

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Metodologia Model Based Design applicata alla
progettazione di un relè di sovraccarico**



Relatore

Prof. Alberto TENCONI

Candidato

Michele MAZZINI

A.A. 2017/2018

“Molla gli ormeggi, esci dal porto sicuro e lascia che il vento gonfi le tue vele. Esplora. Sogna. Scopri.”

Mark Twain

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito al successo del mio stage e che mi hanno sostenuto durante il mio cammino.

In prima istanza rivolgo i mie ringraziamenti al mio *maitre de stage* **Amine Hamza**, Project Design Leader del progetto Quattro-OLR, in seno alla società Schneider Electric, il quale, condividendo la sua esperienza e le sue conoscenze, si è dimostrato ogni giorno attento e disponibile, e grazie alla sua energia ha saputo trasmettere le motivazioni necessarie al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Ringrazio in egual modo tutti i colleghi facenti parte del team del progetto, per l'accoglienza dimostrata e per il loro spirito di collaborazione, ed in particolare **Eric Guillot** (System Design Leader), **Marc Bodocco** (Requirements Management Leader) e **Michael Falconet** (Embedded Software Design Leader), i quali hanno messo a disposizione le loro competenze ed hanno partecipato attivamente e con passione alla mia formazione .

Tengo a ringraziare inoltre il mio relatore **Alberto Tenconi**, per la disponibilità da subito dimostrata, e tutti i docenti e il personale universitario del **Politecnico di Torino** con cui ho collaborato, per la loro professionalità e il loro aiuto. Ringrazio allo stesso modo tutti i compagni di corso con i quali ho condiviso questo percorso.

Rivolgo infine il ringraziamento più sentito alla mia **famiglia** e agli **amici**, che mi hanno fornito costantemente il loro supporto e i loro consigli e sono sempre stati presenti al momento del bisogno.

Sommario

Introduzione: Model Based Design	7
1) L'azienda e il suo contesto	9
1.1) Schneider Electric.....	9
1.2) Switching & Controlling division	10
2) Quattro Offer.....	11
2.1) Il Sistema Quattro – Motor Starter	11
2.2) Relè di Sovraccarico: Quattro – OLR	13
2.2.1) Background: protezione dal sovraccarico (2).....	13
3) Analisi delle esigenze: gestione delle specifiche e tracciabilità	17
3.1) Tracciabilità delle esigenze	17
3.2) Modello di Tracciabilità : Progetto Quattro	19
3.3) Offer Requirements (OR)	21
3.4) Product Specifications.....	23
3.4.1) Executive Summary.....	23
3.4.2) Analisi Funzionale: metodologia APTE	24
3.4.3) Definizione delle specifiche tecniche.....	28
3.5) Specifications Review	32
3.6) Conclusioni	34
4) Modellizzazione: motore asincrono trifase e sensori di corrente del relè di sovraccarico	35
4.1) Modello di funzionamento a regime del motore asincrono trifase: determinazione dei parametri equivalenti (3)	37
4.1.1) Circuito equivalente in analogia con il trasformatore	37
4.1.2) Riporto dei parametri di rotore a statore	38
4.1.3) Circuito equivalente a frequenza di alimentazione	41
4.1.4) Bilancio energetico della macchina.....	42
4.1.5) Espressione della coppia	43
4.1.6) Principali metodi di avviamento (4)	45
4.1.7) Determinazione dei parametri del circuito equivalente (3).....	49
4.2) Modellizzazione dei sensori di corrente del relè di protezione	53
4.2.1) Background: il sensore di corrente nel relè termico (5)	53
4.2.2) Caratterizzazione dei sensori di corrente.....	56
4.2.3) Realizzazione del banco di prova	57
4.2.4) Modello di base: guadagno medio e deviazione standard	66
4.2.5) Studio dello sfasamento e della distorsione armonica	69

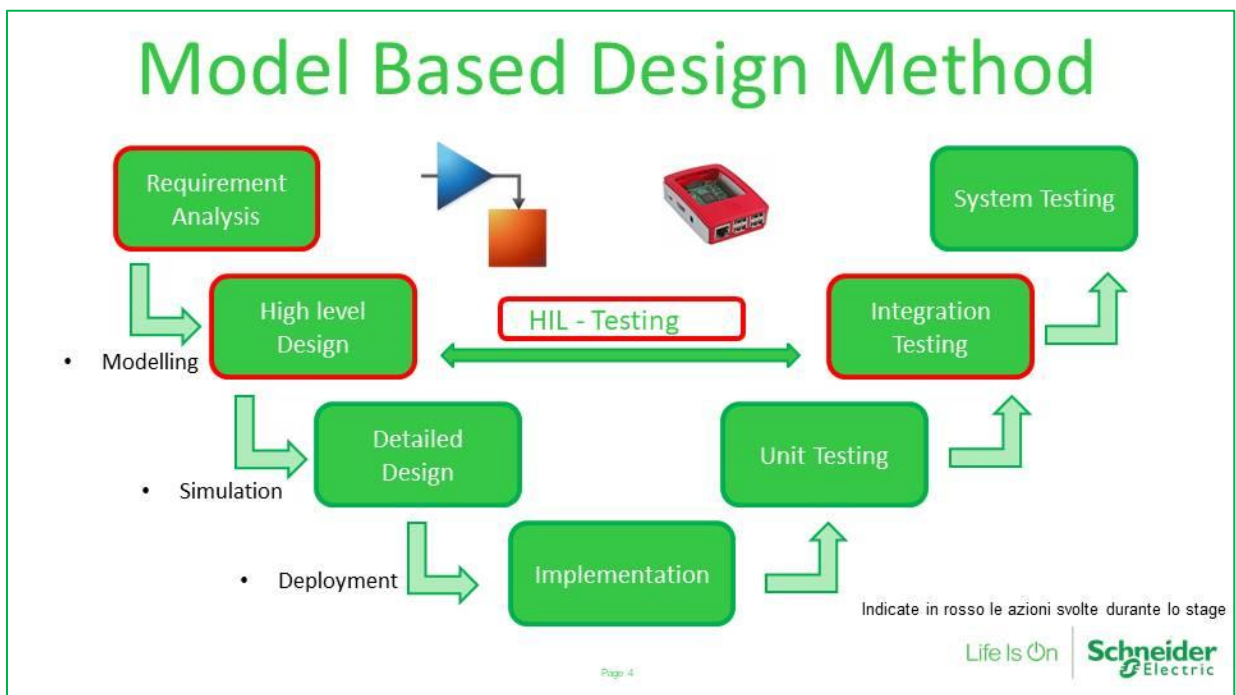
4.3) Conclusioni	73
5) Simulazione HIL (Hardware in the Loop).....	75
5.1) Background: la simulazione HIL	75
5.1.1) Che cos'è la simulazione HIL?	75
5.1.2) La simulazione HIL applicata alla metodologia Model Based Design	76
5.2) Realizzazione della simulazione	77
5.2.1) Raspberry Pi	77
5.2.2) MATLAB/Simulink.....	79
5.2.3) Creazione di un'applicazione Android.....	83
5.2.4) Esempio	85
5.2.5) Conclusioni	85
Conclusione	87
Appendice A) Risultati delle prove sui sensori di corrente	89
A.1) Guadagno nominale e deviazione standard	89
A.2) Studio dello sfasamento e della distorsione armonica.....	95
Bibliografia.....	101

Introduzione: Model Based Design

All'interno di questo elaborato vengono descritti gli obiettivi, lo svolgimento ed i principali risultati ottenuti durante uno stage semestrale, svoltosi in seno alla società Schneider Electric, presso lo stabilimento Electropole di Grenoble, dedicato all'attività di Ricerca e Sviluppo (R&D).

La missione di stage è stata quella di partecipare, interagendo con l'intero team, alla realizzazione del progetto **Quattro – Motor starter**, avente come obiettivo l'elaborazione di un sistema di avviamento e protezione dedicato ai motori asincroni. Tale progetto, al momento della sua concezione, è stato suddiviso in tre sottosistemi, ciascuno dei quali preso in consegna da un differente Project Design Leader (PDL): interruttore, contattore, **relé di sovraccarico**. Quest'ultimo componente rappresenta il tema centrale della tesi, affrontato in collaborazione con il relativo PDL, nonché tutore di stage.

La linea guida seguita durante lo svolgimento del tirocinio è stata la metodologia del Model Based Design, metodologia che permette di migliorare la gestione di un progetto in maniera efficace e conveniente, dal punto di vista delle tempistiche e dei costi. L'approccio MBD consiste nel modellizzare fin dal principio il sistema completo, rendendo così possibili i test delle soluzioni tecniche e di design elaborate dai vari PDL per rispondere alle esigenze del prodotto. Il maggior costo iniziale previsto da questo metodo, dovuto alla modellizzazione, viene compensato da un risparmio in ottica temporale e da una migliore comunicazione ed interazione tra i differenti team del progetto.



Evidenziate in rosso le missioni di stage.



Per facilitare la lettura ed evidenziare gli argomenti trattati, l'esposizione, introdotta da una breve presentazione della società e dell'offerta del progetto Quattro, è stata organizzata in tre sezioni principali, corrispondenti alle azioni intraprese :

- **1) Analisi delle esigenze e gestione delle specifiche tecniche;**
- **2) Modellizzazione: motore asincrono, sensori di corrente del relè;**
- **3) Hardware In the Loop simulation: Raspberry Pi, Simulink.**

La prima sezione affronta il tema della gestione delle specifiche tecniche del relè e della loro tracciabilità, operazione preliminare che riveste un ruolo di fondamentale importanza per la realizzazione del progetto. Tutto ha inizio a partire dal documento **Offer Requirement** contenente le esigenze del mercato che l'offerta del prodotto deve soddisfare. Tale documento viene presentato dal team Marketing e risponde alle richieste dei clienti. In seguito ad un'accurata analisi dell'Offer Requirement, i Project Design Leader, responsabili dell'area tecnica, procedono con l'elaborazione delle specifiche, rispettando i requisiti di ogni esigenza. Queste specifiche vengono quindi raccolte in appositi documenti, definiti **Product Specifications**, dove a ciascuna di esse deve essere attribuita un'etichetta che ne permetta la tracciabilità.

Nella sezione successiva, seguendo lo schema della metodologia MBD, viene descritta la seconda missione intrapresa, ovvero la partecipazione al processo di design. Sono presentati i due modelli forniti al PDL: lo schema equivalente per funzionamento a regime del motore asincrono a gabbia di scoiattolo e il modello relativo al sensore di corrente utilizzato per il relè di sovraccarico.

Il primo modello, elaborato su base teorica, risponde alla necessità del team di disporre di una descrizione generale del funzionamento del motore elettrico al quale è destinata la protezione. Tale modello è stato quindi integrato con la presentazione dei test necessari alla determinazione dei vari parametri equivalenti utilizzati nelle simulazioni.

Per lo studio del secondo modello, relativo ai sensori di corrente, è stato invece necessario eseguire una serie di test preliminari, i cui risultati sono disponibili in appendice, così da poter fondare l'analisi su di un sufficiente numero di dati. Una volta effettuate le prove necessarie, sono stati proposti due modelli: uno caratterizzato da un guadagno nominale costante ed uno derivato dallo studio della distorsione armonica (THD).

Nella terza ed ultima sezione viene introdotto l'aspetto più innovativo, affrontato nel periodo finale di stage, ovvero la realizzazione di una piattaforma di simulazione Hardware In the Loop. Per rispondere alla metodologia di project management basata sul Model Based Design, risulta infatti necessario effettuare dei test nell'arco del processo di progettazione, in modo tale da verificare le differenti soluzioni tecniche senza dover disporre del prodotto ultimato. Si è deciso di realizzare tale sistema utilizzando un dispositivo Raspberry Pi integrato con una carta elettronica di espansione, dedicata alla conversione analogico-digitale. Per la parte relativa alle simulazioni, il software Simulink ha fornito tutti gli strumenti necessari per la generazione del codice. Per una maggiore semplicità ed una più rapida interfaccia con l'utente, il sistema è stato infine completato con la generazione di un'applicazione Android dedicata, anch'essa ottenuta grazie ad uno speciale supporto fornito da Mathworks.



1) L'azienda e il suo contesto

1.1) Schneider Electric

Schneider Electric è un'azienda leader nella gestione dell'energia elettrica e dell'automatismo industriale. In 180 anni di attività Schneider Electric si è affermata nel ruolo di fornitrice di sistemi completi che assicurano sicurezza, continuità di servizio ed efficienza energetica.

Date chiave (1)

1836

I fratelli Schneider acquistano le fonderie del Creusot (71). Due anni più tardi danno origine a Schneider & C^{ie}.

1891

Schneider si lancia sul mercato nascente dell'elettricità.

1919

Espansione di Schneider in Europa. Il gruppo avvia la produzione di motori e apparecchiature elettriche.

1945

Nel dopoguerra Schneider abbandona il campo degli armamenti per dedicarsi alla siderurgia e all'energia elettrica.

1981

Schneider continua la sua politica di focalizzazione sull'elettricità con delle acquisizioni strategiche.

1988

Telemecanique entra a far parte del gruppo Schneider Electric.

1991

Square D entra a far parte del gruppo Schneider Electric.

1992

Merlin Gerin entra a far parte del gruppo Schneider Electric.

2000-2009

Politica di acquisizione delle società che permettono a Schneider Electric di affermare la propria posizione.

2010

Schneider rafforza la sua posizione nell'ambito delle Smart Grids.

2014

Schneider Electric consolida la sua capacità di rispondere alla crescente domanda nei servizi di gestione dell'energia.

Oggi

Life Is On. Schneider Electric si impegna ad assicurare una fornitura di energia per chiunque ed ovunque, a combattere la frattura energetica ed a favorire l'accesso all'elettricità.



La sfida principale di Schneider Electric è quella di mirare a ridurre la frattura di consumo energetico presente nel mondo, che al giorno d'oggi risulta evidente. La sua missione è quindi quella di rendere l'energia accessibile a chiunque, dovunque ed in ogni momento.

Seguendo i suoi obiettivi, il gruppo, punta a sviluppare prodotti e servizi innovativi, per semplificare e migliorare la vita dei loro utilizzatori: energia pulita e domanda ridotta.

1.2) Switching & Controlling division

La divisione presso lo stabilimento Electropole di Schneider Electric (figura 1.1) all'interno del quale si è svolto lo stage è la Switching & Controlling (S&C).

La divisione S&C si occupa della concezione, dello sviluppo e della commercializzazione di prodotti di commutazione di potenza elettrica. Tra questi possiamo citare i contattori, gli interruttori, i relè di protezione, e i sistemi di azionamento. In pieno accordo con la politica e la strategia aziendali, i prodotti elencati contribuiscono alla rivoluzione digitale in corso e garantiscono il rispetto delle norme ambientali sostenute da Schneider Electric.



