **RESET_OUT** e **PWM_EN_N**, discussi in sezione 2.2.1, quando comandati direttamente dal microcontrollore tramite un semplice script in C.

Verificato dunque che tutti i segnali di trasmissione in arrivo ai connettori delle schede Gate Driver funzionassero correttamente, si è provveduto alla connessione di quest'ultime. L'accensione dei LED posizionati su ciascuna scheda ne indica la corretta alimentazione.

La fase 10 è stata dedicata invece al processo di validazione delle unità ADC configurate in precedenza. Di seguito sono riportate le descrizioni delle metodologie adoperate per la validazione completa e definitiva delle ADC adibite alla conversione dei segnali analogici di feedback delle tre correnti di fase, della tensione DC-link e della coppia; per quanto concerne i segnali analogici dei quattro sensori di temperatura, in questa fase del processo di testing si riporta solamente la verifica della corretta configurazione della ADC 4, poiché nel momento in cui è stato affrontato non erano ancora disponibili le connessioni con i sensori di temperatura.

L'obiettivo delle operazioni di validazione è quello di ottenere delle Linee di Tendenza delle correnti, della tensione e della coppia, dalle quali ricavare i coefficienti di Scala e di Offset attraverso cui correggere, via Firmware, i risultati delle conversioni delle unità ADC. Poiché quest'ultime hanno una risoluzione di 12 bit, i valori interi risultanti dalle conversioni spaziano da 0 a 4095; attraverso l'applicazione dei fattori di Scala e di Offset è possibile riportarli a valori effettivi di corrente e tensione. Le Linee di Tendenza sono ricavate tramite un file Excel che mette in relazione grafica i risultati interi delle conversioni ADC con i valori misurati di corrente e tensione tramite strumentazione esterna.

La validazione delle unità ADC per correnti di fase e tensione DC-Link necessita dapprima dell'apertura del kit del convertitore, per poter accedere sia ai sensori ad effetto Hall per le misure di corrente, sia ai terminali del DC-Link per la prova in tensione. Verificato che il connettore di ciascun sensore si connetta alla scheda di controllo con la giusta polarità (essendo alimentati a 3 cavi, -15 V, GND e +15 V), si identifica l'ordinamento dei sensori in base alle ADC corrispondenti; ad esempio, il terminale di potenza corrispondente alla fase A del convertitore è quello associato al sensore di corrente connesso alla ADC 1. Le prove in corrente sono state effettuate considerando la presenza di diversi componenti:

1. Kit WolfSpeed aperto, comprensivo di scheda di controllo e programmatore ST-Link;
2. Conduttore semplice di piccolo diametro utilizzato per "aumentare" virtualmente la corrente rilevata dal sensore, praticando 10 spire che passano nella zona centrale di rilevazione;

3. Shunt per Millivoltmetro delle Officine Galileo [34], dispositivo di shunt che serve a misurare correnti elevate (fino a 30 A) trasformandole in una tensione proporzionale facilmente rilevabile da strumenti di misura, tipo Multimetro;
4. Power Supply per la generazione di un valore noto di corrente, fino a 20 A;
5. Multimetro;
6. PC per la programmazione del microcontrollore, con semplice script per la raccolta dei valori scritti nei registri delle ADC a seguito della conversione;
7. Foglio di calcolo Excel sul quale riportare i valori delle misure effettuate.

Innanzitutto occorre definire lo stato delle connessioni delle prove e il ruolo di ciascun dispositivo presente. In figura 5.43 si riporta uno schema semplice riassuntivo di ciò:

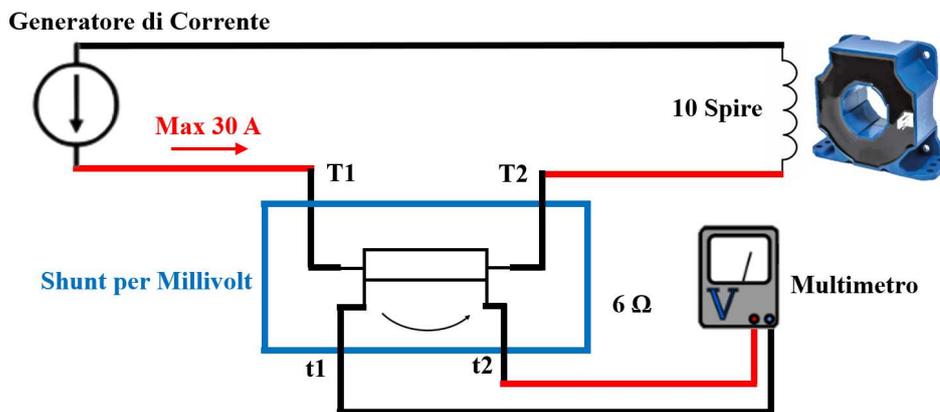


Figura 5.43: Schematico delle Connessioni delle Prove in Corrente.

Il Power Supply può generare correnti fino a 20 A; tuttavia, specialmente per valori superiori a 10 A, la corrente generata non rispecchia precisamente il valore voluto dall'utente. In operazioni di taratura accurata come quelle delle unità ADC, occorre ottenere con precisione il valore di corrente desiderato. Per questo motivo è stato integrato nelle prove l'uso dello Shunt per Millivoltmetro.

In particolare, ai terminali posteriori "T1" e "T2" può circolare corrente fino a 30 A, mentre ai terminali anteriori "t1" e "t2" è presente una resistenza di 6 Ω, ossia lo shunt vero e proprio sul quale si rileva la tensione, dell'ordine dei millivolt. Ad un valore di corrente massimo pari a 30 A che circola nei terminali posteriori, corrisponde un valore di tensione misurata sullo shunt di 60 mV; nota questa relazione, è possibile mettere in corrispondenza il valore di corrente generato dal Power Supply (incerto per l'utente)

con la tensione rilevata dal Multimetro, impostato in Millivolt. Attraverso la 5.19 si può quindi ricavare il valore di corrente effettiva circolante nel circuito “posteriore”, ossia quello principale connesso alla bobina entrante nel sensore ad effetto Hall:

$$I_{effettiva} = \frac{V_{Multimetro} \times 30 \text{ A}}{60 \text{ mV}} \quad (5.19)$$

È importante considerare che, poiché sono state realizzate 10 spire sulla bobina che passa all’interno del sensore ad effetto Hall, ogni valore di corrente presente (nel Power supply e nella 5.19) necessita un’amplificazione di un fattore 10; ciò è stato fatto per far rilevare dal sensore correnti equivalenti da -200 A fino a +200 A (effettiva generata dal Power Supply di 20 A). Non solo, ma poiché il range di corrente primaria considerato nel precedente progetto di tesi [1] è di -250 A e +250 A, l’unità ADC non arriva a rilevare valori pari a 0 o 4095, ossia di fondo scala, ottenibili solo con quest’ultimi valori di corrente.

Le prove sono state dunque condotte aggiornando manualmente il valore di corrente generato dal Power Supply e registrando su un foglio di calcolo Excel i valori di Tensione misurata dal multimetro (ai capi della resistenza di shunt), il valore di corrente ottenuto tramite la 5.19, e il valore convertito dall’unità ADC, nel range 0 - 4095.

L’acquisizione di quest’ultimo valore è stata ottenuta tramite un semplice script in C sulla routine di controllo, in cui ogni 20000 ISR, ovvero ogni secondo, si effettuava una media sulle conversioni realizzate ad ogni ISR sullo stesso valore di corrente. In figura 5.44 si riporta lo stato reale delle prove in corrente, con particolare su spire realizzate sul sensore (sensore in blu e cavo in verde):



Figura 5.44: Stato delle Connessioni delle Prove in Corrente.

Le prove in tensione invece richiedono una strumentazione più semplice, composta da:

1. Scheda di Controllo senza Convertitore;
2. Multimetro;
3. Alimentatore fino a 600 V;
4. Teca di protezione per una maggiore sicurezza durante le prove.

Lo stato delle connessioni è più semplificato rispetto alle prove in corrente, poiché necessita solo di una connessione in parallelo tra il multimetro e il PCB, entrambi connessi all'alimentatore esterno. Le modalità di registrazione dei valori nel foglio Excel è la medesima, in cui i risultati della conversione ADC, sempre interi da 0 a 4095, sono ottenuti secondo le stesse istruzioni descritte per le acquisizioni di corrente, quindi eseguendo una media ogni 1 – 2 secondi.

In figura 5.45 si riporta dunque lo stato reale delle prove in tensione (alimentatore assente in foto poiché riposto in un piano superiore del banco):

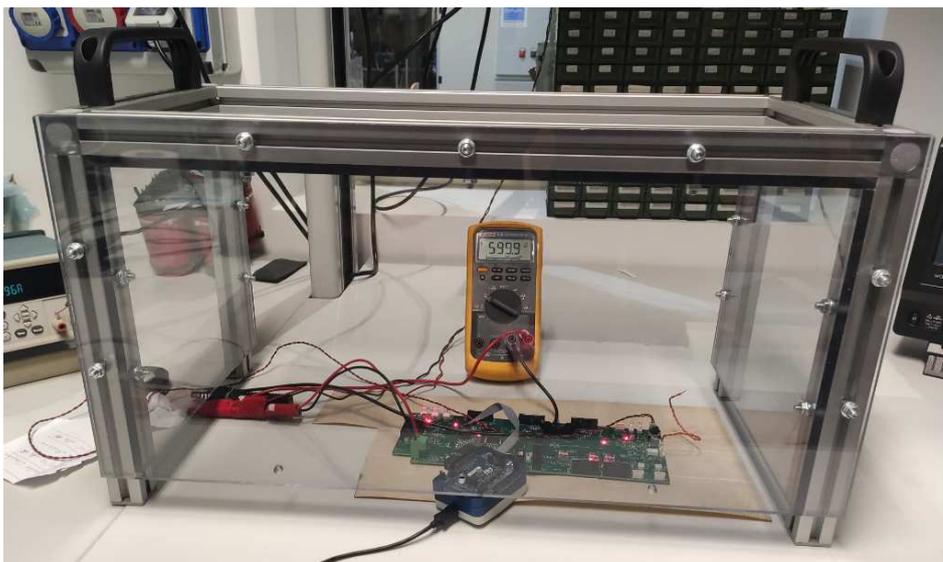


Figura 5.45: Stato delle Connessioni delle Prove in Tensione.

Il condizionamento del dato grezzo ottenuto dal canale 2 della ADC 3 dedicato alla lettura del torsionmetro prevede un prova molto più semplice comandata direttamente da un software pilota del torsionmetro. Innanzitutto si rileva la coppia di offset misurata a sistema non attivo, dovuta principalmente all'eccentricità dell'accoppiamento degli

alberi dei motori MUT e DV; il valore rilevato corrisponde a circa 4 Nm, mentre in ADC circa 1960, ossia metà scala digitale. Successivamente si applica una coppia elevata di 500 Nm tramite pilotaggio diretto del torsionmetro (non algoritmo di controllo), rilevando un valore digitale di circa 2900. Tramite un'interpolazione lineare di questi due punti si ottiene una linea di tendenza circa lineare dalla quale si conservano i valori di fattore di scala e di offset.

Si riportano dunque le Linee di Tendenza ottenute in figura 5.46 (quelle di corrente, prevalentemente sovrapposte) e quella di tensione in figura 5.47, attraverso le quali, tramite l'opzione Excel dedicata, è stato possibile ricavare i valori dei fattori di Scala e di Offset:

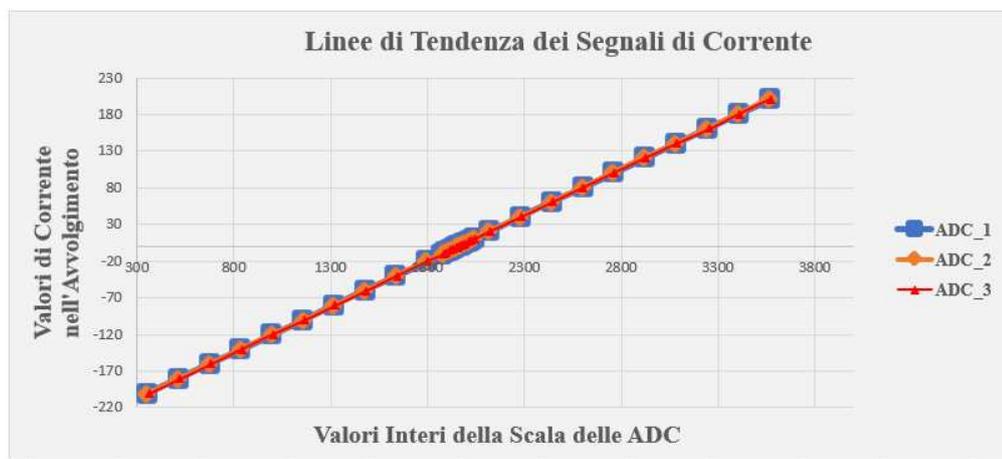


Figura 5.46: Linee di Tendenza delle Correnti di Fase.

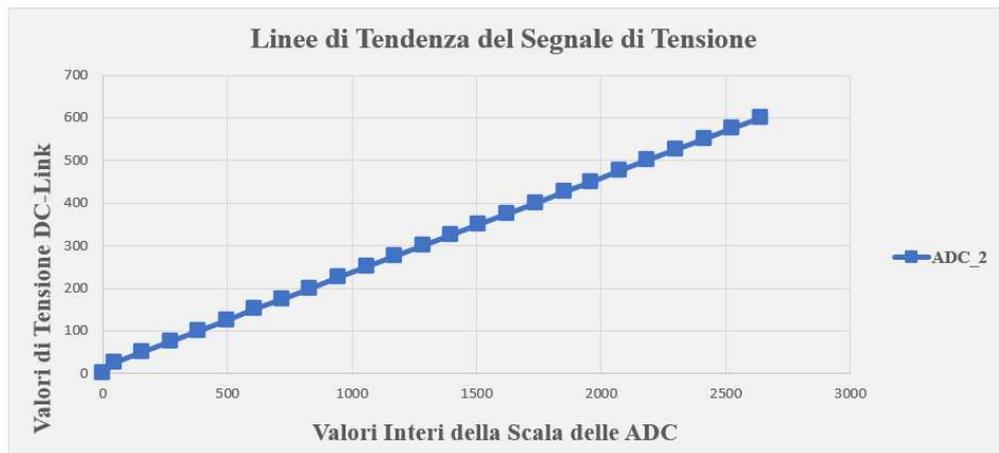


Figura 5.47: Linee di Tendenza della Tensione DC-Link.

