

UNIVERSITY

Master Degree in Electrical Engineering



Master Degree Thesis

**Azionamenti multi-trifase a bassissima
tensione**

Supervisors

Prof. PAOLO GUGLIELMI

Candidate

FABIO SIGNORETTI

March 2024

Sommario

La presente tesi si concentra sulla progettazione, analisi e sperimentazione di due motori elettrici multi trifase a bassissima tensione, con un approfondimento significativo sugli schemi di controllo. Questi motori rivestono un ruolo cruciale nel movimento di un sistema ottico bi-assiale, e la loro ottimizzazione è fondamentale per garantire prestazioni affidabili e efficienti.

Nei primi capitoli della tesi, viene fornita una panoramica dettagliata del sistema in esame, con particolare attenzione alle sue caratteristiche fondamentali. Inoltre, vengono presentate approfondite descrizioni dei due motori che saranno al centro dell'analisi, mettendo in luce le loro specifiche tecniche e le peculiarità di progettazione.

Il quarto capitolo costituisce il cuore della modellizzazione del sistema, sottolineando le simulazioni eseguite tramite simulatore circuitale. Questa sezione offre un confronto dettagliato tra i risultati ottenuti dalle simulazioni e le previsioni derivanti dai calcoli teorici eseguiti precedentemente. Tale analisi è fondamentale per valutare l'accuratezza del modello teorico e per identificare eventuali discrepanze tra la teoria e la pratica.

Nel quinto capitolo, l'attenzione si sposta sull'analisi del funzionamento in ridondanza, esaminando il comportamento delle correnti nel caso di spegnimento di una delle tre fasi e valutando come le restanti due tendano a mantenere la coppia totale. Questo aspetto è cruciale per comprendere la resilienza del sistema in situazioni di guasto e per garantire una progettazione robusta e sicura.

Infine, il sesto capitolo presenta i risultati ottenuti sperimentalmente attraverso la realizzazione di un prototipo. Questa fase di sperimentazione fornisce una valida verifica pratica delle simulazioni teoriche, consentendo di confrontare le prestazioni previste con quelle effettivamente osservate. I risultati sperimentali contribuiscono quindi a consolidare e validare l'approccio progettuale adottato.

In sintesi, la tesi fornisce un'analisi completa e approfondita dei motori elettrici,

del sistema ottico bi-assiale e degli schemi di controllo adottati. L'integrazione di simulazioni teoriche e dati sperimentali offre una visione complessiva e accurata delle prestazioni del sistema, contribuendo significativamente alla comprensione e all'ottimizzazione dell'intero sistema.

Indice

Elenco delle tabelle	VII
Elenco delle figure	VIII
Acronyms	XI
1 INTRODUZIONE	1
2 DESCRIZIONE SISTEMA	3
3 DESCRIZIONE MOTORI, SCHEDE E REALIZZAZIONE PRO- TOTIPO	6
3.1 Motore di Elevazione	6
3.1.1 Specifiche Motore	6
3.1.2 Dimensioni Macchina	8
3.1.3 Parti Attive per la Macchina di Elevazione	9
3.1.4 Circuito Stampato	12
3.2 Motore di Brandeggio	16
3.2.1 Specifiche Motore	16
3.2.2 Dimensioni Macchina	16
3.2.3 Parti Attive per la Macchina di Brandeggio	18
3.2.4 Circuito Stampato	21
3.3 Schede	23
3.4 Prototipo	25
4 MODELLO Plecs	32
4.1 Descrizione Modello	32
4.2 Risultati Simulazione	42
4.2.1 Analisi Termica	42
4.2.2 Analisi Elettrica	42
4.2.3 Risultati Analisi per Elevazione	43

4.2.4	Risultati Analisi per Brandeggio	46
4.3	Confronto con Risultati FEM	49
5	ANALISI FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DEGRADATE	53
5.1	Modello Dinamico	53
5.2	Simulazione del Funzionamento in Condizioni Degradate	57
6	PROVE SPERIMENTALI	66
6.1	Descrizione Prove	66
6.1.1	Misura delle Induttanze	66
6.1.2	Misura della Resistenza	67
6.1.3	Prova di EMF	67
6.1.4	Prova di Cortocircuito	68
6.2	Risultati Ottenuti	70
7	CONCLUSIONI	71
	Bibliografia	73

Elenco delle tabelle

3.1	Specifiche Comuni ai due Motori	8
3.2	Ingressi e Uscite per la scheda	23

Elenco delle figure

2.1	Schema del Pan & Tilt	4
3.1	Posizione delle Fasi di Elevazione	7
3.2	Dimensioni del Motore di Elevazione	9
3.3	Sezione di un Avvolgimento di Elevazione	10
3.4	Calcolo della Resistenza del Filo della Macchina di Elevazione . . .	11
3.5	Magnete Nord per Macchina di Elevazione	12
3.6	Simulazione di Smagnetizzazione per Macchina di Elevazione	12
3.7	Circuito Stampato: Layer 1	13
3.8	Circuito Stampato: Layer 2	14
3.9	Circuito Stampato: Layer 3	14
3.10	Circuito Stampato: Layer 4	15
3.11	Posizione delle Fasi di Brandeggio	16
3.12	Dimensioni Macchina di Brandeggio	17
3.13	Collegamenti per passare a trifase sul motore di brandeggio	18
3.14	Avvolgimento per Macchina di Brandeggio	19
3.15	Calcolo resistenze del Filo di Brandeggio	19
3.16	Dimensioni Magnete Brandeggio	20
3.17	Simulazione di Smagnetizzazione per Macchina di Brandeggio	20
3.18	Circuito Stampato: Layer 1	21
3.19	Circuito Stampato: Layer 2	21
3.20	Circuito Stampato: Layer 3	22
3.21	Circuito Stampato: Layer 4	22
3.22	Dimensioni scheda	24
3.23	Specifiche del Dispositivo GaN	25
3.24	Statore di Elevazione Non Conforme	26
3.25	Fallito Inserimento delle Bobine di Brandeggio	27
3.26	Valutazione dell'interferenza tra le bobine	28
3.27	Prototipo per la macchina di elevazione	29
3.28	Prototipo per la macchina di Brandeggio	30
3.29	Disegno del Circuito Stampato per il Motore di Brandeggio	31

4.1	EPC23104	32
4.2	Schema Inverter	33
4.3	Dettaglio su una fase dello schema presentato in fig.4.2	34
4.4	Schema a blocchi per il controllo della prima e della terza terna	35
4.5	Schema a blocchi per il controllo della seconda terna	36
4.6	Controllo di coppia in Plecs	37
4.7	Riferimenti per generare la PWM	38
4.8	Ingrandimento sullo Schema di Controllo	39
4.9	Schema per la Valutazione delle Correnti	40
4.10	Schema per il Calcolo del Ripple	41
4.11	Grafico delle perdite del Dispositivo GaN	41
4.12	Andamento della Temperatura	42
4.13	Correnti nella Macchina di Elevazione per T_{max}	44
4.14	Ripple di Corrente per la Macchina di Elevazione	45
4.15	Correnti nella Macchina di Elevazione per $T_t = T_{max}/3$	46
4.16	Correnti nella Macchina di Brandeggio per T_{max}	47
4.17	Ripple di Corrente per la Macchina di Brandeggio	48
4.18	Correnti nella Macchina di Brandeggio per $T_t = T_{max}/3$	49
4.19	Correnti e Coppia per Elevazione in FEM	50
4.20	Correnti e Coppia per Brandeggio in FEM	50
4.21	Correnti per la macchina di brandeggio a $T_t = T_{max}/3$	51
4.22	Correnti per la macchina di elevazione a $T_t = T_{max}/3$	51
5.1	Schema di Controllo della Coppia con Guasto	57
5.2	Schema di Controllo della Prima Terna con Guasto	58
5.3	Schema di Controllo della seconda e della Terza Terna con Guasto	59
5.4	Correnti nelle Fasi durante il Guasto	60
5.5	Schema dell’Inverter con aggiunta delle Mutue Induttanze	61
5.6	Correnti nelle Fasi durante il Guasto	62
5.7	Richiesta di Coppia e Comportamento effettivo della coppia	63
5.8	Riferimento di Corrente in caso di guasto	64
5.9	Correnti di fase se non viene rilevato il guasto	65
6.1	Misura Indiretta della Resistenza	67
6.2	Prova di EMF	68
6.3	prova Cortocircuito	69

Acronyms

SPM

Synchronous Permanent Magnet

Fs

Fondo scala

GaN

Gallium Nitride

RLE

Circuito con serie di Resistenza Induttanza e Forza Elettro Motrice

IR

Infra-Red

PWM

Pulse Width Modulation

EMF

Forza Elettro Motrice

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Nel contesto di questa tesi, è fondamentale approfondire ulteriormente le caratteristiche distintive dei due servomotori e del sistema ottico biassiale che essi controllano. La comprensione dettagliata delle differenze tra il motore responsabile del movimento attorno all'asse di brandeggio e quello dedicato al carico attorno all'asse di elevazione rivela aspetti cruciali per la progettazione e l'ottimizzazione del sistema nel suo complesso.

La scelta di utilizzare un motore a magneti permanenti, con encoder e albero dedicato per ciascun servomotore, evidenzia la precisione e la modularità del design. La dimensione maggiore del motore di brandeggio potrebbe essere correlata a esigenze specifiche di coppia o velocità di rotazione, mentre la differenza nel numero di poli e denti di statore potrebbe influire sulle prestazioni dinamiche e sulle caratteristiche di controllo.

La realizzazione di schede di elettronica di potenza identiche per il controllo di entrambi i motori sottolinea l'approccio uniforme nell'implementazione della gestione energetica. Questa decisione potrebbe essere giustificata dall'obiettivo di semplificare la manutenzione e la gestione del sistema, nonché dalla possibilità di sviluppare strategie di controllo comuni.

Nella fase di simulazione, sarà interessante esplorare le diverse condizioni di lavoro dei due motori, con un focus particolare sul funzionamento a coppia massima e a coppia termica. L'analisi dei risultati in queste condizioni critiche fornirà preziose informazioni sulla robustezza e sulle prestazioni del sistema in situazioni estreme.

La simulazione del funzionamento del motore di brandeggio in presenza di guasti alle terne, con e senza la presenza di mutue induttanze, rappresenterà un

ulteriore elemento chiave nell'esame della sicurezza e della robustezza del sistema. Questi scenari di guasto possono fornire indicazioni preziose sul comportamento del sistema in situazioni non ideali e sulla capacità di gestire eventuali problematiche.

Infine, l'integrazione dei risultati delle simulazioni con quelli ottenuti attraverso prove di laboratorio contribuirà a validare la precisione del modello simulativo e a fornire una panoramica completa delle prestazioni del sistema. Le conclusioni tratte da questa ricerca saranno essenziali per formulare raccomandazioni di miglioramento, suggerire possibili ottimizzazioni e guidare lo sviluppo futuro del sistema ottico biassiale controllato dai due servomotori.

Capitolo 2

DESCRIZIONE SISTEMA

Il sistema è costituito da:

- Una piattaforma con configurazione U-bar biassiale;
- Un pay-load fissato al centro dell'asse di elevazione.

Il pay-load comprende una telecamera diurna, una telecamera IR e un laser per misurare le distanze.

Questo tipo di struttura a U permette di avere alcuni vantaggi:

- Distribuzione del carico uniforme: così si riduce lo stress concentrato in determinate aree, migliorando stabilità e resistenza complessiva della struttura;
- Aumento della rigidità: si ha una migliore resistenza alla flessione e alla torsione;
- Facilità di montaggio;
- Compatibilità con varie applicazioni: la forma a "U" rende la struttura molto versatile e adattabile a diverse esigenze progettuali;
- Costi di produzione ridotti: richiede meno materiale di altre forme strutturali.

Sia i motori, che i sensori di posizione sono accoppiati direttamente con i rispettivi assi, annullando ogni tipo di gioco.

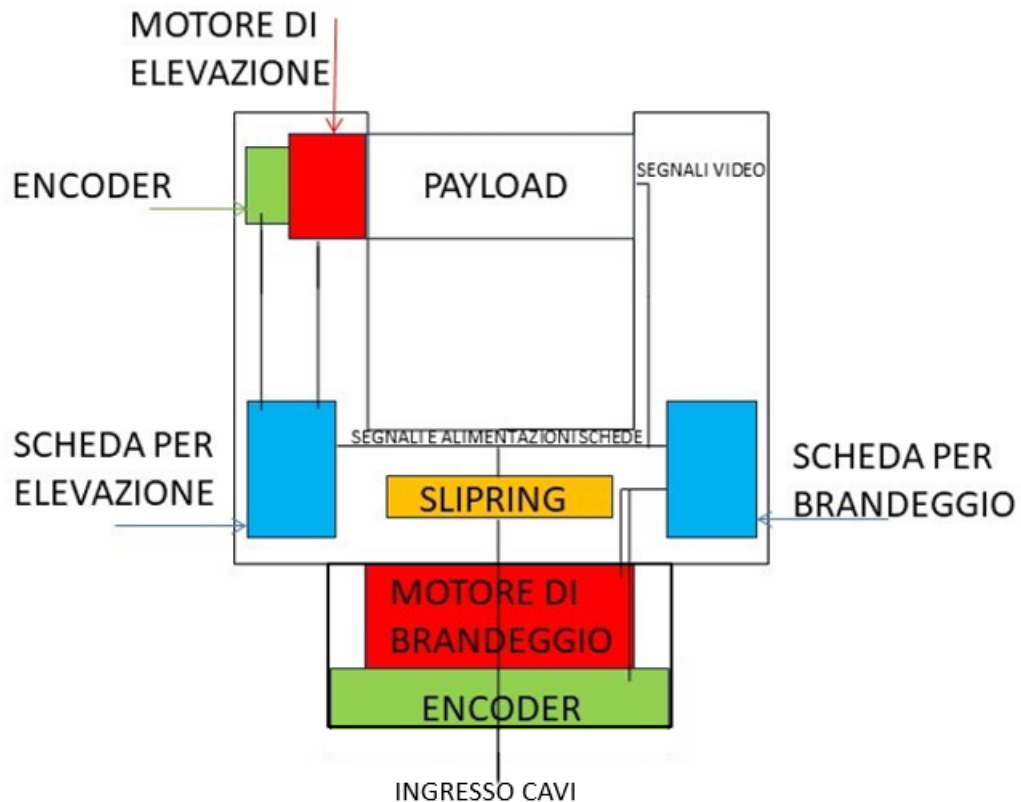


Figura 2.1: Schema del Pan & Tilt

In fig.2.1 è riportato uno schema della struttura. Di seguito si approfondisce quanto rappresentato.

Gli assi di elevazione e di brandeggio sono mossi da due motori brushless. Inoltre, ogni asse è dotato di un encoder assoluto accoppiato direttamente con l'asse, in aggiunta l'asse di brandeggio presenta anche un freno di stazionamento. Questo freno viene impegnato tramite una corona dentata e un pignone, per aumentare il valore della coppia frenante.

Il motore di brandeggio è a rotazione continua e non ha un fine corsa. I segnali delle telecamere vengono trasmessi tramite un cavo con slip-ring. Il motore di elevazione al contrario ha una corsa di $-30^{\circ}/+80^{\circ}$.

Gli encoder usati sono assoluti, monogiro, hollow-shaft con 21 bit di risoluzione.

Le due schede per i motori sono praticamente identiche. La differenza è che per

il brandeggio si è inserito in più il comando per il freno e, inoltre, la scala per i valori di corrente è diversa. Tra i due motori c'è una differenza di un ordine di grandezza tra le ampiezze delle correnti di una fase.

Le alimentazioni delle schede e i vari segnali necessari (ad esempio i segnali video delle telecamere) sono trasmessi tramite un cavo con slip-ring. Lo slip-ring è dotato di spazzole che permettono a trasmissione dei dati senza interruzioni di movimento nonostante la rotazione della struttura.

Capitolo 3

DESCRIZIONE MOTORI, SCHEDE E REALIZZAZIONE PROTOTIPO

I motori in questione sono entrambi brushless a magneti permanenti e con nove fasi. Questo numero di fasi permette di avere maggior precisione nel controllo di velocità e coppia, una miglior distribuzione del carico e una maggior efficienza, nonostante l'implementazione del motore risulti più complessa rispetto a quella di un motore con meno fasi.

I motori presentano tra loro alcune differenze che vengono descritte più dettagliatamente nei paragrafi seguenti.

3.1 Motore di Elevazione

Il motore di elevazione è una macchina SPM con nove fasi e venti paia poli. Sono presenti trentasei avvolgimenti di statore, quattro per ciascuna delle nove fasi.

3.1.1 Specifiche Motore

Le nove fasi del motore di elevazione devono essere disposte come illustrato in fig.3.1 perchè si vuole avere un avvolgimento simmetrico.

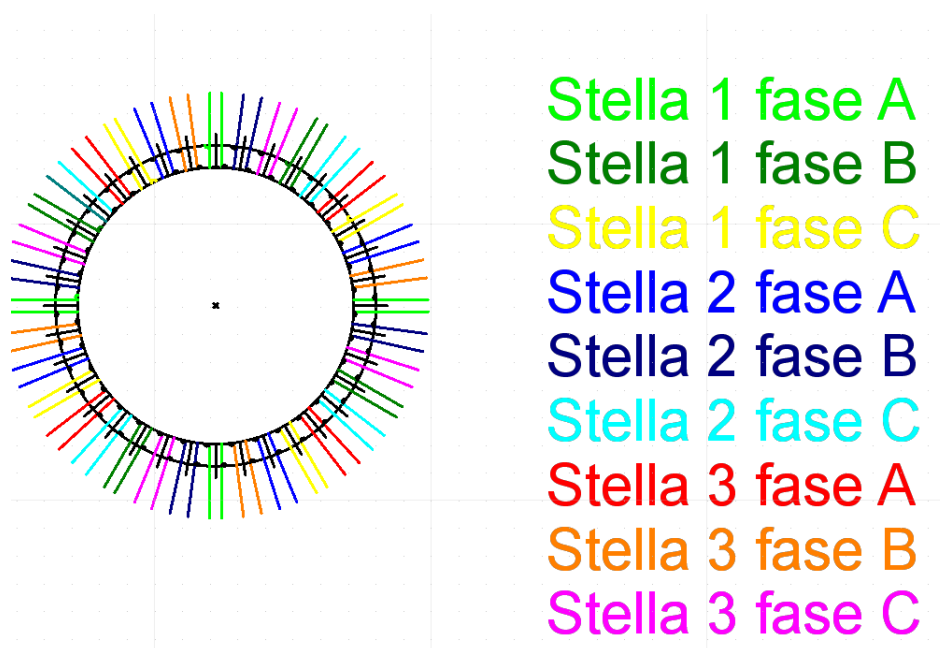


Figura 3.1: Posizione delle Fasi di Elevazione

Gli avvolgimenti appartenenti alla stessa fase sono disposti a 90° meccanici.

Questo risultato si ottiene con la seguente equazione:

$$\Theta_{meccanico} = (\Theta_{elettrico} + n \cdot 360) / pp \quad (3.1)$$

dove n è il numero della fase oggetto di studio e pp è il paio poli.

Il motore di elevazione presenta alcune specifiche in comune con il motore di brandeggio che vengono riportate nella seguente tabella 3.1:

Specifica	Valore	Unità di Misura
Velocità Massima	1,5	rad/s
Velocità Massima	14,5	rpm
Tensione di Alimentazione Inverter Minima	18	V
Tensione di Alimentazione Inverter Massima	32	V
Tensione di Alimentazione Inverter Full Performance	>20-22	V
Numero di fasi	9	-
Ripple di coppia ammesso	<0,1 % Fs	-
Temperatura Ambiente Minima	-30	°C
Coppia Termica	$C_{max}/3$	-

Tabella 3.1: Specifiche Comuni ai due Motori

La coppia nominale è $C_{nom} = 3.2Nm$ e quella massima $C_{max} = 3.4Nm$.

3.1.2 Dimensioni Macchina

Il motore di elevazione andrà posizionato in uno spazio ristretto all'interno della struttura a "U" descritta nel capitolo precedente(2), di conseguenza le sue dimensioni risulteranno ridotte. Vengono riportate qui di seguito in fig.3.2.