Figura 1.1: Stabilimento Electropole, Grenoble (FR)

2) Quattro Offer

2.1) Il Sistema Quattro – Motor Starter

L'argomento centrale attorno al quale si sono svolte le differenti missioni dello stage è il progetto Quattro – Motor Starter. Tale offerta, tuttora in fase di sviluppo in seno a Schneider Electric, consiste nel design di un innovativo sistema di avviamento e protezione per motori asincroni, che soddisfi le nuove richieste del mercato.

Il progetto Quattro è stato concepito ed organizzato secondo le regole dell'ingegneria dei sistemi. Nel rispetto di tale visione manageriale, il sistema globale viene suddiviso in diversi sottosistemi (Prodotti), ciascuno dei quali corrisponde ad una particolare esigenza. Ogni sottosistema viene assegnato ad un team, che si occuperà dello sviluppo e del design del componente, nell'ottica di dare origine al prodotto finale. Tale scenario sistemistico permette di organizzare varie discipline, quali la gestione delle specifiche, la realizzazione dei test e delle verifiche e la coordinazione dei differenti team, così da raggiungere gli obiettivi prefissati nel modo più efficiente possibile, considerando prestazioni, costi e tempistiche.

Seguendo tale approccio, il progetto Quattro è stato organizzato secondo lo schema presentato in figura 2.1, dando origine ad una struttura ramificata.

All'apice del diagramma troviamo il sottosistema nel quale rientrano tutte le applicazioni relative al contattore di potenza. Tale dispositivo deve essere progettato per un utilizzo generale; deve cioè garantire la protezione dei motori elettrici ed allo stesso tempo poter essere utilizzato nell'ambito di applicazioni non direttamente legate all'impiego dei motori.

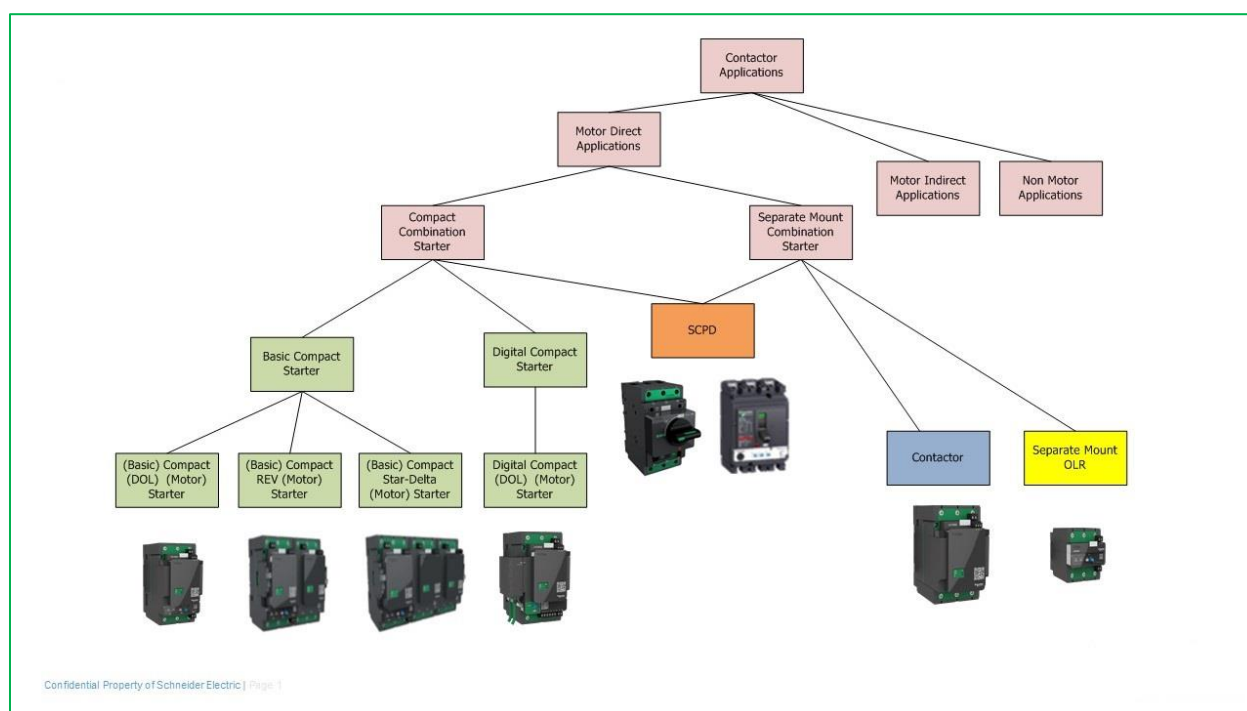


Figura 2.1: Quattro Offer

Per quanto riguarda le applicazioni dedicate alla protezione dei motori, l'offerta propone due configurazioni differenti (figura 2.2):

- Separate Mount Combination Starter
- Compact Combination Starter

La soluzione Separate Mount consiste nella realizzazione di un contattore e di un relè di sovraccarico acquistabili separatamente, ma facilmente integrabili e compatibili per l'utilizzo nella stessa catena di protezione.

La soluzione Compact è composta da una gamma di prodotti più articolata, a sua volta suddivisa in un'offerta Basic ed un'offerta Digital. Nella configurazione Basic rientrano i dispositivi di avviamento e protezione completi, comprendenti contattore e relè di sovraccarico: avviamento DOL (Direct On Line), avviamento DOL più invertitore di senso di marcia, avviamento Stella-Triangolo. L'offerta digital infine, benché composta dal solo DOL starter, rappresenta la soluzione più innovativa. Il Digital Compact Starter infatti consiste in un progetto in completa sintonia con le nuove richieste del mercato, rivolto verso una totale digitalizzazione degli apparecchi, che, per soddisfare i bisogni del cliente, devono essere connessi e facilmente controllabili a distanza (interfaccia web, applicazione smartphone etc.).

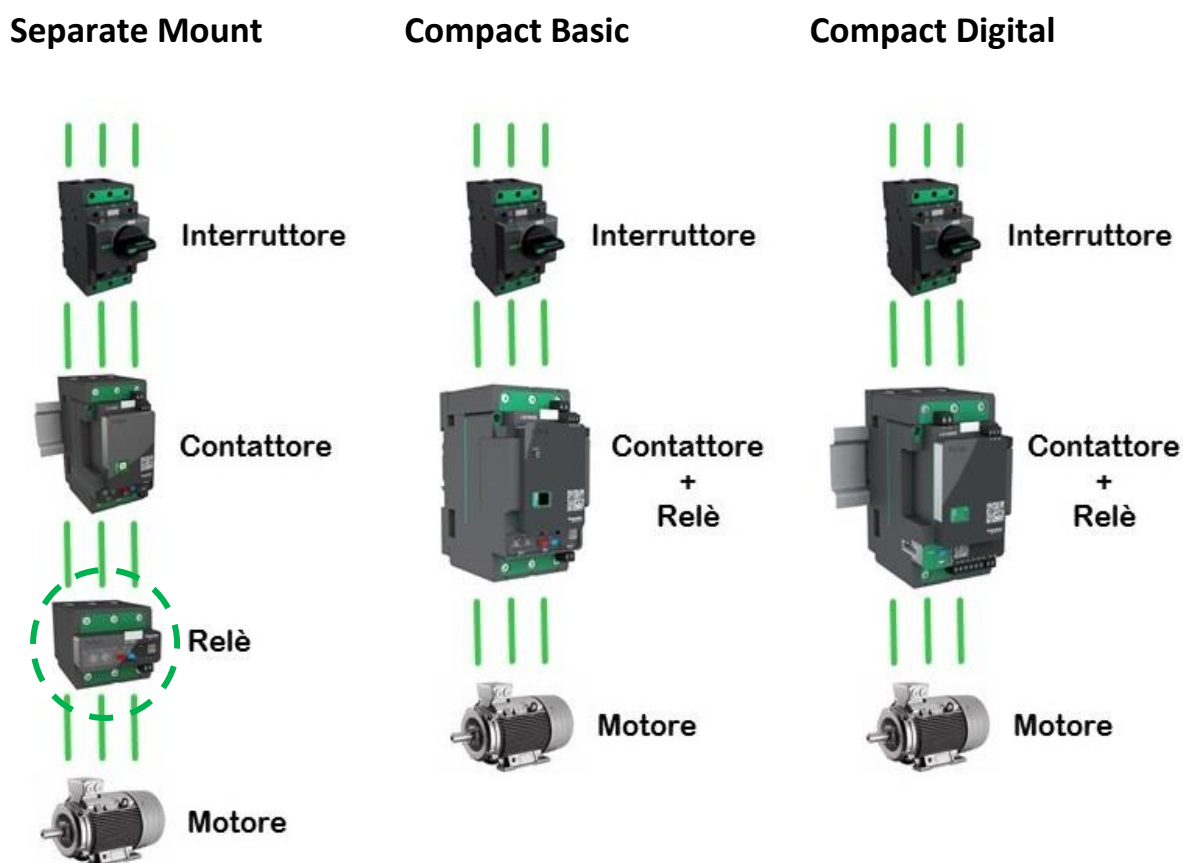


Figura 2.2 Catena di Protezione

2.2) Relè di Sovraccarico: Quattro – OLR

L'argomento centrale dello stage e del presente elaborato, è la partecipazione alla realizzazione del relè di sovraccarico del progetto Quattro. Tale dispositivo è stato concepito secondo le esigenze presentate dal marketing, in modo tale da essere compatibile con le tre versioni precedentemente descritte: Separate Mount, Basic, Digital.

2.2.1) Background: protezione dal sovraccarico (2)

Il sovraccarico rappresenta il guasto più comune durante il funzionamento dei motori elettrici. In tali condizioni si verifica un aumento della corrente assorbita, in concomitanza con gli effetti termici dovuti all'aumento delle perdite Joule.

La temperatura nominale di funzionamento del motore, ad una temperatura ambiente di 40°C, viene stabilita dalla classe termica del sistema di isolamento. Se tale limite viene superato, si avranno delle ripercussioni sul tempo di vita del motore, che porteranno ad un prematuro invecchiamento dei materiali isolanti. Occorre sottolineare che il funzionamento in sovraccarico, se non ricorrente e di durata limitata, non ha un impatto negativo immediato. Ne consegue che il motore non debba essere necessariamente arrestato, ma le condizioni nominali di funzionamento devono essere ristabilite al più presto.

La presenza di un sistema appropriato di protezione contro i sovraccarichi risulta fondamentale, poiché:

- Salvaguarda la durata di vita del motore prevenendone il funzionamento in condizioni anomale di riscaldamento
- Assicura la continuità di servizio evitando l'interruzione prematura dell'alimentazione e consentendo il riavvio nelle migliori condizioni di sicurezza per il personale ed i dispositivi

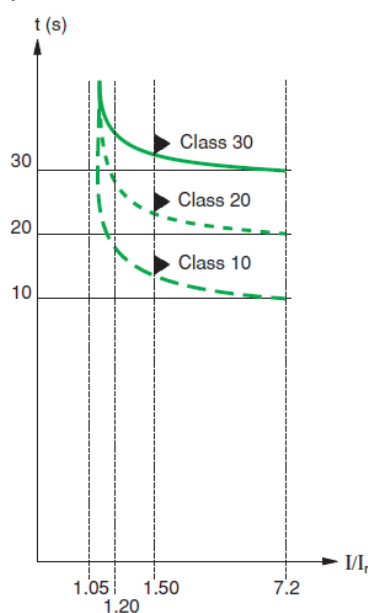


Figura 2.3: Curva di intervento di un Overload Relay

Per la scelta della corretta protezione da sovraccarico (figura 2.5) è fondamentale conoscere nel dettaglio le condizioni di lavoro del motore (temperatura ambiente, altitudine, servizio standard). Da tali fattori dipendono infatti le grandezze caratteristiche del motore, in termini di potenza e corrente. Queste condizioni di funzionamento devono essere fornite dal costruttore.

Altitude m	Ambient temperature						
	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
1000	1.07	1.04	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82
1500	1.04	1.01	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79
2000	1.01	0.98	0.94	0.90	0.86	0.82	0.77
2500	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84	0.79	0.75
3000	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71
3500	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68
4000	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72	0.68	0.64

Figura 2.4: Fattore di derating del motore in accordo con le sue condizioni di funzionamento

Nella tabella di figura 2.4 possiamo vedere alcuni esempi di coefficienti correttivi al variare delle condizioni di utilizzo. I valori riportati in tabella sono solamente indicativi. Nella pratica il derating di un motore dipende da numerosi fattori quali la taglia, la classe di isolamento, la soluzione adottata per il raffreddamento, il grado di protezione IP e altri parametri specificati dal costruttore. Va sottolineato inoltre che la potenza nominale specificata sulla targa del motore è riferita al servizio continuo S1. Esistono però altri servizi standard come il servizio di durata limitata S2 o i servizi intermittenti periodici S3, S4 ed S5, per i quali la potenza di lavoro può essere differente dalla potenza nominale.

Nella catena di protezione del motore, il relè di sovraccarico (evidenziato in figura 2.2) soddisfa queste necessità, tenendo sotto controllo il valore della corrente di alimentazione. Tale relè non dispone di una funzione destinata all'apertura del circuito, ma è progettato per commutare un dispositivo di interruzione, generalmente un contattore, che deve garantire l'apertura all'insorgere di una corrente di guasto.

Trip time from the following states:					
	Cold at $1.05 \times I_r$	Hot at $1.2 \times I_r$	Hot at $1.5 \times I_r$	Cold at $7.2 \times I_r$	Narrower tolerances (band E)
Class					
10 A	> 2 hrs	< 2 hrs	< 2 mins	2 s < tp < 10 s	-
10	> 2 hrs	< 2 hrs	< 4 mins	4 s < tp < 10 s	5 s < tp < 10 s
20	> 2 hrs	< 2 hrs	< 8 mins	6 s < tp < 20 s	10 s < tp < 20 s
30⁽¹⁾	> 2 hrs	< 2 hrs	< 12 mins	9 s < tp < 30 s	20 s < tp < 30 s

(1) class used infrequently in Europe, but used widely in the United States

Cold state: Initial state without previous load

Hot state: Thermal equilibrium reached at I_r

I_r : Setting current of the overload relay

Figura 2.5: Principali classi di intervento per protezioni contro i sovraccarichi in accordo con IEC 60947-4-1



Come anticipato, oltre a proteggere i motori da correnti pericolose, questi relè devono permettere il funzionamento in condizioni di sovraccarico temporanee, come quelle dovute all'avviamento, e non devono intervenire a meno che il transitorio non sia eccessivamente lungo.

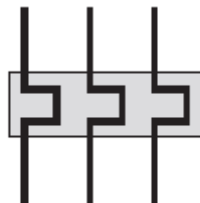


Figura 2.6: Simbolo circuitale relè termico

A seconda delle applicazioni il tempo necessario all'avviamento del motore può variare da alcuni secondi (nel caso di avviamento a vuoto o per coppie resistenti molto basse) fino ad alcune decine di secondi (nel caso di coppie resistenti molto elevate o carichi caratterizzati da grandi inerzie). Risulta dunque necessario adattare il relè di protezione del motore al relativo transitorio di avviamento. Per soddisfare questa necessità, la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) definisce, a mezzo della normativa 60947-4-1, le diverse classi di relè di sovraccarico, ciascuna con il corrispondente tempo di intervento (figura 2.5).