I fattori di scala ottenuti sono riassunti in tabella 5.3:

Acquisizione da Correggere	Fattore di Scala	Offset
Corrente Fase A	0.1249	-244.86
Corrente Fase B	0.1251	-244.6
Corrente Fase C	0.1251	-245.81
Tensione DC-Link	0.2215	+15.549
Coppia	0.4881	+958.32

Tabella 5.3: Tabella dei Parametri di Scala e Offset.

In cui si precisa che i fattori di Offset per le correnti di fase non sono stati utilizzati nella routine di controllo, in quanto ricavati tramite uno State Machine dedicato, come descritto in sezione 5.3.

La validazione dell' ADC 4, configurata per la conversione dei sensori di temperatura segue in questa fase un processo molto limitato. Sostanzialmente è stato verificato che ponendo sia a GND che a 3.3 V i Pin dei connettori di temperatura, il valore convertito dalla ADC per ciascun canale fosse dapprima uguale a 0 (connessione GND), e poi pari al fondo scala, quindi 4095 (connessione 3.3 V).

La fase finale e conclusiva del processo di validazione della scheda di Controllo riguarda la verifica delle funzioni ausiliarie, delle ventole del convertitore, del comando della Service Board, dell'alimentazione del torsiometro e del funzionamento del relè di emergenza.

Non essendo ancora disponibile in questa fase progettuale il segnale in frequenza del flussimetro e dell'encoder, per quanto riguarda i General Purpose Timer configurati precedentemente, è stato possibile verificare il funzionamento solamente dei contatori utilizzati per la rilevazione dei periodi dei segnali di temperatura delle 3 schede Gate Driver.

Su ciascun modulo di potenza CAB450M12XM3 [7] è presente una resistenza NTC per la misura della temperatura del modulo. La misura della resistenza NTC è disponibile in modo differenziale su uno dei 4 connettori di ingresso del scheda Gate Driver montata sul modulo; la scheda genera un'onda quadra, con un Duty Cycle del 50%, a frequenza variabile in base alla resistenza rilevata. Il segnale viene dunque raccolto dal PCB di controllo e il timer dedicato alla rilevazione del segnale restituisce nel Capture Register 1 il suo periodo da condizionare.

Il condizionamento del segnale viene effettuato basandosi su due relazioni fondamentali:

→ Una **Look-Up Table** creata con apposito script Matlab, lo stesso utilizzato in sezione 4.2, a partire dal legame presente tra la frequenza del segnale di temperatura e il valore della resistenza variabile NTC, presentato sotto forma di tabella nel datasheet [8] (figura 5.48) delle schede Gate Driver e ampliato sotto forma di Look-Up:

NTC Resistance (Ω)	Frequency Output (kHz)
13,491	4.6
4,700	10.3
1,928	17.1
898	22.8
464	26.4
260	28.3
156	29.5
99	30.1

Figura 5.48: Linee di Tendenza della Tensione DC-Link.

→ Una **formula** che permette di ricavare la temperatura del modulo a partire dal valore della resistenza NTC, presente nel datasheet del kit Wolfspeed [2]:

$$T_{RTD} = -87.12 \times \log(R_{NTC_A}) + 786.14 \quad (5.20)$$

Infine, è stata verificata la correttezza di funzionamento dell'alimentazione 24 V del torsionmetro, trasferita tramite connettore dedicato, mentre si è constatata l'avaria di una delle due ventole montate sul kit Wolfspeed. La scheda di Servizio è stata correttamente comandata tramite un semplice script in C che azionasse in sequenza le sue funzioni principali, utilizzando il connettore creato appositamente.

5.3 L'algoritmo di Controllo

5.3.1 Routine di Controllo

La sezione che segue comprende la descrizione completa dell'algoritmo di controllo scritto in linguaggio C in STM32CubeIDE, l'ambiente di sviluppo integrato ufficiale di STMicroelectronics per la programmazione dei microcontrollori STM32. L'algoritmo deve essere in grado di coordinare tutte le funzioni del sistema unificato progettato finora garantendo in ogni condizione di funzionamento sicurezza, affidabilità ed efficienza. Tutte le informazioni provenienti dai segnali in arrivo al microcontrollore devono essere processate e interpretate dall'algoritmo con precisione, sfruttando a pieno le potenzialità delle periferiche configurate nella 5.2.2. La scrittura del codice deve essere semplice, efficiente e ottimizzata per poter essere interpretabile dagli utenti senza malintesi evitando linee superflue o ridondanti.

L'obiettivo dell'analisi dell'algoritmo sviluppato cerca quindi di far luce sui principali aspetti dello stesso, mostrando quando necessario delle linee di codice a supporto, dall'organizzazione dei file "header .h" o "source .c" alla suddivisione del codice di Routine principale in blocchi funzionali. Infine, tutte le caratteristiche e proprietà della comunicazione CAN, incluse le funzioni di trasmissione e ricezione appartenenti all'algoritmo di controllo, sono analizzate nel dettaglio nella sezione successiva 5.3.2, per fornire una descrizione più completa e dettagliata della rete di comunicazione sviluppata.

Il primo aspetto da considerare è la suddivisione dei file a supporto dell'algoritmo, come anticipato divisi in "header .h" o "source .c". In breve, i file ".h" contengono le dichiarazioni, come le funzioni presenti nel codice (solo dichiarate) o le variabili create dall'utente; questi file non contengono quindi codice eseguibile e sono inclusi in altri file tramite la linea "#include". D'altra parte, i file ".c" contengono il codice eseguibile o funzioni che vengono richiamate nell'algoritmo; affinché i file ".h" siano consultabili occorre includerli nelle intestazioni di ciascun file ".c". La suddivisione effettuata in questo progetto di tesi considera:

- **6 file ".h"** contenenti Costanti generali, Costanti del Motore, Variabili, Strutture dati create dall'utente, Dichiarazioni delle Funzioni presenti e Macro;
- **8 file ".h"** contenenti le LUTs tradotte tramite lo script analizzato in sezione 4.2. Sono quindi presenti le 5 LUT di controllo motore FPC, la LUT per il condizionamento del segnale di temperatura dei moduli e le LUT per il controllo CVC;
- **3 file ".c"** principali di Main, di routine ISR "stm32g4x_it.c" e delle Funzioni richiamate dalle ISR.

Si propone a seguire l'analisi dettagliata dei file "main.c" e "stm32g4xx_it.c", organizzati dapprima in schemi a blocchi che ne identificano gli aspetti principali, e successivamente ciascuno descritto nel più nel dettaglio. Iniziando dal file "main.c" in figura 5.49 si riporta il suo schema a blocchi:

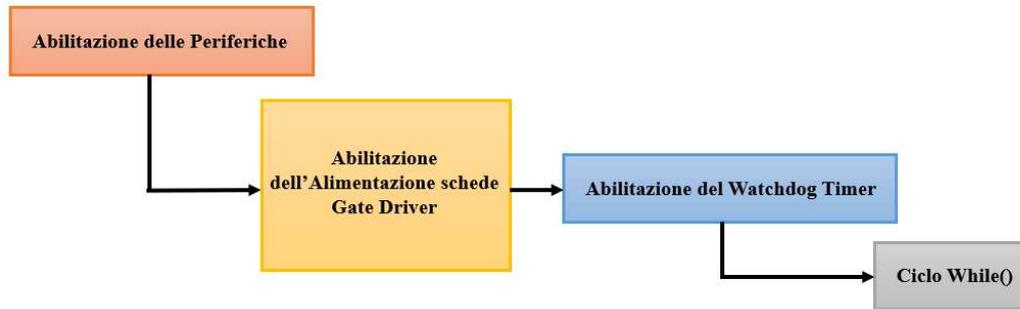


Figura 5.49: Schema a Blocchi del file main.c.

Il file **main.c** contiene al suo interno le abilitazioni delle periferiche configurate col Software STM32CubeIDE, insieme all'alimentazione delle schede Gate Driver. È stato deciso infatti di alimentare continuamente le schede e di interrompere la modulazione PWM quando necessario nella routine principale di controllo, a seguito di un guasto o quando non si vuole la modulazione attiva. Le linee di codice per le abilitazioni delle periferiche sono strettamente specifiche e si riferiscono ai loro registri principali di Stato e Configurazione; tramite questa operazione si abilitano FDCAN 1 (canale CAN A), ADC e Timers.

L'abilitazione dell'IWDG segue l'abilitazione delle schede Gate Driver perché quest'ultime seguono un processo di abilitazione in sequenza ritardata di 100 ms ciascuna, per consentirne l'avvio in sicurezza; abilitare il Watchdog timer prima delle schede porterebbe al raggiungimento dello 0 del contatore decrementale prima che questo possa essere ricaricato nella routine principale di controllo, a causa dei ritardi di abilitazione dei Driver.

Infine, il ciclo "**while()**" consente all'algoritmo di restare in uno stato di "Idle", quindi un loop senza fine, ogni qualvolta la routine di controllo termina all'interno della finestra disponibile di 100 μ s tra due ISR successive, in attesa quindi che la prossima routine venga richiamata dal Timer A dell'HRTIM; all'interno del ciclo non sono presenti istruzioni.

In figura 5.50 si riporta invece lo schema dei blocchi funzionali del file "stm32g4xx_it.c" specifici della Routine di Controllo:

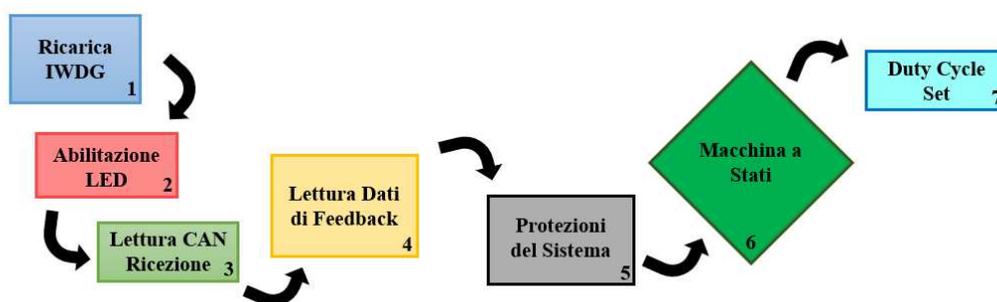


Figura 5.50: Schema a Blocchi della ISR di controllo motore.

Il file **stm32g4xx_it.c** contiene al suo interno il codice in linguaggio C eseguito dalle routine ISR configurate in sezione 5.2.2, quali la routine di controllo motore, di trasmissione messaggi CAN, di gestione termica e di emergenza; la routine di trasmissione sarà analizzata nel dettaglio nella sezione successiva, mentre quella termica e di emergenza seguono quella di controllo.

Il primo blocco funzionale della routine di controllo è costituito dalla ricarica del **Watchdog Timer**, da performare all’inizio della routine affinché il contatore decrementale non raggiunga lo zero, interrompendo così il codice. La linea di codice che permette di ricaricare il timer al suo ARR è:

```
IWDG->KR=0xAAAA;
```

Il secondo blocco si dedica unicamente all’attivazione dei **LED di segnalazione** dell’operatività del microcontrollore, non ha un ruolo particolare nell’algoritmo e la sua posizione del codice non influenza il suo funzionamento. Per le operazioni di attivazione o disattivazione di segnali digitali di Output connessi a GPIO pin si utilizzano le funzioni “HAL”, che consentono velocemente e intuitivamente di cambiare o leggere gli stati di qualsiasi GPIO Pin:

```
HAL_GPIO_WritePin(LED1_GPIO_Port, LED1_Pin, GPIO_PIN_SET);
```

Il terzo blocco riguarda la lettura e interpretazione dei **messaggi CAN** ricevuti dal Master PC, descritto nella sezione 5.3.2 dedicata. Dopo che i segnali letti e ricevuti sono stati convertiti in variabili utilizzabili nell’algoritmo, un insieme di 7 Macro interpreta ogni valore ricevuto per modificare le variabili dedicate nell’algoritmo; ad esempio, per

l'attivazione del Feed-forward di Coppia la variabile "Torque_Switch" contiene all'interno il valore da interpretare del messaggio CAN, mentre la "torque_feedforward_enable" il valore da aggiornare e usare nell'algoritmo:

```
#define _torque_feedforward(Torque_Switch, torque_feedforward_enable)
if(Torque_Switch == 0) torque_feedforward_enable = 0;
if(Torque_Switch == 1) torque_feedforward_enable = 1;
```

Il quarto blocco riguarda tutte le letture e condizionamenti dei segnali di **feedback**, in ordine:

1. **Letture e Condizionamento delle Correnti di fase e Tensione DC-Link.** Ad esempio, a seguire si riportano le linee di codice che, a partire dal termine della sequenza di conversione dell'ADC 1, ricava il valore scritto all'interno del "Injected Data Register" per la corrente della fase A e ne applica fattore di scala e Offset (quest'ultimo secondo una logica descritta successivamente):

```
while(((ADC1->ISR)&(1<<6))==0){} ADC1->ISR|=((1<<6)); //Termine Conversione
input_current.ch0=(float)ADC1->JDR1; //Valore Grezzo
iabc.a = input_current.ch0 * scale_current_a; //Fattore di Scala
iabc.a -= offset_current.a; //Offset
```

2. **Letture e Condizionamento della Posizione di Rotore.** Innanzitutto il codice raccoglie il dato grezzo ricavato dal "Counter" Register del Timer 1, applica il Fattore di Scala ($\frac{2\pi}{4 \cdot 1024}$) e satura tra $(0, 2\pi)$ l'angolo Meccanico. Successivamente si ricava l'angolo Elettrico applicandovi l'offset costante "Assoluto" (definito dall'accoppiamento dell'albero con l'Encoder, è l'angolo elettrico tra l'asse α di riferimento e l'asse "Z" del trasduttore di posizione), e si satura nello stesso modo anche l'angolo così ottenuto:

```
Theta_Mech = ((float) TIM1 ->CNT) * ENC_FAC;
if(Theta_Mech < 0) Theta_Mech+=TWOPI;
if(Theta_Mech >= TWOPI) Theta_Mech-=TWOPI;
Theta_Elt = Theta_Mech * PP + ENC_OFF;
```

La velocità di rotazione si ricava dal PLL discusso in sezione [4.3.1](#), come Output del regolatore PI:

```
omega_mech = PLL.out;
n_mech = omega_mech * RAD2RPM;
```