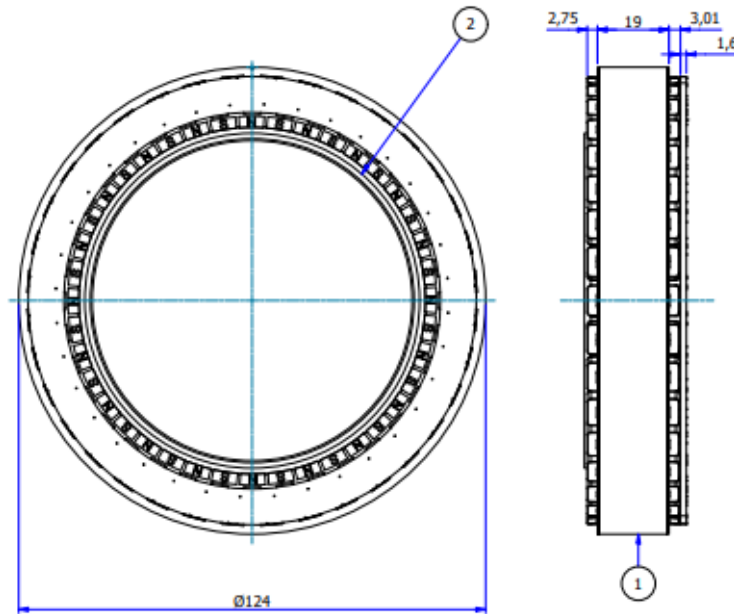


Figura 3.2: Dimensioni del Motore di Elevazione

L'applicazione di questo motore, visti i fattori di forma della macchina elettrica fa optare per un numero di paia poli pari a venti, con frequenze della fondamentale basse. In queste condizioni risultano trascurabili le perdite nel ferro, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità.

La macchina di elevazione realizzata presenta una struttura triplo-trifase, che però essere anche riportata a trifase modificando le connessioni in fase di realizzazione.

3.1.3 Parti Attive per la Macchina di Elevazione

Per quanto riguarda gli avvolgimenti, si è optato per delle bobine realizzate con cavo autocementante di diametro nominale $D_n = 0,355\text{mm}$. Le connessioni tra le bobine appartenenti alla stessa fase sono realizzate in serie tramite un circuito stampato.

Le bobine in serie sono quattro per fase. Gli avvolgimenti appartenenti alla stessa fase sono posizionati a 90° meccanici gli uni dagli altri. Ogni bobina è stata realizzata con 95 spire, per un totale di 380 spire per fase.

In aggiunta, per fare in modo che le bobine avvolte attorno ai denti adiacenti potessero essere inserite senza problemi, si è deciso di dare una forma simile ad un

tronco di cono (la bobina è più larga verso il giogo di statore e si restringe andando verso il traferro) a ciascun avvolgimento, come mostrato in fig.3.3.

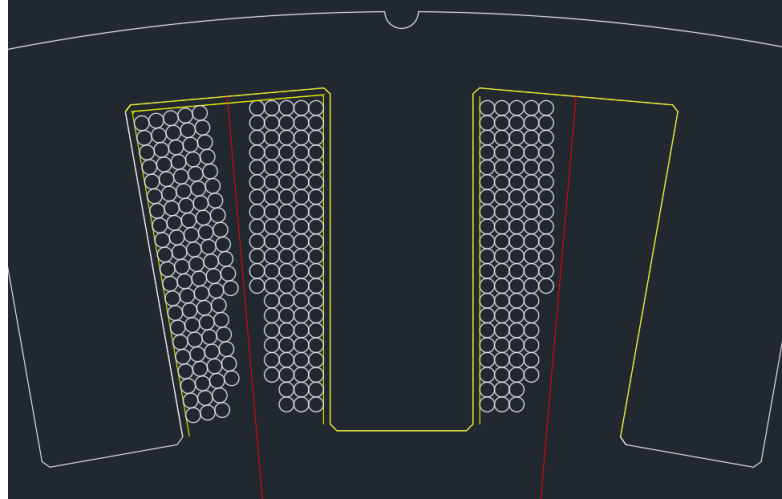


Figura 3.3: Sezione di un Avvolgimento di Elevazione

Dalla scelta del diametro del filo si è calcolata la sua resistenza nel modo seguente:

Prima si calcola la resistenza della singola bobina:

$$R_{bobina} = (65 \cdot Sm_{larga} + 24 \cdot Sm_{media} + 6 \cdot Sm_{stretta}) \cdot \rho / A_{filo} \quad (3.2)$$

dove Sm è la lunghezza della spira media in metri, che varia a seconda della parte dell'avvolgimento considerata. Più ci si avvicina al traferro, più la lunghezza della spira media si accorcia, mentre allontanandosi dal traferro, la lunghezza aumenta. I valori sono $Sm_{larga} = 0,058m$, $Sm_{media} = 0,057m$ e $Sm_{stretta} = 0,56m$ e vanno moltiplicati per il numero di spire appartenenti a ciascuno dei tre strati: 65 spire per Sm_{larga} , 24 spire per Sm_{media} e 6 spire per $Sm_{stretta}$.

A_{filo} è l'area del filo in millimetri quadrati (mm^2) e il valore di quest'area è $0,9898mm^2$, come rappresentato in alto a sinistra in fig.3.4.

Infine ρ è la resistività elettrica del rame in Ohm per millimetro quadrato al metro ($\Omega mm^2/m$) e vale $\rho = 0,2\Omega mm^2/m$.

Successivamente viene calcolata la resistenza totale del filo, considerando la connessione in serie, nel seguente modo:

$$R_{filo} = 4 \cdot R_{bobina} \quad (3.3)$$

I risultati del calcolo precedente hanno portato a una resistenza $R_{filo} = 4,44\Omega$, come evidenziato in fig.3.4 .

Diámetro Nominal (mm)	Sección cavo [mm ²]	Diámetro externo max Grado 1B [mm]	Diámetro Externo max Grado 2B [mm]	Área Sección Rame [mm ²]	Área sección Bobina[mm ²]	Densità corrente cavo [A/mm ²]
0,335	0,088141	0,333		8,373395	10,466744	2,246286050
0,355	0,098990	0,413	0,432	3,403100	11,753675	2,000302068
0,375	0,110447	0,436	0,456	10,492465	13,116581	1,792623600
0,4	0,125664	0,461	0,481	11,338060	14,322600	1,575549869
diámetro filo in m						
	0,000335					
	0,000355					
	0,000375					
	0,0004					
Dati bobina						
Numero passate						
	95					
Corrente di picco [Apl]						
	0,28			Resistenza Singola Bobina 3 strati [Ω]		
				1,25		
Corrente rms [Arms]						
	0,20			1,11		
Coefficiente di stipamento						
	0,8			1,00		
				0,88		
spira media 5 passate [mm]						
	58,21	in m		Resistenza Totale Filo 3 strati [Ω]	Induttanza mH	
		0,05821		4,99	110	
spira media 4 passate [mm]						
	57,33	in m		4,44	110	
		0,05733		3,98	110	
spira media 3 passate [mm]						
	56,45	in m		3,50	110	
		0,05645				
resistività rame Dmm2/m						
	0,02					

Figura 3.4: Calcolo della Resistenza del Filo della Macchina di Elevazione

I magneti, di forma trapezoidale, sono incollati sul rotore. Le dimensioni vengono riportate in fig.3.5 (Nella figura è rappresentato solo il nord, ma il sud ha le medesime dimensioni).

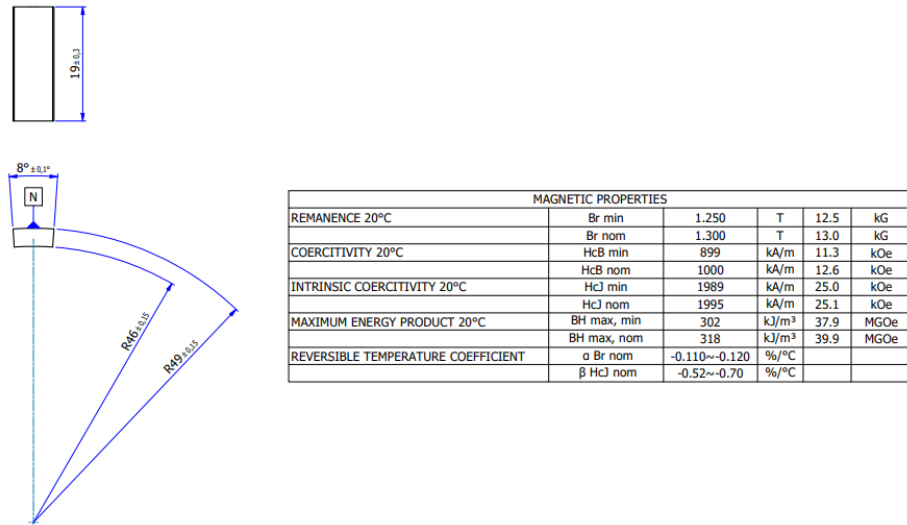


Figura 3.5: Magnete Nord per Macchina di Elevazione

Per questi magneti è stata valutata una possibile smagnetizzazione con una simulazione ad elementi finiti, ma come illustrato in fig.3.6 il problema è trascurabile.

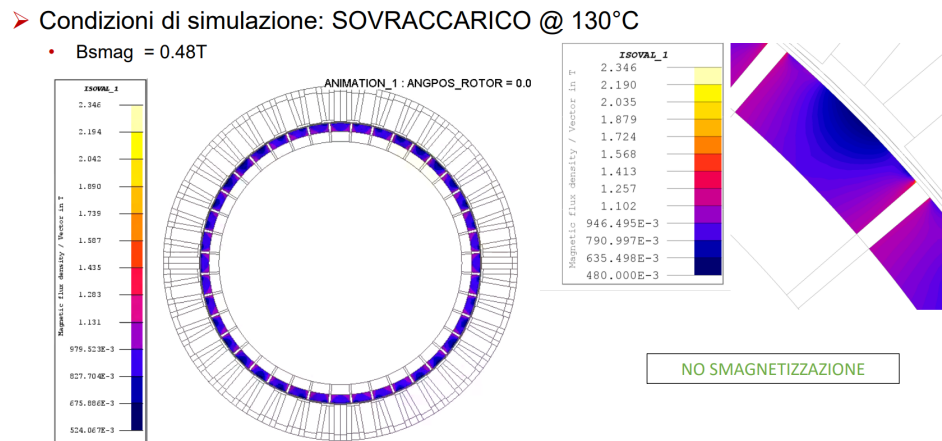


Figura 3.6: Simulazione di Smagnetizzazione per Macchina di Elevazione

3.1.4 Circuito Stampato

Il circuito stampato su cui avvengono i collegamenti è organizzato in 4 livelli:

- Layer 1: Collegamenti serie della prima terna fig.3.7;
- Layer 2: Collegamenti serie della seconda terna fig.3.8;

- Layer 3: Collegamenti serie della terza terna fig.3.9;

- Layer 4: Centri stella delle tre terne fig.3.10.

Queste disposizioni sono rappresentate qui di seguito:

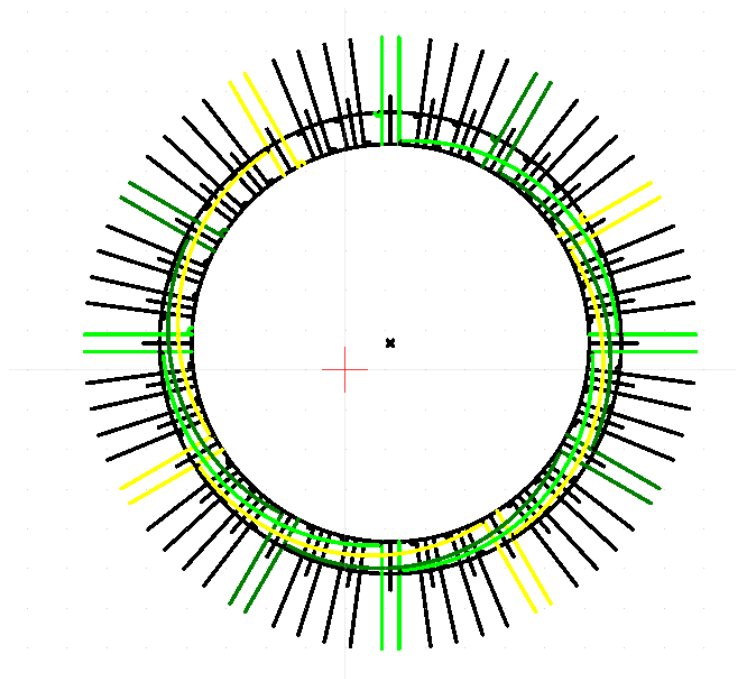


Figura 3.7: Circuito Stampato: Layer 1

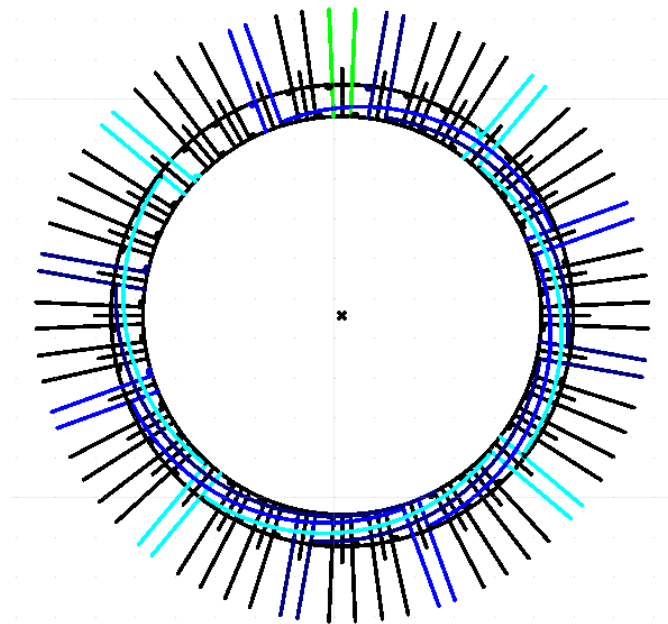


Figura 3.8: Circuito Stampato: Layer 2

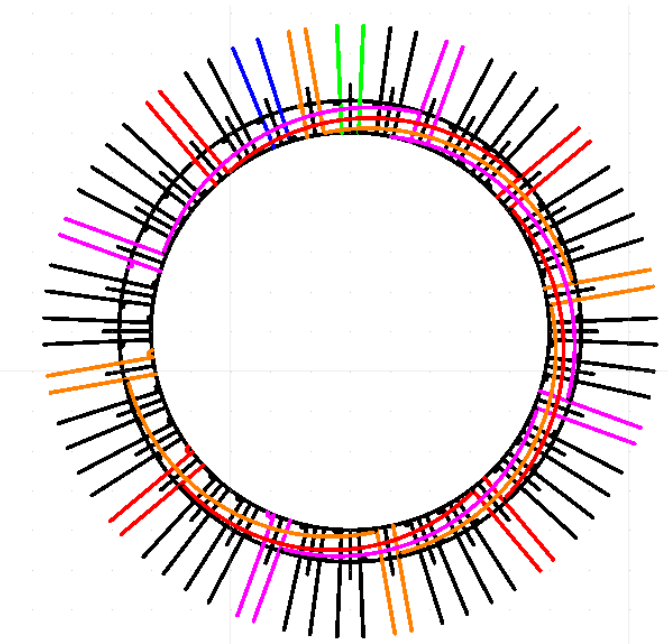


Figura 3.9: Circuito Stampato: Layer 3

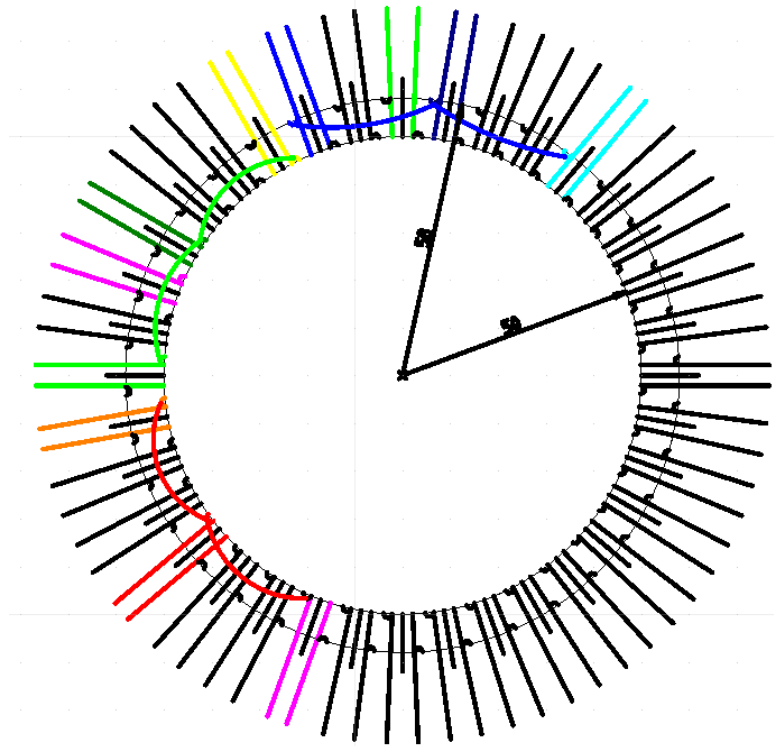


Figura 3.10: Circuito Stampato: Layer 4

Grazie a queste disposizioni i collegamenti risultano pettinati, ovvero privi di incroci e risulta più facile la realizzazione del circuito e i relativi isolamenti.

3.2 Motore di Brandeggio

Il motore di brandeggio è una macchina SPM con nove fasi e dieci paia poli; con diciotto avvolgimenti di statore, due per ciascuna delle nove fasi.

3.2.1 Specifiche Motore

Le nove fasi del motore di brandeggio devono essere disposte come in fig.3.11 perchè si vuole un avvolgimento simmetrico.

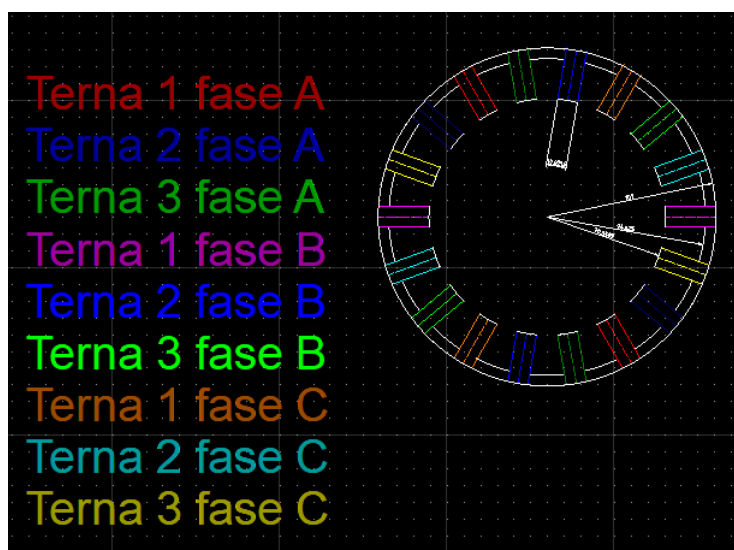


Figura 3.11: Posizione delle Fasi di Brandeggio

Gli avvolgimenti appartenenti alla stessa fase sono disposti a 180° .

Questo risultato si ottiene con l'equazione 3.1.

Le altre specifiche sono già state elencate nella tabella 3.1.

Questa macchina si differenzia dalla prima, in quanto per il brandeggio si ha una coppia nominale $C_{nom} = 20Nm$ e una coppia massima $C_{max} = 21.6Nm$.

3.2.2 Dimensioni Macchina

La macchina di brandeggio è posizionata alla base della struttura a "U", ha quindi più spazio rispetto alla macchina di elevazione e risulta più grande come si può

osservare in fig.3.12.

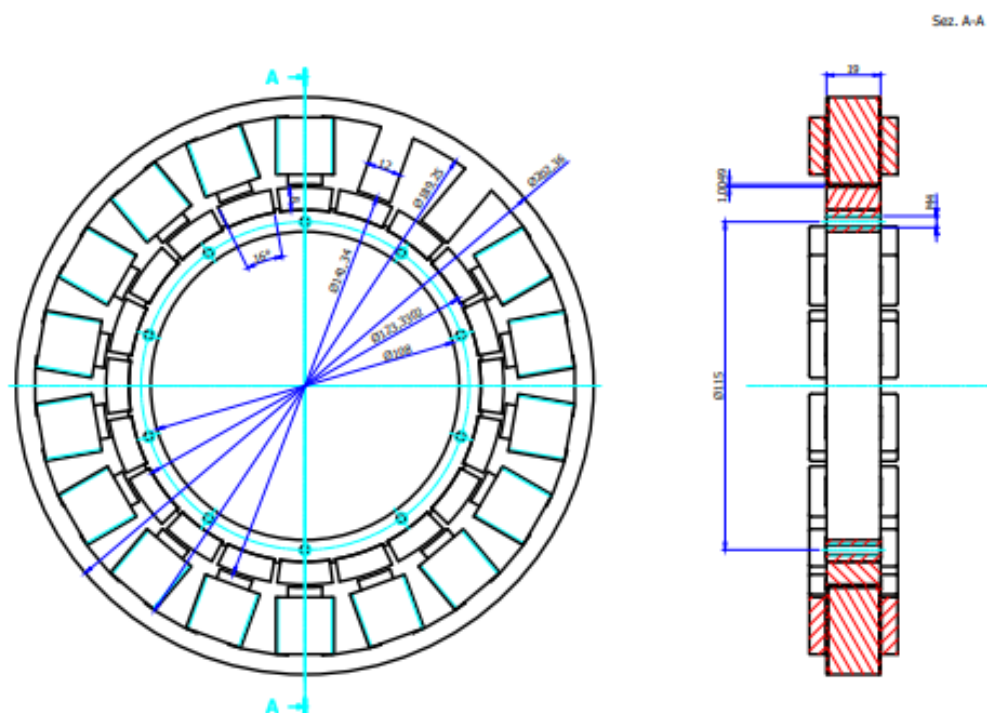


Figura 3.12: Dimensioni Macchina di Brandeggio

L'applicazione di questo motore, visti i fattori di forma della macchina elettrica fa optare per un numero di paia poli pari a dieci, con frequenze della fondamentale basse ($15rpm * 10pp/60 = 2,5Hz$). In queste condizioni risultano trascurabili le perdite nel ferro, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità.