Il relè di protezione dal sovraccarico di cui si parlerà all'interno dell'elaborato è un relè termico elettronico. Tali dispositivi beneficiano dei vantaggi dell'elettronica, che permette di disporre di un'immagine termica del motore più dettagliata. Sulla base di un modello che ricostruisce le costanti termiche della macchina, il circuito elettronico calcola costantemente la temperatura come funzione della corrente che fluisce all'interno degli avvolgimenti e del tempo di funzionamento. La protezione fornisce così una buona approssimazione delle condizioni reali di riscaldamento e permette di prevenire eventuali aperture inopportune.

Una volta definita una panoramica del settore di lavoro e degli argomenti centrali da affrontare durante il periodo di stage, il primo passo per prendere conoscenza del progetto, delle sue caratteristiche e dei suoi obiettivi, è stato quello di partecipare alla gestione delle specifiche tecniche del prodotto della loro tracciabilità.



3) Analisi delle esigenze: gestione delle specifiche e tracciabilità

La missione introduttiva è stata la partecipazione alla tracciabilità delle specifiche tecniche relative al relè di protezione, in collaborazione e con il sostegno del Project Design Leader e del Requirements Management Leader. Questo compito consiste nel redigere un documento in cui vengono raccolte tutte le soluzioni tecniche adottate in fase di progetto, le quali rispondono alle esigenze del Marketing.

Affrontare questo argomento si è rivelato molto importante dal punto di vista tecnico e formativo: ha permesso una visione globale delle caratteristiche del prodotto in via di sviluppo ed ha reso possibile l'esplorazione di un aspetto progettuale non trattato in ambito accademico.

3.1) Tracciabilità delle esigenze

La tracciabilità delle esigenze è il processo che permette di seguire l'iter di sviluppo delle specifiche tecniche di un prodotto. Essa riguarda tutti gli aspetti del progetto, a partire dalla definizione delle richieste del marketing fino alla presentazione delle soluzioni di design, alla realizzazione dei test di verifica ed alla validazione. In ogni documento, a ciascuna specifica proposta viene assegnato un tag di identificazione (figura 3.1), che ne definisce gli attributi principali: ID, titolo, stato di maturità, versione, offerta ed eventuali collegamenti con altri tag. L'utilizzo di queste etichette permette di tracciare la cronologia del progetto e di risalire dunque all'origine di eventuali incongruenze.

[ID:QMS_PR_001_384];[Title:Control_Aux_connection];[Maturity:Approved];[Version:2];
[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_12]
SHALL accept two 0.25-2.1 mm² stranded wire, with and without ferrules
(embout)
[END]

Figura 3.1 Esempio di tag

L'aspetto principale della tracciabilità, infine, è quello di fornire una soluzione che permetta di seguire l'avanzamento del progetto, osservandone il progressivo adempimento delle esigenze. Utilizzando il software Reqtify, il Requirements Management Leader, è in grado di definire l'evoluzione del processo di tracciabilità, raccogliendo ed analizzando l'insieme dei tag utilizzati nei vari documenti. Ogni settimana, grazie a tale software ed all'impiego dei tag, è possibile fornire ai membri dei team una serie di grafici riassuntivi che evidenziano la maturità e lo sviluppo del progetto (figure 3.2, 3.3).

Al termine del progetto tutte le esigenze iniziali saranno soddisfatte ed i collegamenti tra i vari tag saranno coperti al 100%.

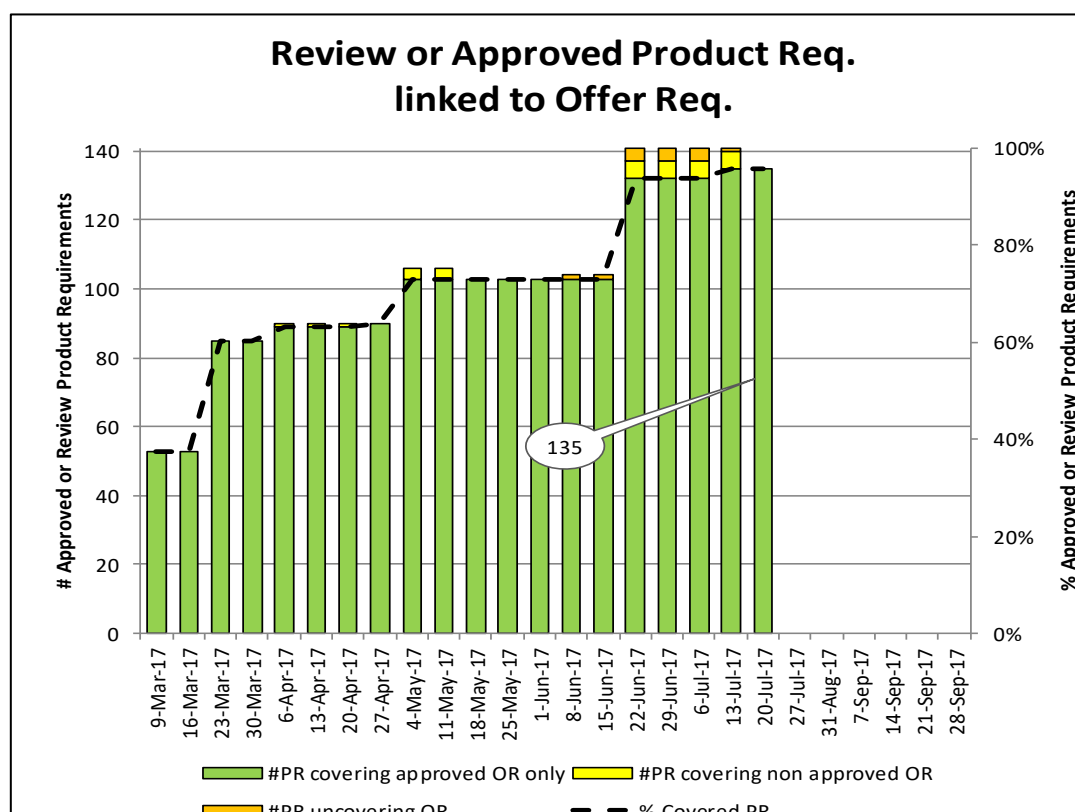


Figura 3.2: Stato delle specifiche collegate alla corrispondente richiesta del marketing

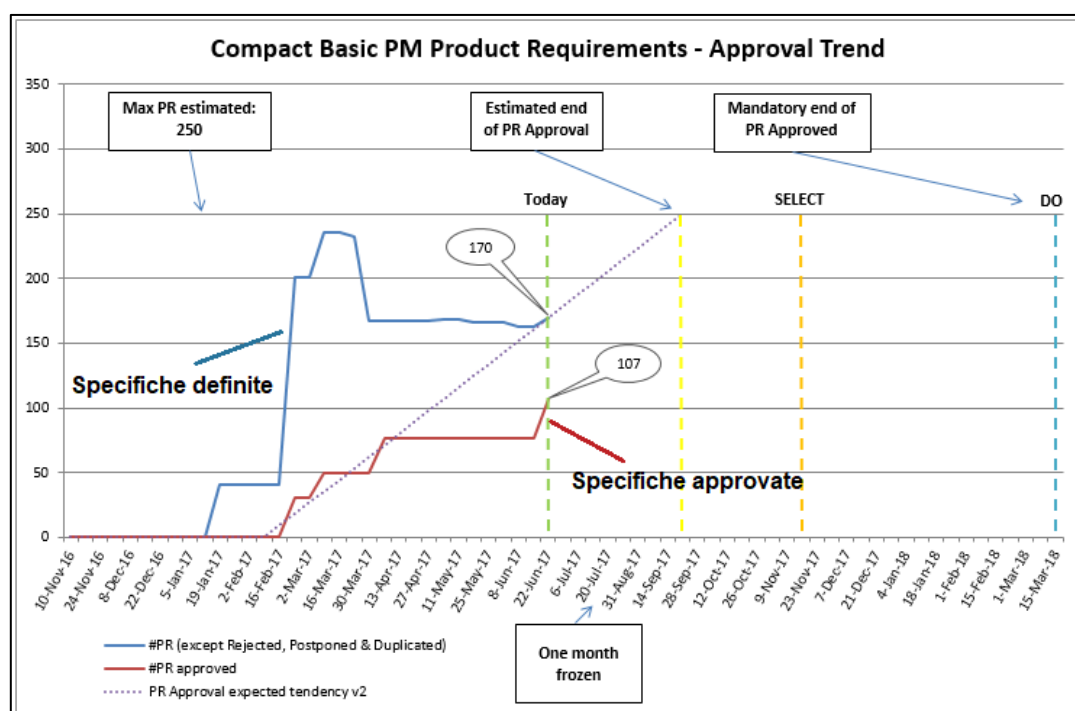


Figura 3.3: Trend di approvazione delle specifiche tecniche

3.2) Modello di Tracciabilità : Progetto Quattro

Lo step introduttivo nel processo di gestione delle specifiche è stato quello di prendere confidenza con il modello di tracciabilità adottato per il progetto (figura 3.4). Tale modello, proposto dal Requirements Management Leader con lo scopo di rendere la procedura chiara e comprensibile a tutti i membri del team, identifica e collega i vari sottosistemi presenti.

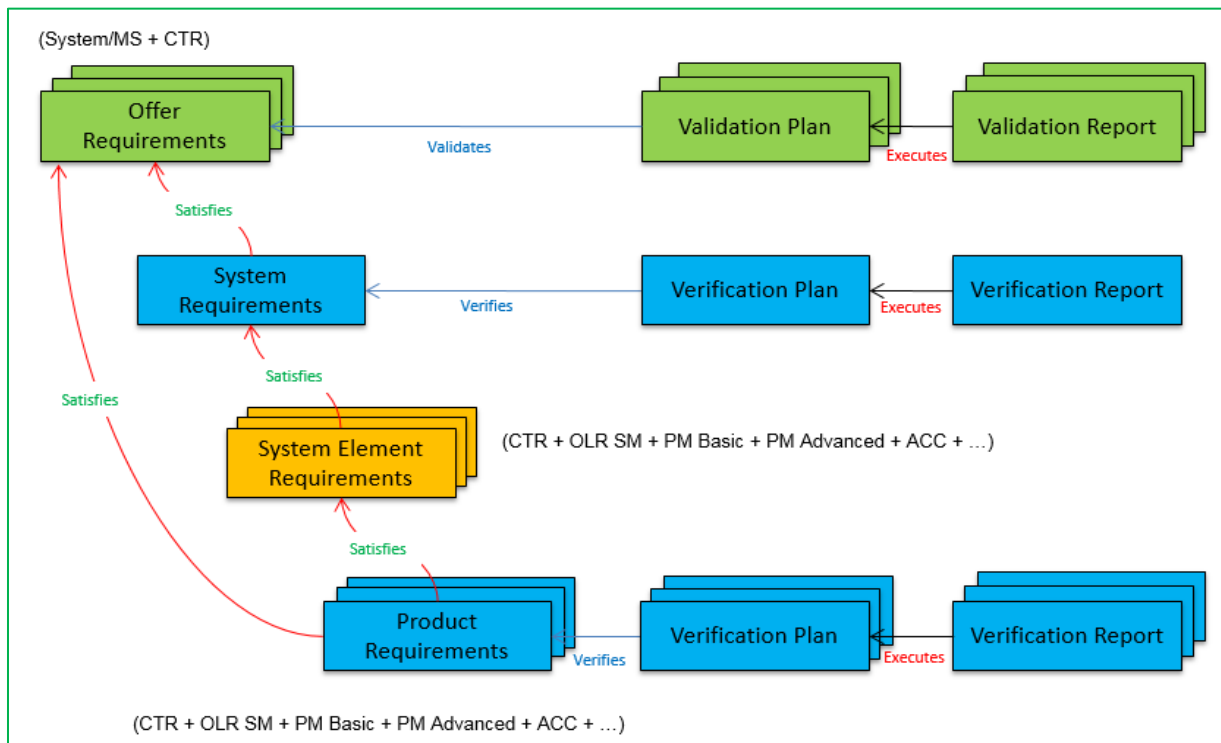


Figura 3.4: Modello di tracciabilità

Il punto comune al quale sono connesse le differenti sezioni del diagramma è costituito dal documento **Offer Requirements**, fornito dal team Marketing. All'interno di tale documento troviamo raccolte tutte le esigenze che il prodotto deve rispettare. Ogni esigenza è identificata attraverso un tag, che specifica l'offerta alla quale è rivolta (Basic, SM, Advanced) e la sezione alla quale fa riferimento (System, Product).

A partire dall'**Offer Requirements** i PDL di ogni team del progetto devono provvedere a loro volta alla redazione di un documento nel quale saranno riportate tutte specifiche tecniche che rispondano alle esigenze presentate dal marketing.

Il team System, incaricato di definire le specifiche tecniche del sistema globale di avviamento e protezione, è inoltre incaricato della stesura di un documento, denominato **System Element Requirements**, nel quale sono presentate ulteriori esigenze. Queste ultime, derivanti dai vincoli necessari alla soddisfazione delle richieste Marketing, sono rivolte a tutti i prodotti che costituiscono il sistema.

I Project Design Leader dei team incaricati dei prodotti contattore e relè di sovraccarico, provvedono dunque alla stesura dei documenti **Product Requirements**, nei quali le specifiche tecniche presentate, soddisfano sia le richieste marketing, sia i vincoli di sistema.

Riassumendo, i System Design Leader del Sistema Quattro si occupano di:

System PDL

- Revisionare il documento Offer Requirement contenente le esigenze marketing
- Identificare le specifiche di sistema derivanti dall'Offer Requirement
- Collegare le specifiche di sistema alle rispettive esigenze Offer Requirement
- Revisionare le esigenze di sistema: System Element Requirements
- Collaborare con il Requirement Management Leader per garantire la tracciabilità.

In parallelo con l'attività del sistema, troviamo le attività svolte dai PDL responsabili dei prodotti Quattro, che corrispondono alle attività svolte durante lo stage, collaborando alla gestione delle esigenze del relè di protezione:

Product PDL

- Revisionare il documento Offer Requirement :esigenze marketing
- Revisionare il documento System Element Requirement: esigenze di sistema
- Collegare le specifiche di prodotto alle rispettive esigenze Offer Requirement e System Elements Requirement
- Collaborare con il Requirement Management Leader per garantire la tracciabilità.

Tutti i documenti redatti sono infine sottoposti ai processi di verifica e validazione. La verifica consiste nel testare la soluzione tecnica adottata in fase di design ed appurarne il relativo funzionamento. Il piano di validazione si occupa invece di esaminare i collegamenti tra le esigenze dell'Offer Requirements e le specifiche tecniche e di constatare che queste ultime corrispondano ai bisogni del Marketing.