3. **Letture e Condizionamento della Coppia.** Il torsiometro invia alla Control Board in forma differenziale il segnale analogico di coppia rilevata. L'algoritmo rileva dal canale 2 della ADC 3 il dato grezzo di coppia positiva o negativa da 0 a 4095; il dato è opportunamente condizionato tramite la procedura descritta in sezione 5.2.3 applicandovi il fattore di scala e di offset, per poi esser filtrato con un Passa-Basso a 100 Hz per attenuare il rumore della lettura:

```
Torque_Raw = - ((float)ADC3->JDR2 * 0.4881f - 958.32f);
Torque += TS * TWOPI * 100.0f * (Torque_Raw - Torque);
```

4. **Letture delle Temperature dei Sensori.** Il codice ricava i dati provenienti dalle periferiche del microcontrollore adibite all'acquisizione sia dei segnali di temperatura dei sensori, ossia l'ADC 4. Queste informazioni sono poi utilizzate nella ISR dedicata di gestione termica.

```
while(((ADC4->ISR)&(1<<6))==0){} //Termine Conversione
ADC4->ISR|=((1<<6));
```

Il quinto blocco si riferisce all'applicazione delle **protezioni** alle variabili ottenute dalle letture e condizionamento dei segnali di feedback. Le protezioni presenti sono scritte in 6 macro distinte e tutte leggono il valore di un dato di ingresso, lo confrontano con una soglia di riferimento o semplicemente ne interpretano il valore, cambiano il valore del bit di riferimento da 0 a 1 nel vettore degli errori "Error_vector" (in cui ciascun bit corrisponde ad un tipo diverso di errore, configurato nel file Excel "error_vector.xlsx") e portano lo Stato della macchina in "ERROR", ossia lo stato inerte di "idle", analizzato in seguito. Si riportano alcune linee di codice per l'intervento della protezione di Sovratensione:

```
if(vdc >= VTG_PROT) {
*State=ERROR;
*Error_vector |= (1<<OVV_DC); }
```

Il sesto blocco comprende la logica della gestione della **Macchina a Stati**, ossia un modello di progettazione virtuale del comportamento della macchina reale; il modello comprende 7 Stati differenti con le relative logiche di Transizione. Ogni Stato è definito da un insieme di comandi che regola il comportamento della macchina per quella specifica condizione di funzionamento. L'obiettivo principale della Macchina a Stati è far sì che la stessa sia pronta a ricevere il controllo motore vero e proprio, inizializzando

le variabili e in assenza di errori; non solo, ma in presenza di una qualsiasi condizione critica di funzionamento essa deve essere in grado di portare la macchina in uno stato sicuro di “Idle” e da questo riprendere il controllo in sicurezza. In figura 5.51 si riporta quindi lo schematico che definisce gli Stati e la gestione delle Transizioni:

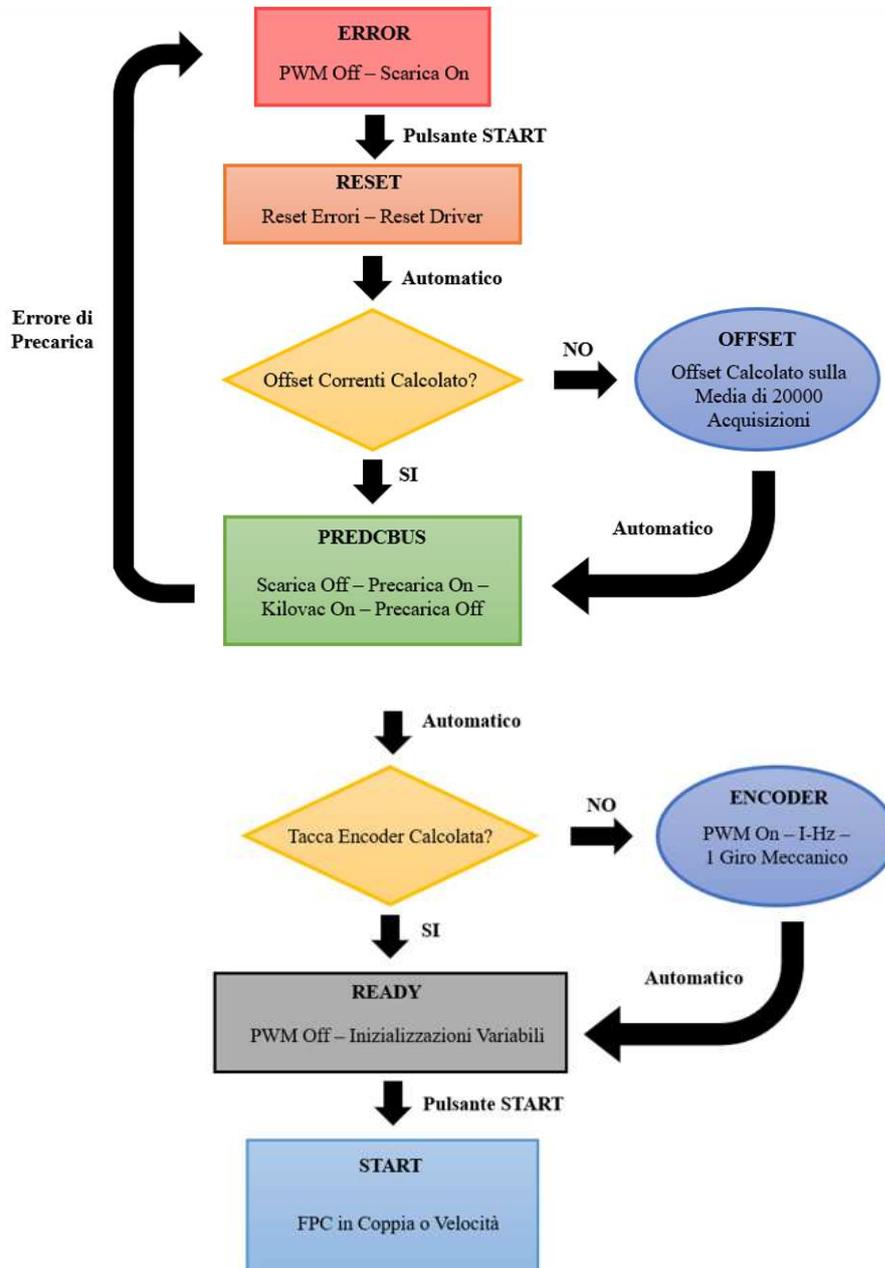


Figura 5.51: Schema a Blocchi della Macchina a Stati.

Le linee di codice che gestiscono gli Stati e le Transizioni utilizzando principalmente funzioni del tipo “HAL” viste in precedenza o cicli “if()” con contatori. Oltre lo Stato “START” l’unico in cui è presente un controllo effettivo del motore è quello “ENCODER” in cui si applica un controllo di tipo “I-Hz”, il quale ha l’obiettivo di generare un vettore di Corrente a modulo e frequenza costante, tramite 2 regolari PI e 2 anelli chiusi in componenti (d, q) di corrente.

La componente in asse q di riferimento è nulla, ovvero il sistema rotante adottato è concorde con l’asse d del vettore stesso; gli Output dei regolatori sono le tensioni di riferimento in assi (d, q). Nel caso dello State “ENCODER”, l’obiettivo è la rilevazione dell’offset “temporaneo”, differente da quello “assoluto” (citato precedentemente come “ENC_OFF”), poichè compensato con la prima rilevazione della tacca di Zero dell’Encoder; sostanzialmente si tratta dell’offset presente tra la posizione effettiva del rotore e quella rilevata dal contatore del microcontrollore, non ancora resettato. Lo State Machine prevede dunque un controllo “I-Hz” con corrente di picco di 20 A in cui la frequenza varia a rampa fino per far compiere al motore un giro meccanico in qualche secondo.

Il settimo e ultimo blocco dell’algoritmo di controllo motore è formato dalle poche righe di codice che inseriscono i **valori dei Compare Register** per ogni Duty Cycle negli appositi registri. La logica è stata descritta in sezione 5.2.2; ciò che differisce sono i “limiti” estremi dei Duty Cycle, pari a 0.01 e 0.99, gestiti rispettivamente con valore di Compare e Compare 2 uguali e pari all’ ARR_Half, viceversa Compare 1 pari a 0 e Compare 2 pari a ARR:

```
if(duty < 0.01){duty = 0;}
if(duty >= 0.99){ registro.CMP1xR = 0;
registro.CMP2xR = 0xFFFFD;
}else{
centre_offset = duty * half_counter;
registro.CMP1xR = (uint32_t)(half_counter - centre_offset);
registro.CMP2xR = (uint32_t)(half_counter + centre_offset); }
```

La routine ISR di Gestione Termica si divide principalmente in 3 fasi, raffigurate in figura 5.52:



Figura 5.52: Schema a Blocchi della ISR di Gestione Termica.

La **Lettura e Condizionamento delle Temperature** (e del flussimetro, non implementato nel layout finale poiché non ancora disponibile) ha l'obiettivo di generare come Output i valori esatti di temperatura e di flusso dell'unità di raffreddamento; a partire da quest'ultimi l'algoritmo applica delle logiche ad Isteresi per il controllo del sistema di raffreddamento del sistema. Le linee di codice riportate sono un piccolo estratto delle routine di acquisizione e condizionamento; ad esempio, per i segnali in frequenza dei moduli di potenza si applica la (5.20) presentata precedentemente:

```

Module_RTD_Period.a = (float)TIM2 ->CCR1;
if(Module_RTD_Period.a > 0)
Module_RTD_frequency.a = FCLK/Module_RTD_Period.a;
resistance_NTC.a = read_one_dim_lut(. . .)
if(Module_RTD_Period.a > 0)
Module_Temperature->a = -87.12f * logf(resistance_NTC.a) + 786.14f;
_torque_feedforward(Torque_Switch, torque_feedforward_enable)
  
```

Il secondo blocco applica invece la **logica ad Isteresi** per il controllo del sistema di raffreddamento. La logica ad Isteresi si definisce sulla base di due parametri, l'Errore di Temperatura e la Banda di Isteresi; il primo consiste nella differenza tra una Temperatura di Riferimento e la Massima Temperatura rilevata tra i sensori o moduli di potenza, mentre la seconda è definita dalla differenza tra la Temperatura di On e la Temperatura di Riferimento. Ogni qual volta la Massima Temperatura Rilevata supera la Temperatura di On il sistema di raffreddamento considerato si abilita (pompa o ventola motore), viceversa se inferiore rispetto alla Temperatura di Off il sistema di disabilita; una logica di controllo a banda di Isteresi consente all'algoritmo di non abilitare o disabilitare repentinamente il sistema di raffreddamento sulla base di una sola Temperatura di Riferimento. Le due logiche sono implementate in funzioni dedicate e, dopo aver applicato un algoritmo di ordinamento crescente delle temperature rilevate, si calcola l'errore di temperatura sulla massima e si applica l'Isteresi:

```

if(error_temperature + h <= 0)
HAL_GPIO_WritePin(RELE_2_GPIO_Port, RELE_2_Pin, GPIO_PIN_SET);
  
```

```
if(error_temperature - h >= 0)
HAL_GPIO_WritePin(RELE_2_GPIO_Port, RELE_2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
```

Il terzo blocco **protezioni del sistema** applica le macro adibite alla sicurezza termica del sistema, ossia sovratemperature o sovrappotenze dell'unità di raffreddamento. Il codice prevede anche una protezione supplementare per l'assenza di flusso refrigerante mentre la pompa è alimentata:

```
if(Water_Pump_Flag==1 && Flow_Rate == 0){
*State = ERROR;
*Error_vector |= (1<<ZERO_WF); }
```

Infine, la routine ISR di Emergenza configurata in sezione 5.2.2 come “**EXTI9_5_IRQHandler**” ha il compito di riportare lo State Machine in “ERROR” ogni qual volta si registra un cambiamento dello stato logico da High a Low dei segnali di **X_FAULT**, con **X = A, B, C**, provenienti dai moduli di potenza per errori di desaturazione o sovracorrenti, e di **EMG_IN_N**, il quale segnala l'intervento dell'operatore sul pulsante di emergenza. Così come per le logiche di protezione del sesto blocco, anche in questo caso l'errore è segnalato ponendo il bit corrispondente del vettore degli errori ad 1. Ad esempio, per il segnale **A_FAULT**:

```
State=ERROR;
if (HAL_GPIO_ReadPin(A_FAULT_GPIO_Port, A_FAULT_Pin) == 0)
Error_vector |= (1<<FLT_MDL_A);
```

5.3.2 Comunicazione CAN

I principi di funzionamento della comunicazione CAN sono già stati discussi in sezione 2.2.1; di seguito si analizza invece l'insieme dei segnali e messaggi scambiati dai dispositivi coinvolti nella rete di comunicazione, nonché il funzionamento delle routine di trasmissione e ricezione scritte nell'algoritmo di controllo. L'obiettivo principale di questa sezione è la completa descrizione delle modalità secondo cui la comunicazione CAN è stata integrata all'interno del progetto di tesi, per rendere disponibile a futuri utenti una sua espansione che sia coerente con quanto affrontato finora.

L'analisi proposta si concentra su 3 aspetti fondamentali della rete di comunicazione, quali:

- La definizione dei Nodi, Messaggi e Segnali da scambiare;
- Algoritmi dedicati alle routine di Trasmissione e Ricezione dei messaggi del Nodo Wolfspeed;
- Algoritmi dedicati alle routine di Trasmissione e Ricezione dei messaggi del Nodo Master PC.

Il primo aspetto è stato affrontato tramite il software "**Vector CANdb ++ Editor**", progettato per gestire Database per reti di comunicazione basate su protocollo CAN. Il software presenta semplici interfacce che permettono di creare e modificare file di Database in formato standard DBC (CAN Database File), ossia un determinato tipo di file ".DBC" che descrive in dettaglio i messaggi e i segnali scambiati tra le unità di controllo elettronico (ECU, Electronic Control Units) in una rete di comunicazione, nonché quantità e proprietà dei nodi che la compongono, il tutto organizzato in senso gerarchico. Ad esempio, all'interno di ciascun file si trovano informazioni specifiche per i segnali coinvolti nella comunicazione riguardo ID, lunghezza, fattori di scalatura, offset, unità di misura e commenti; ogni file ".DBC" può essere aperto e visualizzato anche in ambiente Matlab attraverso script dedicati, lo stesso descritto nella prossima sezione 5.4 per l'abilitazione della comunicazione CAN nel sistema.