La macchina di brandeggio realizzata presenta una struttura triplo-trifase, che può essere riportata a trifase modificando le connessioni in fase di realizzazione. Per passare alla struttura trifase bisogna collegare le fasi di ciascuna terna tra loro come illustrato in fig.3.13.

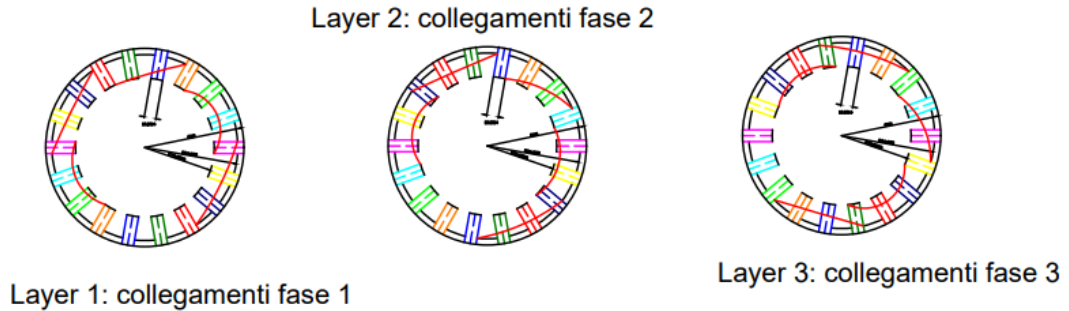


Figura 3.13: Collegamenti per passare a trifase sul motore di brandeggio

Nota per il collegamento degli avvolgimenti: l'avvolgimento della seconda fase di ciascuna terna (vedere fig.3.11) è collegato al contrario rispetto agli avvolgimenti appartenenti alle altre due fasi.

3.2.3 Parti Attive per la Macchina di Brandeggio

Per quanto riguarda gli avvolgimenti di brandeggio, si è optato per delle bobine realizzate con cavo autocementante di diametro $D_n = 0,8mm$, le connessioni tra le bobine sono state realizzate in serie tramite un circuito stampato.

Le bobine in serie per fase sono due: gli avvolgimenti appartenenti alla stessa fase sono posizionati a 180° meccanici gli uni dagli altri. Ogni bobina è realizzata con 7 strati da 25 passate, per un totale di 350 spire in serie.

In questo caso non ci sono problemi di montaggio e la forma della bobina può essere parallelepipeda come mostrato in fig.3.14.

I magneti sono incollati sul rotore e le dimensioni sono riportate in fig.3.16 (in figura è rappresentato solo il nord, ma le dimensioni per il sud sono le medesime).

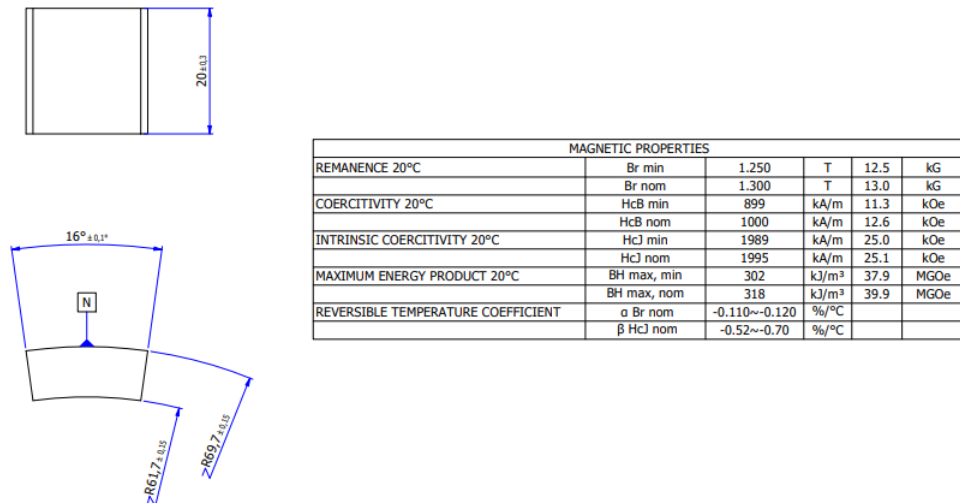


Figura 3.16: Dimensioni Magnete Brandeggio

Inizialmente si è visto, tramite analisi ad elementi finiti, come i magneti con altezza 6 mm tendessero a smagnetizzarsi in condizioni di sovraccarico, quindi si è optato per inspessire i magneti a 8 mm, così da risolvere il problema come si può vedere in fig.3.17.

➤ Smagnetizzazione:

- Bsmag = 0.48T

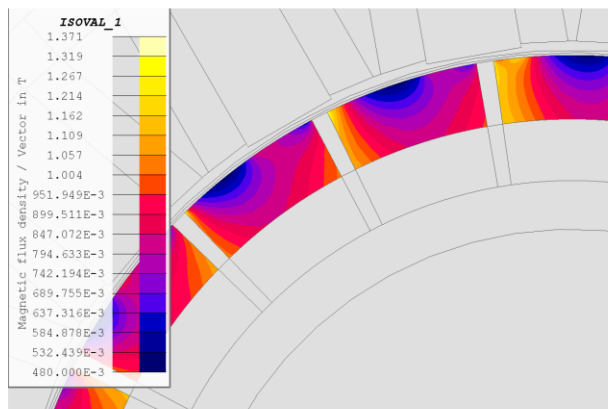


Figura 3.17: Simulazione di Smagnetizzazione per Macchina di Brandeggio

3.2.4 Circuito Stampato

Il circuito stampato su cui avvengono i collegamenti è organizzato in 4 livelli:

- Layer 1: Collegamenti serie della prima terna fig.3.18;
- Layer 2: Collegamenti serie della seconda terna fig.3.19;
- Layer 3: Collegamenti serie della terza terna fig.3.20;
- Layer 4: Centri stella delle tre terne fig.3.21.

Rappresentazione delle disposizioni:

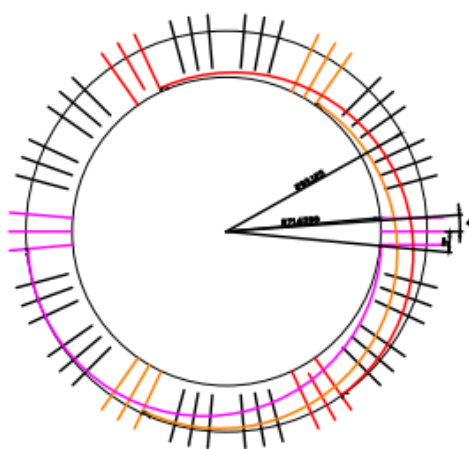


Figura 3.18: Circuito Stampato: Layer 1

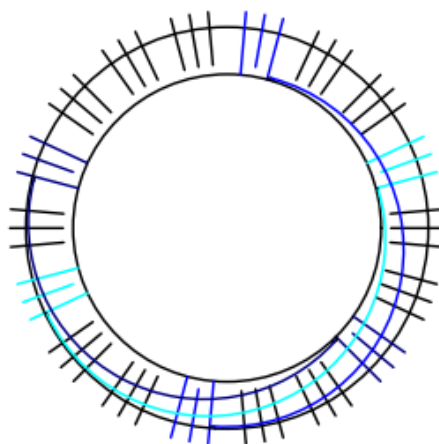


Figura 3.19: Circuito Stampato: Layer 2

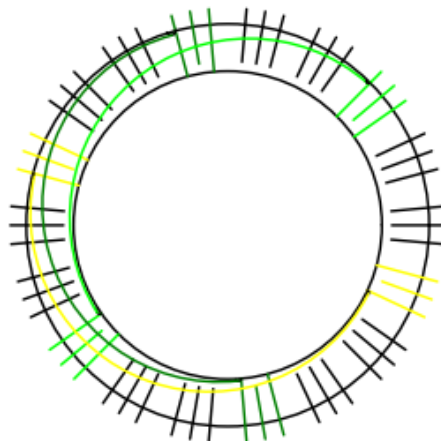


Figura 3.20: Circuito Stampato: Layer 3

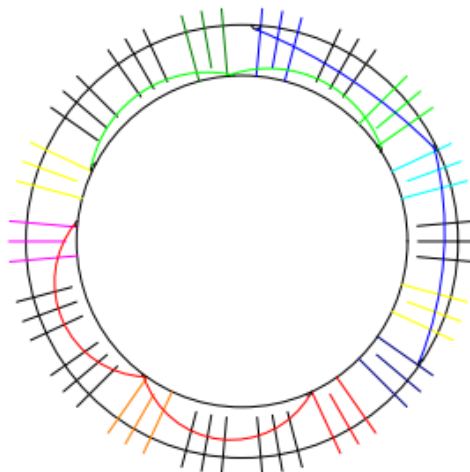


Figura 3.21: Circuito Stampato: Layer 4

Con queste disposizioni i collegamenti risultano pettinati, ovvero privi di incroci e risulta più facile la realizzazione del circuito.

3.3 Schede

Come si è detto nel capitolo 2, le schede per il controllo dei motori sono identiche tranne che per due particolari:

- Il segnale per il freno è presente solo per la scheda di brandeggio;
- Il fondo scala per i segnali di corrente è diverso, dato che le ampiezze differiscono di un ordine di grandezza.

Di seguito la tabella con le caratteristiche di base delle schede.

Dir.I/O	Tipo I/O	Descrizione	Tipologia di Segnale Elettrico	Livello di Segnale	Corrente Massima Applicabile
I/O	SSI	Lettura encoder	RS422		
I/O	SSI	Gyro	RS422		
I/O	RX/TX	Linea di Debug	RS422		
I/O	Ethercat	2 Ethercat	100BASE-TX		
O	9 PWM	Comandi delle 9 fasi del motore	Onda Quadra di Comando	logico 0-1	-
O	1 PWM	Chopper di frenatura	Onda Quadra di Comando	logico 0-1	-
O	Alim	Alimentazione encoder	Tensione	5 Vdc	max 150 mA
O	Alim	Alimentazione Gyro	Tensione	5 Vdc	0,6 A
O	Freno	Freno per Brandeggio	Tensione a Tre Livelli	0-18-24 V	1 A
O	GPIO	2 Uscita Relè	Free Contact	32 Vdc	2 A
I	6 shunt	6 letture di corrente da shunt	Corrente	-	2,5 A
I	Alim	1 Alimentazione scheda	Tensione	18-32 Vdc	-
I	GPIO	2 Ingressi Optoisolati	Tensione	18-32 Vdc	
I	Vdc BUS	Lettura Isolata Tensione	Tensione	0-36 Vdc	

Tabella 3.2: Ingressi e Uscite per la scheda

Nota per freno di Brandeggio: la tensione di 24 V serve per sbloccare il freno, mentre la tensione di 18 V serve per il mantenimento del freno in modo da eseguire

un risparmio energetico sulla bobina dello stesso.

In fig.3.22 vengono riportate le dimensioni di perimetro e di foratura della scheda

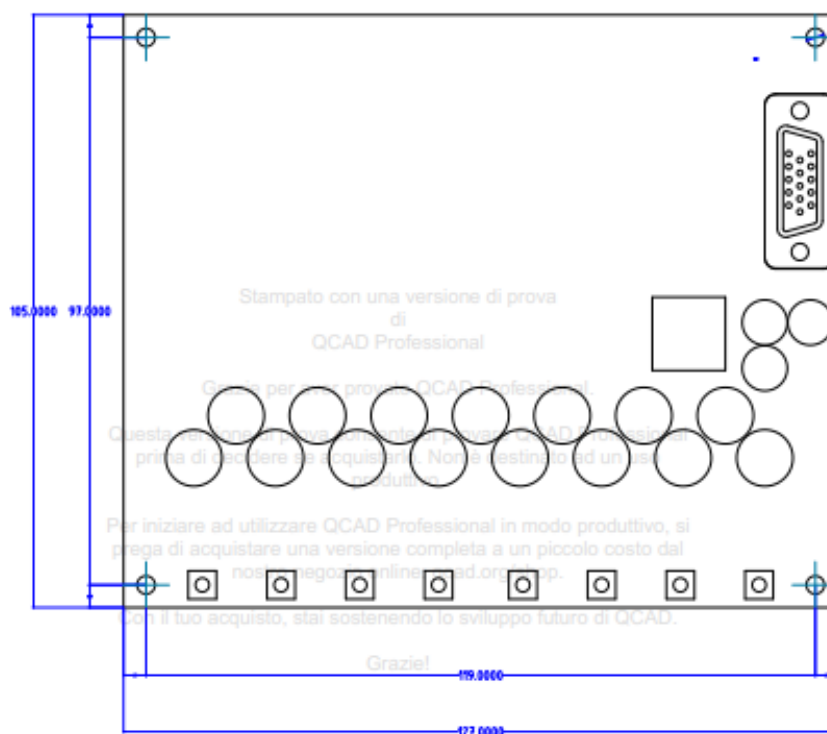


Figura 3.22: Dimensioni scheda

Per quanto riguarda le PWM abbiamo un segnale ad onda quadra generato dal confronto tra la tensione di riferimento e una triangolare. La frequenza di switching è pari a $12kHz$.

Il convertitore scelto: EPC23104, non ha problemi a lavorare a $12kHz$; infatti il suo range di lavoro è da $5kHz$ a $3MHz$ come si può leggere in fig.3.23 [1].

Key Parameters		
PARAMETER	VALUE	UNIT
Power Stage Load Current (1 MHz)	15	A
Pulsed current (25°C, $T_{pulse} = 300 \mu s$)	78	
Operating PWM Frequency (Minimum)	5	kHz
Operating PWM Frequency (Maximum)	3	MHz
Absolute Maximum Input Voltage	100	V
Operating Input Voltage Range	80	
Nominal Bias Supply Voltage	5	

Figura 3.23: Specifiche del Dispositivo GaN

Riguardo l'alimentazione della scheda: la parte di elettronica deve accendersi con una tensione di 12 Vdc e può arrivare al massimo a 33 Vdc, con un range nominale che può variare da 20 a 33 Vdc, in accordo con la norma MIL-STD-1275 Rev.E. Per la parte di potenza della scheda si considera una tensione che può variare tra i 18 e i 32 Vdc.

Bisogna valutare in quale modo alimentare la parte di potenza.

Se tenere la terra collegata alla parte elettronica o meno, se mettere un filtro unico da cui far partire le due alimentazioni o se mettere un filtro per ciascuna delle due parti.

Non è ammessa rigenerazione, quindi si pensa di dover inserire un chopper di frenatura che dovrà intervenire entro 100 ms.

Questo chopper dovrà aver la capacità di assorbire la corrente massima di tutte e tre le terne, quindi almeno $2,5A_{pk} * 3 = 7,5A_{pk}$.

Per le due parti della scheda si considera una capacità che non dovrebbe superare i 250 μF per ciascuna delle due parti (500 μf in totale).

Nel caso in cui si superasse questa capacità sarà necessario un circuito di precarica che tenga conto del caso peggiore: il sistema può assorbire al massimo $13A_{pk}$, quindi per ogni scheda la corrente massima da gestire durante la precarica vale $6,5A_{pk}$.

3.4 Prototipo

Per la realizzazione del prototipo, sono stati ordinati inizialmente i pacchi di lamierini per i due motori e alcune bobine campione per verificare il corretto inserimento di quest'ultime nelle cave statoriche.

Nella realizzazione del primo prototipo sono stati riscontrati alcuni problemi:

- Con il pacco statorico, per il motore di elevazione ci sono stati problemi di estrazione e si è rotto. Si è comunque richiesto di inviare il campione non conforme;
- Con le bobine, per il motore di brandeggio c'è stato un problema di inserimento. Lo spigolo del dente del pacco di statore impedisce l'inserimento delle bobine sul dente.

Di seguito si riportano le foto di quando appena descritto.

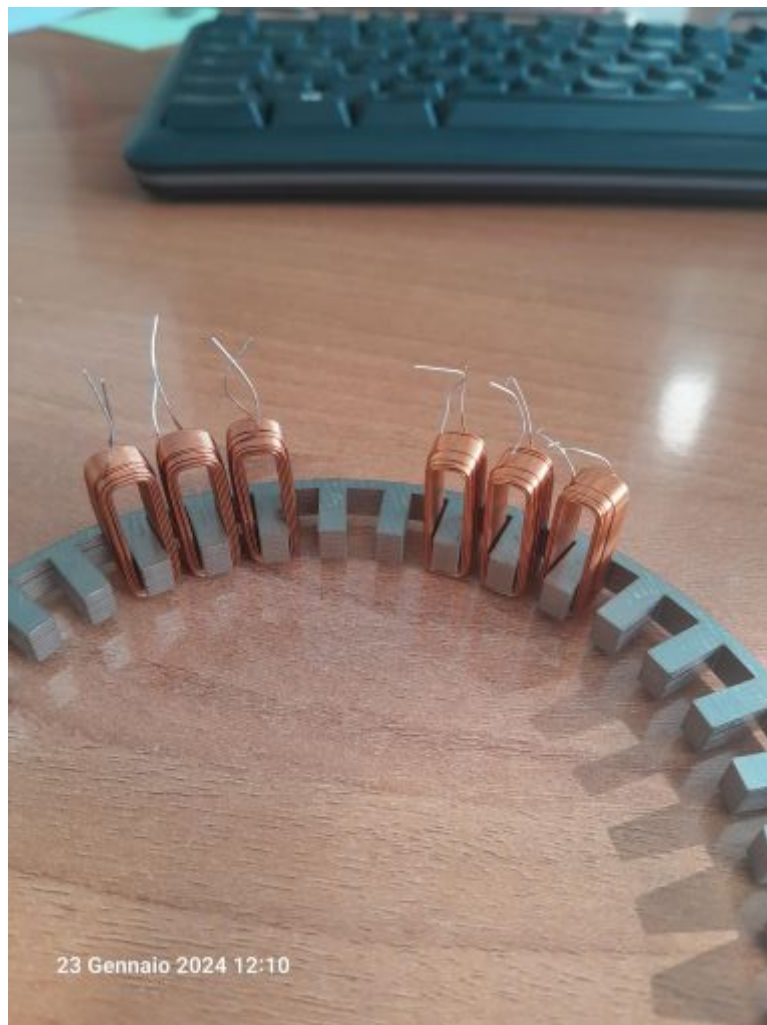


Figura 3.24: Statore di Elevazione Non Conforme

In fig.3.24 si possono osservare le bobine per il motore di elevazione e lo statore non conforme.

Da quello che si vede si può dire che non ci sono problemi di inserimento di bobine adiacenti quindi non ci sono interferenze tra le bobine. Bisognerà verificare l'inserimento nel dente di statore quando arriverà il pacco di statore corretto.

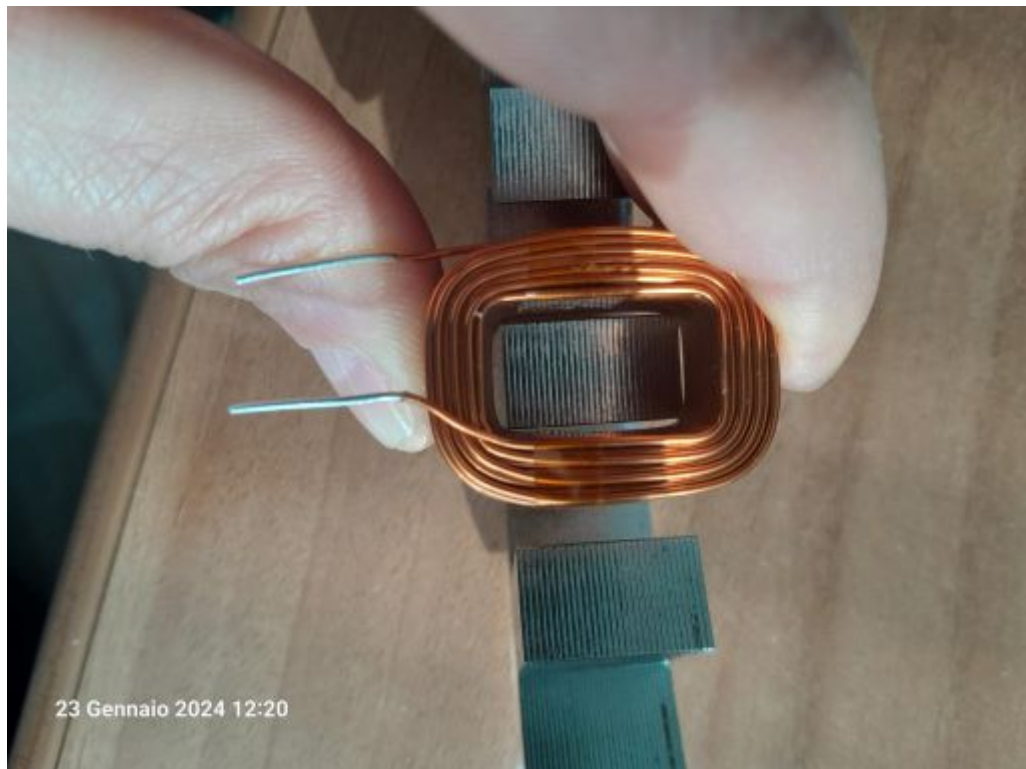


Figura 3.25: Fallito Inserimento delle Bobine di Brandeggio

In fig.3.25 si vede l'interferenza tra lo spigolo del dente e la bobina che ne causa l'impossibilità di inserimento.