Per entrare nel dettaglio della missione svolta durante lo stage a proposito della definizione e della gestione delle specificazioni, occorre dunque analizzare la struttura dell'Offer Requirements.



3.3) Offer Requirements (OR)

Il documento Offer Requirements, come sottolineato, rappresenta il punto in comune all'origine del progetto. La redazione dell'OR avviene per mano del team marketing ed è frutto di un'accurata analisi del mercato, dei bisogni del cliente e dei prodotti offerti dalla concorrenza. Al suo interno troviamo tutte le esigenze che i team di design devono soddisfare, organizzate nelle differenti sezioni che identificano le offerte (figura 3.5). Tale descrizione dettagliata del sistema e del prodotto permette ai leader del progetto e a tutti i membri del team di avere chiaro fin dal principio l'obiettivo finale.

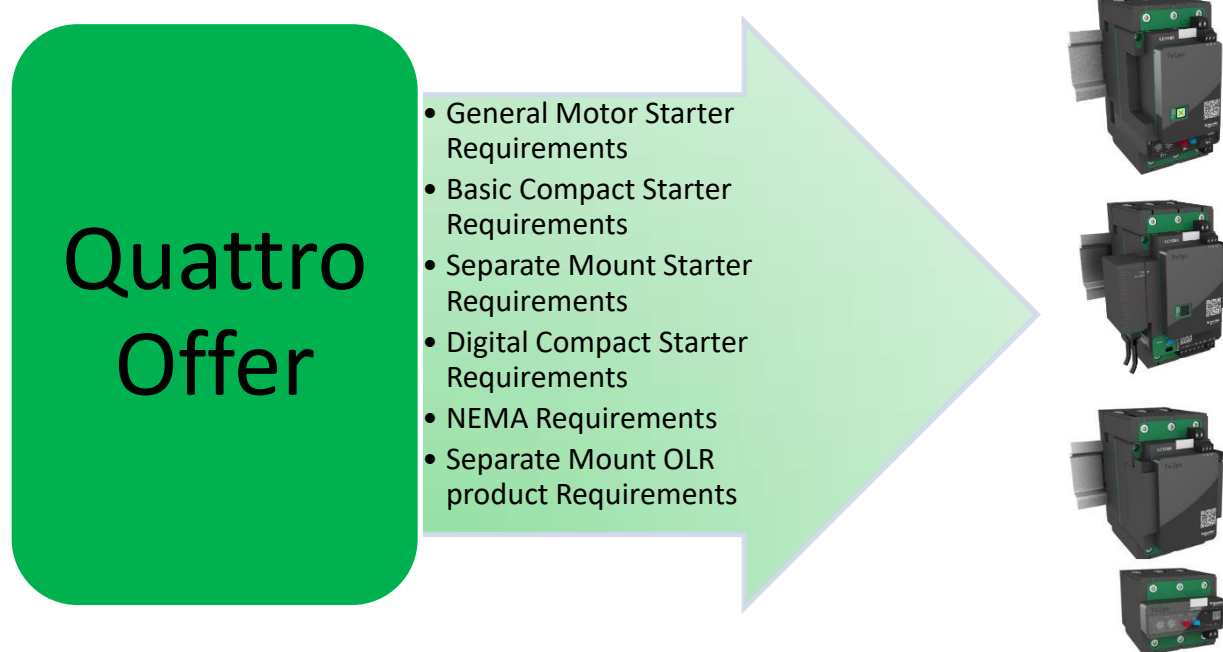


Figura 3.5 Offer Requirements: richieste marketing

Al fine di garantire la tracciabilità delle esigenze e facilitarne la gestione, ad ogni bisogno esplicitato dal Marketing deve essere attribuito un tag (figura 3.6).

[ID:QMS_OR_001_4];[Title:Ir_Max_Current];[Maturity:Approved];[Priority:Shall];[Risk:NoRisk];[CriticalToQuality:True];[Offer:Basic,Advanced,SM];[Version:1];[RefersTo:System]

Figura 3.6: Esempio di tag

Gli attributi principali di ogni tag sono costituiti da *ID*, *Offer*, *Refers To* e *Priority*. Grazie a queste definizioni l'esigenza viene indirizzata ad un team specifico (*Refers To*), che potrà così creare delle apposite soluzioni tecniche. Tali soluzioni riguarderanno l'offerta esplicitata nel tag (*Offer*) e saranno collegate al codice di identificazione (*ID*).

Per quanto riguarda l'attributo *Priority*, esso viene utilizzato per definire il livello di criticità dell'esigenza:

- SHALL requirement: obiettivo essenziale per il progetto con un impatto economico rilevante
- SHOULD requirement: elemento importante ma con un impatto economico accettabile
- MAY requirement: opzione gradita, la cui mancata realizzazione potrebbe causare il malcontento del cliente

Il passo iniziale per lo svolgimento della missione è stato dunque quello di analizzare in modo approfondito il documento sopra descritto ed i dettagli dell'offerta, in modo tale da poter procedere con la creazione del documento Product Specifications e con la gestione delle relative specificazioni.



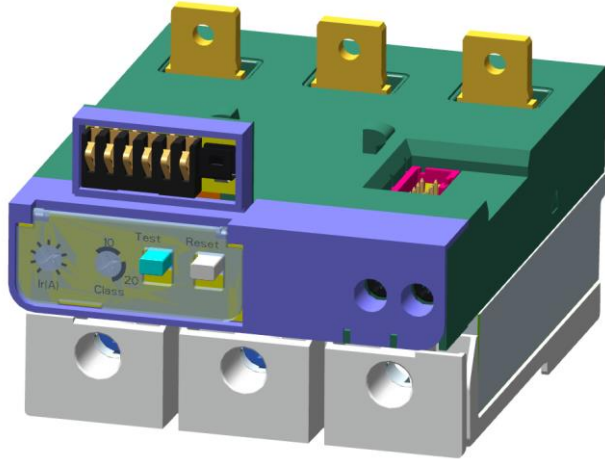
3.4) Product Specifications

Una volta analizzate le esigenze proposte dal marketing, l'obiettivo successivo è stato quello di dedicarsi alla stesura del documento Product Requirements, relativo al relè di sovraccarico.

Questa operazione consiste nel tradurre tali esigenze in specifiche tecniche, le quali sono in seguito utilizzate in fase di progetto. All'interno del Product Specifications troviamo dunque la descrizione delle soluzioni tecniche riguardanti le tre versioni del relè di sovraccarico: Basic, SM, Digital .

3.4.1) Executive Summary

Il primo passo nella redazione del documento è stato quello di presentare in una tabella riassuntiva (tabella 3.1) le principali caratteristiche del relè di sovraccarico, derivate dai bisogni espressi dal Marketing. In tale sintesi, condivisa ugualmente con clienti e fornitori, sono raccolte le funzioni di protezione assicurate dal prodotto, nonché una prima immagine del *form factor* del dispositivo in fase di progettazione.

Aspect	Item	Value
HMI	Form Factor	
	Settings	1/ Rotary switch for Ir: 16 positions, I _{max} /I _{min} = 4. 2/ Rotary switch for: 2.1/ Class = 5, 10, 20, 30, 2.2/ Automatic/Manual Reset, 2.3/ Single Phase/Three Phase motors
	Local control (front face)	1/ Test Button, 2/ Reset Button,
	Local indication (front face)	1/ Trip flag (mechanical), 2/ LED for preventive overload alarm, 3/ LED for motor running,
	Remote control (Electrical)	1/ Electrical remote control (through Wiring Box connector)
	Remote indication (Electrical)	1/ 97/98 electrical output, - 8mm Fork and ring terminals - 250VAC/5A.
Functions	Over load protection	-
	Phase unbalance	30% (TBC)

Aspect	Item	Value
	Ground fault	Threshold = I_r (TBC)
	Automatic Reset	1...3 Minutes (TBC)
	Preventive alarm	105% of I_R (TBC)
	Motor Running	-
Motors	Starting modes	DOL, Start-Delta
	Direction of rotation	Direct rotation, Reversed rotation
	Currents	FR4: 32...125A, FR5: 60...225A, FR6: 105-420A, FR7: 200...800A, FR7: 250...1000A, (target/separate mount of OLR)

Tabella 3.1 Tabella riassuntiva Overload Relay

Una volta realizzata la tabella introduttiva, che consiste in un'analisi preliminare del dispositivo, si è passati ad uno studio più approfondito degli aspetti progettuali. Per organizzare il documento e definire le funzioni del relè di protezione, è stata eseguita un'analisi funzionale, condotta secondo la metodologia APTE.

3.4.2) Analisi Funzionale: metodologia APTE

La metodologia APTE è un procedimento standard di analisi funzionale e di analisi di valore molto popolare in Francia. Tale metodo è stato sviluppato a partire dagli anni 60 dalla società APTE, basandosi sugli studi relativi all'analisi funzionale svolti da Larry Miles.

Secondo i principi del sistema APTE, il primo passo nella realizzazione di un progetto consiste nel definire con precisione lo scopo finale e gli obiettivi da raggiungere. L'oggetto studiato viene inserito nel suo ambiente d'utilizzo in modo tale da esprimere al meglio le funzioni da fornire al cliente.

Il metodo APTE consiste dunque principalmente nel ragionare nell'ottica delle finalità previste, indipendentemente dalle soluzioni adottate, il che consiste nel:

- Definire i problemi come obiettivi da raggiungere
- Elencare i possibili casi d'utilizzo del prodotto
- Per ognuno dei casi elencare le funzioni che il prodotto deve garantire
- Per ognuna delle funzioni determinare i criteri di valore

Per ogni caso d'utilizzo occorre presentare le funzioni del prodotto, mettendo in evidenza il servizio reso. A tal fine il metodo APTE suggerisce l'utilizzo di un "diagramma a piovra". L'oggetto studiato viene posto al centro della piovra ed è contornato dagli oggetti che ne influenzano il funzionamento.

In tale diagramma, accompagnato da una tabella descrittiva, le funzioni sono suddivise in tre categorie, a seconda della loro natura:

- le funzioni principali (F.P.) costituiscono lo scopo del prodotto,
- le funzioni secondarie (F.S.) derivano direttamente dalle F.P. e sono necessarie per il loro raggiungimento,
- le funzioni vincolanti (F.C. Fonctions Contraintes) costituiscono delle esigenze che il prodotto deve rispettare.

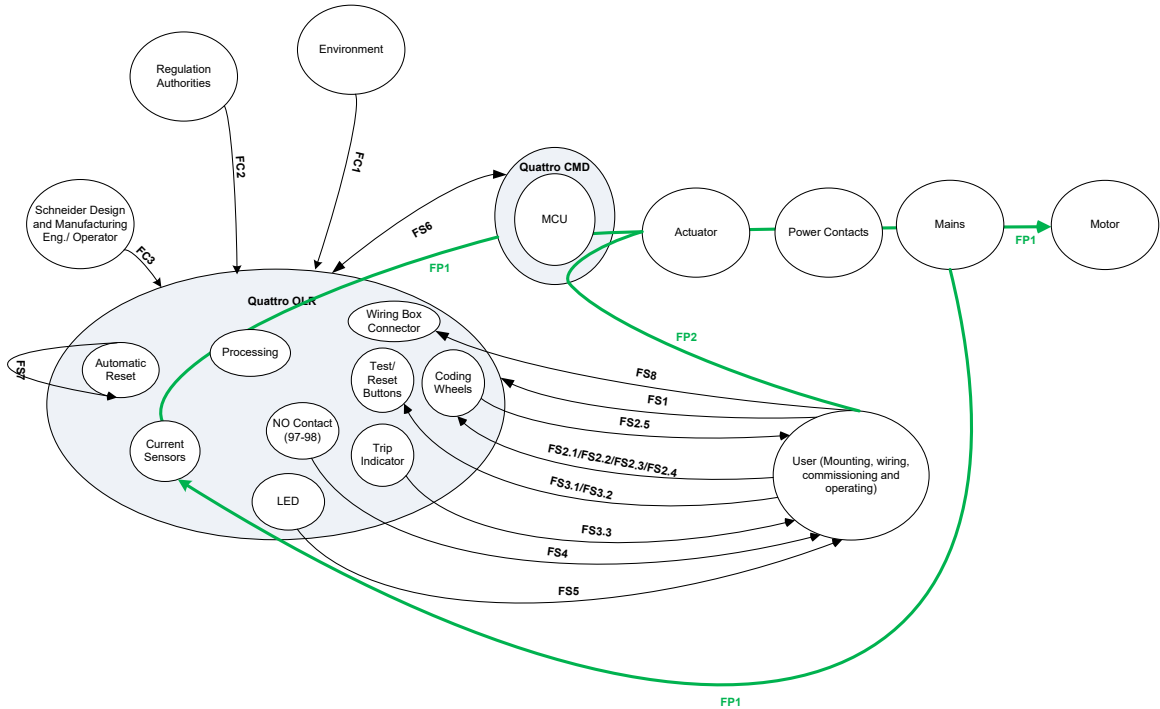
Basandosi sul risultato di tale analisi, le cui conclusioni sono riassunte nelle tabelle 3.2 e 3.3, è stato possibile procedere con la stesura vera e propria del documento, assegnando ad ogni funzione la soluzione tecnica adottata.