Prima di definire quanti e quali messaggi debbano essere scambiati nella rete, occorre configurare la rete stessa definendo il numero di Nodi presenti, ossia i dispositivi che partecipano alla comunicazione. La rete si compone quindi di 3 ECU, corrispondenti a 3 Nodi; nel sistema unificato si sono considerati la Control Board del kit Wolfspeed, il PC Master di controllo e la Control Board della MUT. Tuttavia, la comunicazione è abilitata solamente per i primi due dispositivi, poiché ancora non disponibile un'integrazione completa del banco con la scheda di controllo della Machine Under Test. Per quanto riguarda la definizione dei messaggi e dei segnali scambiati, in tabella 5.4 si riassumono insieme alle loro principali caratteristiche.

- **7 Messaggi** ognuno di lunghezza pari a 8 Byte, contenenti uno o più segnali. Ogni messaggio deve essere specificato se in Ricezione o Trasmissione per i dispositivi coinvolti; se ad esempio, un determinato messaggio è in Ricezione per il kit Wolfspeed, allora occorre non solo che questo sia così indicato nel Database, ma anche che sia in Trasmissione per il Master PC;
- **17 Segnali**, ognuno con una lunghezza di 1, 8 o 32 bit a seconda della variabile o grandezza da comunicare. Nel Database è necessario assegnare ciascun segnale al messaggio di appartenenza; non solo, ma nelle assegnazioni occorre verificare che non si superi il limite di lunghezza del singolo Messaggio, e, come spiegato più nel dettaglio a seguire, ogni Messaggio possa essere “diviso” in due sezioni da 32 bit senza che alcun Segnale contenuto al suo interno venga diviso. È consentito assegnare nello stesso messaggio 4 Segnali da 8 bit e uno da 32 bit, poiché “sezionabile” a metà senza troncature i segnali, ma non è possibile invece assegnare un segnale da 8 e uno da 32 bit, poiché troncando il Messaggio il Segnale da 32 bit verrebbe diviso. Ovviamente il bit di partenza del segnale successivo corrisponde al bit “+1” del segnale precedente, e i segnali nella tabella 5.4 sono riportati in cascata per ciascun Messaggio seguendo questo ordinamento:

Messaggi e ID	Segnali	Informazioni Principali
Commands 0x0	Start	1 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	Stop	1 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	OFF	1 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	Operative Mode	1 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	Torque FeedForward	1 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
Error and State 0x1	Error Vector	32 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	State Machine	8 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
	Control Type	8 bit, Senza Segno ne Offset o Scala
Feedback Electrical 0x2	Voltage DC	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala

Messaggi e ID	Segnali	Informazioni Principali
	Current Phase Peak	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
Feedback Mechanical 0x3	Torque	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
	Speed Mech	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
Temperature Limits 0x4	Max Module Temperature	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
	Max Sensor Temperature	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
Reference and Limit 0x5	Torque Ref Lim	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
	Speed Ref Lim	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala
Feedback Water Flow 0x6	Water Flow	32 bit, di tipo Float con segno, no Offset o Scala

Tabella 5.4: Tabella dei Messaggi e Segnali rete CAN

Mentre in figura 5.53 si riportano quanti e quali messaggi sono scambiati dai due Nodi presenti:

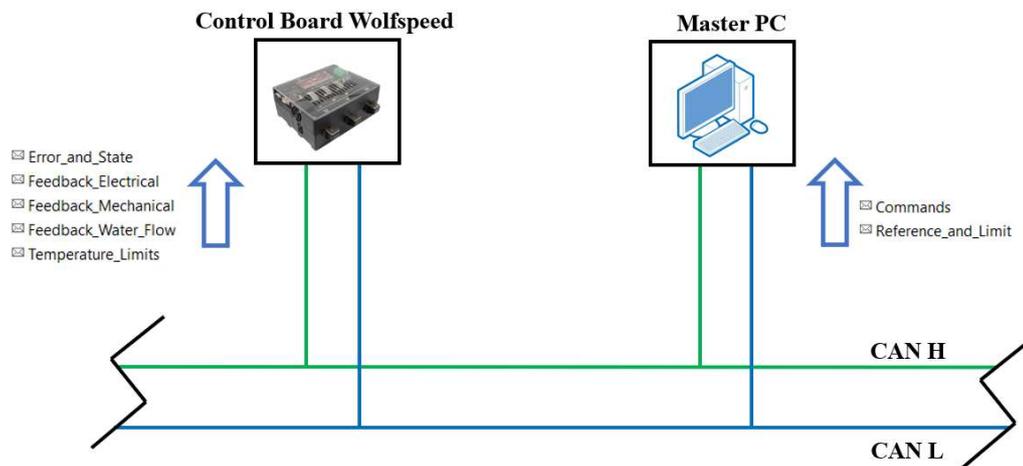


Figura 5.53: Schema rete CAN implementata.

Il secondo aspetto riguarda gli algoritmi utilizzati per le routine di Trasmissione e Ricezione messaggi dal Nodo Wolfspeed. La prima, come indicato in sezione 5.2.2, impostata tramite una routine ISR indipendente chiamata ogni 50 ms, in cui solamente un messaggio viene inviato. Nel dettaglio, la routine di Trasmissione:

1. **Incrementando un contatore**, in sequenza tutti e 5 i messaggi in Trasmissione sono inviati con un tempo totale di 250 ms;
2. **Converte il feedback** in segnale da trasmettere:

```
CAN1_out_vect[0] = *((uint32_t*) &vdc);
CAN1_out_vect[1] = *((uint32_t*) &iabc_peak);
```

La conversione avviene tramite un **Cast (uint32_t*)**, ossia una conversione applicata al dato di tipo Float; l'obiettivo è l'ottenimento del valore sottoforma di dato a 32 bit, ossia di segnale. L'indirizzo della variabile float è convertito in un puntatore a 32 bit, operazione che consente di leggere il valore della variabile non più come float ma come dato a 32 bit;

3. **Trasmette il messaggio**, scrivendone ID, lunghezza e contenuto nell'insieme di registri dedicati, ossia i "**hfdcan1.msgRam.TxFIFOQSA**", posti nell'area di memoria "Message RAM" nella sezione "TX FIFO/Queue":

```
*((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.TxFIFOQSA) = MESSAGE_ID << 18;
*((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.TxFIFOQSA + 1) = NBYTES_TX << 16;
*((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.TxFIFOQSA + 2) = CAN1_out_vect[0];
*((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.TxFIFOQSA + 3) = CAN1_out_vect[1];
```

Le linee di codice rispettano l'ordinamento dei bit all'interno dei registri tramite l'applicazione degli shift "«18" e "«16"; non solo, ma accedono ai registri corretti della sezione "TX FIFO/Queue" tramite i Byte Offset "+1", "+2", "+3", rappresentativi di spostamenti di indirizzi di memoria di 1, 2 e 3 Byte rispettivamente.

La routine di Ricezione dei messaggi CAN, gestita all'inizio della ISR di controllo eseguita a 20 kHz nel dettaglio:

1. **Verifica la presenza di messaggi** in Ricezione nel buffer FIFO;
2. **Trascrive ID e contenuto del messaggio** ricevuto nell'insieme di registri dedicati, ossia i "**hfdcan1.msgRam.RxFIFO0SA**", posti nell'area di memoria "Message RAM" nella sezione "Rx FIFO 0":

```
CAN_RX_ID=*((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.RxFIFO0SA) >> 18) & 0x7FF;  
data_in_CAN[0]= *((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.RxFIFO0SA + 2);  
data_in_CAN[1]= *((uint32_t*)hfdcan1.msgRam.RxFIFO0SA + 3);
```

Le linee di codice rispettano l'ordinamento dei bit per l'estrazione dell'ID del messaggio, (dal bit 18 al 28 del registro) e trascrivono in formato 32 bit il contenuto del messaggio dai relativi registri spostati negli indirizzi di memoria di 2 e 3 Byte;

3. **Estrae i segnali corretti dai messaggi ricevuti**, convertendoli in variabili di tipo float o 8 bit:

```
CAN_msg.Commands.Start = (uint8_t) ((data_in_CAN[0] >> 0) & 0x1);  
CAN_msg.Commands.Stop = (uint8_t) ((data_in_CAN[0] >> 1) & 0x1);  
CAN_msg.Reference_and_Limit.Torque_Ref_Lim= *((float*) &data_in_CAN[0]);  
CAN_msg.Reference_and_Limit.Speed_Ref_Lim = *((float*) &data_in_CAN[1]);
```

Le linee di codice estraggono due segnali ad 1 bit, Start e Stop, e due segnali float a 32 bit. Nel primo caso tramite la maschera "0x1" si estrae il LSB (Bit Meno Significativo) una volta che il messaggio è stato allineato correttamente verso destra, mentre nel secondo si effettua l'operazione inversa di conversione analizzata per la Trasmissione, quindi da dato grezzo a 32 bit a dato di tipo float tramite conversione del puntatore dell'indirizzo di memoria.

Il terzo aspetto riguarda invece gli algoritmi sviluppati per la Trasmissione e Ricezione dei messaggi del Nodo Master PC. Questi sono stati inizialmente scritti in uno script Matlab di prova e successivamente integrati nella programmazione dell'Interfaccia Utente oggetto della prossima sezione 5.4. Nello script denominato "CAN_Communication" si riassumono le linee di codice dedicate alla comunicazione CAN per l'utente; lo script nel dettaglio:

1. **Instaura una comunicazione CAN** con la Control Board tramite un dispositivo Hardware "PCAN-USB FD" [35], da interfaccia tra il Master PC e il kit Wolfspeed, e il file ".DBC" di Database discusso precedentemente, il quale contiene tutte le informazioni legate a nodi, messaggi e segnali della rete CAN;
2. **Trasmette i messaggi** tramite le linee di codice (estratte, di esempio):

```
msgOUT = canMessage(CAN_DBC, "Commands");  
msgOUT.Signals.Start = 0;  
  
msgOUT = canMessage(CAN_DBC, "Reference_and_Limit");  
msgOUT.Signals.Torque_Ref_Lim = 100;  
msgOUT.Signals.Speed_Ref_Lim = 300;  
transmit(Can_A, msgOUT);
```

Le linee di codice trasmettono i dati da voler inviare alla Control Board tramite l'operatore “**transmit**”, specificando il canale di comunicazione creato e il messaggio;

3. **Riceve i messaggi** tramite le linee di codice (estratte, di esempio):

```
rxMsg = receive(Can_A, Inf, "OutputFormat", "timetable");  
r1 = rxMsg(strcmpi("Feedback_Electrical", rxMsg.Name), :);  
r2 = rxMsg(strcmpi("Feedback_Mechanical", rxMsg.Name), :);
```

Le linee di codice ricevono i messaggi dalla Control Board tramite l'operatore “**receive**”, il quale crea una tabella temporale in cui riporta tutti i messaggi e segnali ricevuti a seconda dell'ordine di arrivo.

5.4 Interfaccia Utente di Controllo

Per Interfaccia Utente di Controllo si intende l'insieme di tutti i pannelli, spie, pulsanti e finestre attraverso la quali l'utente o l'operatore si interfaccia con il sistema unificato. Questa sezione descrive il processo di sviluppo e di programmazione di tutte le funzionalità che caratterizzano la "UI Control Graphic" del progetto di tesi. Una volta che l'algoritmo di controllo motore, la comunicazione CAN e l'interfaccia grafica sono stati completati correttamente, l'utente si troverà ad interfacciarsi con il banco prova solo attraverso quest'ultima, la quale consente che tutti i parametri di controllo e di feedback siano sempre resi noti; il sistema unificato così realizzato, risulta essere, agli occhi dell'utente, un preciso e dinamico attuatore di coppia o velocità.

In figura 5.54 si riporta lo stato finale dell'interfaccia sviluppata:

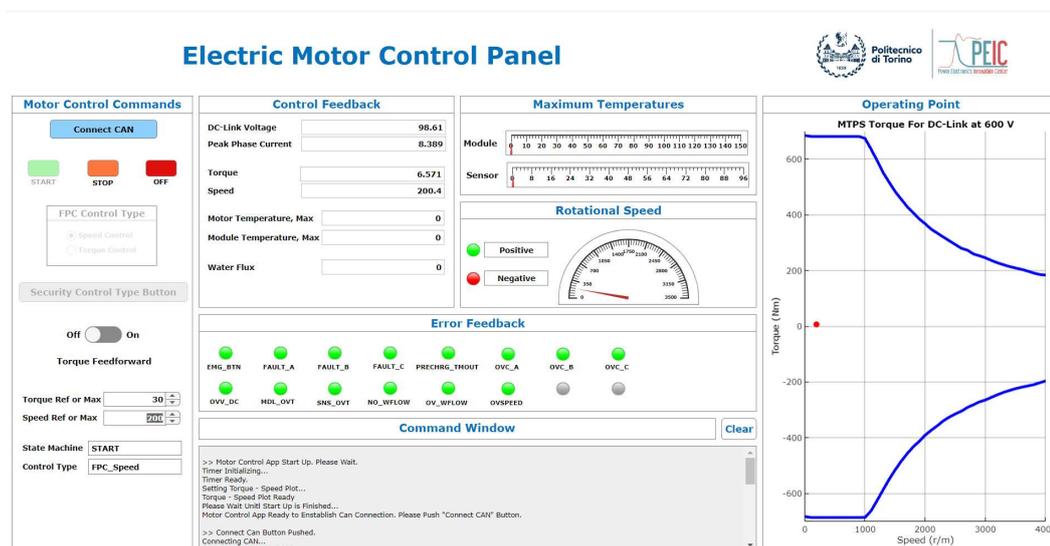


Figura 5.54: Interfaccia Utente di Controllo Motore.

L'interfaccia si presenta così suddivisa in 6 sezioni operative, ciascuna all'interno comprensiva di diversi componenti di controllo, come spie, pulsanti, leve o grafici. Ogni componente è stato opportunamente programmato per adempiere alla funzione designata, che sia solamente di visualizzazione o di interazione. Infatti, tutti i componenti presenti sono caratterizzati da variabili globali e algoritmi scritti all'interno di funzioni dedicate che ne modificano lo stato in base:

- **L'intervento diretto dell'utente**, sui componenti interagibili, come pulsanti, leve o selezionatori, i quali trasmettono dei segnali alla Control Board del kit WolfSpeed tramite le funzioni di comunicazione CAN analizzate in sezione 5.3.2;

- **Ai Messaggi Ricevuti** dalla Control Board, tramite comunicazione CAN, manipolandoli e aggiornando lo stato di componenti come spie, targhette numeriche o di testo.