Figura 3.26: Valutazione dell'interferenza tra le bobine

Visto il mancato inserimento delle bobine si è voluto valutare quale dimensione cambiare per risolvere il problema.

Facendo riferimento a fig.3.26, si è concluso che conviene allungare il lato lungo delle bobine. Allungando il lato corto si potrebbe rischiare che l'inserimento di bobine adiacenti venga impedito a causa dell'interferenza tra le bobine stesse.

Mantenendo invariata la dimensione minore della bobina non si hanno problemi di inserimento, inoltre, per come è strutturato il sistema, non è un problema allungare il lato maggiore della bobina. Lungo quella direzione c'è spazio per allungare il motore.

I problemi sopra descritti sono stati in seguito risolti e si è potuto procedere con la realizzazione del prototipo.

Di seguito si riportano le immagini del risultato ottenuto.

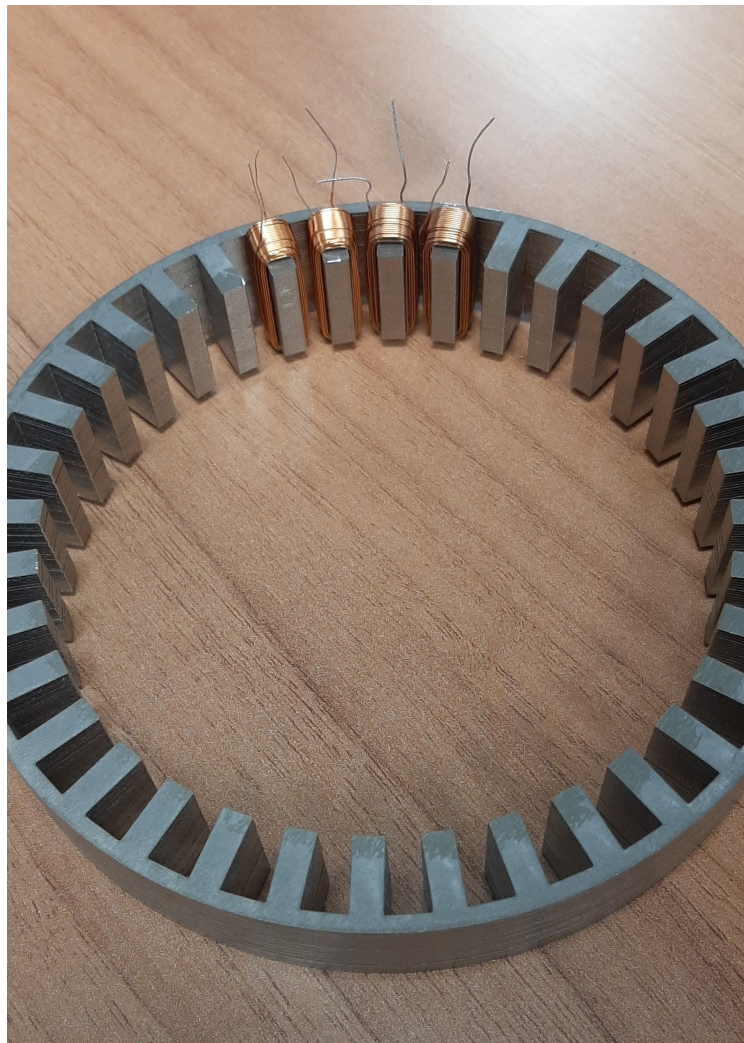


Figura 3.27: Prototipo per la macchina di elevazione

In fig.3.27 si può vedere la realizzazione dello statore per la macchina di elevazione. In questo caso sono stati risolti i problemi di estrazione e il pacco statorico è stato realizzato correttamente. Le bobine sono state inserite correttamente, non ci sono stati problemi di interferenza né tra bobina e dente, né tra bobine adiacenti.



Figura 3.28: Prototipo per la macchina di Brandeggio

In fig.3.28 si può vedere la realizzazione dello statore per la macchina di brandeggio, con il corretto inserimento delle bobine. In questo caso è stato risolto il problema dell'inserimento delle bobine nel dente aumentando leggermente le dimensioni delle bobine stesse. L'inserimento delle bobine ora è corretto e non ci sono problemi di interferenza né tra bobina e dente, né tra bobine adiacenti.

Per quanto riguarda i collegamenti degli avvolgimenti si è progettato il circuito stampato partendo dagli schemi presentati in precedenza.

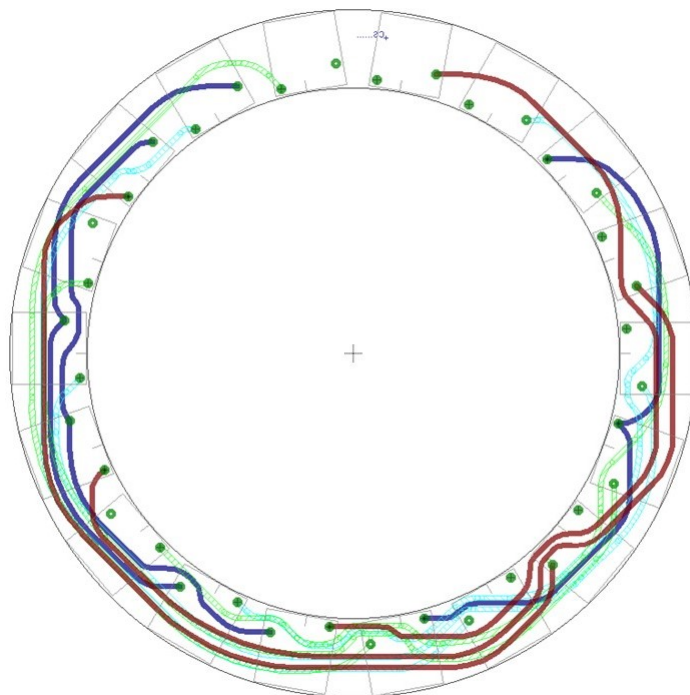


Figura 3.29: Disegno del Circuito Stampato per il Motore di Brandeggio

Nella figura 3.29, viene presentato il layout del circuito stampato, progettato per connettere in serie gli avvolgimenti statorici della macchina di brandeggio. Le piste, appartenenti a livelli distinti, sono contraddistinte da colori differenti. In particolare, le tracce rosse, appartenenti al primo layer, fungono da collegamento tra gli avvolgimenti della prima terna. Le piste verdi, invece, rientrano nel secondo layer e collegano gli avvolgimenti della seconda terna. Le tracce azzurre appartengono al terzo layer, con la funzione di connettere gli avvolgimenti della terza terna, mentre le piste blu scuro, appartenenti al quarto layer, sono destinate a formare i centri stella delle tre terne.

I nove collegamenti di uscita per l'alimentazione del motore saranno realizzati saldando i conduttori in corrispondenza dei terminali delle bobine interessate.

Capitolo 4

MODELLO Plecs

Le schede per le due macchine sono uguali tra loro e sono equivalenti a tre inverter trifase. Ciascuno di questi lavora su una terna di una macchina, dato che i motori vengono visti come tre motori trifase indipendenti.

I convertitori sono composti da nove dispositivi GaN: EPC23104 (fig.4.1), che comprendono sia lo switch superiore che lo switch inferiore di un ramo del convertitore nello stesso case.

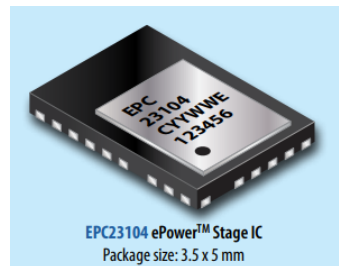


Figura 4.1: EPC23104

Per quanto riguarda il modello dei motori si è deciso di approssimarli con dei sistemi RLE, ovvero un circuito che comprende una resistenza, un'induttanza e un generatore di forza elettromotrice.

4.1 Descrizione Modello

Il modello illustrato in fig.4.2, creato utilizzando Plecs [2], consente di simulare una scheda di controllo associata a un motore. L'aspetto chiave dello schema della

scheda è la presenza di nove rami, ognuno dei quali è rappresentato da interruttori controllati mediante un segnale PWM.

La sezione dedicata al motore adotta un approccio di approssimazione mediante circuiti RLE, in cui ciascun circuito è collegato a uno specifico ramo dell'inverter. Questa rappresentazione permette di modellare il comportamento dinamico del motore e di considerare le caratteristiche di resistenza e induttanza.

Inoltre, sono inclusi parametri di linea essenziali per simulare le perdite dovute ai collegamenti tra le fasi del motore tramite circuito stampato e alle componenti delle schede. Questi parametri influenzano le prestazioni complessive del sistema, consentendo di valutare l'efficienza e l'accuratezza della simulazione. Questa configurazione fornisce un quadro completo per l'analisi delle interazioni tra la scheda di controllo, l'inverter, il motore e i collegamenti di linea. È fondamentale considerare attentamente i parametri e le caratteristiche del modello per ottenere risultati simulativi accurati e rappresentativi del comportamento del sistema nel mondo reale.

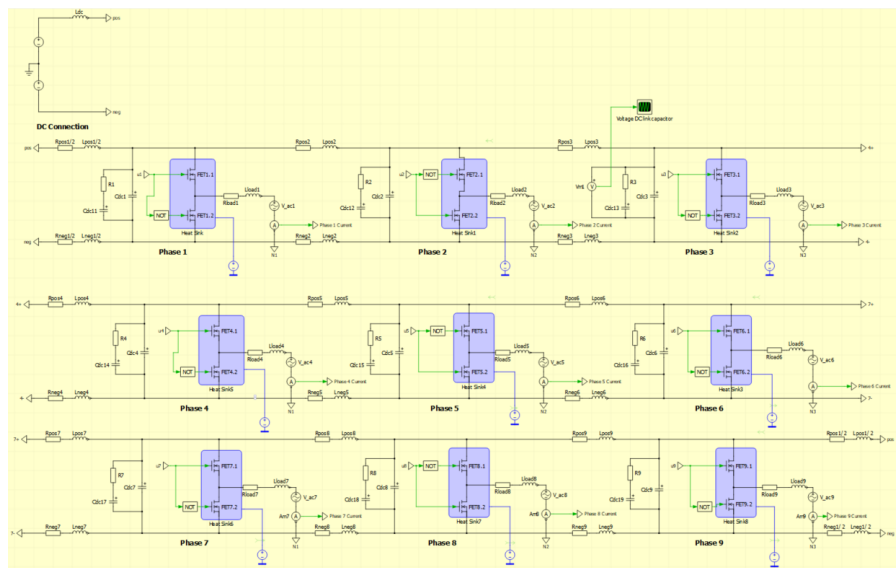


Figura 4.2: Schema Inverter

Tramite questo modello è possibile simulare il funzionamento di una scheda e di un motore, sia a regime che in dinamica, per passare da un funzionamento all'altro basta modificare lo schema di controllo. Il controllo, in ciascuno dei due casi, verrà presentato in seguito.

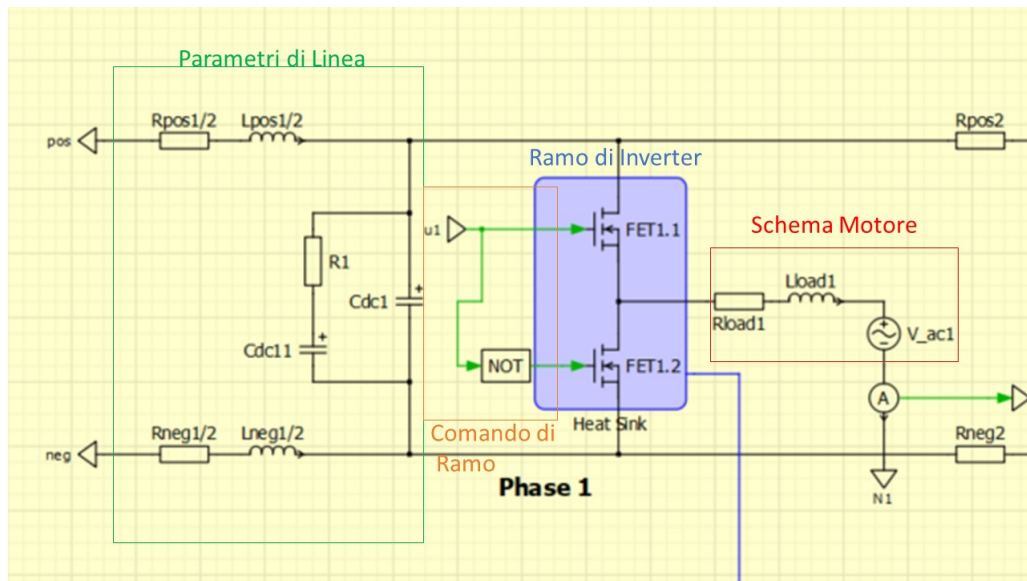


Figura 4.3: Dettaglio su una fase dello schema presentato in fig.4.2

In fig.4.3 è presentato il dettaglio su una delle nove fasi:

- Nel riquadro verde sono evidenziati i parametri della linea che collega ciascuna fase;
- Nel riquadro arancione sono evidenziati i comandi di un ramo;
- Nel riquadro azzurro sono evidenziati i dispositivi GaN;
- Nel riquadro rosso sono evidenziati i parametri del motore.

Questo modello è uguale per entrambe le macchine e, per passare da una simulazione all'altra, vengono modificati solo alcuni parametri che dipendono dalle differenze fra le due macchine:

- Coppia di picco: $T_{pk} = 3,2Nm$ per Elevazione e $T_{pk} = 20Nm$ per Brandeggio;
- Corrente di picco: $I_{pk} = 0,28A_{pk}$ per Elevazione e $I_{pk} = 2,22A_{pk}$ per Brandeggio;
- Resistenza di Carico: $R_{load} = 4,44\Omega$ per Elevazione e $R_{load} = 1,14\Omega$ per Brandeggio;
- Induttanza di carico: $L_{load} = 110mH$ per Elevazione e $L_{load} = 24mH$ per Brandeggio.

Questi valori sono i risultati di una simulazione agli elementi finiti. Tale simulazione è stata fatta inizialmente ed è stata impiegata per il confronto del comportamento delle macchine con la simulazione in Plecs. Questo confronto sarà trattato nei capitoli successivi.

Le tre terne sono suddivise verticalmente, quindi avremo le tre fasi della prima terna che corrispondono ai numeri 1,4 e 7. Le tre fasi della seconda terna che corrispondono ai numeri 2,5, e 8 ed infine le tre fasi della terza terna che corrispondono ai numeri 3,6 e 9.

Si è deciso di simulare un controllo di coppia con il seguente schema:

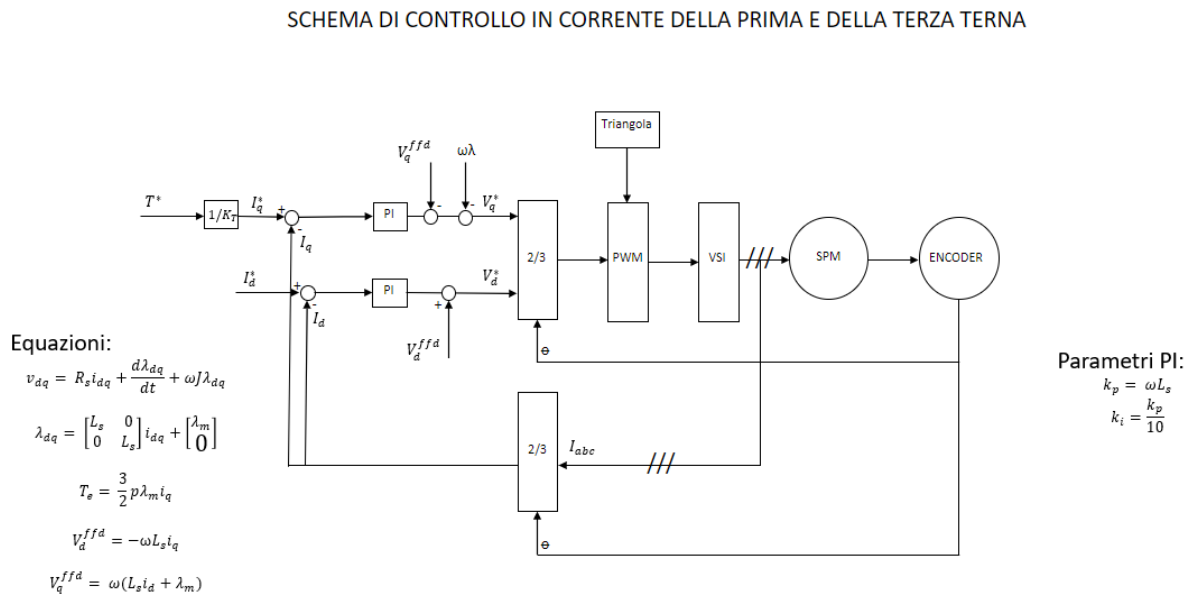


Figura 4.4: Schema a blocchi per il controllo della prima e della terza terna

- v_d e v_q sono le tensioni di statore calcolate nel sistema bifase sincrono in assi (d,q);
- i_d e i_q sono le correnti di statore calcolate nel sistema bifase sincrono in assi (d,q);
- λ_d e λ_q sono i flussi generati dagli avvolgimenti calcolati nel sistema bifase sincrono in assi (d,q);
- λ_{mp} è il flusso di rotore generato dai magneti permanenti;
- pp è il paiapoli;
- T_e è la coppia elettromagnetica generata dal motore.

Lo schema di controllo appena presentato viene tradotto in Plecs come in fig.4.6

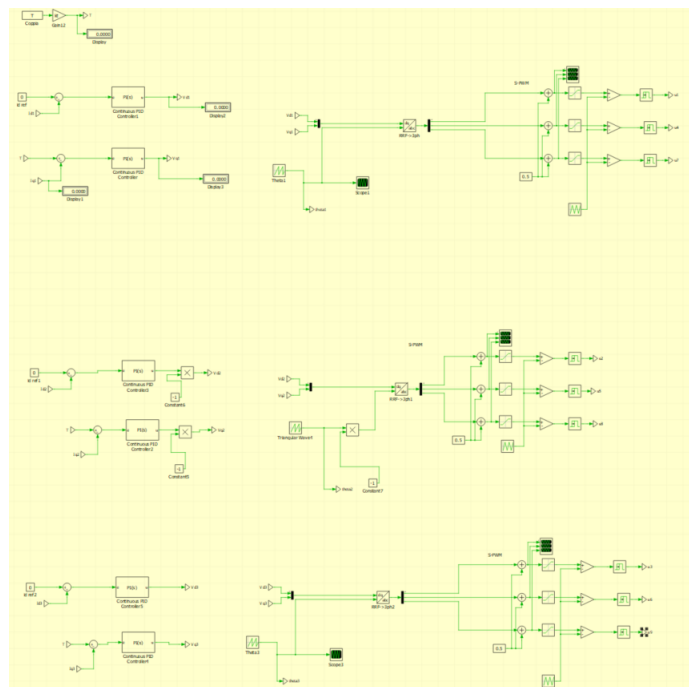


Figura 4.6: Controllo di coppia in Plecs

Di seguito, nelle figure fig.4.7 e fig.4.8, si mostra un ingrandimento dello schema appena presentato in fig.4.6. In particolare si prende in considerazione la generazione della PWM della prima terna.