Based on APTE Method, the objective is: “Rather than do what you can with what you have, do what you need with the lowest cost”

FAVA – Situation of Operation, manufacturing and troubleshooting

Octopus Diagram



Functions Descriptions	
N°	Description
FP1	Protect the motor (from inappropriate load current leading to overheat)
FP2	Control the motor
FS1	Assemble and Wire the motor protection module
FS2.1	Set manually the protection rated current (Ir)
FS2.2	Set manually the protection class (CL)
FS2.3	Set manually Auto/Manu Reset
FS2.4	Set manually Single/Tri phases Motor
FS2.5	Visually check relay settings
FS3.1	Test manually thermal protection
FS3.2	Reset manually the thermal protection
FS3.3	Visually check thermal protection status
FS4	Remotely check the status of the thermal protection
FS5	Visually check the status of the load
FS6	Enable / Disable contactors
FS7	Reset automatically the thermal protection
FS8	Reset remotely the thermal protection
FC1	Withstand environmental conditions
FC2	Comply to all applicable regulations
FC3	Calibrate the Protection Chain and Configure the ASIC parameters during industrialization phase

Tabella 3.2



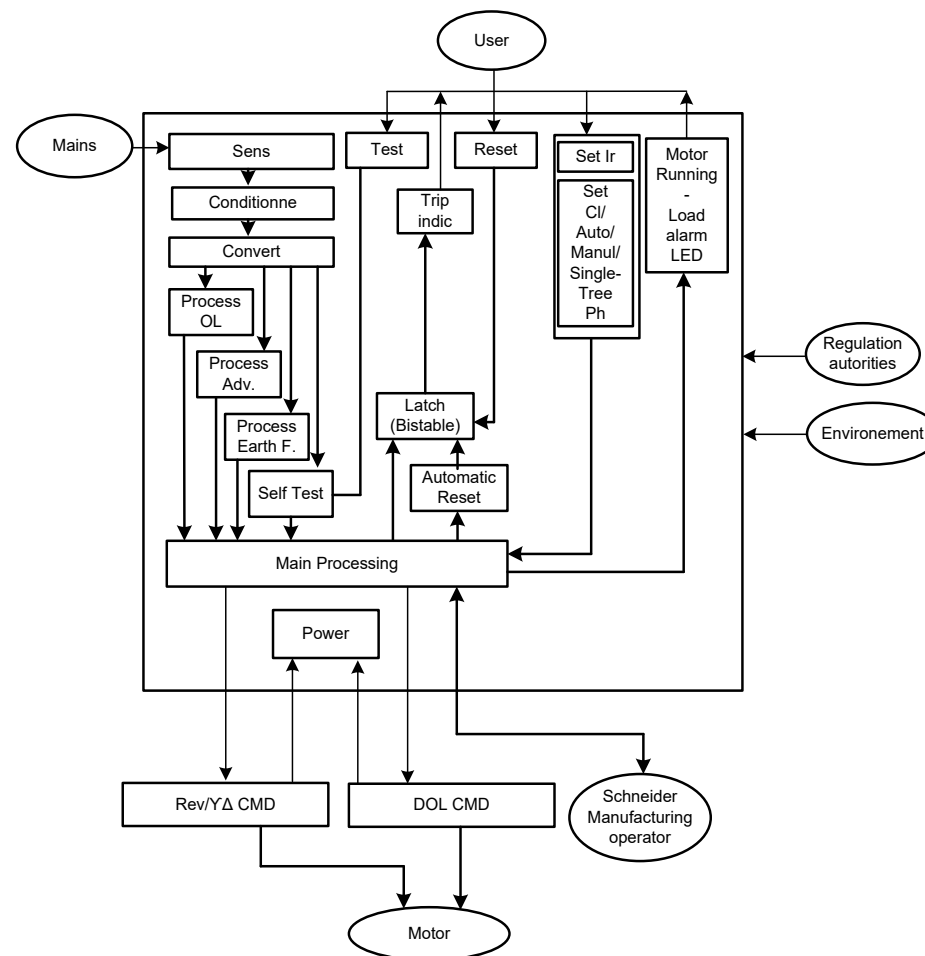


Tabella 3.3

3.4.3) Definizione delle specifiche tecniche

La redazione del documento contenente le specifiche tecniche, rappresenta uno step fondamentale nella realizzazione di un progetto ed ha occupato, in parallelo con le altre missioni elencate, l'intera durata dello stage.

Il documento è suddiviso in tre macro-sezioni corrispondenti ai prodotti facenti parte dell'offerta:

- Basic Separate Mount Combination Starter
- Compact Combination Starter

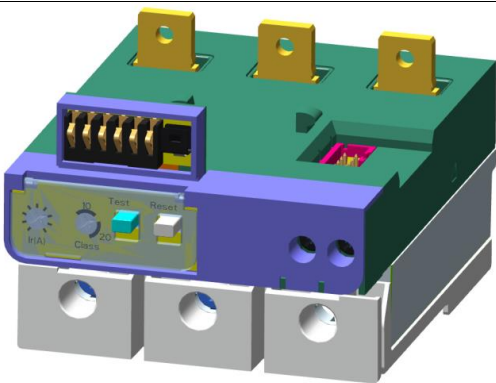
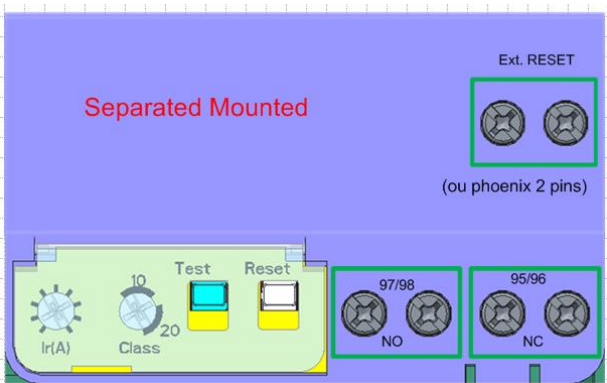
<p>Embedded Overview</p>	
<p>Separate mount Overview</p>	

Tabella 3.4 Presentazione delle versioni Compact e Separate Mount

Per alleggerire l'operazione ed evitare la definizione di soluzioni identiche e dunque ridondanti, le specifiche tecniche relative a richieste marketing comuni alle differenti offerte sono state raggruppate in un'unica sezione, definita appunto "Common Specifications".

Come anticipato, la definizione e l'organizzazione delle specifiche sono state quindi condotte facendo riferimento all'analisi funzionale effettuata. Le soluzioni tecniche adottate sono state presentate attraverso l'utilizzo di tabelle (Tabella 3.5), in modo tale da rendere intuitiva ed immediata l'associazione con la funzione di riferimento e con la relativa richiesta marketing.

Env.	Function	Requirement			Comment
User	FS2.1: Set Ir	Values	FR4	<p>[ID:QMS_PR_001_422];[Title:Ir Setting FR4];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_4]</p> <p>28.8/31.5/34.6/37.9/41.6/45.6/50.1/54.9/60.2/66.1/72.4/79.5/ 87.2/95.6/104.8/115.0A</p> <p>[END]</p>	
			FR5	<p>[ID:QMS_PR_001_423];[Title:Ir Setting FR5];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_4]</p> <p>56.3/61.7/67.7/74.2/81.4/89.3/97.9/107.4/117.8/129.2/141.7/155.5/170.5/187.0/205.1/225.0A</p> <p>[END]</p>	
			FR6	<p>[ID:QMS_PR_001_424];[Title:Ir Setting FR6];[Maturity:InAnalysis];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_4]</p> <p>105.0/115.2/126.3/138.5/152.0/166.7/182.8/200.5/219.9/241.2/264.6/290.2/318.3/349.1/382.9/420.0A</p> <p>[END]</p>	Max current to be corrected
			FR7	<p>[ID:QMS_PR_001_425];[Title:Ir Setting FR7];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_4]</p> <p>250.0/274.2/300.8/329.9/361.8/396.9/435.3/477.4/523.6/574.3/6360.0/691.0/757.9/831.2/911.7/1000A</p> <p>[END]</p>	

Tabella 3.5 Definizione delle correnti nominali di funzionamento

Le specifiche tecniche sono state elaborate con la partecipazione dell'intero team OLR, nel rispetto delle linee guida Schneider, facendo dunque riferimento ai cataloghi e all'esperienza pregressa.

Un ulteriore aspetto importante nella definizione delle specifiche tecniche del relè di sovraccarico è stato quello di soddisfare i vincoli imposti dalle normative (esempio Tabella 3.6) e dalle autorità di regolamentazione.

Il progetto Quattro deve infatti garantire le seguenti certificazioni:

- UL Listing - CSA-C22.2 – FCC : Nord America
- IEC/UL 60947-4-1
- CCC : Cina
- EAC: Russia
- KC: Korea
- DNV/GL: trasporto marittimo, alta priorità
- IACS E10: BV – DNV – GL – LROS – RINA – ABS – KROS – CCS
- NK: Giappone, trasporto marittimo
- ATEX (SIL1)



Requirement		Level	Crit.	Comment
FC1: EMC	[ID:QMS_PR_001_204];[Title:EMC IEC61000-4-2];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC 61000-4-2 [END]	9.6 Kv - Air	A	
		9.6 Kv – Contact	A	
	[ID:QMS_PR_001_205];[Title:EMC IEC61000-4-3];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC61000-4-3 [END]	25 V/m - 80MHz...3GHz	A	
		25 V/m IMS bands	A	
	[ID:QMS_PR_001_206];[Title:EMC IEC61000-4-4];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC61000-4-4 [END]	4.5 kV / 5 kHz & 20 kHz & 100 kHz on power ports	A	20kHz is FCS Req
		2.5 kV / 5 kHz & 100 kHz on signal ports	A	
	[ID:QMS_PR_001_207];[Title:EMC IEC61000-4-5];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC61000-4-5 [END]	4.4 kV (CM 12Ω) on power ports (> 50V)	A	
		2.2 kV (DM 2Ω) on power ports (> 50V)	A	
		2.2 kV (CM 12Ω) on power ports (≤ 50V)	A	
		1.1 kV (DM 2Ω) on power ports (≤ 50V)	A	
		2.2 kV (CM 42Ω) on signal ports	A	
		1.1 kV (DM 42Ω) on signal ports	A	
	[ID:QMS_PR_001_208];[Title:EMC IEC 61000-4-6];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC61000-4-6 [END]	25 V / 0.15 ... 80 MHz	A	
		25 V / ISM	A	
	[ID:QMS_PR_001_209];[Title:EMC IEC 61000-4-8];[Maturity:Approved];[Version:1];[RefersTo:Basic,SM];[Satisfies:QMS_OR_001_179] IEC61000-4-8 [END]	300 A/m / Permanent – test for 1mn	A	
		1000 A/m / Temporary - test for 3s	A	

Tabella 3.6 Normative relative alla compatibilità elettromagnetica

Infine, anche nel caso del documento Product Specifications, il garantire la tracciabilità delle specifiche ha rappresentato un aspetto di fondamentale importanza.

Ad ogni soluzione tecnica proposta è stata rigorosamente assegnata un'etichetta, nella quale sono contenute tutte le informazioni necessarie al suo riconoscimento.

Ogni tag, come visibile nelle tabelle esemplificative riportate in precedenza, è caratterizzato da:

- Un codice identificativo (**ID**) che ne permette facilmente la rintracciabilità
- Un titolo che ne descrive brevemente l'ambito
- Lo stato di maturità della specifica
- Il numero di versione
- L'offerta alla quale la specifica fa riferimento (**RefersTo**)
- La richiesta marketing alla quale la specifica fa riferimento e che viene soddisfatta (**Satisfies**)

La definizione dello stato di maturità di ciascuna specifica non è un'operazione immediata, ma viene effettuata durante riunioni a cadenza regolare, con la partecipazione dei differenti leader dei team del progetto. Tali riunioni prendono il nome di Specifications Review.



3.5) Specifications Review

Per l'approvazione delle specifiche tecniche proposte all'interno del documento Product Specifications, sono stati regolarmente indotti dei meeting durante i quali si è discusso riguardo alla fattibilità della soluzione proposta e alla sua adeguatezza.

Ad ogni meeting partecipano:

- OLR – Project Design Leader
- System Design Leader
- Project Marketing Leader
- Requirements Management Leader

Durante le Specifications Review non vengono esaminate tutte le specifiche elaborate, ma solamente quelle ritenute pronte per essere approvate. In previsione dei meeting fissati, si procede dunque con la preparazione di un file Excel (Tabella 3.7) nel quale sono riportati solamente gli elementi che si intende passare in revisione. La preparazione di tali file risulta notevolmente semplificata dalla presenza delle etichette associate alle specifiche, che permettono di selezionarle ed organizzarle rapidamente all'interno delle tabelle. Lo stato di maturità di ogni tag viene quindi modificato alla voce "review", in attesa di essere presentato per la valutazione definitiva.

In sede di riunione le soluzioni alle esigenze del marketing vengono presentate ai partecipanti, ed a seconda della decisione presa si procede con l'aggiornamento dello stato di maturità.

Section number	Maturity	Offer
on 5.2.1	Review	
on 5.2.1	Approved	
on 5.2.1	Duplicated	
on 5.2.1	InAnalysis	
on 5.2.1	InRevision	
on 5.2.1	Postponed	
on 5.2.1	Rejected	
on 5.2.1	Review	

Figura 3.6 Stato di maturità

Le Specifications Review rappresentano un aspetto molto importante e delicato per la definizione dell'avanzamento del progetto e richiedono perciò una profonda attenzione dal punto di vista relativo alla tracciabilità. Come riportato a modello d'esempio in Tabella 3.7, all'interno dei file Excel preparati per l'occasione, ogni specifica deve rigorosamente essere accompagnata dal suo codice identificativo e dal codice identificativo dell'esigenza marketing a cui essa fa riferimento. Inoltre, nel caso in cui una soluzione tecnica non venga approvata, occorre inserire un commento che giustifichi tale scelta.

ID	Title	Section Title	Maturity	RefersTo	Satisfies	In review since	Comments	Review during the meeting
QMS_PR_001_2	Mounting	Common Specification	Approved	Basic	QMS_OR_001_11	20-Feb-2017	[19/06/17] Approved	Yes
QMS_PR_001_3	Mounting	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_10	20-Feb-2017	[20/02/17] Waiting to refer it to system - OR need to be updated referring to the system [19/06/17] Approved	Yes
QMS_PR_001_177	power cables	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_3	19-Jun-2017	[19/06/17] RefersTo SM + Basic	Yes
QMS_PR_001_417	CMD OLR connection	Common Specification	Approved	Basic	QMS_OR_001_61	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_419	Terminal block type	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_12	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_385	Control_Aux connection	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_12	3-Apr-2017	[03/04/17] Check with technical team [19/06/17] Approved	Yes
QMS_PR_001_386	Control_Aux connection	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_12	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_420	Rotary switches	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_44	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_421	Rotary Switches	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_44	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_422	Ir Setting FR4	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_4	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_423	Ir Setting FR5	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_4	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_424	Ir Setting FR6	Common Specification	InAnalysis	Basic,SM	QMS_OR_001_4	19-Jun-2017	[19/06/17] Max current to be corrected	Yes
QMS_PR_001_425	Ir Setting FR7	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_4	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_426	Ir Setting reading	Common Specification	InAnalysis	Basic,SM		19-Jun-2017	[19/06/17] MKT will add OR	Yes
QMS_PR_001_427	CI Setting	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_66	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_428	CL rotary switches	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_66	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_429	CL rotary switch number of pos	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_47	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_430	CI reading time	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_211	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_431	Auto Manu Setting	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_49	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_432	Auto Manu values	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_49	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_37	Auto/Manu	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_68	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_433	Auto Manu Reading time	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_211	19-Jun-2017		Yes
QMS_PR_001_68	Automatic reset timer	Common Specification	Approved	Basic,SM	QMS_OR_001_83	6-Mar-2017	[06/03/17] Need a total view on auto reset [19/06/17] Approved + OR 83 to clarify by MKT => Change request to create (PR already align with targeted OR)	Yes

Tabella 3.7 Esempio file per Specifications Review



Al termine della riunione si può procedere con l'aggiornamento delle etichette del documento Product Specifications, facendo fede alla tabella Excel utilizzata durante la review. La nuova versione dei documenti viene infine ufficializzata e resa disponibile a tutti i membri del team.

Tali documenti, come descritto in precedenza, saranno poi utilizzati dal Requirements Management Leader come base di riferimento per la produzione dei grafici esplicativi della fase di avanzamento del progetto (figura 3.3).