Lo script Matlab “**Motor_Control_APP**” contiene al suo interno tutto l’algoritmo dell’interfaccia utente sviluppato nell’ambiente Matlab App Designer, ossia un ambiente integrato per progettare e programmare app e interfacce grafiche. Nell’ambiente di design è presente un editor grafico per il layout dell’app e per la distribuzione dei componenti, e un editor di codice integrato per definire la logica dell’app, quindi l’editor per lo sviluppo dell’algoritmo. Differentemente da uno script Matlab ordinario, l’ambiente di programmazione consente la scrittura delle funzioni e algoritmi solamente in zone ben precise dello script, quali:

- Un ambiente di scrittura per le **variabili globali** utilizzate nel codice;
- Un ambiente di scrittura delle **funzioni personalizzate** dell’utente;
- **Funzione di “Start-Up”** dell’interfaccia, ovvero solamente all’apertura dell’app;
- **Funzione di “Close-Request”**, ovvero solamente alla chiusura dell’app;
- **Funzioni generiche** di ogni componente presente nell’interfaccia.

Seguendo questa logica, lo script presenta come funzioni personalizzate:

1. “**ReadAndUpdateSignals**”, per la ricezione dei messaggi CAN, interpretazione dei segnali, gestione delle notifiche di “Alert” e di scrittura dei messaggi “User-Friendly” nella Command Window (messaggi di stato e di segnalazione operazioni in corso), update degli stati dei componenti dell’interfaccia in base ai segnali ricevuti;
2. “**handleError**”, “**handleNotification**” e “**updateCommandWindow**”, per la creazione di Notifiche Sonore o Pop-Up in presenza di Errori di controllo o condizioni pericolose nel sistema, oppure per la scrittura di messaggi generici nella Command Window.

Mentre in Start-Up lo script:

1. Inizializza un **Timer** con una frequenza caratteristica di 1 Hz il cui compito è richiamare la funzione “ReadAndUpdateSignals”;
2. Effettua il **plot del grafico Coppia-Velocità** con punto di funzionamento inizialmente posto a valori nulli, poi aggiornato con la funzione “ReadAndUpdateSignals” in base alle condizioni di funzionamento;

3. **Non rende interagibili i pulsanti dell'interfaccia** fintantoché la connessione CAN non si stabilisce con l'apposito pulsante.

Infine, in chiusura dell'app lo script disabilita il canale di comunicazione CAN e chiude l'interfaccia.

Passando invece alle 6 sezioni della GUI, la prima di “Motor Control Commands” consente all'utente di poter interagire direttamente con il sistema motore. Il pulsante di Connessione CAN permette di instaurare la comunicazione con la Control Board del kit Wolfspeed, con la funzione descritta in sezione 5.3.2. I pulsanti di Start, Stop e Off, insieme al selettore di Feedforward e di Tipo di Controllo FPC (se in coppia o in velocità) generano la trasmissione dello stesso messaggio CAN, quello di “Commands”, i cui bit di segnale assumono valori concordi a quanto comandato. In particolare, per assicurare maggiore sicurezza nell'interfaccia, la variazione del tipo di controllo FPC avviene solamente se effettua la pressione del pulsante di Sicurezza.

A seguire alcune linee di codice per la selezione del Feedforward di Coppia e di variazione del tipo di controllo a seguito della pressione del pulsante di sicurezza:

```
Switch_Value = app.TorqueFeedforwardSwitch.Value;
switch Switch_Value
case 'On'
msgOUT.Signals.Torque_FeedForward = 1;
case 'Off'
msgOUT.Signals.Torque_FeedForward = 0;

app.Control_Type_Selector= app.FPCControlTypeButtonGroup.SelectedObject;
switch app.Control_Type_Selector.Text
case 'Speed Control'
msgOUT.Signals.Operative_mode = 0
case 'Torque Control'
msgOUT.Signals.Operative_mode = 1
```

Nello stesso pannello sono presenti anche quattro targhette, due di testo e due numeriche. Le prime riportano lo State Machine e il tipo di controllo attualmente presenti nella macchina, quindi non modificabili dall'utente e solo per la visualizzazione. Le etichette numeriche sono interagibili e consentono di importare i riferimenti o limiti (a seconda del controllo) di Coppia e Velocità, direttamente tramite scrittura o tramite spinner laterale. Se i valori scritti eccedono i limiti di 650 Nm o 3500 rpm (positivi e negativi), un Alert indica di impostare correttamente dei valori inferiori:

```
app.Speed_Max = 3500;
```

```
if app.SpeedRefMax < -app.Speed_Max || app.SpeedRefMax > app.Speed_Max
    uialert(app.UIFigure, 'Invalid value. Please enter a number between -3500 and 3500. ');
return;
```

I pannelli di “Control Feedback”, “Maximum Temperatures”, “Rotational Speed” e “Error Feedback” consentono invece all’utente di interfacciarsi con tutti i dati di feedback del sistema, come tensione DC-link, corrente massima di fase, coppia, velocità, temperature massime e errori presenti nel sistema. L’update di ogni etichetta di testo, numerica, tachimetro o termometri avviene ogni secondo tramite la funzione “ReadAndUpdateSignals” chiamata dal timer a 1 Hz, in base ai messaggi e segnali ricevuti. In particolare, la velocità di rotazione è sempre riportata e rappresentata nel tachimetro in valore assoluto; il verso di rotazione è segnalato da apposite spie luminose. Si riportano alcune linee di codice per gli aggiornamenti delle etichette numeriche o di testo e del tachimetro:

```
if(app.Positive_Speed)
    app.SpeedGauge.Value = Speed;      % Update Tachimetro
    app.Positive_Speed_Lamp.Color = [0, 1, 0]; % Spia Verde per verso Positivo

app.ModuleTempGauge.Value = temp_max_module; % Update Etichetta Temperatura
app.DCLinkVoltageEditField.Value = vdc;      % Update Etichetta Tensione
app.PeakPhaseCurrentEditField.Value = i_peak; % Update Etichetta Corrente
```

I 14 errori che possono verificarsi nel sistema, i quali portano la macchina ad una condizione “idle” nello stato di Error (sezione 5.3.1) a seguito dell’attivazione delle protezioni associate, sono segnalati anch’essi da spie luminose e Alert sonori. Tramite un flag di tipo “true” o “false” si evita la ripetizione della notifica sonora di errore ogni qualvolta la funzione “handleError” è chiamata dal timer; alcune linee di codice descrivono quanto analizzato per le spie luminose di errore:

```
app.handleError(1, app.Lamp, 'Emergency Button Error Occurred. ');
if Error_Bit
    lampHandle.Color = [1, 0, 0]; % Spia rossa in errore
    beep;                          % Sonoro di Notifica
else
    lampHandle.Color = [0, 1, 0]; % Spia verde in assenza di errore
```

La Command Window riporta tutte le operazioni correnti e processi in background, segnala all’utente eventuali errori, istruzioni o messaggi di Alert o errore. È presente un pulsante che consente di resettare e “pulire” la finestra di testo da tutte le righe presenti. La programmazione del pulsante e della scrittura testuale nella Command Window è effettuata tramite funzioni specifiche, le cui linee di codice principali:

```
app.CommandWindow.Value = [currentText; newText]; % Per il nuovo Testo  
app.CommandWindow.Value = {' '}; % Per il Clear tramite Pulsante
```

Infine, la sezione “Operating Point” permette all’utente di conoscere in tempo reale il punto di funzionamento della macchina, in tutti e 4 i quadranti del grafico Coppia-Velocità (la velocità nel grafico è in valore assoluto). L’update del punto di funzionamento avviene ogni secondo tramite la funzione “ReadAndUpdateSignals”, mentre il grafico è creato una volta sola in Start-Up. Le linee di codice per l’update del punto di funzionamento nel piano:

```
app.Operating_Point_Motor.XData = abs(Speed);  
app.Operating_Point_Motor.YData = Torque;
```

5.5 Assemblaggio della Scatola

Ultimate le procedure di testing e validazione del kit Wolfspeed, comprensivo della nuova Control Board e dell'algoritmo di controllo, lo step successivo per lo sviluppo del sistema unificato è l'assemblaggio della scatola in alluminio contenente i componenti elettromeccanici, di raffreddamento e il kit inverter stesso. Pertanto, in questa sezione sono presentate tutte le fasi che hanno caratterizzato il processo di assemblaggio e validazione del layout meccanico, progettato nel capitolo 3, incluse le criticità affrontate porre rimedio ad alcune decisioni consolidate nello sviluppo del CAD tridimensionale, ma che non possono essere realizzate nella pratica.

Le fasi che hanno caratterizzato il processo di assemblaggio del layout meccanico sono state:

1. Ottenimento dei pannelli in alluminio e loro foratura;
2. Fissaggio dei Componenti Esterni e Interni;
3. Realizzazione Connettori CAN, Encoder, Torsiometro e Emergenza;
4. Cablaggio Interno;
5. Realizzazione Messa a Terra del sistema;
6. Validazione e Disposizione Unità di raffreddamento.

Il primo processo riguarda l'ottenimento dei pannelli in alluminio secondo le quotature riportate in sezione 3.3.2. Il taglio delle lamiere è stato effettuato in un laboratorio dedicato, così come le forature delle stesse; la criticità affrontata in questa istanza è stata l'impossibilità di realizzazione di forature quadrate per i componenti Filtro ingresso IEC Schaffner FN9260-6-06 [15] e Phoenix Contact a 2 vie 0707109 [17]. Si è deciso quindi di realizzare delle forature classiche circolari e di allargarle successivamente con una lima per metalli.

La seconda fase riguarda il fissaggio dei componenti Esterni, principalmente i connettori da parete disponibili, e Interni. Per i primi non state affrontate particolari criticità di montaggio, una volta che tutte le forature rispettano i disegni quotati. Per gli Interni, il primo step ha riguardato il taglio della barra DIN secondo la lunghezza prevista di circa 15 cm, per poi agganciarvi Power Supply, morsettiera e alimentatore 24 V per il torsiometro. Successivamente Kilovac e convertitore sono stati fissati secondo il direzionamento opportuno, rispettando quindi l'orientazione delle fasi.

Non è stato possibile posizionare il filtro EMI in quanto non ancora disponibile; le connessioni realizzate ignorano l'assenza del filtro, che potrà essere integrato in seguito. L'azione filtrante è comunque realizzata in piccola parte dal componente Schaffner e dai condensatori Cy presenti nella scheda DC-Side.

La terza fase del processo comprende la realizzazione dei connettori CAN, Encoder e Torsiometro per la connessione interna (lato scatola) ai D-Sub Switchcraft standard a 9 vie [36], e del connettore di emergenza, normalmente chiuso, alla morsettiera Phoenix Contact a 2 vie 0707109 [17].

Per i primi componenti occorre effettuare un processo di saldatura secondo un Pinout ben preciso, a seconda del tipo di connessione da realizzare. Il connettore che si interfaccia con quello presente sul PCB ha un suo Pinout caratteristico da rispettare secondo lo sbroglio riportato negli schematici della scheda; il connettore che invece si affaccia al D-Sub Switchcraft ha un Pinout da rispettare a seconda della connessione da realizzare, se CAN, Encoder o Torsiometro. Pinout CAN e Encoder, lato D-Sub a 9 vie, sono riportati in figura 5.55:

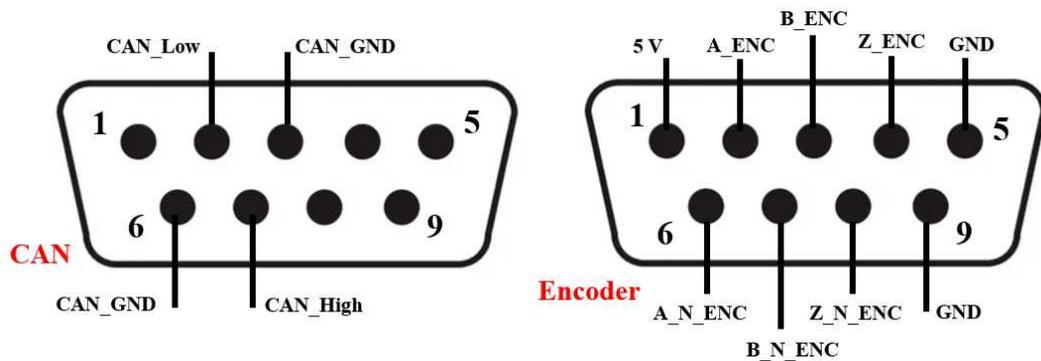


Figura 5.55: Schema di Connessione D-Sub a 9 vie per Encoder e CAN.

Mentre il Pinout del Torsiometro e la connessione di emergenza alla morsettiera Phoenix Contact sono riportate in figura 5.56:

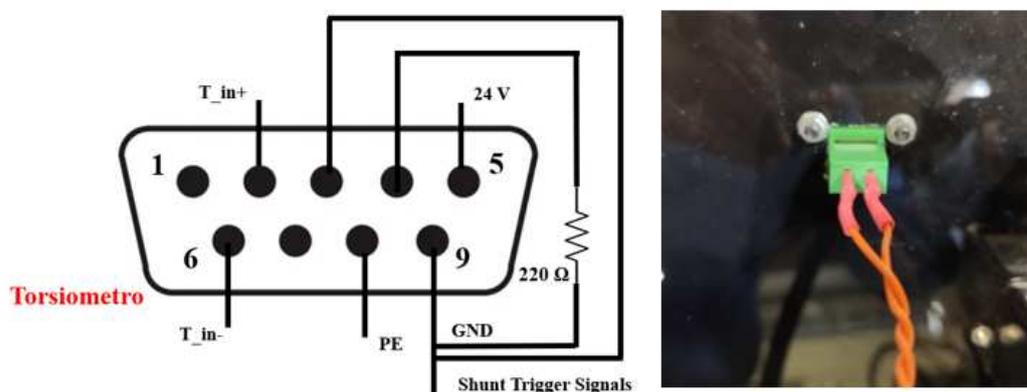


Figura 5.56: Schema di Connessione D-Sub a 9 vie per Torsiometro e particolare su Morsettiera di Emergenza.

Le connessioni per i D-Sub sono state effettuate secondo le stesse procedure riportate in sezione 5.1.2 per la creazione della connessione di comando tra la Control Board e la Service Board; si noti che i cavi realizzati per l'Encoder sono due, uno per i segnali di Input e uno per i segnali di Output (sezione 2.2.1). Per quanto riguarda invece la terminazione della connessione di emergenza, i due cavi di segnale sono stati saldati ai terminali della morsettiera e tramite l'applicazione di un termorestringente si assicura la sua protezione e isolamento.