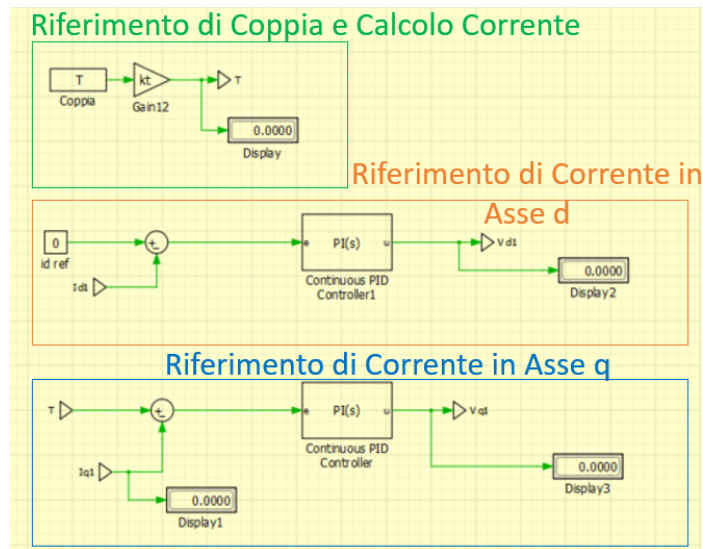


Figura 4.7: Riferimenti per generare la PWM

In fig.4.7 sono rappresentati:

- Nel riquadro verde: Il riferimento di coppia e il calcolo della corrente come rapporto tra a coppia T e il coefficiente $K_r = 3/2 \cdot pp\lambda_{mp}$;
- Nel riquadro arancione: Il riferimento di corrente in asse d, che deve essere nullo, dato che questa componente non è utile alla generazione di coppia, e il calcolo per il corrispettivo riferimento di tensione;
- Nel riquadro blu: Il riferimento di corrente in asse q, che serve per la generazione di coppia, e il calcolo per il corrispettivo riferimento di tensione.

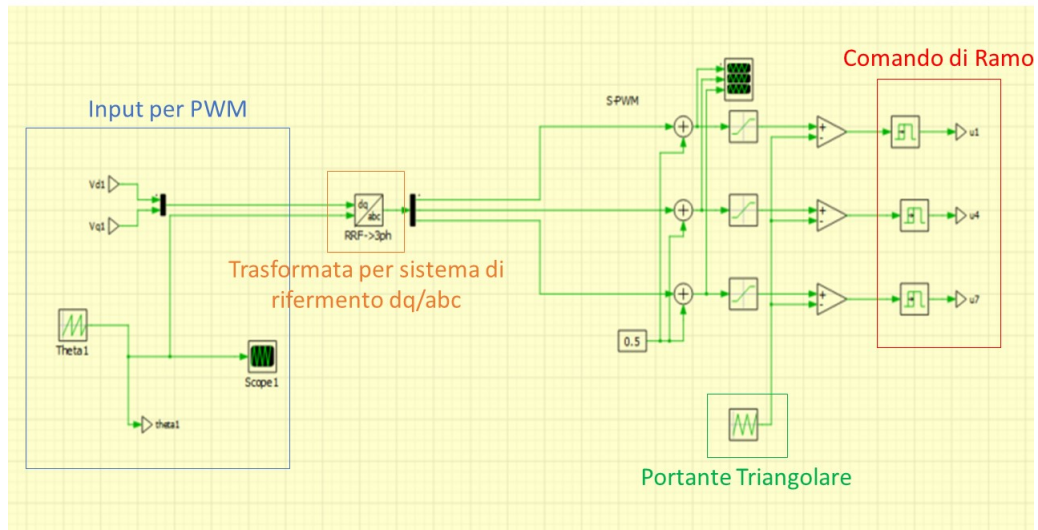


Figura 4.8: Ingrandimento sullo Schema di Controllo

In fig.4.8 si vede come dai riferimenti di tensione in assi d,q si arriva al comando del ramo di inverter. Per ogni ramo si genera un comando unico che viene sdoppiato di seguito, come si vede nello schema raffigurato in fig.4.3 dove si può notare il blocco "NOT".

In particolare in fig.4.8 si posso distinguere:

- Nel riquadro blu: le tensioni in assi dq e il riferimento di posizione Θ_1 ;
- Nel riquadro arancione: la trasformata per il passaggio dal riferimento in assi dq ad assi 1,2,3;
- Nel riquadro verde: la portante triangolare, che serve come confronto con le tensioni sugli assi 1,2,3 in per unit;
- nel riquadro rosso: Il comando del ramo in uscita.

Il riferimento di posizione Θ varia all'interno di ciascuna delle tre terne. Affinché le nove correnti siano correttamente sfasate l'una rispetto all'altra, è necessario che la prima fase di ciascuna terna sia sfasata rispetto alla prima fase delle altre due. In particolare, la prima fase della prima terna è considerata il riferimento. La prima fase della seconda terna, invece, è sfasata di 40° ; tuttavia, a questi 40° va aggiunto un ulteriore scostamento di 180° , poiché la seconda terna segue un riferimento che si muove nella direzione opposta alle altre due. Infine, la prima fase della terza terna è sfasata di 80° rispetto alla prima fase della prima terna.

In questo modo, le correnti appartenenti alla stessa terna sono sfasate tra loro di 120° e sono sfasate di 40° con le correnti corrispondenti appartenenti alle altre due terne.

In fig.4.2, è possibile inoltre notare che si sono valutate le prestazioni termiche dei dispositivi GaN.

Per quanto riguarda l'osservazione dei risultati sono stati inseriti degli scope: uno per ciascuna terna, più uno per la rappresentazione di tutte e nove le correnti, come mostrato in fig.4.9

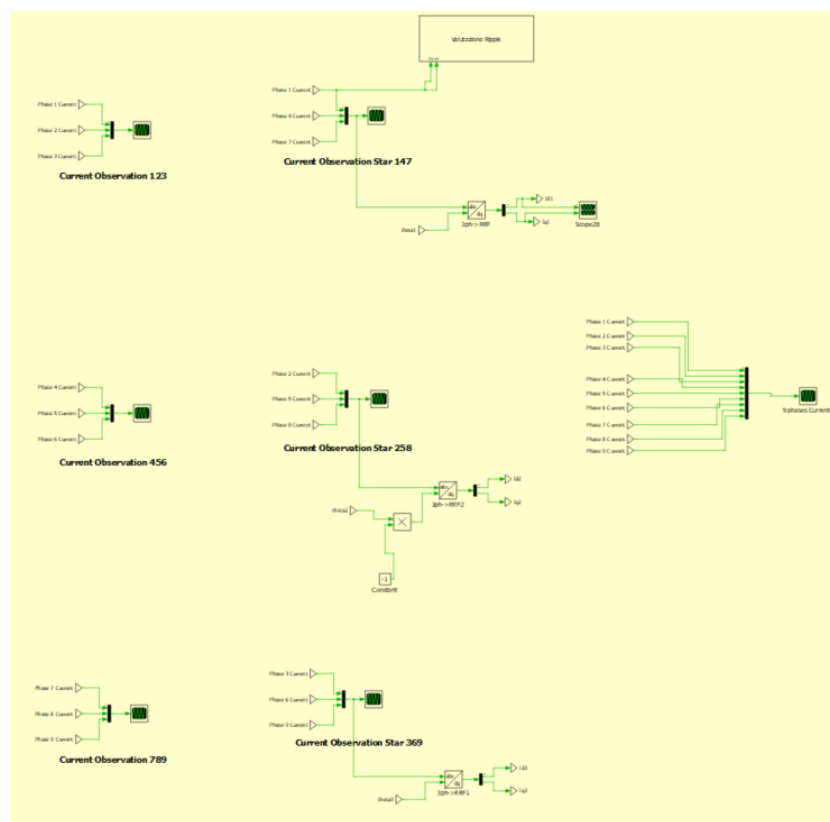


Figura 4.9: Schema per la Valutazione delle Correnti

In conclusione, sulla prima fase della prima terna, si calcola il ripple. Quest'ultimo viene calcolato come mostrato in fig.4.10, ovvero la differenza tra la corrente simulata e una sinusoide con stessa ampiezza.

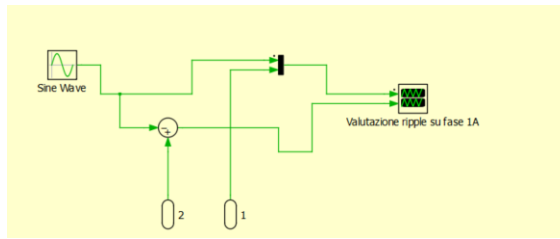
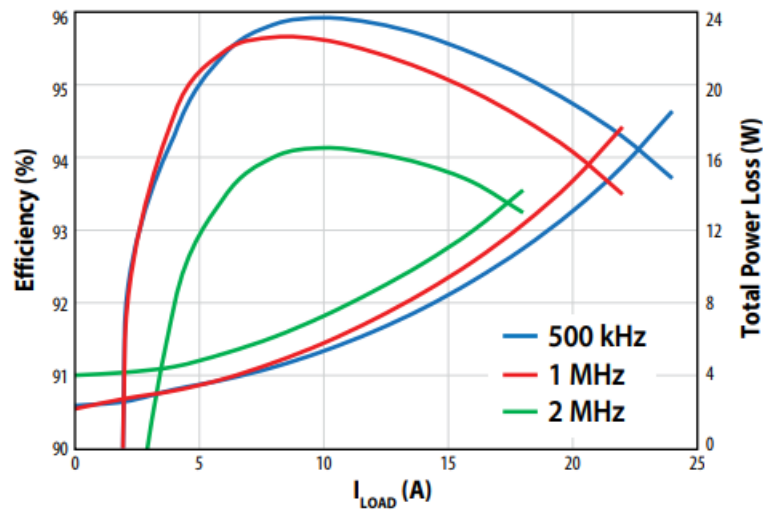


Figura 4.10: Schema per il Calcolo del Ripple

Nello scope dedicato al ripple vengono rappresentati il ripple e il confronto tra le due sinusoidi: la corrente e il seno generato dal blocco apposito.

Il modello presentato è comprensivo anche della parte termica. In fig.4.3 il riquadro azzurro è uno scambiatore di calore che serve a simulare il raffreddamento del singolo convertitore.

Oltre allo scambiatore, per ogni dispositivo, è stato inserito un valore di resistenza termica $R_{th} = 27\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ e lo schema delle perdite fornito dal datasheet [1] e riportato in fig.4.11.



Buck Converter, $V_{IN} = 48\text{ V}$, $V_{OUT} = 12\text{ V}$, Deadtime = 10 ns, $L = 2.2\text{ }\mu\text{H}$, $\text{DCR} = 700\text{ }\mu\Omega$, Top Side Heatsink attached, Airflow = 400 LFM, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, using **EPC90152 Evaluation Board**.

Figura 4.11: Grafico delle perdite del Dispositivo GaN

4.2 Risultati Simulazione

4.2.1 Analisi Termica

Per quanto riguarda i risultati della simulazione delle prestazioni termiche, si è ottenuto quanto segue: i componenti elettronici non si surriscaldano, dato che le perdite legate alle correnti limitate ($0,28A_{pk}$ per Elevazione e $2,22A_{pk}$ per Brandeggio).

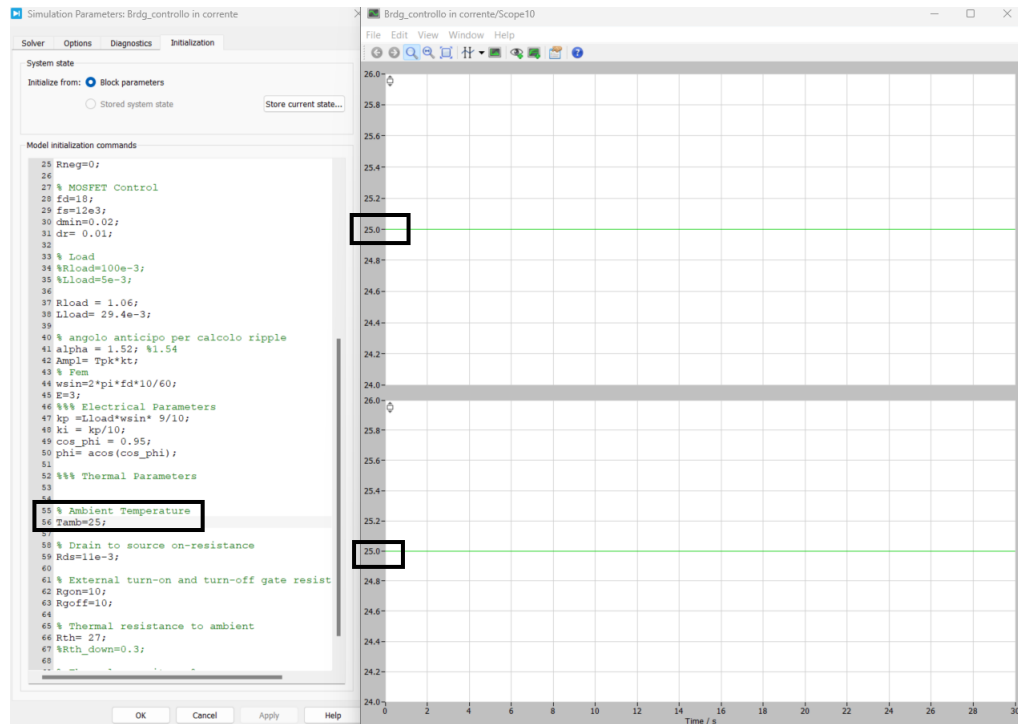


Figura 4.12: Andamento della Temperatura

In fig.4.12 è evidenziato come gli switch rimangano alla temperatura ambiente impostata. Possiamo quindi concludere che l'analisi termica porta a risultati poco significativi.

4.2.2 Analisi Elettrica

In questo paragrafo si analizza il comportamento delle correnti a regime di funzionamento.

Per questo tipo di analisi si sono fatte diverse prove.

Si è deciso di presentare i risultati più rilevanti e interessanti ai fini della progettazione delle due macchine.

Per entrambe le macchine sono state fatte le prove a coppia massima ed in aggiunta, per verificare che il controllo di coppia e il modello fossero corretti, si è fatta un'altra prova per ciascun motore con una coppia differente: si è fatta una prova con coppia termica $T_t = T_{max}/3$.

4.2.3 Risultati Analisi per Elevazione

Di seguito, vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni in regime di funzionamento del motore di elevazione. Inizialmente, vengono mostrate le correnti risultanti per una richiesta di coppia nominale, insieme al corrispondente ripple di corrente. Successivamente, sono riportate le variazioni di corrente per una richiesta di coppia ridotta.

Nella prima sezione, le correnti rilevate durante la richiesta di coppia nominale forniscono una panoramica del comportamento del motore in condizioni di carico nominale. La presenza di un ripple di corrente può essere osservata ed analizzata per comprendere la stabilità e l'efficienza del sistema.

Nella seconda sezione, esploriamo il comportamento del motore in risposta a una richiesta di coppia ridotta. Questo scenario può essere cruciale per valutare le prestazioni del motore in condizioni di carico inferiore e può essere determinante per le applicazioni in cui sia richiesta una precisione di controllo anche a basse richieste di coppia.

L'analisi dettagliata di questi andamenti di corrente fornisce informazioni cruciali per ottimizzare il design e il controllo del motore di elevazione, garantendo prestazioni affidabili e efficienti in una gamma diversificata di scenari operativi.

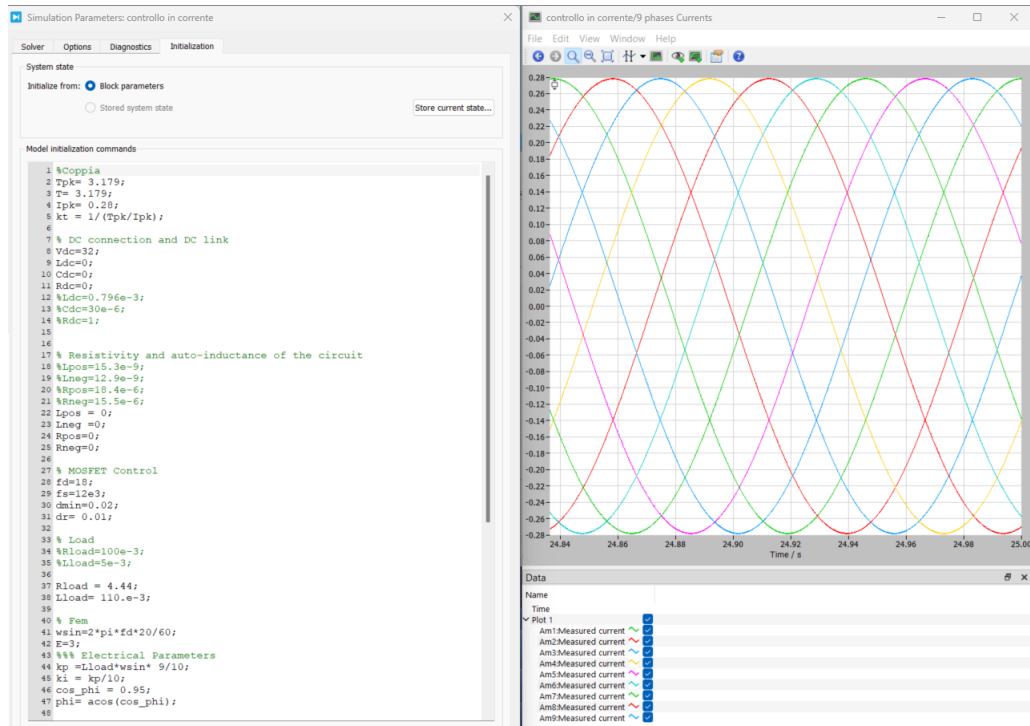


Figura 4.13: Correnti nella Macchina di Elevazione per T_{max}

In fig. 4.13 si possono vedere le correnti statoriche della macchine di elevazione. È possibile notare che la forma d'onda è sinusoidale con un'ampiezza di $0,28A_{pk}$ e un periodo di $0,15s$. A questa sinusoide si somma un leggero ripple che è stato valutato sulla fase 1 della prima terna, come descritto in fig.4.10.

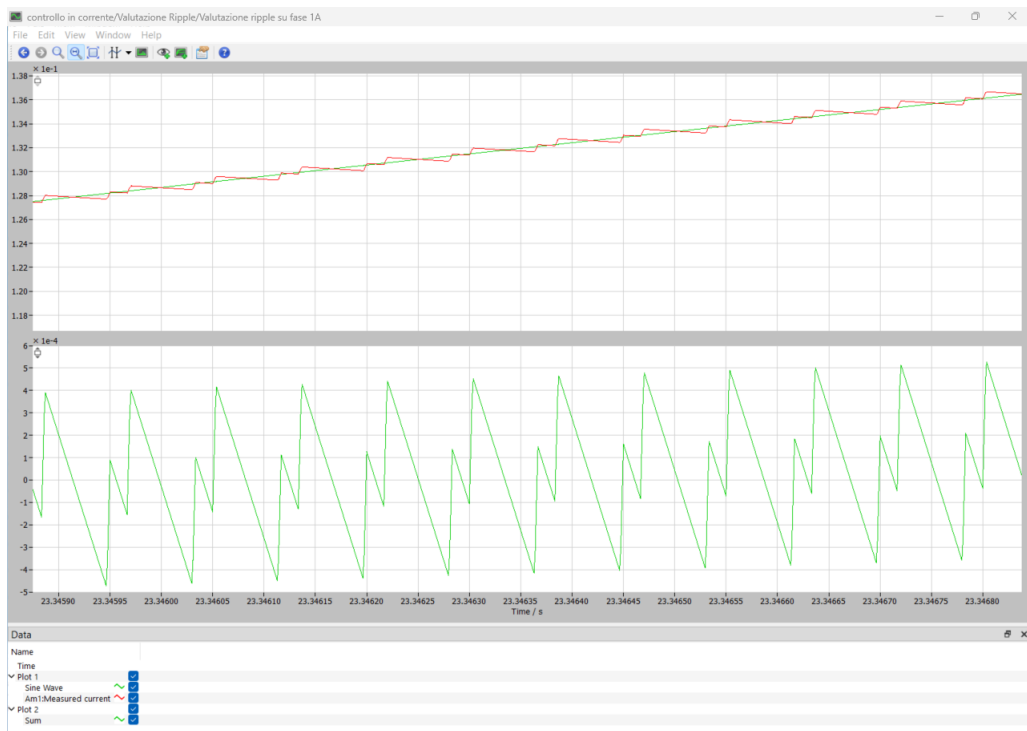


Figura 4.14: Ripple di Corrente per la Macchina di Elevazione

In fig.4.14 si può vedere la forma del ripple che risulta abbastanza limitato e che corrisponde allo 0,15% del valore di corrente di picco.