3.6) Conclusioni

La collaborazione alla definizione delle specifiche tecniche ed alla gestione della loro tracciabilità si è rivelata un'attività molto interessante e formativa sotto diversi aspetti. In primo luogo ha fornito l'occasione di prendere confidenza con un aspetto progettuale poco trattato in ambito accademico. Tale attività, svolta per l'intera durata dello stage, è stata inoltre affrontata in collaborazione con un team internazionale, in un ambiente molto stimolante sotto il punto di vista della cooperazione e del lavoro di squadra. Il frutto di tale attività ha portato alla definizione di 170 specifiche tecniche, 100 delle quali approvate in maniera definitiva ed ad una copertura del 65% delle esigenze marketing. Al termine dello stage il documento risultante è stato quindi consegnato al Project Design Leader per la continuazione del progetto.



4) Modellizzazione: motore asincrono trifase e sensori di corrente del relè di sovraccarico

Seguendo il diagramma a V, facente riferimento alla linea guida dettata dalla metodologia Model Based Design, la seconda macro-sezione di questo elaborato è dedicata al processo di modellizzazione.

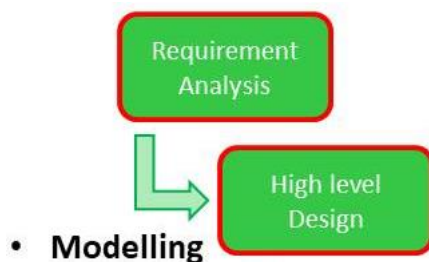


Figura 4.1 Processo Model Based Design

In questa fase del progetto l'obiettivo è stato quello di fornire un modello completo della catena di funzionamento del relè termico di protezione del motore, in modo tale da permettere l'esecuzione di simulazioni complete del prodotto in via di sviluppo.

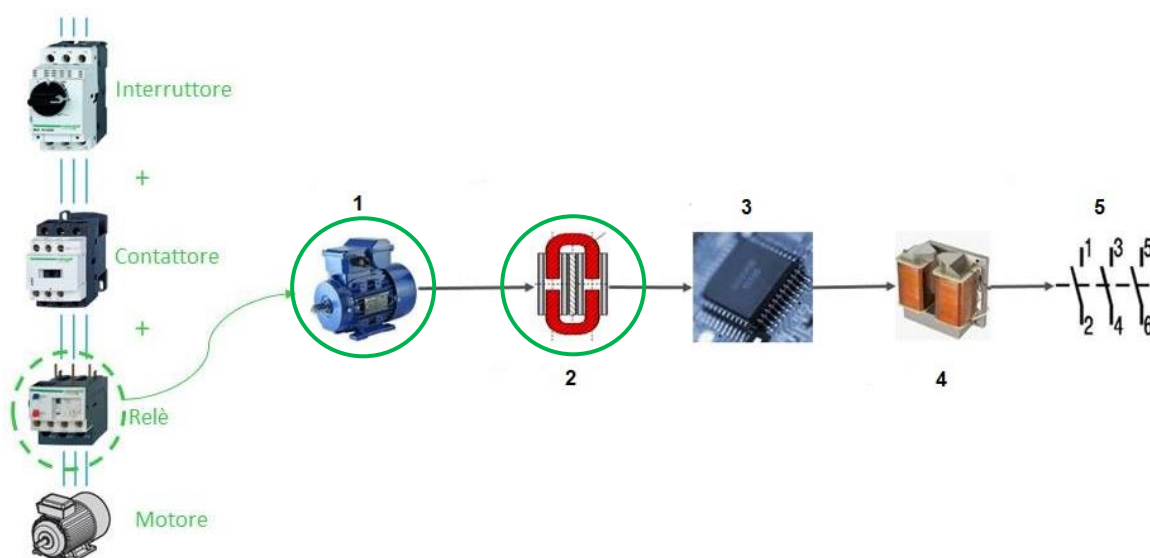


Figura 4.2 Catena di funzionamento del relè – in evidenza gli aspetti affrontati durante lo stage

In figura 4.2 possiamo vedere gli elementi principali che definiscono il funzionamento del relè di sovraccarico:

1. Motore asincrono a cui è destinata la protezione
2. Sensore di corrente del relè
3. Sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati
4. Attuatore per il comando di apertura in caso di malfunzionamento
5. Contattore di potenza per apertura dell'alimentazione

I modelli richiesti dal tutore di stage e realizzati durante il periodo di tirocinio sono stati due:

- Modello di funzionamento a regime del motore asincrono trifase e determinazione dei parametri equivalenti
- Modello del sensore di corrente del relè di protezione

Il primo modello è stato richiesto per la realizzazione di alcune valutazioni preliminari dei dispositivi di protezione associati al motore ed in particolare per la precisazione delle prove necessarie al calcolo dei parametri del circuito equivalente. Si tratta di un modello standard, basato sulle conoscenze acquisite durante il percorso universitario, grazie agli studi dedicati alle macchine elettriche.

Il secondo modello è stato invece ricavato attraverso l'esecuzione di numerosi test volti alla caratterizzazione del sensore di corrente del relè di protezione. Tali risultati, in seguito ad una rielaborazione dei dati raccolti, hanno permesso di modellizzare il dispositivo tramite l'utilizzo di formule empiriche.



4.1) Modello di funzionamento a regime del motore asincrono trifase: determinazione dei parametri equivalenti (3)

4.1.1) Circuito equivalente in analogia con il trasformatore

Il modello proposto per soddisfare le richieste del team è un modello classico, basato sull'analogia esistente tra il motore asincrono ed il trasformatore. Ricorrendo a tale analogia si può proporre un primo esempio di circuito equivalente:

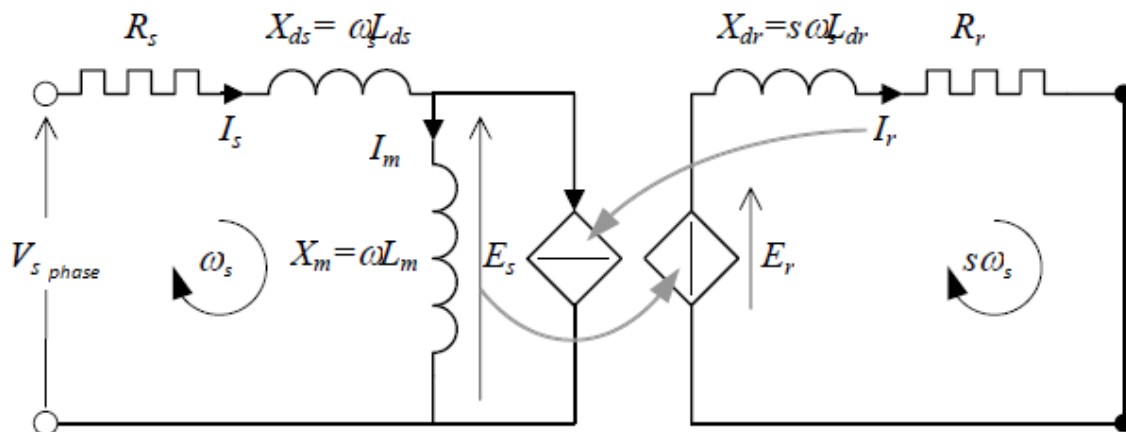


Figura 5.3 Circuito equivalente motore asincrono: analogia con il trasformatore

Nel circuito in figura 5.3 sono indicati i parametri caratteristici che costituiscono il modello:

- $V_{s \text{ phase}}$: tensione di fase di statore
- R_s : resistenza di fase di statore
- L_{ds} : induttanza di dispersione di fase di statore
- $\omega_s = p \cdot (\omega)$: pulsazione elettrica di statore (dove p = paia poli)
- L_m : induttanza di magnetizzazione
- E_s : fem indotta a statore
- E_r : fem indotta a rotore
- R_r : resistenza di fase di rotore
- L_{dr} : induttanza di dispersione di fase di rotore
- $s\omega_s$: pulsazione elettrica di rotore (dove $s = \text{scorrimento} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega - p \cdot \omega_r}{\omega}$)

Le induttanze introdotte all'interno del circuito considerano due fenomeni differenti. Le induttanze di dispersione L_{ds} ed L_{dr} rappresentano la dispersione di flusso al traferro. A seconda della precisione del modello, all'interno di tali induttanze possiamo trovare modellizzata la dispersione in cave, la dispersione dovuta ai disturbi armonici, la dispersione nelle testate di statore, la dispersione negli anelli di rotore (in caso di rotore a gabbia) e la dispersione dovuta all'inclinazione delle cave di rotore.

L'induttanza di magnetizzazione L_m descrive invece la presenza di una corrente magnetizzante necessaria alla creazione di un flusso al traferro. In caso si trascuri la saturazione dei nuclei magnetici, tale corrente indica la quota necessaria alla

magnetizzazione del solo traferro. In caso contrario entrerebbero in gioco anche i giochi e le zone dentate, dunque la corrente magnetizzante sarebbe più rilevante. In entrambi i casi, a differenza del trasformatore, la corrente magnetizzante rappresenta una quota importante della corrente assorbita dal motore e dunque non può essere trascurata.

4.1.2) Riporto dei parametri di rotore a statore

Ricordando ancora l'analogia esistente tra il motore asincrono ed il trasformatore, risulta conveniente riportare tutti i parametri elencati allo stesso lato della macchina, (o a statore o a rotore). Nell'ottica del progetto Quattro, poiché il rotore del motore considerato è di tipo a gabbia di scoiattolo ed i suoi avvolgimenti non sono accessibili, la scelta ricade sul riporto delle grandezze del circuito equivalente a statore. Una volta effettuato il riporto si ottiene il circuito rappresentato in figura 5.4, dove l'apice " ' " sta ad indicare i parametri di rotore riportati a statore.

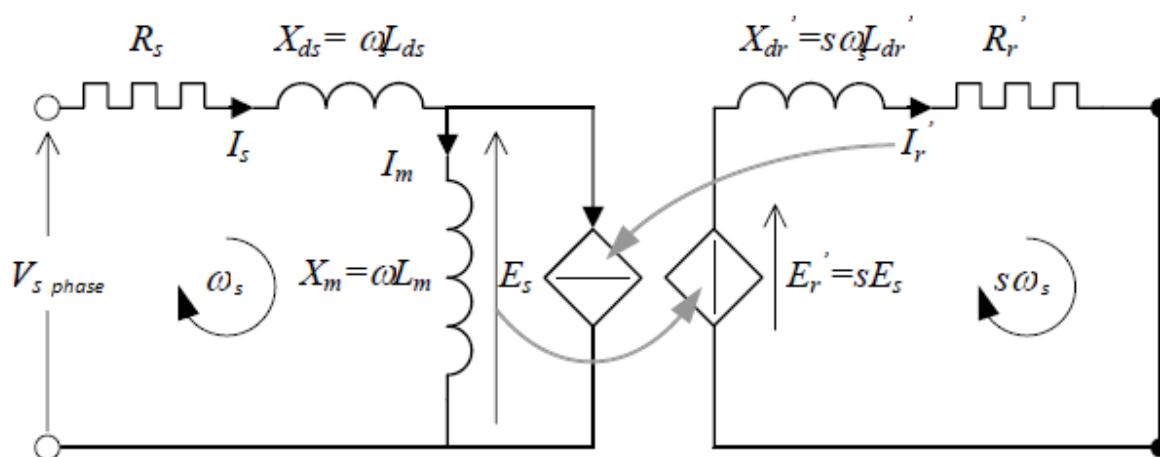


Figura 4.4 Riporto delle grandezze di rotore a statore

L'operazione di riporto delle grandezze di rotore a statore è resa possibile dalla definizione di opportuni coefficienti, derivati dalla teoria degli avvolgimenti.

L'avvolgimento di statore è un avvolgimento trifase regolare distribuito sinusoidalmente, ovvero un avvolgimento nel quale ad ogni conduttore di andata corrisponde un conduttore di ritorno diametrico.

La forza magnetomotrice prodotta da tale avvolgimento può essere espressa come:

$$A_3(\alpha_e, t) = \frac{3}{\pi} \cdot q \cdot z_c \cdot I \cdot \sum_{h=-\infty}^{h=+\infty} \frac{K_{a,h}}{h} \sin(h\alpha_e - \omega \cdot t)$$

$$h = 6k + 1 \text{ con } k \text{ intero} \in [-\infty, +\infty]$$

Dove:

- q = numero di cave per polo per fase
- z_c = conduttori in serie per cava
- $K_{a,h}$ = fattore di avvolgimento

Il fattore di avvolgimento che compare nel formalismo della forza magnetomotrice è definito da:

$$K_{a,h} = K_{r,h} \cdot K_{p,h}$$

$$K_{r,h} = \text{coefficiente di raccorciamento} = \cos\left(h \cdot n_r \cdot \frac{\beta_c}{2}\right) = \cos\left(h \cdot n_r \cdot \frac{\pi}{6q}\right)$$

$$K_{p,h} = \text{coefficiente di passo (o distribuzione)} = \frac{\sin\left(h \cdot q \cdot \frac{\beta_c}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(h \cdot \frac{\beta_c}{2}\right)} = \frac{\sin\left(h \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{q \cdot \sin\left(h \cdot \frac{\pi}{6q}\right)}$$

Ragionando in termini di fondamentale, ossia per l'armonica di ordine $h = 1$, la fmm rotante ottenuta sarà:

$$A_{3,fond} = \frac{3}{\pi} \cdot q \cdot z_c \cdot K_{a,1} \cdot I$$

Definendo:

$$N_1 = \text{numero eq. di spire in serie / fase} = q \cdot z_c \cdot p$$

$$Z_f = \text{numero eq. di conduttori in serie / fase} = 2N_1$$

L'espressione precedente può essere riscritta come:

$$A_{3,fond} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Z_f}{\pi \cdot p} \cdot K_{a,1} \cdot I$$

Possiamo quindi effettuare lo stesso procedimento andando a considerare l'avvolgimento di rotore, realizzato a gabbia di scoiattolo, come un avvolgimento polifase. Il sistema di correnti indotte a rotore da infatti origine ad un numero di fasi equivalente dato da:

$$m = \text{numero fasi rotore} = \frac{\text{n° barre di rotore}}{\text{paia poli}} = \frac{Z_2}{p}$$

La forza magnetomotrice generata dall'avvolgimento a gabbia di scoiattolo sarà dunque:

$$A_m(\alpha, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Z_2}{p} \cdot I \cdot \sum_{h=-\infty}^{h=+\infty} \frac{1}{h} \sin(h\alpha - \omega \cdot t)$$

$$h = kN + p \text{ con } k \text{ intero} \in [-\infty, +\infty]$$

E ragionando ancora una volta in termini di fondamentale avremo:

$$A_{m,fond} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Z_2}{p} \cdot I$$



La definizione delle forze elettromotrici generate dai due avvolgimenti ci permette ora di ricavare i coefficienti necessari al riporto delle grandezze di rotore a statore.

Ragionando in termini di equivalenza possiamo affermare che la corrente di rotore riportata a statore, e che quindi fluisce in un avvolgimento trifase regolare distribuito sinusoidalmente, dovrà dare origine ad una fmm pari a quella generata dalle correnti di rotore che circolano nelle barre dell'avvolgimento a gabbia di scoiattolo.