La quarta fase riporta lo stato delle connessioni interne realizzate seguendo gli schematici riportati in sezione 3.2. Durante questa fase occorre prestare attenzione alle polarità delle terminazioni dei componenti e dei connettori. Le connessioni a 230 V sono state realizzate internamente con cavi di sezione 1.5 mm^2 , mentre quelle a 15 V di alimentazione schede e 24 V per torsiometro a 1 mm^2 . Per quanto riguarda le connessioni a 600 V sono stati utilizzati dei cavi a 70 mm^2 , e infine quelle di terra a 1.5 e 2.5 mm^2 .

La quinta fase si concentra sulla disposizione dell'impianto di terra del sistema unificato, realizzata con due linee separate. La prima comprende tutte le connessioni di segnale della scheda di Controllo (2 per l'Encoder, il torsiometro e l'alimentazione della scheda), il filtro Schaffner e il Power Supply NDR da 24 V; il nodo di terra a cui queste connessioni fanno capo è posizionato nel pannello di alimentazione del sistema e questa prima linea di messa a terra si richiude sul conduttore giallo-verde di protezione dell'alimentazione 230 V. La seconda linea invece comprende la terra di potenza, quindi del motore, del convertitore e della scheda di Servizio; il nodo è realizzato con l'isolatore

descritto in sezione 3.2.1. Il circuito di terra di potenza si chiude invece sul conduttore giallo-verde di protezione dell'alimentatore DC-Side del convertitore a 600 V.

La sesta e ultima fase prevede la disposizione dell'unità di raffreddamento. Poiché gli angolari ad L non disponibili al momento della realizzazione fisica del layout meccanico, la Cooling Unit è posizionata nelle vicinanze della scatola e non al di sopra di essa. Le connessioni idrauliche sono state realizzate connettendo direttamente i portagomma allo scambiatore di calore del convertitore e questi le tubazioni in PVC per la mandata e ritorno del fluido refrigerante. Applicando un nastro di Nylon alle estremità dei portagomma è stato possibile assicurare la tenuta degli stessi al convertitore e ai raccordi dell'unità di raffreddamento. Infine, per questa disposizione provvisoria, si è deciso di non comandare tramite relè dedicato l'azionamento della pompa in funzione della temperatura dei moduli, ma di comandare la sua accensione connettendo continuamente l'alimentazione ad una presa esterna 230 V.

In figura 5.57 segue una panoramica generale del sistema assemblato pronto per la validazione sperimentale, al netto dei componenti non ancora disponibili discussi finora:

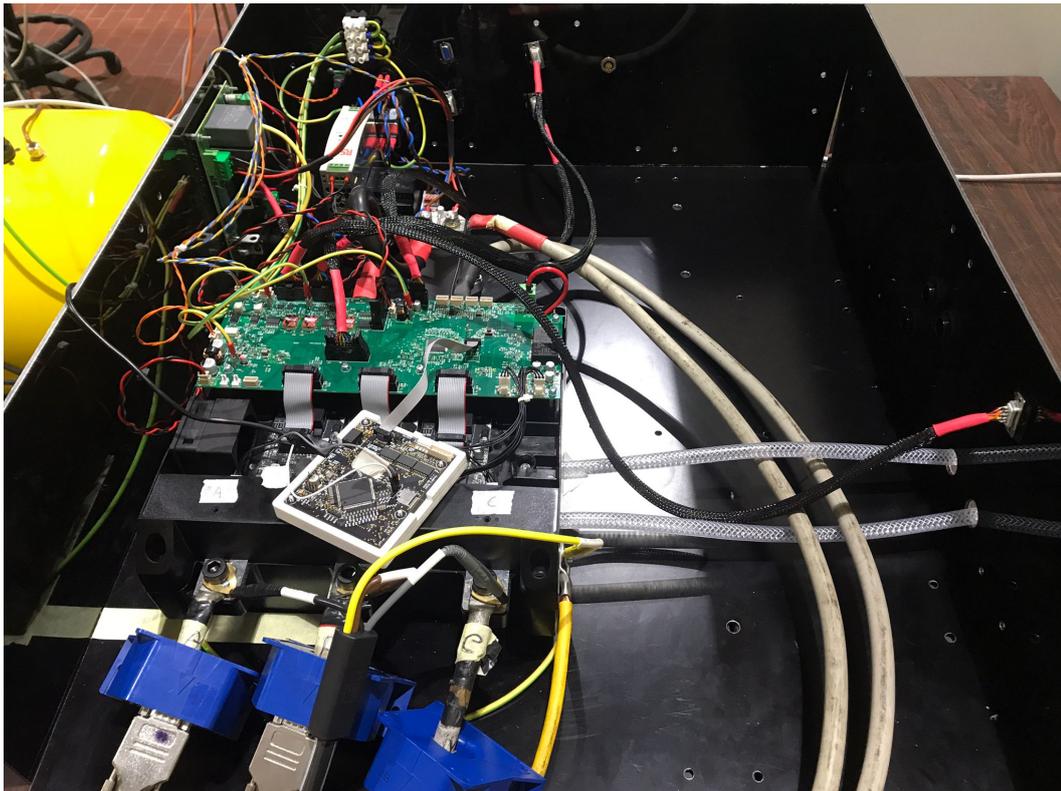


Figura 5.57: Stato Finale della Scatola Assemblata e Cablata.

5.6 Test e Validazione del Sistema Unificato

La sezione che segue chiude il progetto di tesi con l'insieme di test e procedure di validazione del sistema unificato realizzato. A seguire è possibile trovare una descrizione completa dei risultati sperimentali conseguiti nelle fasi finali del progetto, interpretati per rendere disponibile agli utenti che si interfaceranno con il sistema le sue reali potenzialità e prestazioni dinamiche.

L'insieme delle prove sperimentali eseguite sul sistema si possono così riassumere:

- Test preliminare su **Carico Induttivo** con controllo I-Hz;
- Caratterizzazione dell' **Errore di Tensione del Convertitore**;
- Test sul Motore con controllo **CVC in inversione dinamica di coppia**;
- Test sul Motore con controllo **FPC in inversione dinamica di coppia**.

Il primo test in elenco è stato condotto al termine delle fasi di validazione della Control Board descritte in sezione 5.2.3 con algoritmo di controllo completo e già implementato. L'obiettivo del test è stata la validazione della modulazione PWM applicando effettivamente tensione su un carico induttivo trifase, da 0.3 mH ciascuna.

Per quanto concerne lo stato delle connessioni, i terminali di potenza lato DC-Link sono stati connessi ad un alimentatore di tensione da 40 V, mentre le fasi connesse direttamente al carico. Durante la prova sono stati utilizzati sia l'oscilloscopio per l'acquisizione di una tensione e di una corrente di fase; l'obiettivo del test è la circolazione nel carico di una corrente di picco di 10 A, tramite un controllo in anello chiuso di corrente a frequenza costante, ossia l' "I-Hz".

I parametri di testing in tabella 5.5 sono così stati impostati:

Parametro	Simbolo	Valore
Corrente di Riferimento	i_d^*	10 A
Pulsazione Elettrica	f_0	100 Hz
Banda del Controllo	f_b	1000 Hz
Induttanza del Carico	L	0.3 mH
Guadagno Proporzionale	k_p	$2\pi \cdot f_b \cdot L = 1.885 \Omega$
Guadagno Integrativo	k_i	$\frac{k_p}{10 \cdot \omega_b} = 1884 \frac{\Omega}{s}$

Parametro	Simbolo	Valore
-----------	---------	--------

Tabella 5.5: Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo.

Il controllo sfrutta le linee di codice principali utilizzate per i controlli in anello chiuso tramite la funzione classica “PIReg(XPIReg *Reg)”. In figura 5.58 si riporta il primo risultato ottenuto sulla tensione di fase istantanea, la quale commuta tra 0 e Vdc:

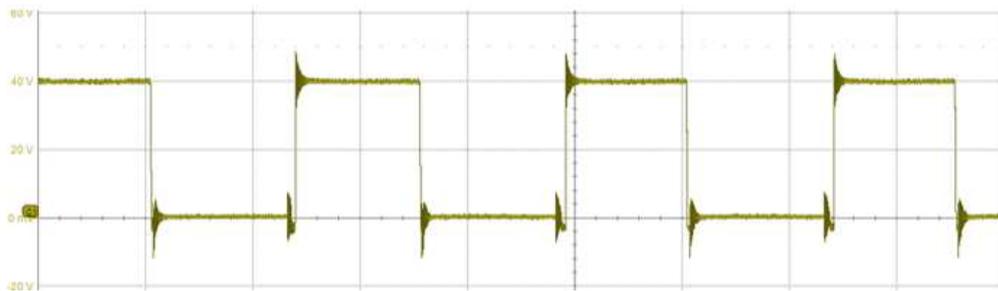


Figura 5.58: Test I_Hz per Carico Induttivo, Tensione di Fase Istantanea con Tensione DC-Link pari a 40 V.

Mentre in figura 5.59 l’andamento della corrente di fase (si intravede la modulazione PWM nei picchi, quando il duty è massimo):

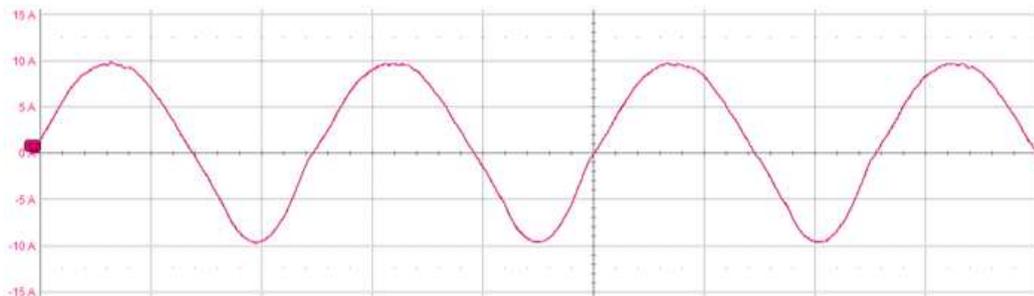


Figura 5.59: Test I_Hz per Carico Induttivo, Corrente della fase A, con riferimento di ampiezza pari a 10 A.

La compensazione dell'errore di tensione provocato dalla presenza dell'inverter è un processo fondamentale nella caratterizzazione ottimale e precisa del comportamento del motore a basse velocità, in cui la Back-EMF non permette ancora di trascurare le cadute resistive di tensione. Tramite un processo (e State Machine) dedicato è stato possibile identificare l'errore di tensione di fase in una LUT monodimensionale, il cui valore di ingresso è la corrente di fase istantanea. L'algoritmo di controllo sfruttato per questo processo di caratterizzazione è stato già fornito completo e adattato al banco prova in esame.

La presenza del convertitore provoca due tipologie di errore di stima della tensione, dovuti ai **Tempi Morti** e alle **Cadute di Tensione negli switch di potenza**. I due errori in forma vettoriale sono così caratterizzati:

$$\begin{cases} \bar{v}_{dt} = \frac{4}{3} \cdot t_d \cdot f_s \cdot V_{dc} \cdot \text{sign}(\bar{i}) \\ \bar{v}_{on} = \frac{4}{3} \cdot V_{th} \cdot \text{sign}(\bar{i}) + R_d \cdot \bar{i} \end{cases} \quad (5.21)$$

In cui t_d tempo morto, f_s frequenza di switch, V_{dc} tensione DC-Link, e:

$$\begin{cases} V_{th} = \frac{V_{th,sw} + V_{th,fw}}{2} \\ R_d = \frac{R_{th,sw} + R_{th,fw}}{2} \end{cases} \quad (5.22)$$

L'errore complessivo di tensione in forma vettoriale è dato da:

$$\bar{v}_{err} = \frac{4}{3} \cdot V'_{th} \cdot \text{sign}(\bar{i}) + R_d \cdot \bar{i} \quad (5.23)$$

con $V'_{th} = V_{th} + t_d \cdot f_s \cdot V_{dc}$.

Mentre in componenti di fase ($x = a, b, c$), considerando le tensioni medie commutate dell'inverter rispetto ad un punto centrale "0" del DC-Link:

$$v_{err,x} = v_{x0}^* - v_{x0} = V'_{th} \cdot \text{sign}(i_x) + R_d \cdot i_x, \quad \text{con } v_{x0}^* \text{ ideale e } v_{x0} \text{ reale.} \quad (5.24)$$

La procedura di identificazione dell'errore complessivo di tensione avviene attraverso un controllo "I-Hz" in cui si impone un vettore di corrente a frequenza nulla e allineato con l'asse Reale α . In queste condizioni non è presente alcuna B-EMF (rotore fermo) e in componenti (α, β) le tensioni di riferimento sono:

$$\begin{cases} v_{\alpha}^* = R_s I_{test} + v_{err,\alpha} \\ v_{\beta}^* = 0 \end{cases} \quad (5.25)$$

$$\begin{cases} v_{err,\alpha} = \frac{4}{3} \cdot V'_{th} + R_d \cdot I_{test} \\ v_{err,\beta} = 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

Complessivamente si ottiene in asse Reale α :

$$v_{\alpha}^* = (R_s + R_d) \cdot I_{test} + \frac{4}{3} \cdot V'_{th} \quad (5.27)$$

Il processo di identificazione dei parametri coinvolti avviene in 2 fasi distinte; la prima serve per ricavare la resistenza complessiva ($R_s + R_d$), mentre la seconda per ricavare la LUT contenente le diverse V'_{th} per ogni valore di corrente di fase, da utilizzare per ottenere ad ogni ISR di controllo l'errore di tensione di fase.