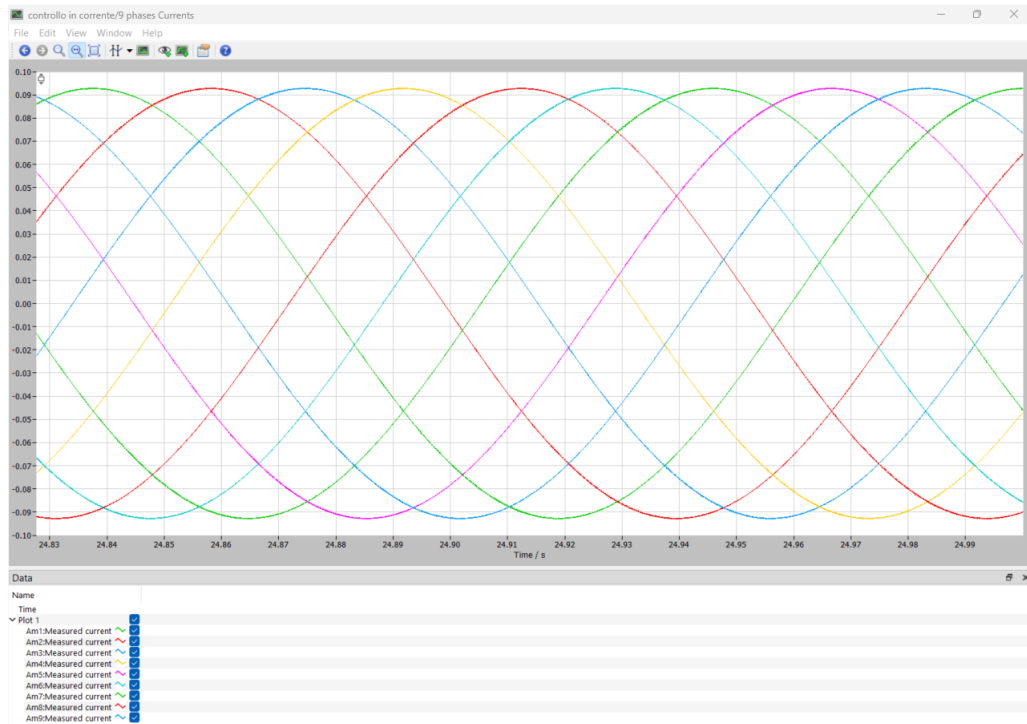


Figura 4.15: Correnti nella Macchina di Elevazione per $T_t = T_{max}/3$

In fig.4.15 sono rappresentate le correnti, entranti nella macchina di elevazione, nel caso in cui la coppia sia uguale alla coppia termica, ovvero un terzo di $T_{max} = 3,2Nm$.

In questo caso, si vede come la forma d'onda della corrente sia sempre la stessa, ma cambi l'ampiezza della corrente, che diminuisce: scende da $0,28A_{pk}$ dovuti alla coppia massima, a circa $0,09A_{pk}$.

4.2.4 Risultati Analisi per Brandeggio

Di seguito, vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni in regime di funzionamento del motore di brandeggio. Inizialmente, vengono mostrate le correnti risultanti per una richiesta di coppia nominale, insieme al corrispondente ripple di corrente. Successivamente, sono riportate le variazioni di corrente per una richiesta di coppia ridotta.

Nella prima sezione, le correnti rilevate durante la richiesta di coppia nominale forniscono una panoramica del comportamento del motore in condizioni di carico massimo. La presenza di un ripple di corrente può essere osservata ed analizzata

per comprendere la stabilità e l'efficienza del sistema.

Nella seconda sezione, esploriamo il comportamento del motore in risposta a una richiesta di coppia ridotta. Questo scenario può essere cruciale per valutare le prestazioni del motore in condizioni di carico inferiore e può essere determinante per le applicazioni in cui sia richiesta una precisione di controllo anche a basse richieste di coppia.

L'analisi dettagliata di questi andamenti di corrente fornisce informazioni cruciali per ottimizzare il design e il controllo del motore di brandeggio, garantendo prestazioni affidabili e efficienti in una gamma diversificata di scenari operativi.

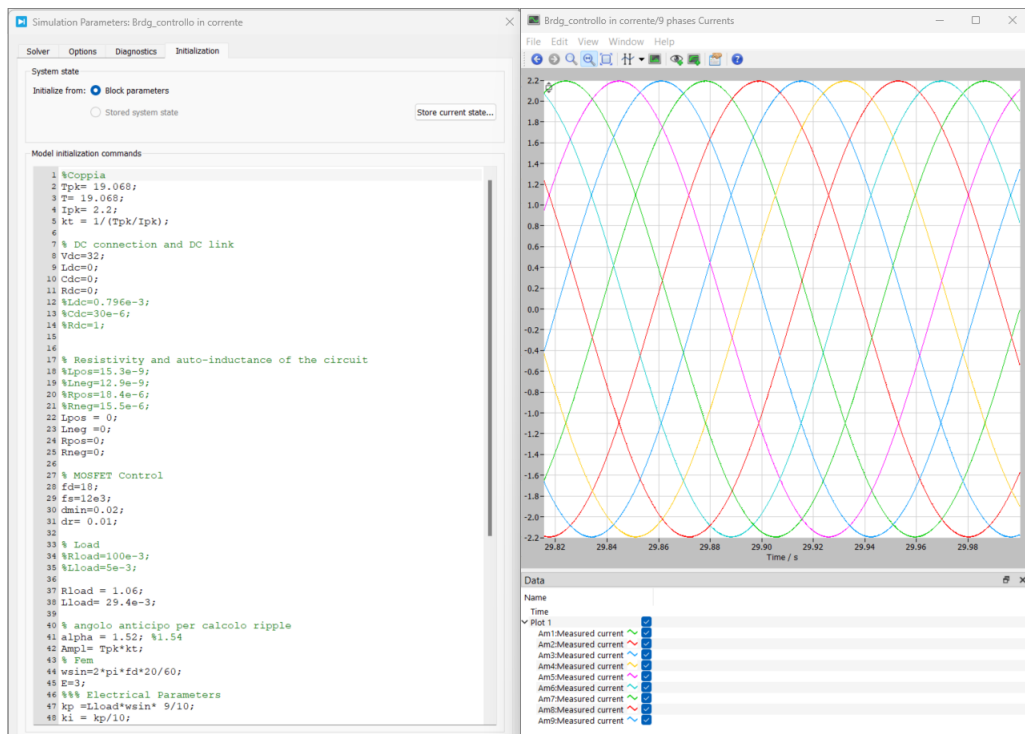


Figura 4.16: Correnti nella Macchina di Brandeggio per T_{max}

In fig.4.16 si possono vedere le nove correnti statoriche della macchina di brandeggio. È da notare che la forma d'onda è sinusoidale, con un'ampiezza di $2,2A_{pk}$ e un periodo di $0,15s$. A questa sinusoide si somma poi un leggero ripple, che è stato valutato in modo analogo a quello di elevazione e in fig.4.17 si può notare che il ripple è limitato.

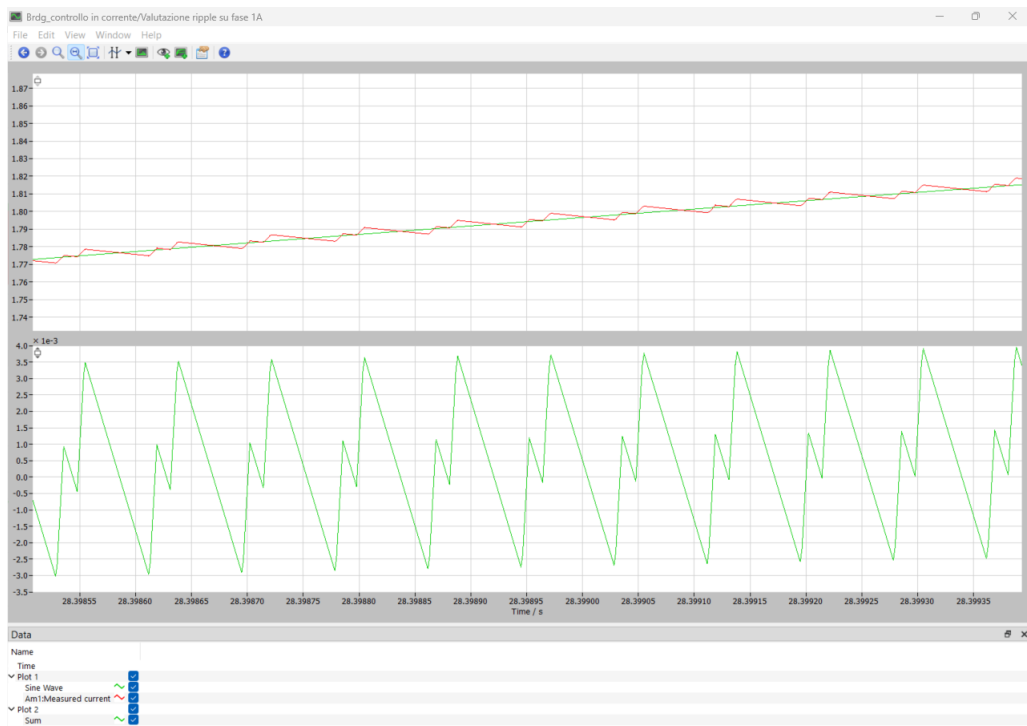


Figura 4.17: Ripple di Corrente per la Macchina di Brandeggio

In fig.4.17 si può vedere la forma del ripple che è abbastanza limitato e che corrisponde allo 0,15% del valore di corrente di picco.

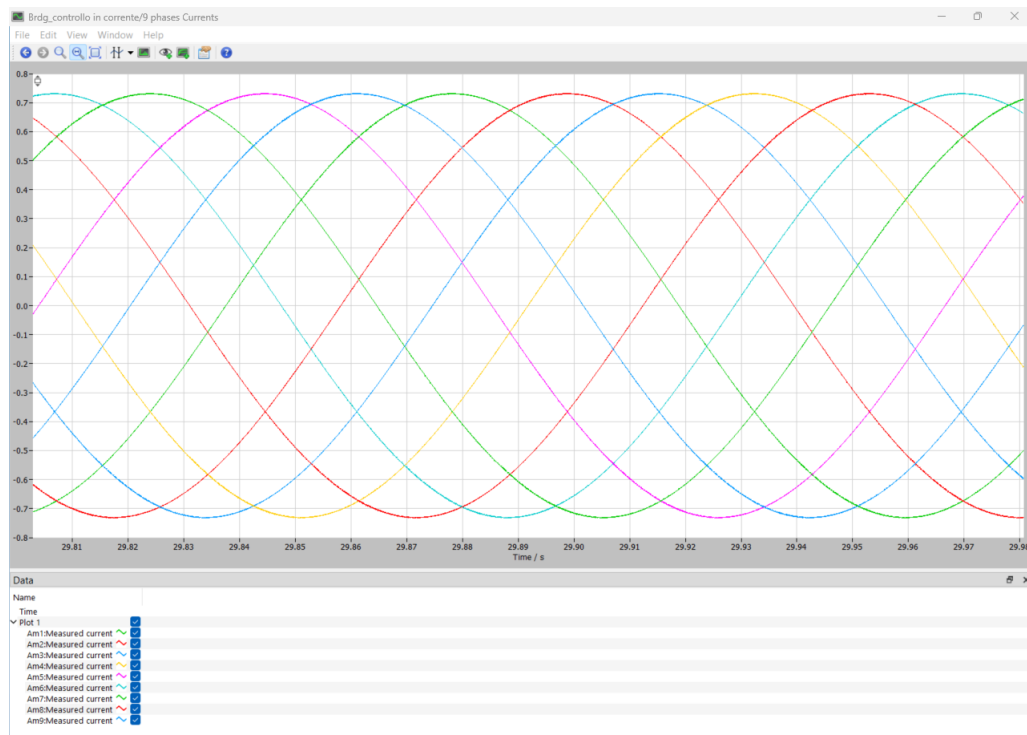


Figura 4.18: Correnti nella Macchina di Brandeggio per $T_t = T_{max}/3$

In fig.4.18 sono rappresentate le correnti, entranti nella macchina di brandeggio nel caso in cui la coppia sia uguale alla coppia termica, ovvero un terzo della T_{max} , $T_t = 20/3Nm$.

In questo caso si vede come la forma d'onda della corrente sia sempre la stessa, ma cambia l'ampiezza: l'ampiezza della corrente diminuisce: scende da $2,22A_{pk}$ dovuti alla coppia massima, a circa $0,7A_{pk}$.

4.3 Confronto con Risultati FEM

Prima di questa simulazione Plecs erano stati forniti dei primi risultati ottenuti con una simulazione ad elementi finiti eseguita tramite il programma Flux di Altair [3].

Di seguito si riportano i primi risultati come confronto con ciò che è stato ottenuto tramite Plecs.

➤ Condizioni di simulazione: CARICO @ 130°C

- Macchina completa 2D
- $B_r = 1.085T$
- $\theta = 130^\circ C$
- $n = 18 \text{ rpm}$
- $I_{ph} = 0.28 A_{pk}$

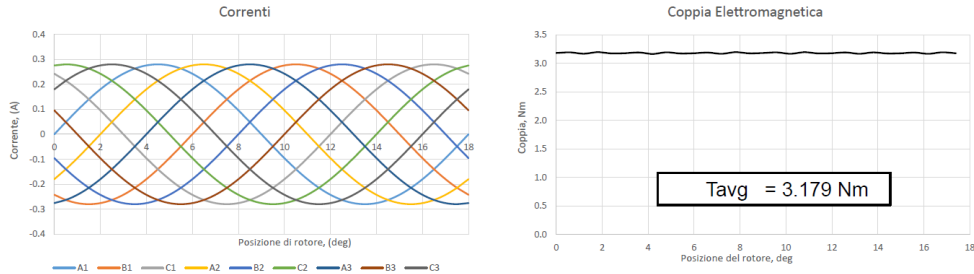


Figura 4.19: Correnti e Coppia per Elevazione in FEM

In fig.4.19 sono riportate le correnti per coppia massima del motore di elevazione. È da notare come i risultati presentati sono molto simili a ciò che è stato simulato e raffigurato in fig.4.13.

La coppia è praticamente costante, ma risente del leggero ripple che è pari a 0,3% sul valore di picco di coppia.

➤ Condizioni di simulazione: CARICO @ 130°C

- Macchina completa 2D
- $B_r = 1.085T$
- $\theta = 130^\circ C$
- $n = 18 \text{ rpm}$
- $I_{ph} = 2.2 A_{pk}$

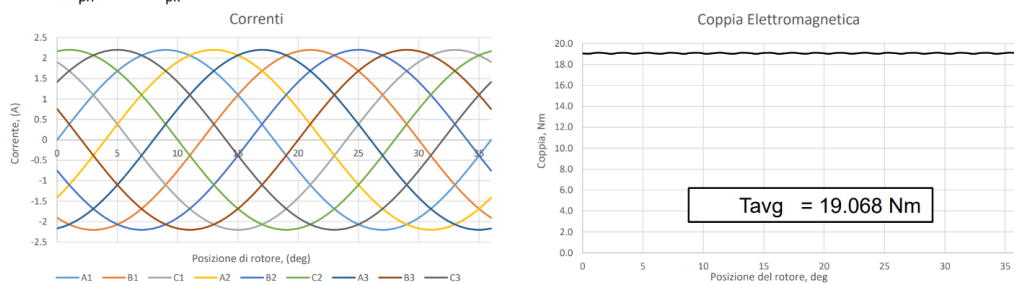


Figura 4.20: Correnti e Coppia per Brandeggio in FEM

In fig.4.20 sono riportate le correnti per coppia massima del motore di brandeggio. I risultati presentati sono molto simili a ciò che è stato simulato e raffigurato in

fig.4.16.

La coppia è praticamente costante, ma risente del leggero ripple che è pari a 0,3% sul valore di picco di coppia.

Oltre alle prove a coppia nominale sono state simulate anche le due prove a coppia termica $T_t = T_{max}/3$.

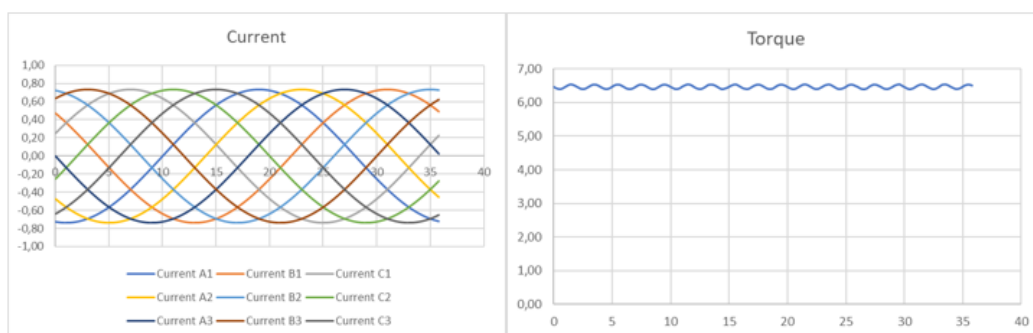


Figura 4.21: Correnti per la macchina di brandeggio a $T_t = T_{max}/3$

In fig.4.21 sono raffigurate le correnti per coppia termica del motore di brandeggio. I risultati sono molto simili a quelli che sono stati ottenuti con Plecs e che sono raffigurati in fig.4.18.

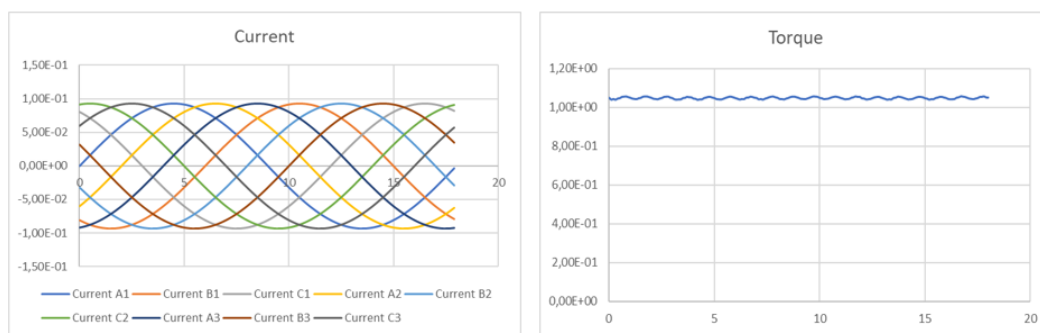


Figura 4.22: Correnti per la macchina di elevazione a $T_t = T_{max}/3$

In fig.4.22 sono riportate le correnti per coppia termica del motore di elevazione. I risultati sono molto simili a quelli che sono stati ottenuti con Plecs e che sono

raffigurati in fig.4.15.

In questi casi si può vedere bene come la coppia sia praticamente costante, ma risenta sempre del leggero ripple che diventa 1% per la coppia di brandeggio e 0,9% per la coppia di elevazione.

Capitolo 5

ANALISI FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DEGRADATE

5.1 Modello Dinamico

Nei modelli precedenti non sono state considerate le mutue induttanze che si generano dall'interazione tra le bobine alimentate perchè non influenzano il funzionamento regolare della macchina. Per il funzionamento in condizioni degradate, invece, è necessario considerare le mutue induttanze perchè queste vanno a influenzare il comportamento dinamico.

Per il calcolo delle induttanze mutue si è partiti dal calcolo tramite FEM del flusso, che, generato dall'alimentazione di una sola fase, interagisce con le altre bobine e coi magneti. Dopo di che si è fatto lo stesso calcolo, ma in assenza del contributo dei magneti. Infine si è fatto il calcolo dei flussi con la prova a vuoto.

Per il calcolo dei flussi effettivi si sono presi i risultati ottenuti dalla prova con i magneti attivi e si sono sottratti i risultati ottenuti dalla prova a vuoto.

Una volta calcolati i flussi basta dividere per la corrente della fase alimentata per trovare le induttanze:

$$L_{kk} = \lambda_k / i_k \quad (5.1)$$

$$M_{jk} = \lambda_j / i_k \quad (5.2)$$

Con L_{kk} si indica l'autoinduttanza di un avvolgimento che concatena il proprio flusso, mentre con M_{jk} la mutua induttanza tra due avvolgimenti che concatenano ciascuno il flusso generato dall'altro.

Considerando la struttura del motore, l'influenza di un avvolgimento sugli altri è simmetrica, ovvero un avvolgimento alimentato da corrente genera un flusso che viene concatenato in modo uguale da due avvolgimenti equidistanti dal quello alimentato. Di conseguenza le induttanze mutue tra l'avvolgimento alimentato e ciascuno dei due avvolgimenti equidistanti da esso saranno uguali.