<p>Avv. statore</p> $A_{3, fond} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Z_f}{\pi \cdot p} \cdot K_{a,1} \cdot I'_R$	<p>Avv. rotore</p> $= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Z_2}{p} \cdot I_R = A_{m, fond}$
--	---

Si ottiene dunque:

$$I'_R = \frac{Z_2}{3 \cdot Z_f \cdot K_{a,1}} \cdot I_R$$

In tale espressione è possibile evidenziare ancora una volta l'analogia esistente tra il motore asincrono ed il trasformatore:

$$\frac{I'_R}{I_R} = \frac{Z_2}{3 \cdot Z_f \cdot K_{a,1}} = \text{coeff. di riporto a statore} = \left(\frac{N_{secondario}}{N_{primario}} \right)$$

Il riporto dei parametri a statore può quindi essere effettuato applicando tali risultati. Prendendo ad esempio il riporto della resistenza di rotore, introducendo il concetto di equivalenza delle perdite Joule prodotte si può scrivere:

<p>Avv. statore</p> $P_{Joule,R} = 3 \cdot R'_R \cdot (I'_R)^2$	<p>Avv. rotore</p> $= Z_2 \cdot R_R \cdot I_R^2$
---	--

Potendo esprimere la resistenza di rotore come:

$$R'_R = R_R \cdot \frac{(3 \cdot Z_f \cdot K_{a,1})^2}{3 \cdot Z_2}$$

Una volta effettuate le operazioni di riporto descritte, l'avvolgimento a gabbia di scoiattolo di rotore sarà descritto come un avvolgimento formalmente equivalente a quello di statore, ovvero caratterizzato dallo stesso numero di fasi e dallo stesso numero di spire equivalenti. Va sottolineato che il circuito così ottenuto (figura 5.4) è ancora composto da due circuiti funzionanti a frequenze diverse. Le grandezze elettriche di rotore sono infatti ancora caratterizzate da una pulsazione pari alla pulsazione di scorrimento. Tale circuito, inoltre, non fornisce alcuna indicazione riguardo la potenza meccanica trasmessa.

4.1.3) Circuito equivalente a frequenza di alimentazione

Per poter definire il circuito equivalente del motore asincrono, ed unificare i due circuiti separati presenti nel modello precedente (figura 4.4), occorre riportare il circuito rotorico alla frequenza di statore.

Per effettuare tale operazione è necessario alterare le grandezze rotoriche secondo il rapporto di frequenze di statore e rotore, determinato dallo scorrimento già definito. Occorre quindi dividere per lo scorrimento s i parametri presenti nell'equazione di tensione del circuito rotorico di figura 5.4.

Una volta effettuato questo procedimento i due circuiti precedenti risultano isofrequenziali e possono essere combinati in un unico circuito equivalente (figura 4.5).

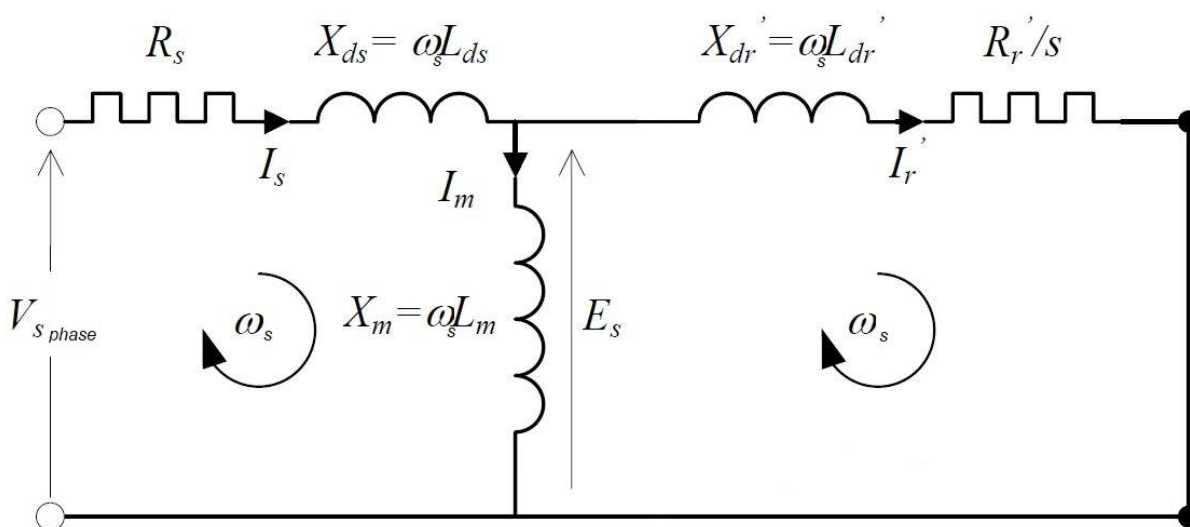


Figura 4.5 Circuito equivalente isofrequenziale

Notiamo dall'analisi del circuito ottenuto che anche la resistenza di rotore viene alterata dall'operazione di riporto alla frequenza di statore. La nuova resistenza $\frac{R'_R}{s}$ ha delle ripercussioni sul bilancio energetico della potenza attiva a rotore. In tale valore fittizio di resistenza statorica confluisce l'intera potenza attiva trasmessa a rotore, ovvero la somma delle perdite Joule rotoriche e della potenza meccanica trasmessa all'albero.

4.1.4) Bilancio energetico della macchina

Facendo riferimento al circuito equivalente ottenuto (figura 4.5) risulta interessante effettuare un bilancio delle potenze in gioco, che permetta di evidenziare la suddivisione della potenza assorbita dal motore.

$$P_{stator} = P_s = 3V_{s\ phase} I_s \cdot \cos(\varphi_s) = \sqrt{3} V_s I_s \cdot \cos(\varphi_s) \quad [4.1]$$

Per ottenere il valore della potenza trasferita al traferro occorre calcolare le perdite Joule a livello di statore:

$$P_{js} = 3R_s I_s^2 \quad [4.2]$$

Nel caso in cui le perdite nel ferro non fossero trascurabili, sarebbero tenute in conto nel bilancio energetico, tramite l'inserimento di una resistenza fittizia in parallelo all'induttanza di magnetizzazione (figura 5.6), e calcolate come:

$$P_{Fe} = 3 \frac{E_s^2}{R_{Fe}} \quad [4.3]$$

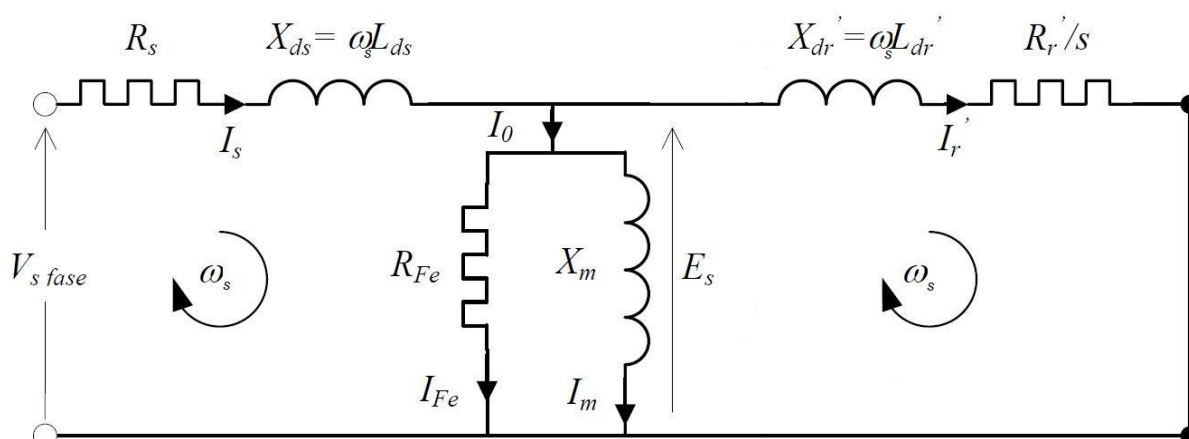


Figura 4.6 Circuito equivalente con perdite nel ferro

La potenza elettrica P_t trasmessa al traferro è quindi calcolabile come la differenza tra la potenza fornita in ingresso e le perdite totali di statore:

$$P_t = P_s - P_{js} - P_{Fe} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2 \quad [4.4]$$

Per ottenere la potenza meccanica P_m effettivamente trasmessa all'albero è ancora necessario sottrarre l'ammontare delle perdite Joule di rotore:

$$P_{jR} = 3R'_r I_r'^2 \quad [4.5]$$

La P_m sarà quindi data dalla differenza tra la [4.4] e la [4.5]:

$$P_m = P_t - P_{jR} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2 - 3R'_r I_r'^2 = 3 \frac{(1-s)}{s} R'_r I_r'^2 \quad [4.6]$$

Dall'analisi delle espressioni ricavate vediamo che, come detto in precedenza, la resistenza fittizia $\frac{R'_R}{s}$ risulta essere composta da due contributi:

- La resistenza R'_r che rappresenta le perdite Joule di rotore
- La resistenza $\frac{(1-s)}{s} R'_r$ che modella la potenza elettrica effettivamente convertita dal motore in potenza meccanica

Riformulando i risultati ottenuti possiamo inoltre scrivere:

$$P_m = (1 - s)P_{entrefefer} \quad [4.7]$$

$$P_{jr} = sP_{entrefefer} \quad [4.8]$$

4.1.5) Espressione della coppia

A partire dai risultati ottenuti dal bilancio energetico del motore, che ci hanno permesso di ricavare l'espressione della potenza meccanica trasmessa all'albero, è possibile dedurre la coppia prodotta in uscita dal motore:

Dalla definizione tradizionale di coppia meccanica $C_m = \frac{P_m}{\omega_m}$, otteniamo:

$$C_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3 \frac{(1-s)}{s} R'_r I_r'^2}{\omega_m} = \frac{P_t}{\omega_s} = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{R'_r}{s} I_r'^2 \quad [4.9]$$

(**N.B.** : $\omega_m = (1 - s) \cdot \omega_{syn} = (1 - s) \cdot \frac{\omega_s}{p}$, per una macchina avente p paia poli)

Analizzando l'espressione [4.9] è importante evidenziare la seguente formulazione della coppia:

$$C_m = \frac{P_t}{\omega_s} \rightarrow P_t = C_m \cdot \omega_s \quad [4.10]$$

Tale risultato ci dice che, assegnato il valore di coppia richiesta al motore, la potenza trasmessa dallo statore al rotore sarà data dalla [4.10], indipendentemente dalla velocità di rotazione del rotore ω_r .

Per terminare i calcoli relativi alla determinazione della coppia, come deducibile dalla [4.9], è ancora necessario ricavare la corrente rotorica I'_R .

Partiamo dal circuito equivalente precedentemente ricavato ed applichiamo il teorema di Thevenin, così da semplificare il procedimento analitico.



Applichiamo dunque Thevenin ai capi di $\overline{Z}_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{dr}$, per ottenere il circuito semplificato di figura 5.7.

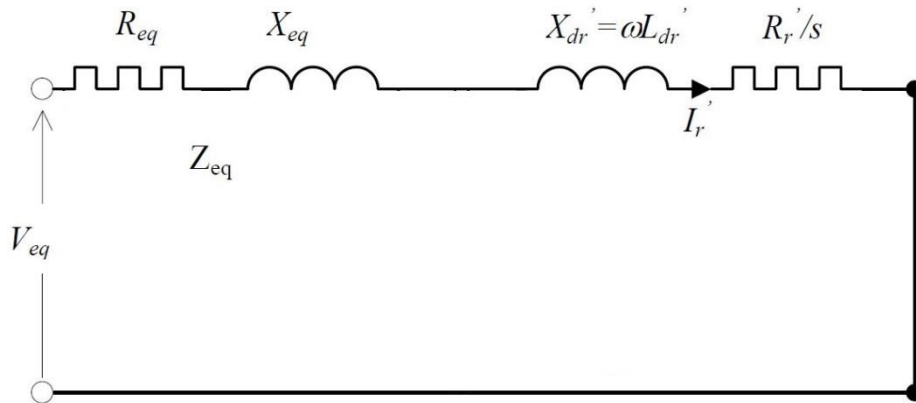


Figura 5.7 Circuito equivalente: applicazione teorema di Thevenin

$$\begin{aligned} \text{Impedenza di rotore} &= \overline{Z}_s = R_s + jX_{ds} \\ \text{Impedenza a vuoto} &= R_{Fe} // jX_m = \overline{Z}_0 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_m}{R_{Fe} + jX_m} \\ \text{Impedenza equivalente} &= \overline{Z}_{eq} = \frac{\overline{Z}_s \cdot \overline{Z}_0}{\overline{Z}_s + \overline{Z}_0} \\ \text{Tensione equivalente} &= \overline{V}_{eq} = \frac{\overline{Z}_0}{\overline{Z}_s + \overline{Z}_0} \overline{V}_s \end{aligned}$$

Dal nuovo circuito ottenuto, e noti i suoi parametri, possiamo ricavare la corrente necessaria al calcolo della coppia:

$$\overline{I}'_r = \frac{\overline{V}_{eq}}{\overline{Z}_{eq} + \overline{Z}_r} \rightarrow I'_r = \frac{V_{eq}}{\sqrt{\left(R_{eq} + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{eq} + X'_{dr})^2}} \quad [4.11]$$

Sostituendo l'espressione [4.11] nella [4.9] otteniamo dunque il valore della coppia prodotta dal motore asincrono:

$$C_m = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{R'_r}{s} I'^2_r = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_{eq} + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{eq} + X'_{dr})^2} V_{eq}^2 \quad [4.12]$$

Basandoci sui calcoli finora effettuati possiamo infine dare una valutazione della corrente e dunque della coppia di spunto.

In fase di avviamento si verifica una situazione di funzionamento a scorrimento pari ad 1 e si hanno valori di corrente e di coppia molto elevati. Benché in tali condizioni prevalga il funzionamento transitorio rispetto a quello stazionario si possono trarre comunque alcune importanti conclusioni.

Facendo ancora riferimento al circuito di figura 5.7 ed imponendo il funzionamento a scorrimento $s = 1$ avremo:

$$I'_{r\text{ avviamento}} = \frac{V_{eq}}{\sqrt{(R_{eq} + R'_r)^2 + (X_{eq} + X'_{dr})^2}} \quad [4.13]$$

$$C_{avviamento} = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{R'_r}{(R_{eq} + R'_r)^2 + (X_{eq} + X'_{dr})^2} V_{eq}^2 \quad [4.14]$$

Tali espressioni evidenziano come, in fase di avviamento, il motore produca coppie di spunto elevate, assorbendo correnti cospicue. Queste correnti possono essere fino a 10 volte più grandi rispetto al valore nominale e dunque devono essere considerate nella scelta della protezione da adottare.