Per prima cosa si comanda uno stadio iniziale di "Parking" con vettore di corrente a frequenza nulla, allineato con l'asse Reale α e modulo 80 A, affinché la macchina abbia il tempo necessario per allinearsi senza oscillazioni. Dopodichè si impongono due impulsi di corrente a differente ampiezza per breve tempo, 45A e 90A per 500 ms. Durante ciascun impulso si ricavano le v_{α}^* (uscite dei PI) e al termine dei due si ottiene ($R_s + R_d$):

$$(R_s + R_d) = \frac{v_{\alpha,1}^* - v_{\alpha,2}^*}{I_1 - I_2} \quad (5.28)$$

Successivamente si impone nelle stesse modalità una gradinata ad ampiezza decrescente di corrente (rispettando sempre le condizioni stazionarie di rotore fermo ed allineato, ossia B-EMF nulla). Per ogni step di corrente, nota la resistenza totale, si può ricavare la V'_{th} conservandone ogni valore in una LUT dedicata.

$$V'_{th,K} = \frac{3}{4} \cdot (v_{\alpha,K}^* - (R_s + R_d) \cdot I_K) \quad (5.29)$$

In figura 5.60 la LUT ottenuta da interpolare per ogni valore di corrente di fase:

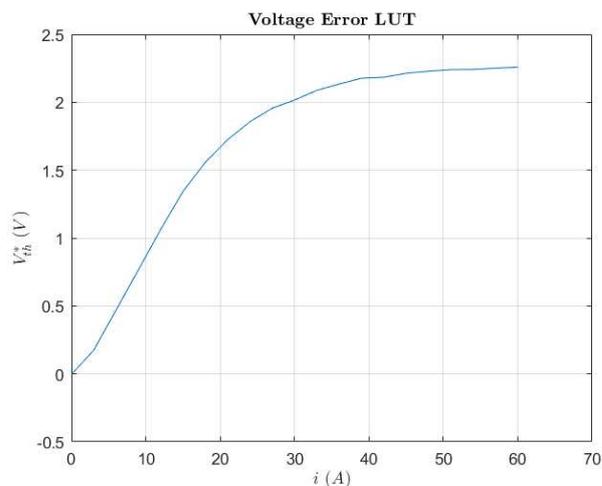


Figura 5.60: LUT Errore di Tensione per Inverter.

L'integrazione dell'errore di tensione nel controllo FPC avviene prima dell'Osservatore di Flusso, in modo tale che quest'ultimo utilizzi delle tensioni di fase ricostruite non ideali. Queste sono ottenute sottraendo i valori delle LUT, moltiplicate per il segno delle correnti di fase, dalle tensioni ideali ricostruite a partire dai Duty Cycle. In figura 5.61 si riporta il processo completo di identificazione dell'errore di tensione:

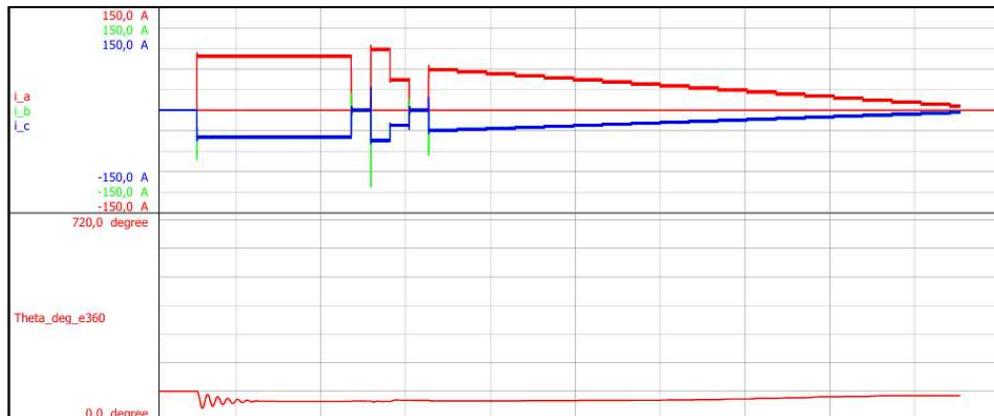


Figura 5.61: Correnti di Fase e Angolo Meccanico durante il test di identificazione dell'errore di tensione.

I test di controllo motore in coppia sono stati eseguiti con M.U.T. del banco prova non pilotata, ovvero la Driving Machine (il motore oggetto del controllo) ha risentito solamente di un carico inerziale dovuto all'ingombro del rotore della M.U.T. Ne consegue

che durante le operazioni di testing nessuna coppia attiva resistente è stata applicata al motore pilotato del banco, ad eccezione delle coppie resistenti di attrito.

Di seguito sono mostrati i risultati ottenuti con controllo motore FOC-CVC e FPC, considerando solamente le variazioni dinamiche di coppia positiva e negativa in funzione della velocità di rotazione; ogni qual volta quest'ultima eguaglia un valore di riferimento impostato dall'utente, il valore di coppia di riferimento è invertito con uno slew rate di 5000 Nm/s. Pertanto le forme d'onda attese di coppia e velocità devono necessariamente avere un andamento, rispettivamente, trapezoidale e "quasi" sinusoidale (nel dettaglio, lineare nel tratto costante dell'onda trapezia, ad arco di parabola nei tratti lineare dell'onda).

Il controllo di coppia FOC-CVC è stato eseguito considerando i parametri di controllo in tabella 5.6:

Parametro	Simbolo	Valore
Coppia Massima	$\pm T_{max}$	600 Nm
Velocità di Riferimento per il cambio dinamico di coppia	$\pm n_{ref}$	600 rpm
Tensione DC-Link	V_{DC}	600 V
Banda del Controllo	f_{CVC}	600 Hz
Induttanza differenziale d	l_{dd}	4.5 mH
Induttanza differenziale q	l_{qq}	10.0 mH
Guadagno Proporzionale d	$k_{p,d}$	$2\pi \cdot f_{CVC} \cdot l_{dd} = 16.9646 \Omega$
Guadagno Integrativo d	$k_{i,d}$	$\frac{k_{p,d}}{10 \cdot \omega_{CVC}} = 6395.5037 \frac{\Omega}{s}$
Guadagno Proporzionale q	$k_{p,q}$	$2\pi \cdot f_{CVC} \cdot l_{qq} = 37.6991 \Omega$
Guadagno Integrativo q	$k_{i,q}$	$\frac{k_{p,q}}{10 \cdot \omega_{CVC}} = 14212.230 \frac{\Omega}{s}$

Tabella 5.6: Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo FOC-CVC.

In figura 5.62 si riportano gli andamenti temporali di correnti di fase, tensione e velocità, di correnti in assi (d, q) di rotore; non solo, in figura 5.63 il piano delle correnti caratterizzato dalla traiettoria dei punti di funzionamento del test, ossia l'MTPA (il test non è stato dunque effettuato in deflussaggio). L'inversione di coppia mette in luce anche la traiettoria di MTPA per corrente negativa in asse q , la quale consente di ottenere il valore negativo di coppia elettromagnetica.

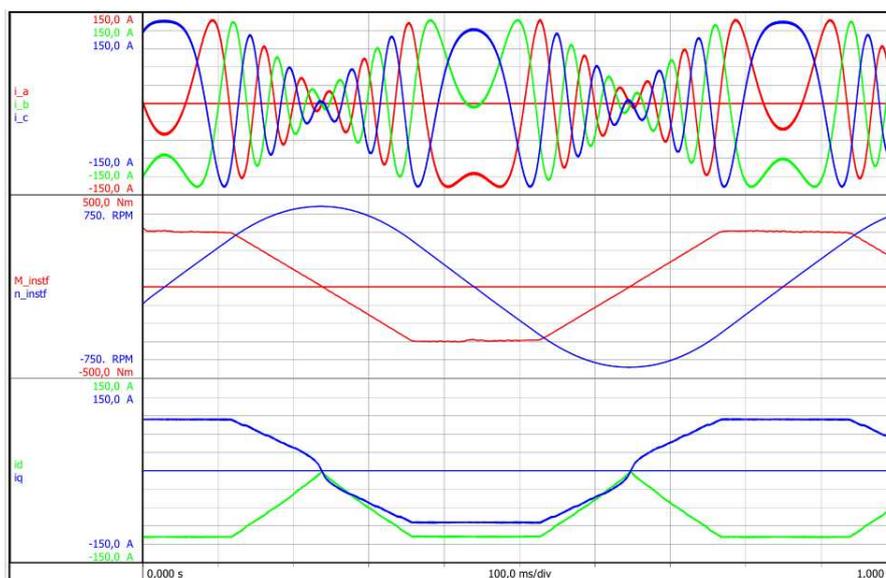


Figura 5.62: Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi (d, q) in funzione del tempo per test CVC.

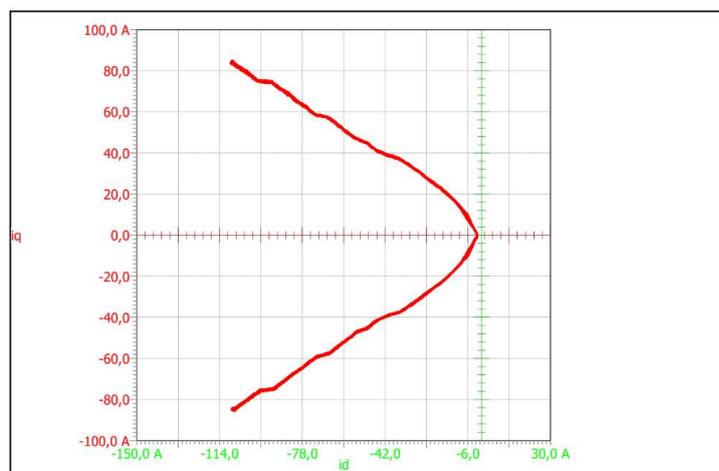


Figura 5.63: Punti di Funzionamento su MTPA nel piano (d, q) in funzione del tempo per test CVC.

Si noti in figura 5.62 l'inversione delle sequenze delle correnti di fase ogni qual volta la velocità di rotazione cambia il suo verso, dovuto all'inversione delle sequenze di tensione di fase. Gli andamenti temporali di coppia e velocità rispecchiano le forme d'onda attese, e in corrispondenza delle variazioni di coppia il controllo CVC non permette che le correnti possano raggiungere istantaneamente impulsi di valori tali da

far intervenire le protezioni di sovracorrente (anche lo slew rate di 5000 nm/s avvantaggia questa condizione).

Il controllo di coppia FPC è stato eseguito in diverse modalità:

1. Assenza di Compensazione dei Tempi Franchi e Osservatore unicamente di tipo $I-\theta$;
2. Compensazione dei Tempi Franchi e Osservatore unicamente di tipo $I - \theta$;
3. Compensazione dei Tempi Franchi e Osservatore combinato di tipo VI e $I-\theta$.

I parametri generici di controllo sono riassunti in tabella 5.7:

Parametro	Simbolo	Valore
Coppia Massima	$\pm T_{max}$	600 Nm
Velocità di Riferimento per il cambio dinamico di coppia	$\pm n_{ref}$	600 rpm
Tensione DC-Link	V_{DC}	600 V
Banda di flusso	f_λ	800 Hz
Guadagno Proporzionale λ	$k_{p,\lambda}$	$2\pi \cdot f_\lambda = 5026.548 \Omega$
Guadagno Integrativo λ	$k_{i,\lambda}$	$\frac{k_{p,\lambda}}{10 \cdot \omega_\lambda} = 2526618.7266 \frac{\Omega}{s}$
Fattore k di Flusso per Deflussaggio	k	0.9

Tabella 5.7: Tabella dei Parametri del Sistema di Controllo FPC.

Il primo test è stato eseguito senza la compensazione dei tempi franchi e con osservatore di tipo $I-\theta$, ossia con banda posta a 200 Hz. Un valore di questo tipo implica che sia per basse che per alte velocità di rotazione, l'osservatore utilizza unicamente le mappe inverse di flusso per ricavare il flusso osservato; si è riscontrato che lo stimatore VI alle velocità di rotazione di interesse (400-600 rpm) genera un'errore di coppia non indifferente fino a 20-30 Nm. La problematica, che interessa principalmente motori di maggiore ingombro, è ancora oggetto di esame per studi futuri, pertanto i test effettuati nel lavoro della tesi sono stati eseguiti quasi totalmente implementando un osservatore $I-\theta$. In figura 5.64 le correnti di fase, coppia e velocità, correnti in assi $(d, q)_s$, mentre in figura 5.65 il piano delle correnti esplorato in ogni punto di funzionamento:

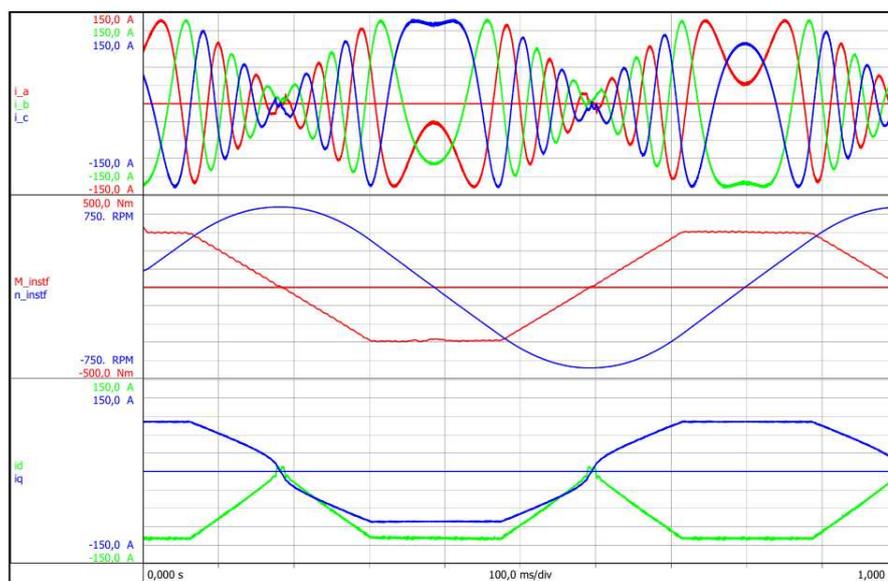


Figura 5.64: Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi $(d, q)_s$ in funzione del tempo per primo test FPC.

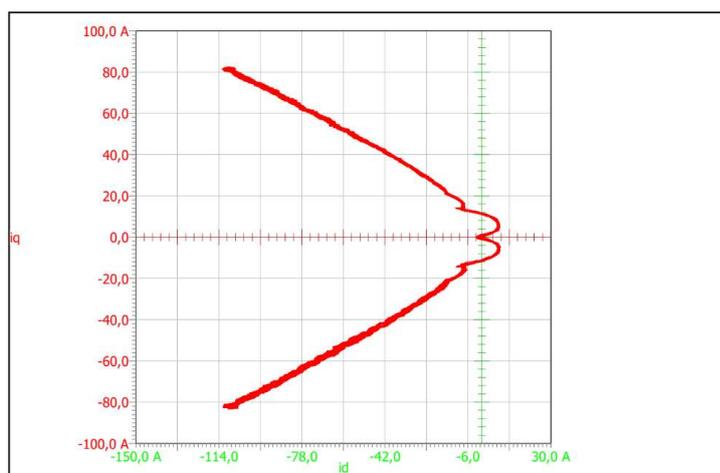


Figura 5.65: Punti di Funzionamento su MTPA nel piano $(d, q)_s$ in funzione del tempo per primo test FPC.