Facendo queste considerazioni possiamo dire che la matrice delle induttanze è simmetrica e risulta essere:

$$\begin{bmatrix} L_{A1A1} & M_{A1B1} & M_{A1C1} & M_{A1A2} & M_{A1B2} & M_{A1C2} & M_{A1A3} & M_{A1B3} & M_{A1C3} \\ M_{B1A1} & L_{B1B1} & M_{B1C1} & M_{B1A2} & M_{B1B2} & M_{B1C2} & M_{B1A3} & M_{B1B3} & M_{B1C3} \\ M_{C1A1} & M_{C1B1} & L_{C1C1} & M_{C1A2} & M_{C1B2} & M_{C1C2} & M_{C1A3} & M_{C1B3} & M_{C1C3} \\ M_{A2A1} & M_{A2B1} & M_{A2C1} & L_{A2A2} & M_{A2B2} & M_{A2C2} & M_{A2A3} & M_{A2B3} & M_{A2C3} \\ M_{B2A1} & M_{B2B1} & M_{B2C1} & M_{B2A2} & L_{B2B2} & M_{B2C2} & M_{B2A3} & M_{B2B3} & M_{B2C3} \\ M_{C2B1} & M_{C2B1} & M_{C2C1} & M_{C2A2} & M_{C2B2} & L_{C2C2} & M_{C2A3} & M_{C2B3} & M_{C2C3} \\ M_{A3A1} & M_{A3B1} & M_{A3C1} & M_{A3A2} & M_{A3B2} & M_{A3C2} & L_{A3A3} & M_{A3B3} & M_{A3C3} \\ M_{B3A1} & M_{B3B1} & M_{B3C1} & M_{B3A2} & M_{B3B2} & M_{B3C2} & M_{B3A3} & L_{B3B3} & M_{B3C3} \\ M_{C3B1} & M_{C3B1} & M_{C3C1} & M_{C3A2} & M_{C3B2} & M_{C3C2} & M_{C3A3} & M_{C3B3} & L_{C3C3} \end{bmatrix}$$

dove i pedici rappresentano una terna e la fase della terna stessa: le lettere fanno riferimento alle fasi e i numeri alle terne come illustrato in fig.3.11. Inoltre si è detto che la matrice è simmetrica quindi generalizzando si avrà che $M_{jk} = M_{kj}$, dove k e j sono una combinazione qualunque di quelle presenti nella matrice.

Per quanto riguarda i valori di ciascuna induttanza, questi sono variabili nel tempo dato che il flusso totale non è in fase con la corrente, quindi per la simulazione si è presa in considerazione la media delle induttanze calcolate in diversi istanti:

- $L_{A1A1} = 24mH$;
- $M_{A1B1} = 1,7mH$;
- $M_{A1C1} = 1,7mH$;
- $M_{A1A2} = 1,8mH$;
- $M_{A1B2} = 5,6mH$;
- $M_{A1C2} = 5,6mH$;

- $M_{A1A3} = 1,7mH$;
- $M_{A1B3} = 1,7mH$;
- $M_{A1C3} = 1,8mH$;

I valori sopra riportati sono stati ottenuti alimentando solo la fase 1 della prima terna (fase A1).

Per il calcolo degli altri valori è necessario tenere conto della simmetria della macchina. Se consideriamo che gli avvolgimenti sono tutti uguali, spegnendo l'alimentazione della fase A1 e accendendo quella della fase B1 possiamo dire che sicuramente $L_{B1B1} = L_{A1A1}$. Per le mutue il ragionamento è analogo: gli avvolgimenti equidistanti dalla fase B1 si comportano in modo analogo tra loro e nella stessa maniera degli avvolgimenti che erano alla stessa distanza dalla fase A1 quando questa era alimentata.

Da queste considerazioni possiamo dire che:

- $L_{B1B1} = L_{A1A1}$;
- $M_{B1C1} = M_{A1B1}$;
- $M_{B1A2} = M_{A1C1}$;
- $M_{B1B2} = M_{A1BA2}$;
- $M_{B1C2} = M_{A1B2}$;
- $M_{B1A3} = M_{A1C2}$;
- $M_{B1B3} = M_{A1A3}$;
- $M_{B1C3} = M_{A1B3}$;
- $L_{C1C1} = L_{A1A1}$;
- $M_{C1A2} = M_{A1B1}$;
- $M_{C1B2} = M_{A1C1}$;
- $M_{C1C2} = M_{A1A2}$;
- $M_{C1A3} = M_{A1B2}$;
- $M_{C1B3} = M_{A1C2}$;
- $M_{C1C3} = M_{A1A3}$;

- $L_{A2A2} = L_{A1A1}$;
- $M_{A2B2} = M_{A1B1}$;
- $M_{A2C2} = M_{A1C1}$;
- $M_{A2A3} = M_{A1A2}$;
- $M_{A2B3} = M_{A1B2}$;
- $M_{A2C3} = M_{A1C2}$;
- $L_{B2B2} = L_{A1A1}$;
- $M_{B2C2} = M_{A1B1}$;
- $M_{B2A3} = M_{A1C1}$;
- $M_{B2B3} = M_{A1A2}$;
- $M_{B2C3} = M_{A1B2}$;
- $L_{C2C2} = L_{A1A1}$;
- $M_{C2A3} = M_{A1B1}$;
- $M_{C2B3} = M_{A1C1}$;
- $M_{C2C3} = M_{A1A2}$;
- $L_{A3A3} = L_{A1A1}$;
- $M_{A3B3} = M_{A1B1}$;
- $M_{A3C3} = M_{A1C1}$;
- $L_{B3B3} = L_{A1A1}$;
- $M_{B3C3} = M_{A1B1}$;
- $L_{C3C3} = L_{A1A1}$.

Una volta calcolata la matrice delle induttanze è possibile procedere con l'implementazione nel modello Plecs. Il procedimento è approfondito nel paragrafo qui di seguito.

5.2 Simulazione del Funzionamento in Condizioni Degradate

Dato che il motore di brandeggio ha le correnti più alte tra le due macchine, si è deciso di fare per questo motore una simulazione di funzionamento in condizioni degradate, ovvero con una terna che si spegne simulando un guasto.

Nello specifico si è cambiato lo schema di controllo, in modo tale che la prima delle tre terne si spenga dopo 1s e che la coppia data dalla somma delle tre terne rimanga costante. Questo finchè la coppia realmente prodotta, ricalcolata dalla misura di corrente, non superi il valore massimo dato dalla coppia di sovraccarico $T_{sc} = 22Nm$; nel momento in cui T_{sc} viene raggiunta, si abbassa la coppia richiesta a $T = 20Nm$.

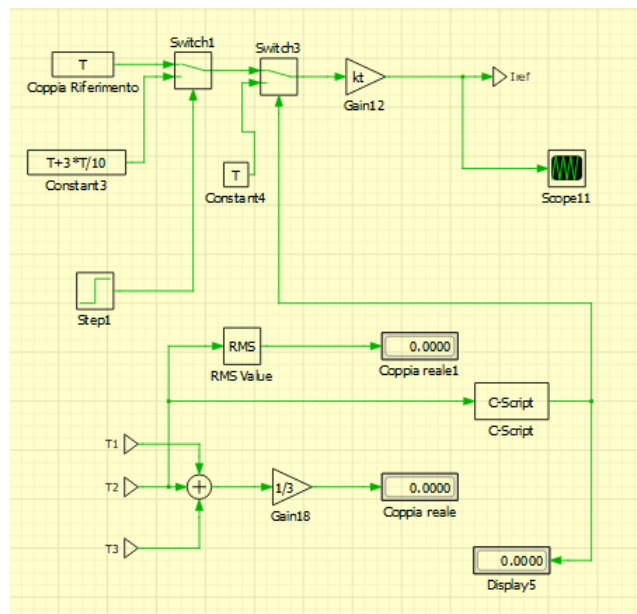


Figura 5.1: Schema di Controllo della Coppia con Guasto

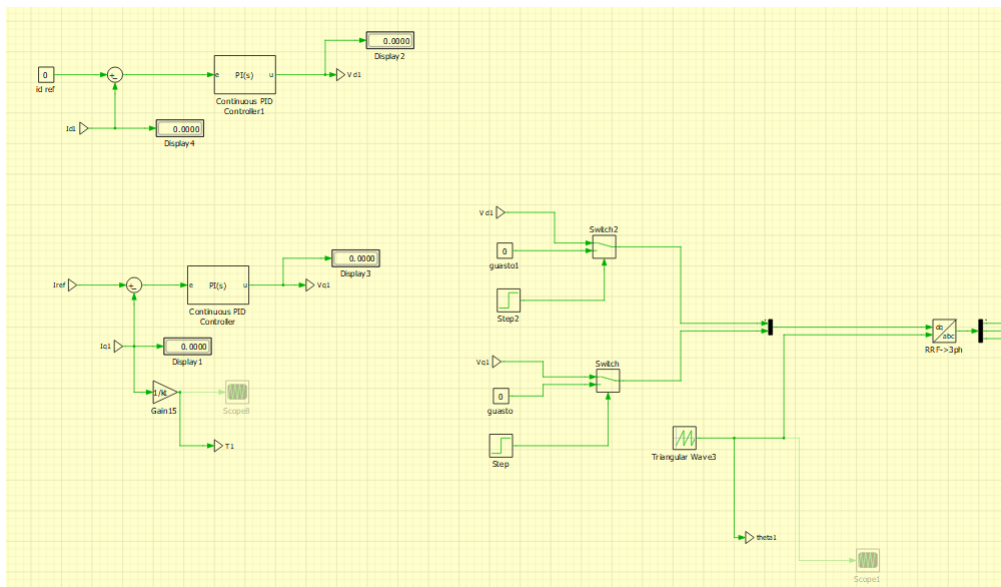


Figura 5.2: Schema di Controllo della Prima Terna con Guasto

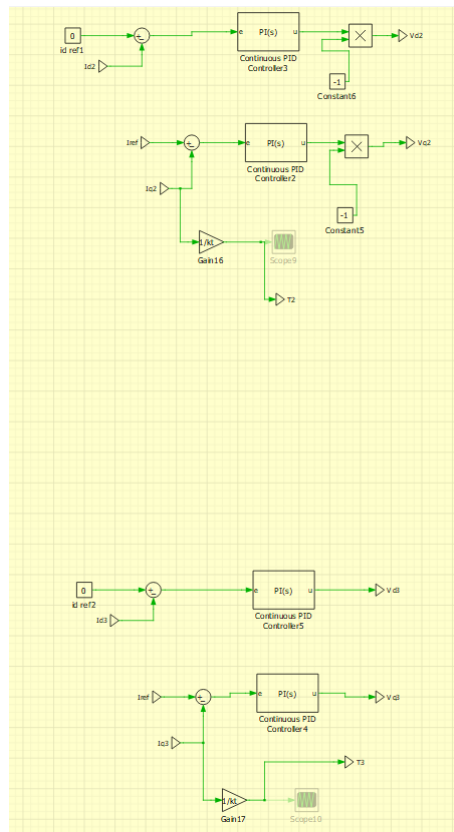


Figura 5.3: Schema di Controllo della seconda e della Terza Terna con Guasto

Nelle fig.5.1, fig.5.2 e fig.5.3 viene rappresentato il nuovo schema di controllo.

In fig.5.1 è presentata la parte di controllo della coppia. Lo schema di controllo è semplificato e fa variare il riferimento di coppia con degli switch: il primo switch è quello che porta la coppia richiesta ad aumentare di 3/10 a causa dello spegnimento della prima terna; il secondo switch serve per riportare la coppia al valore originale nel momento in cui si supera la T_{sc} .

In fig.5.2 e in fig.5.3 sono rappresentati il calcolo delle correnti per l'anello di controllo, e il calcolo della coppia che torna dalla misura di corrente.

Questa simulazione porta al risultato presentato qui di seguito:

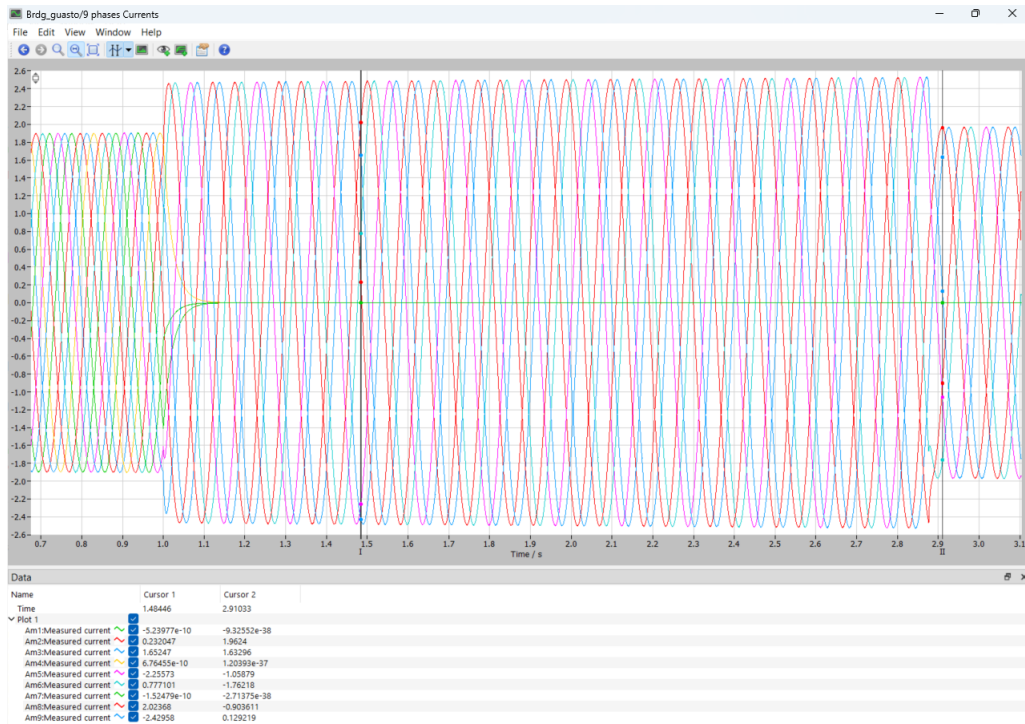


Figura 5.4: Correnti nelle Fasi durante il Guasto

In fig.5.4 si vede che all'inizio abbiamo nove correnti che si generano, come nelle simulazioni precedenti; dopodiché a tempo $t = 1s$ si simula il transitorio dovuto al guasto. Le tre correnti relative al ramo in avaria si azzerano. Le altre sei correnti di fase si distorcono transitoriamente. Le correnti passano da $1,9A_{pk}$ a $2,45A_{pk}$, e mantengono quest'ampiezza per circa $1,9s$, dopo di che, quando si supera la T_{sc} , queste correnti tornano all' ampiezza sinusoidale iniziale. I valori di corrente iniziali sono $2A_{pk}$, perchè siamo ancora nella parte transitoria, ma continuando la simulazione si raggiungono i $2,2A_{pk}$ a regime.

Dopo questa prova ne sono state fatte altre: stesso tipo di guasto, ma con modello circuitale comprensivo delle mutue induttanze sulle fasi.

Le nove mutue induttanze sono state aggiunte come viene mostrato di seguito in fig.5.5.

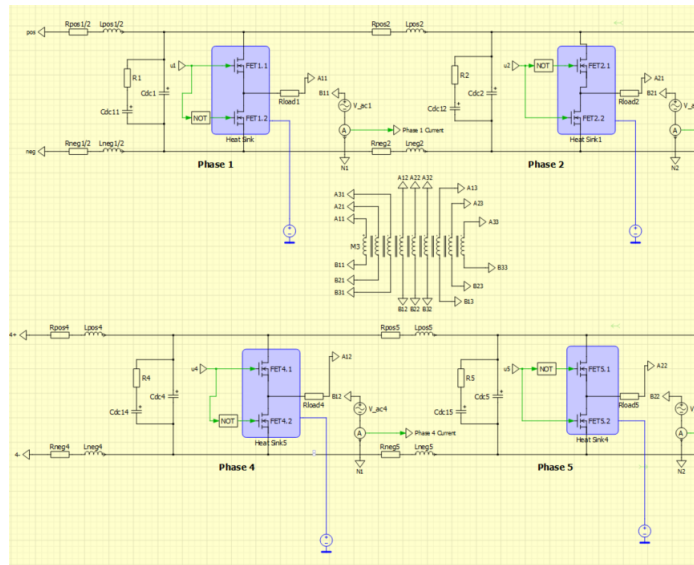


Figura 5.5: Schema dell’Inverter con aggiunta delle Mutue Induttanze

L’introduzione di queste mutue induttanze ha un impatto significativo sul comportamento delle correnti durante la fase transitoria del sistema. I risultati di questa variazione sono dettagliati in fig.5.6, che illustra chiaramente le dinamiche in gioco.

Durante la fase transitoria, l’effetto delle mutue induttanze può essere osservato attraverso variazioni nelle correnti del sistema. Questi cambiamenti sono di particolare rilevanza nell’ottica di comprendere e ottimizzare le risposte del sistema in situazioni di transizione.

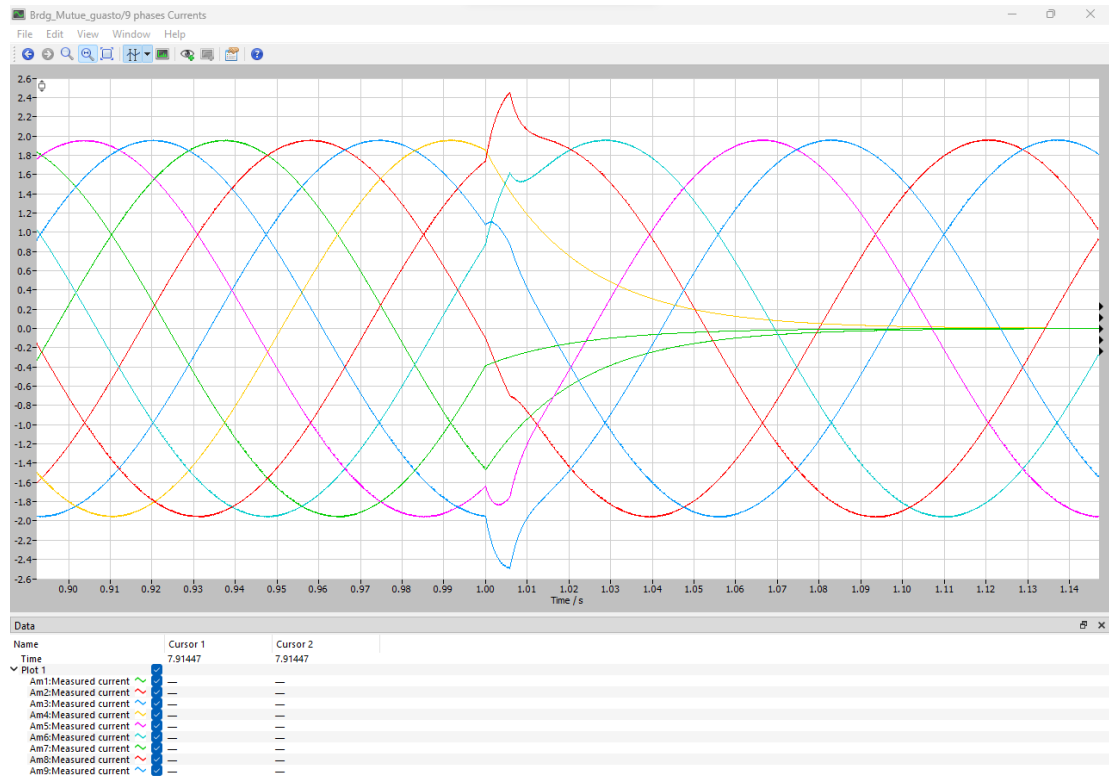


Figura 5.6: Correnti nelle Fasi durante il Guasto

In fig.5.6 si vede che all'inizio abbiamo nove correnti che si generano, come nelle simulazioni precedenti; dopodiché a tempo $t = 1s$ si simula il transitorio dovuto al guasto. Le tre correnti relative al ramo in avaria si azzerano. Le altre sei correnti di fase si distorcono transitoriamente. In particolare due correnti hanno un overshoot: passano da $1,9A_{pk}$ a $2,45A_{pk}$, ma questo picco dura solo $0,1s$, in quanto si supera subito la T_{sc} e queste correnti tornano alla sinusoide iniziale. I valori di corrente iniziali sono $1,9A_{pk}$, perchè siamo ancora nella parte transitoria, ma continuando la simulazione si raggiungono i $2,2A_{pk}$ a regime.

In questa analisi, è altamente pertinente esaminare le variazioni che si verificano nella coppia richiesta e nel conseguente riferimento di corrente. I risultati di tale esplorazione sono presentati in fig.5.7, che mostra chiaramente l'evoluzione della coppia richiesta e l'andamento effettivo della coppia generata dalla seconda terna.

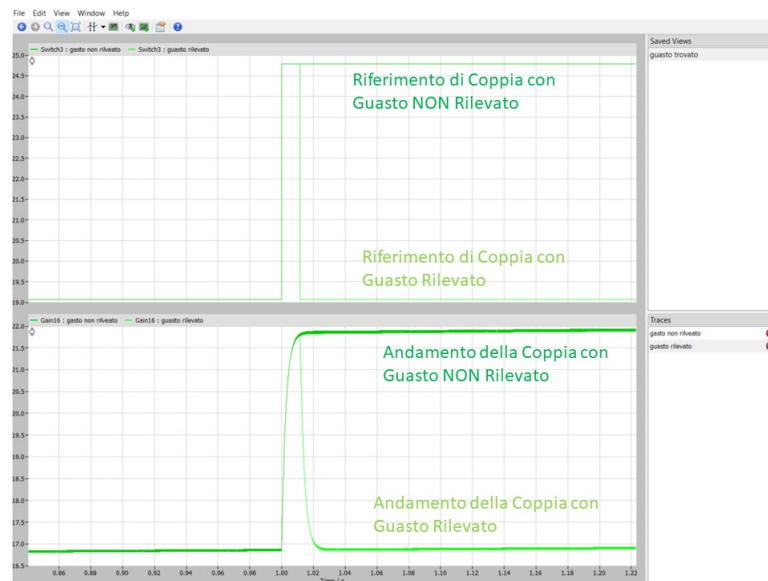


Figura 5.7: Richiesta di Coppia e Comportamento effettivo della coppia

L'osservazione della coppia richiesta è fondamentale per valutare come il sistema risponde alle variazioni nelle condizioni operative, fornendo un'indicazione diretta delle esigenze di carico. Parallelamente, l'analisi dell'andamento effettivo della coppia generata consente di valutare l'efficacia del sistema nel soddisfare tali richieste di coppia.