L'assenza di compensazione dell'errore di tensione per tempi franchi definisce un errore a regime di coppia di qualche Nm; la curva di MTPA per tutti i test FPC condotti presenta un andamento a basse correnti a "doppia onda" nell'intorno dello zero. Anche in questo caso, oggetto di studi futuri potrebbe essere una ricerca più approfondita della

problematica a partire dalla manipolazione delle mappe di flusso, possibilmente errate o incerte per quei valori di corrente.

Il secondo test è stato eseguito nelle stesse modalità ma con compensazione dei tempi franchi; in figura 5.66 si riporta il solo andamento di coppia e velocità in queste condizioni di test, in cui non è più presente l'errore di coppia generata:

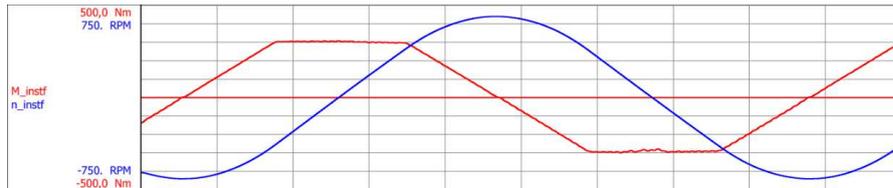


Figura 5.66: Coppia e velocità in funzione del tempo per secondo test FPC.

Il terzo test compensa l'errore di tensione per tempi franchi ma utilizza un osservatore completo, in figura 5.67. Il test eseguito mostra l'errore non trascurabile di coppia ai riferimenti costanti, soprattutto a più basse velocità. La banda dell'osservatore è posta a 10Hz.

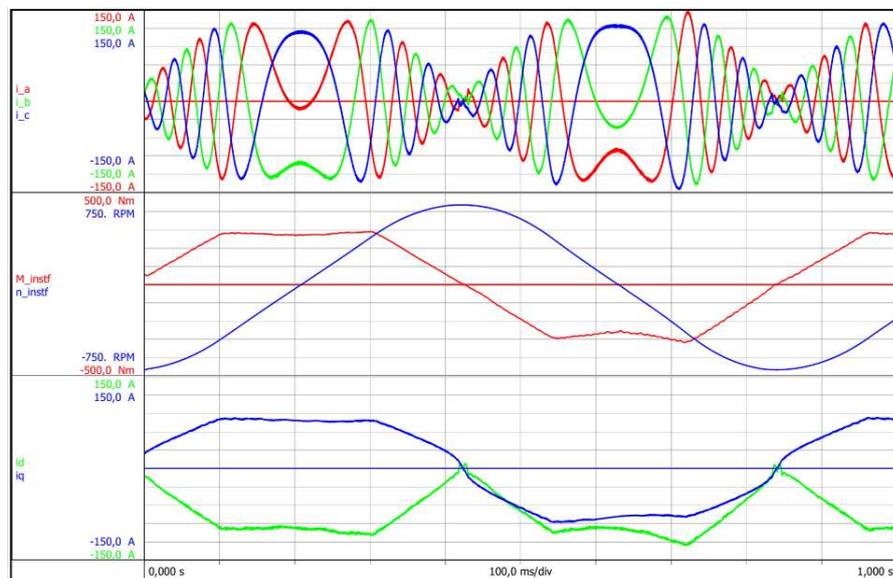


Figura 5.67: Correnti di Fase, Coppia, Velocità, Correnti in assi (d, q)_s in funzione del tempo per terzo test FPC.

Capitolo 6

Conclusions

Uno degli aspetti chiave del sistema di controllo unificato realizzato è stata l'integrazione del convertitore di potenza, il componente essenziale che modula e adatta l'energia proveniente dall'alimentazione di laboratorio per soddisfare le richieste operative del motore. Un aspetto critico della sua integrazione è stata la capacità di raccogliere dati in tempo reale sulla tensione, corrente, posizione, temperatura e coppia del motore, inviando questi feedback costantemente verso il sistema di controllo, basato su un algoritmo complesso implementato all'interno del microcontrollore configurato. Pertanto, l'integrazione del convertitore di potenza in un sistema di controllo unificato ha rappresentato il nucleo del banco prova.

L'assenza di un sistema unificato di questo tipo per un banco prova già esistente ne ha dunque permesso la sua creazione. Definite tutte le limitazioni introdotte dall'utilizzo della precedente scheda di controllo, è stato necessario integrare la nuova Control Board all'interno del sistema, ultimato lo sbroglio della stessa. Infatti, il lavoro di tesi precedente [1] si basa in particolare sulla sostituzione della Control Board esistente, avendone sviluppato gli schematici circuitali. Il banco prova in esame è già caratterizzato dalla presenza di due motori elettrici gemelli allineati e accoppiati lungo l'asse degli alberi motore. Tuttavia, per poter realizzare il sistema di controllo unificato destinato ad essere utilizzato solamente per questo banco prova, è stato necessario progettare e realizzare la scatola in alluminio che protegge e contiene al suo interno fisicamente tutti i componenti che operano in modo coordinato al funzionamento del banco. L'algoritmo di controllo motore sviluppato risponde alle strette esigenze di controllo del MUT specifico; in particolare, l'algoritmo è in grado di attuare un controllo di coppia preciso, affidabile, ad elevate prestazioni dinamiche in ogni condizione di funzionamento, continue o con inversioni di coppia e velocità. Infine, la validazione sperimentale del sistema ha costituito la fase finale del progetto di tesi e permette di verificare la funzionalità non solo del sistema nel suo complesso, ma di ogni suo componente, tramite un efficace sistema di comunicazione CAN ed una interfaccia utente di controllo personalizzata.

Il banco prova realizzato evidenzia come l'integrazione delle funzionalità sviluppate risponda alle esigenze di sperimentazione del laboratorio PEIC, consentendo di sfruttare appieno le potenzialità del kit Wolfsped, accelerando i processi di testing e riducendo i tempi di sviluppo dei prodotti nel settore dell'automotive. In definitiva, l'obiettivo principale della tesi è stato quello di fornire al laboratorio PEIC uno strumento completo e funzionale per l'analisi, validazione e ottimizzazione dei motori destinati alla trazione.

Ulteriori migliorie e modifiche possono essere apportate al banco, come:

- La corretta integrazione del filtro EMI, per la riduzione dei disturbi condotti di modo comune e differenziale, destinato al lato potenza del banco;
- Espansione del sistema di comunicazione CAN con l'integrazione di più unità nodali nella rete;
- Implementazione dei sensori di temperatura destinati al motore del banco, insieme alla routine di condizionamento dei segnali ricevuti dal microcontrollore (di cui la logica ad isteresi è già presente);
- Implementazione del flussimetro con routine di condizionamento del segnale ricevuto (di cui protezioni e logica di gestione termica già presente);
- Sincronizzazione dei segnali PWM e di clock con la scheda di controllo del motore accoppiato nel banco;
- Risoluzione dell'errore di tensione presente in controllo FPC con osservatore *VI* implementato.

I contributi personali apportati per la progettazione del banco sono stati:

- Sbroglia della nuova Scheda di Controllo del kit inverter;
- Progettazione del layout meccanico del banco;
- Scrittura e implementazione degli algoritmi di controllo motore FOC-CVC e FPC;
- Saldatura e assemblaggio della Scheda di Servizio;
- Validazione delle schede elettroniche e fissaggio sul kit Wolfsped del PCB di controllo;
- Configurazione del microcontrollore, delle routine di controllo, protezione e gestione termica, della macchina a stati e dei condizionamenti dei segnali;
- Sviluppo di un sistema di comunicazione CAN;

- Sviluppo di un'interfaccia di controllo utente personalizzata;
- Assemblaggio della scatola contenitiva progettata nel layout meccanico;
- Interconnessione dei componenti;
- Testing e validazione sperimentale del banco, con identificazione dell'errore di tensione per tempi franchi, controllo diretto di coppia o velocità, con inversioni dinamiche e in presenza o meno di compensazione dell'errore di tensione dovuto al convertitore integrato nel sistema.

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va a tutte quelle persone che in modo diretto e indiretto hanno contribuito alla stesura e alla realizzazione del lavoro di tesi. Innanzitutto, vorrei ringraziare chi ha reso possibile la realizzazione dell'elaborato, ossia il Prof. Ing. E. G. Armando e il Dr. F. Mandrile, per disponibilità e supporto. I ringraziamenti più grandi sono indirizzati ai miei genitori, per i sacrifici fatti, il continuo sostegno morale trasmesso per completare il mio percorso di studi. Un grazie, infine, a chi con il sorriso e pazienza ha sempre mostrato gentilezza nel costante supporto, gli amici di infanzia e i colleghi universitari.

Bibliografia

- [1] Matteo De Bianchi. “Power converter design for eMotor test rig”. Tesi di laurea mag. Torino, Italia: Politecnico di Torino, 2024.
- [2] Wolfspeed. *CRD300DA12E-XM3 Datasheet*. Technical document. Mouser Electronicst Code: 941-CRD300DA12EXM3. 2024.
- [3] Prof. Aldo Boglietti Prof. Eric Armando Prof. Radu Bojoi. *Lecture 4 - Evolution and Future Trend in Electrical Drives Measurements*. Lecture Slide, Master’s degree in MECHATRONIC ENGINEERING. 2024.
- [4] Abracon LLC. *Abracon LLC Oscillator ASEMB- 8.000MHZ-LC-T*. Technical document. DigiKey Code: 535-11760-6-ND. 2024.
- [5] RS PRO. *Black Aluminium Sheet Datasheet*. Technical document. RS Code: 778-1696. 2024.
- [6] RS PRO. *Aluminium Angle Datasheet*. Technical document. RS Code: 136-8750. 2024.
- [7] Wolfspeed. *Power Moudle CAB450M12XM3 Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 1697-CAB450M12XM3-ND. 2024.
- [8] Wolfspeed. *Gate Drivers Board CGD12HBXMP Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 1697-CGD12HBXMP-ND. 2024.
- [9] Schaffner. *EMI Filter FN2240-150-99-C2222-R99 Datasheet*. Technical document. Mouser Electronics Code: 631-FN224015C2222R99. 2024.
- [10] MEAN WELL. *Power Supply HDR-60-15 Datasheet*. Technical document. RS Code: 145-7872. 2024.
- [11] MEAN WELL. *Power Supply HDR-75-24 Datasheet*. Technical document. RS Code: 122-2211. 2024.
- [12] Phoenix Contact. *Morsettieraper Barra DIN 3208100 Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 277-11098-ND. 2024.
- [13] TE Connectivity. *Kilovac LEV200 Datasheet*. Technical document. RS Code: 279-8782. 2024.

-
- [14] Cosmotec Industrial Cooling. *Scambiatore di calore acqua/aria EWX20 Datasheet*. Technical document. 2024.
- [15] Schaffner. *Filtro ingresso IEC FN9260-6-06 Datasheet*. Technical document. RS Code: 188-9630. 2024.
- [16] APEM. *Interruttore a bilanciere MR210R5LBR Datasheet*. Technical document. RS Code: 468-5380. 2024.
- [17] Phoenix Contact. *Morsettiera collegabile 0707109 Datasheet*. Technical document. RS Code: 176-1488. 2024.
- [18] Binder. *Connettore circolare 12 Poli, Montaggio su Pannello 09-3492-500-12 Datasheet*. Technical document. RS Code: 706-7814. 2024.
- [19] Binder. *Connettore circolare 12 Poli, Montaggio su Cavo 99-0491-12-12 Datasheet*. Technical document. RS Code: 706-7479. 2024.
- [20] Amphenol Industrial. *Connettore circolare 14 Poli, Montaggio a Pannello FLKC-14EGFS-GCP-001 Datasheet*. Technical document. RS Code: 186-4598. 2024.
- [21] Amphenol Industrial. *Connettore circolare 14 Poli, Montaggio su Cavo FLKC-14EGFS-GCP-001 Datasheet*. Technical document. RS Code: 186-4598. 2024.
- [22] RS PRO. *Pressacavo RS PRO 10mm - 14mm Datasheet*. Technical document. RS Code: 669-4673. 2024.
- [23] RS PRO. *Pressacavo RS PRO 6mm - 12mm Datasheet*. Technical document. RS Code: 669-4664. 2024.
- [24] RS PRO. *Portagomma int. 10mm Datasheet*. Technical document. RS Code: 176-2022. 2024.
- [25] RS PRO. *Riduttore Diritto Maschio 1/2poll - Femmina 3/8poll Datasheet*. Technical document. RS Code: 176-1014. 2024.
- [26] Legris. *Raccordo pneumatico LF3000 0902 17 21 Datasheet*. Technical document. RS Code: 367-5635. 2024.
- [27] Sandro Rubino. *Lecture 3 - Modelling of AC machines*. Lecture Slide, Master's degree in MECHATRONIC ENGINEERING. 2024.
- [28] Texas Instruments. *Regolatore Lineare di Tensione TPS7A2633DRVR Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 296-TPS7A2633DRVRDKR-ND. 2024.
- [29] Texas Instruments. *Regolatore Lineare di Tensione TLV75533PDBVR Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 296-50411-6-ND. 2024.
- [30] STMicroelectronics. *Microcontrollore STM32G474VET6 LQFP100*. Technical document. DigiKey Code: 497-19476-ND. 2024.

- [31] STMicroelectronics. *Microcontrollore STM32G474VET6 LQFP100 Datasheet*. Technical document. 2024.
- [32] STMicroelectronics. *Microcontrollore STM32G474VET6 LQFP100 Reference Manual*. Technical document. 2024.
- [33] STMicroelectronics. *Programmatore e Debugger STLINK-V3SET Datasheet*. Technical document. DigiKey Code: 497-18216-ND. 2024.
- [34] Officine Galileo. *Shunt per Millivoltmetro 00861472 scheda tecnica*. Technical document. 2024.
- [35] PEAK-System Technik GmbH. *PCAN-USB FD User Manual*. Technical document. 2024.
- [36] Switchcraft. *Connettore D-Sub EHDB9FFB Datasheet*. Technical document. RS Code: 876-8580. 2024.