In fig.5.7, nel grafico superiore, è riportata la richiesta di coppia. Questa è pari a $T_{max} = 20Nm$ fino a $t = 1s$, quando inizia il guasto e la coppia aumenta fino al valore di sovraccarico $T_{sc} = 25Nm$. Dopo di che ci sono due possibilità:

- il sistema si accorge del guasto;
- il sistema non si accorge del guasto.

Nel primo caso, grafico in verde chiaro, la richiesta di coppia scende a T_{max} . In questo caso si vede, nel grafico inferiore di fig.5.7, che il comportamento della coppia generata, sempre rappresentata in verde chiaro, segue il riferimento, senza però raggiungere i valori di riferimento, in quanto si trova ancora in fase di avviamento.

Nel secondo caso, grafico in verde scuro, il riferimento di coppia rimane a T_{sc} . In questo caso si vede, nel grafico inferiore di fig. 5.7, che il comportamento della coppia segue il riferimento e di conseguenza il valore della coppia continua a salire.

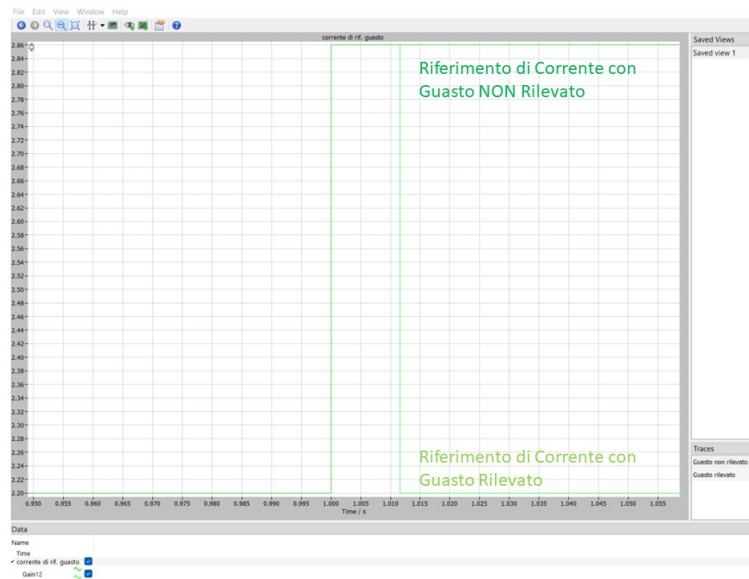


Figura 5.8: Riferimento di Corrente in caso di guasto

Il comportamento della coppia effettiva è giustificato del riferimento di corrente rappresentato in fig.5.8. La corrente di riferimento dipende dalla coppia richiesta, come si può notare dalla figura fig.5.8, nel caso in cui il sistema non rileva il guasto, la corrente di riferimento è un gradino che dopo un secondo passa da 2,20A a 2,9A. Nel caso in cui viene rilevato il guasto, invece, la corrente di riferimento si comporta come un impulso rettangolare e dopo 0,1s il suo valore torna a 2,20A.

Per quanto concerne le correnti di fase, i risultati relativi al rilevamento del guasto sono stati precedentemente esposti nella Figura 5.6. In questo contesto, vengono ora presentati i risultati che riguardano la mancata rilevazione del guasto, illustrati in fig.5.9.

Nel caso della mancata rilevazione del guasto, l'analisi delle correnti di fase assume un ruolo cruciale. La fig.5.9 offre una visione dettagliata dell'andamento di tali correnti, evidenziando come il sistema risponde quando il rilevamento del guasto non avviene correttamente.

L'osservazione di queste correnti fornisce informazioni fondamentali sulla robustezza del sistema in situazioni di guasto non rilevato. Comprendere come il sistema gestisca tali scenari è essenziale per garantire la sicurezza e l'affidabilità del sistema nel suo complesso.

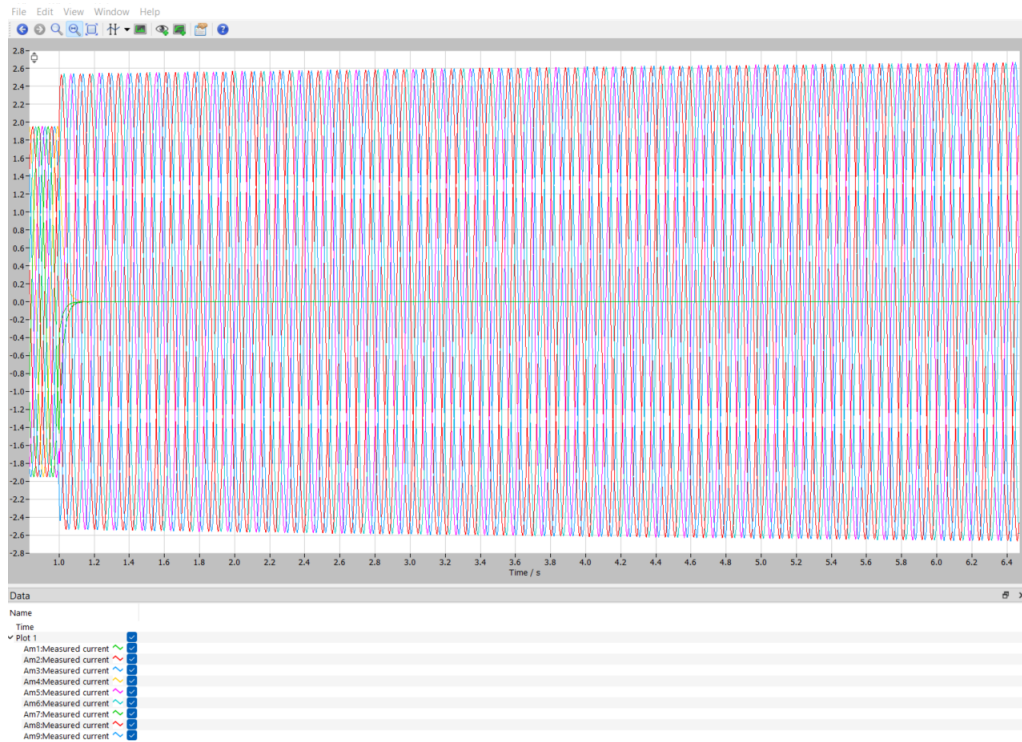


Figura 5.9: Correnti di fase se non viene rilevato il guasto

Questa analisi approfondita delle correnti di fase durante la mancata rilevazione del guasto contribuisce a una comprensione completa delle prestazioni del sistema in diverse condizioni di guasto, facilitando l'ottimizzazione del design e del controllo.

Come si può notare in fig.5.9 si ha lo stesso avviamento del caso precedente. In questo caso però il guasto non viene rilevato e le sei correnti che rimangono attive continuano a crescere in ampiezza, superando i $2,6A_{pk}$ dopo $6,5s$. Aspettando ancora si vedrebbe che questo valore di picco aumenta fino a che la coppia generata non raggiunge quella di riferimento. Questo aspetto rappresenta un problema perchè con questi valori di corrente ci si avvicina alla smagnetizzazione dei magneti.

Capitolo 6

PROVE SPERIMENTALI

In questo capitolo si riportano le varie prove effettuate sui due sistemi e i relativi risultati.

6.1 Descrizione Prove

Per ciascuno dei due motori si è deciso di effettuare le seguenti prove:

- Misura delle Induttanze.
- Misura delle Resistenze.
- Prova di EMF;
- Prova di cortocircuito;

Queste prove vengono descritte e approfondite qui di seguito.

6.1.1 Misura delle Induttanze

La misura delle induttanze è interessante per confrontare i valori reali con quelli ipotizzati nelle fasi di simulazione.

La misura è stata fatta con l'ausilio di un misuratore LCR portatile e si è potuto misurare l'induttanza in aria, ovvero l'induttanza della bobina prima di inserirla nello statore, e l'induttanza sul ferro, ovvero l'induttanza misurata con la bobina inserita sullo statore.

6.1.2 Misura della Resistenza

La misurazione delle resistenze riveste un interesse particolare per confrontare i valori effettivi con quelli ipotizzati durante le fasi di simulazione.

Sono state effettuate due misurazioni: la prima, a freddo, è stata eseguita direttamente su una bobina non collegata all'alimentazione utilizzando un ohmetro. La seconda misurazione è stata eseguita in modo indiretto, con la bobina attraversata dalla corrente nominale; questo approccio consente di valutare come la resistenza varia in relazione alla temperatura. questa misura è stata fatta con l'utilizzo di un amperometro e un voltmetro e ricavando la resistenza dalla legge di Ohm.

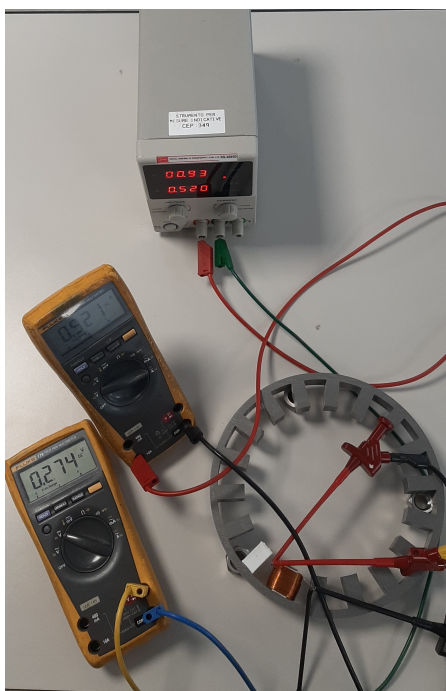


Figura 6.1: Misura Indiretta della Resistenza

6.1.3 Prova di EMF

Il test di EMF è una prova comune per valutare le prestazioni di un motore elettrico e per i motori a magneti permanenti è un metodo per misurare la tensione generata dai magneti quando il rotore viene trascinato a vuoto.

La prova è suddivisa nei seguenti passaggi:

- **Preparazione della Prova:** la preparazione della prova comprende l'installazione della macchina elettrica e del motore primo, ovvero un motore che

serve a trascinare il rotore della macchina elettrica sottoposta al test di EMF, e il collegamento di un voltmetro ai terminali del motore per misurarne la tensione. Questa disposizione viene illustrata di seguito in fig.6.2;

- **Avvio della Prova:** Il motore primo trascina il rotore della macchina a magneti permanenti e i magneti di rotore generano un campo magnetico rotante che induce un tensione ai capi del motore. Con il voltmetro collegato come in fig.6.2 è possibile misurare la tensione indotta concatenata tra due fasi e da questa è possibile risalire al flusso di rotore λ_{mp} .
- **Analisi dei Risultati:** Con la misura della tensione concatenata tra due fasi v_{ab} si può risalire al flusso di rotore tramite la seguente relazione:

$$\lambda_{mp} = v_{ab,pk} / (\sqrt{3} \cdot \omega) \quad (6.1)$$

dove λ_{mp} è il flusso di rotore, $v_{ab,pk}$ è il valore di picco della tensione concatenata misurata e ω è la velocità di rotazione che viene imposta dal motore primo misurata in rad/s .

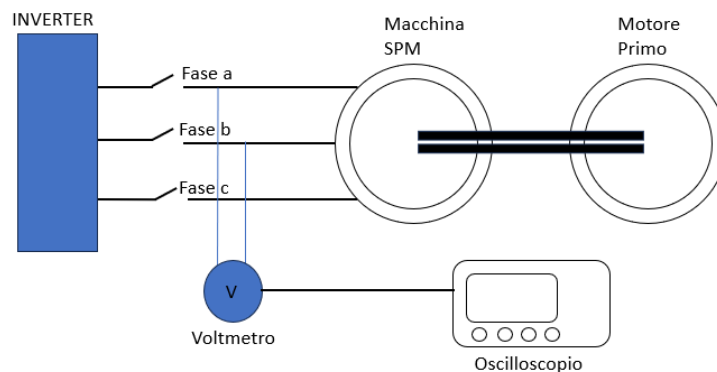


Figura 6.2: Prova di EMF

6.1.4 Prova di Cortocircuito

La prova di cortocircuito su un motore a magneti permanenti può essere utile per identificare eventuali problemi o anomalie nei circuiti interni del motore. Tuttavia, è importante notare che la prova di cortocircuito deve essere eseguita con cautela, poiché potrebbe danneggiare il motore se non viene condotta correttamente.

La prova è suddivisa nei seguenti passaggi:

- **Preparazione della Prova:** la preparazione della prova comprende l'installazione della macchina elettrica e del motore primo e la messa in cortocircuito degli avvolgimenti di statore della macchina elettrica sottoposta alla prova di cortocircuito. Il motore messo in cortocircuito può essere schematizzato come in fig.6.3.
- **Avvio della Prova:** Il motore primo trascina il rotore della macchina a magneti permanenti e i magneti di rotore generano un campo magnetico rotante che induce una corrente negli avvolgimenti della macchina elettrica. La corrente indotta può essere misurata tramite pinza amperometrica. Bisogna prestare attenzione alla velocità con cui viene trascinato il rotore della macchina sottoposta alla prova: se la velocità ω è troppo alta, la corrente indotta può raggiungere valori tali che ci si avvicina alla smagnetizzazione dei magneti.
- **Analisi dei Risultati:** La velocità di trascinamento ω è controllata e si può far variare in modo tale da trovare per quale ω si induce la corrente nominale nella macchina elettrica. I risultati ottenuti vengono poi interpretati in relazioni alle condizioni operative previste e alle specifiche del motore.

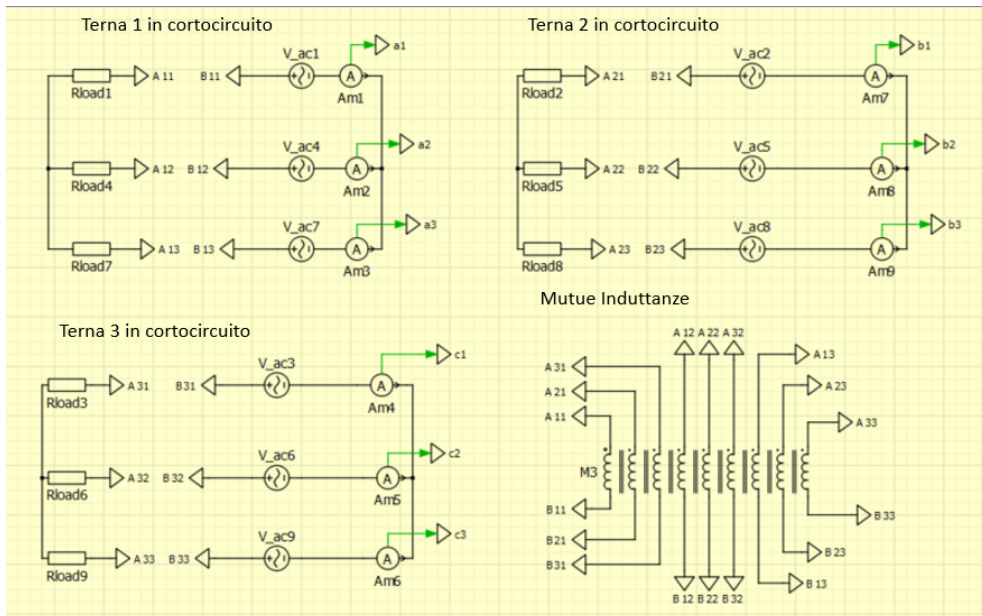


Figura 6.3: prova Cortocircuito

6.2 Risultati Ottenuti

Risultati delle Misure

Dalle misure delle induttanze e delle resistenze si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Induttanza in aria $L_{aria} = 0,517mH$;
- Induttanza sul ferro $L_{Fe} = 3,58mH$
- Resistenza a freddo $R_{freddo} = 0,5\Omega$
- Resistenza con bobina attraversata da corrente $R_{corrente} = 0,55\Omega$

La R_{freddo} è stata misurata a temperatura ambiente, quindi circa $20^{\circ}C$. La $R_{corrente}$ ha un valore maggiore di R_{freddo} perchè la sua temperatura è aumentata, in particolare è salita a circa $43^{\circ}C$.

Come anticipato, $R_{corrente}$ è stata determinata in modo indiretto, calcolando il rapporto tra la tensione applicata agli estremi di una bobina e la corrente che l'ha attraversata. Nel nostro caso, la corrente era fissata a $I_{imposta} = 1,52A_{dc}$, corrispondente al valore efficace della corrente nominale, mentre la tensione misurata dal voltmetro era di $V_{misurata} = 0,843V_{dc}$. Quest'ultimo valore è stato raggiunto dopo circa 40 minuti di passaggio della corrente attraverso la bobina.

Nelle prime valutazioni, presentate nel paragrafo 3.2.2, sono stati riportati i valori attesi delle resistenze delle bobine messe in serie. Per la resistenza a temperatura ambiente di due bobine in serie si era ottenuto un valore $R_{filo} = 0,97\Omega$ che si avvicina molto a quanto misurato, infatti se si considera la serie di due R_{freddo} si ottiene un valore di $R_{serie-freddo} = 2 * R_{freddo} = 1\Omega$. Per la resistenza della bobina a temperatura maggiore di quella ambiente si era ottenuto un valore di $R_{filo} = 1,14\Omega$ che si avvicina molto a quanto misurato, infatti se si considera la serie di due $R_{corrente}$ si ottiene un valore di $R_{serie-corrente} = 2 * R_{corrente} = 1,1\Omega$.

Da quanto è appena stato descritto si può dire che i risultati ottenuti sono conformi con quanto previsto durante le fasi di simulazione, quindi possiamo dedurre che il nostro modello, che è stato descritto in precedenza, sia abbastanza accurato.

Risultati delle altre prove

Non è stato possibile portare a termine le altre prove descritte, quindi non ci sono risultati disponibili.

Capitolo 7

CONCLUSIONI

Questa tesi ha affrontato in modo approfondito e preciso la progettazione, l'analisi e la sperimentazione di due motori elettrici multi trifase a bassissima tensione, centrali per il movimento di un sistema ottico bi-assiale. La ricerca ha fornito una panoramica dettagliata del sistema, con particolare attenzione alle caratteristiche fondamentali e alle specifiche tecniche dei motori in esame. La modellizzazione del sistema, eseguita nel quarto capitolo attraverso simulazioni e confronti con calcoli teorici, ha permesso di valutare l'accuratezza del modello teorico e di identificare eventuali discrepanze tra teoria e pratica.

La progettazione del sistema si è articolata in diversi livelli, distinguendosi innanzitutto per un primo approccio di dimensionamento. Questa fase iniziale ha coinvolto simulazioni dettagliate e analisi approfondite dei risultati, considerando diversi scenari possibili al fine di garantire una progettazione robusta e adattabile alle varie condizioni operative.

Successivamente, è stato intrapreso un secondo livello di implementazione, che ha visto la concretizzazione delle specifiche progettuali attraverso la realizzazione di un prototipo. Questa fase è stata caratterizzata da prove sperimentali mirate, finalizzate a verificare concretamente l'efficacia e la coerenza dei risultati ottenuti nelle fasi precedenti. La realizzazione del prototipo e le prove sperimentali hanno svolto un ruolo cruciale nel consolidare la validità delle scelte progettuali, permettendo di confrontare le valutazioni teoriche con i risultati effettivamente osservati nel contesto pratico.

L'approccio a due livelli, con la combinazione di simulazioni dettagliate e prove sperimentali sul prototipo, ha contribuito a garantire una progettazione completa e affidabile. Tale metodologia ha permesso di affrontare in modo esaustivo le sfide progettuali, assicurando al contempo la coerenza tra le fasi di progettazione teorica

e la realtà implementativa del sistema.

In sintesi, questa tesi rappresenta una risorsa completa e approfondita sull'ottimizzazione dei motori elettrici, del sistema ottico bi-assiale e degli schemi di controllo associati. L'approccio integrato tra simulazioni teoriche e dati sperimentali ha contribuito in modo significativo alla comprensione dettagliata del sistema, fornendo basi solide per ulteriori sviluppi e miglioramenti futuri.

Bibliografia

- [1] *EPC23104 – ePower™ Stage IC*. EPC-CO.com. 2023 (cit. alle pp. 24, 41).
- [2] <https://www.plexim.com/>. Plexim.com (cit. a p. 32).
- [3] <https://altair.com/flux/>. Altair (cit. a p. 49).