4.1.6) Principali metodi di avviamento (4)

Come ricavato precedentemente, all'avviamento del motore si riscontrano forti correnti di spunto, che possono essere abbastanza elevate per portare all'intervento delle protezioni. A causa di questi fenomeni, talvolta l'avviamento diretto del motore (DOL) non è consentito e si ricorre a tecniche e dispositivi particolari.

Esistono numerose configurazioni di avviamento che si differenziano a seconda delle caratteristiche del motore e del carico (figura 4.8). La scelta ricade dunque su valutazioni elettriche, meccaniche ed economiche.

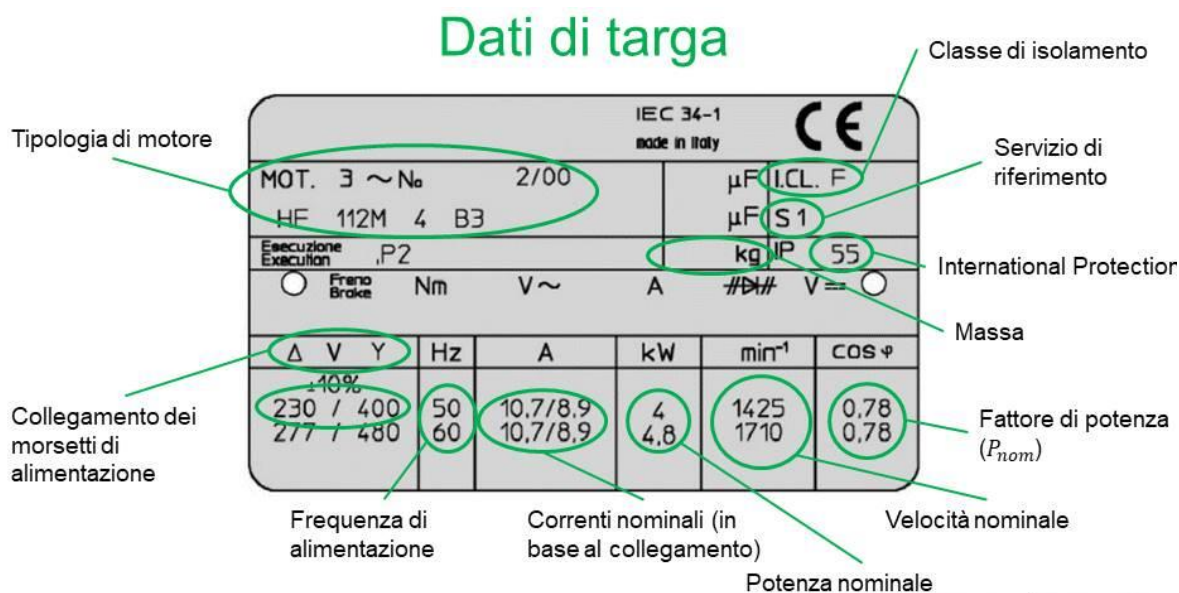


Figura 4.8 Dati di targa

- **Avviamento diretto – DOL (Direct On Line)**

Rappresenta il metodo di avviamento più semplice, in cui il motore è direttamente alimentato alla tensione di targa (figura 5.9).

Il motore si comporterà sostanzialmente come un trasformatore con secondario, formato dalla bassa resistenza di rotore, chiuso in cortocircuito. Si avrà una forte corrente indotta a rotore che si traduce in un picco della corrente di alimentazione.

A discapito dei vantaggi presentati da tale soluzione (attrezzatura ridotta, coppia di avviamento elevata, avviamento rapido, basso costo), l'avviamento DOL risulta conveniente solo in particolari condizioni:

- La macchina da controllare non necessita di un'accelerazione graduale o dispone di un dispositivo di smorzamento che limiti lo shock dovuto all'avviamento
- La coppia di avviamento può essere molto elevata senza provocare eccessivi stress meccanici

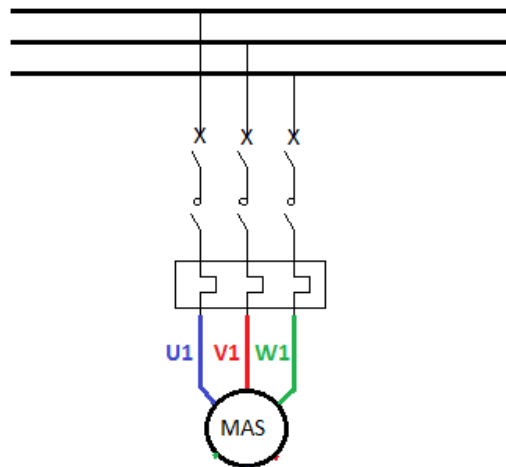


Figura 4.9 Avviamento diretto

- **Avviamento stella triangolo – Y / Δ**

Il principio di questa metodologia risiede nell'avviare il motore connettendo a stella i morsetti di alimentazione, ottenendo una tensione di fase ridotta di un fattore $\sqrt{3}$. Il picco di corrente di avviamento e la coppia di spunto risulteranno divisi per 3. Una volta stabilizzatasi la velocità il motore viene connesso a triangolo ed alimentato alla tensione nominale.

Il passaggio dal collegamento stella al collegamento triangolo deve essere regolato tramite un timer. L'interruttore Δ chiude 30÷50 millisecondi dopo l'apertura dell'interruttore Y, per prevenire la nascita di un cortocircuito dovuto alla chiusura simultanea dei due interruttori.

Al momento del passaggio alla connessione Δ si ha inoltre una breve ma forte sovracorrente dovuta alla f.e.m. controrotante del motore. Per imitare tali fenomeni transitori si introduce un ulteriore ritardo nel passaggio da stella a triangolo. Quest'ultima soluzione però può essere adottata solamente nel caso in cui la

macchina posseda un'inerzia sufficiente ad evitare un'eccessiva riduzione della velocità.

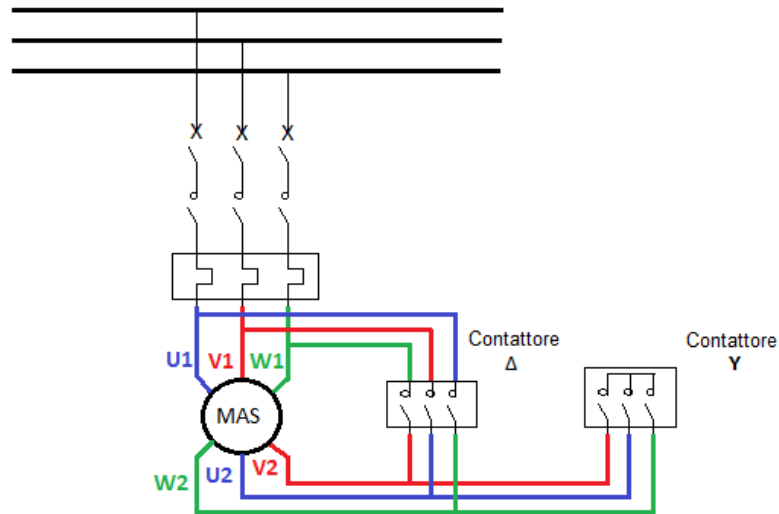


Figura 4.10 Avviamento diretto

I due metodi citati risultano essere i più comuni, e quelli di diretto interesse per soddisfare le richieste relative al progetto in corso. Tuttavia esistono altre tecniche meno diffuse che saranno citate per completezza.

- **Avviamento ad avvolgimento parziale**

Questo sistema, poco usato in Europa, ma piuttosto comune nel mercato Nord Americano, consiste nella costruzione di motori in cui l'avvolgimento di statore è suddiviso in due avvolgimenti paralleli. Tale scelta progettuale equivale alla realizzazione di due “mezzi motori” uguale potenza.

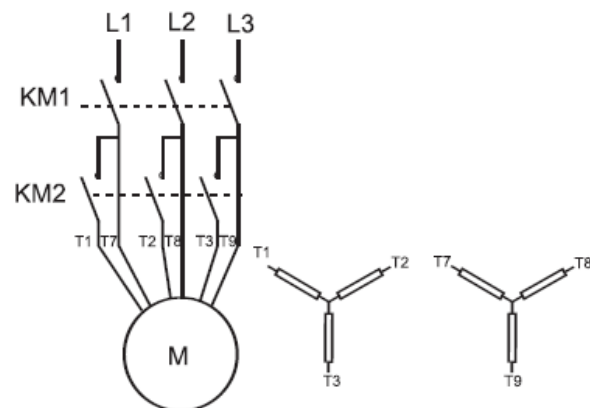


Figura 4.11 Avviamento ad avvolgimento parziale

In avviamento viene alimentata solamente una “metà”, ottenendo correnti e coppie di spunto dimezzate, ma comunque maggiori che nel caso di avviamento stella – triangolo. Alla fine del transitorio di avviamento viene collegato anche il secondo avvolgimento. Il conseguente picco di corrente sarà breve e modesto poiché l'alimentazione del motore non subisce discontinuità.

- **Avviamento con inserzione di resistenze statoriche**

Con questo sistema il motore viene avviato a tensione ridotta a causa dell'inserzione di resistenze in serie con gli avvolgimenti. Una volta che la velocità raggiunge il valore nominale le resistenze vengono eliminate e il motore viene connesso direttamente all'alimentazione. Tale processo, come nel caso dell'avviamento stella-triangolo, deve essere controllato tramite un timer.

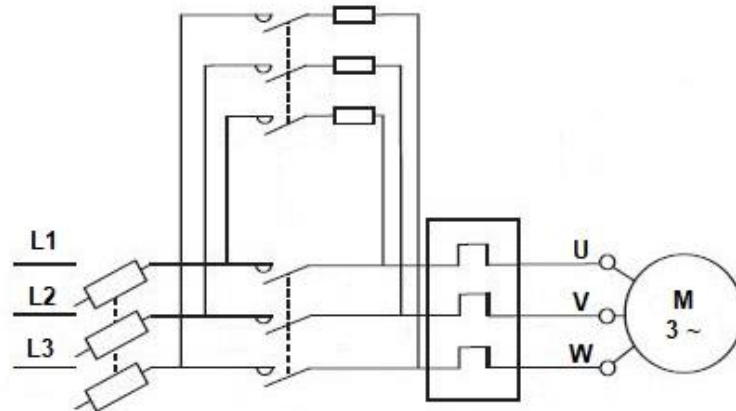


Figura 4.12 Avviamento con inserzione di resistenze statoriche

- **Avviamento con autotrasformatore**

Il motore viene alimentato a tensione ridotta grazie all'utilizzo di un autotrasformatore che sarà poi scollegato una volta terminato il transitorio di avviamento. Questa soluzione, adottata in bassa tensione per motori di potenza superiore ai 150 kW, risulta tuttavia molto costosa a causa della presenza dell'autotrasformatore.

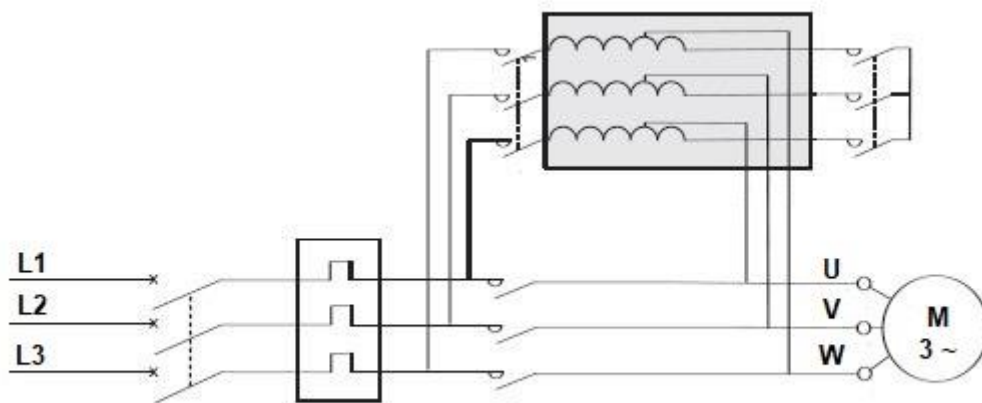


Figura 4.13 Avviamento con autotrasformatore

4.1.7) Determinazione dei parametri del circuito equivalente (3)

I parametri che costituiscono il circuito equivalente di figura 4.6 possono essere ricavati attraverso l'esecuzione di una serie di prove standard sul motore:

- Misura della resistenza di statore R_s in corrente continua
- Prova in corto circuito (o prova a rotore bloccato)
- Prova a vuoto

Per le prove elencate si ricorre ad un circuito come quello rappresentato in figura, dove oltre ai dispositivi necessari alle misurazioni, troviamo anche una sorgente di tensione continua destinata alla determinazione della resistenza R_s .

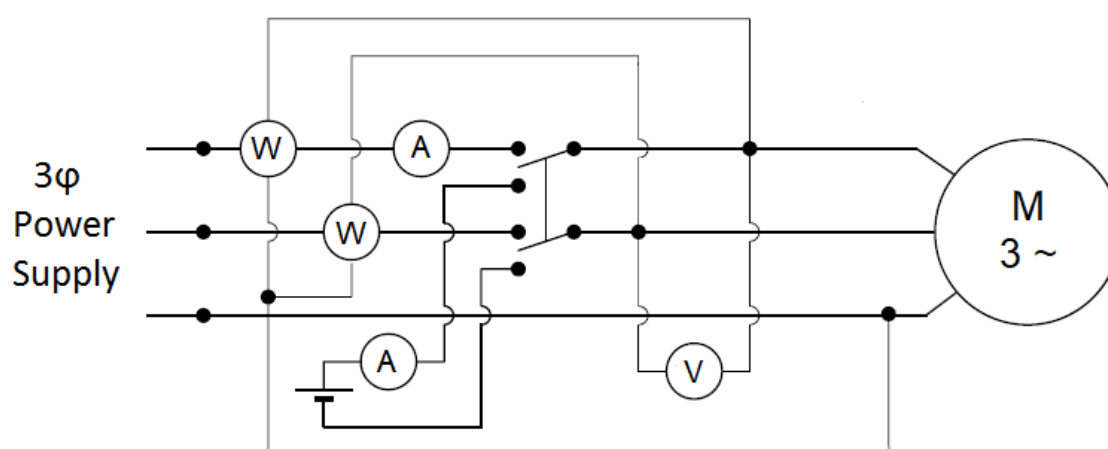


Figura 4.14 Circuito di misura per la determinazione dei parametri

Misura di R_s in corrente continua

La misura della resistenza di fase statorica viene effettuata con il metodo voltamperometrico. Tale prova deve essere condotta a temperatura ambiente così da poter fare affidamento su di un parametro di riferimento.

Il test viene condotto in maniera identica per le tre fasi della macchina ed il valore medio dei risultati ottenuti viene considerato come valore rappresentativo della resistenza di fase di statore R_s , a temperatura ambiente.

Prova in cortocircuito a rotore bloccato (X_{ds} ; X'_{dr} ; R'_r)

La prova in cortocircuito viene effettuata bloccando il rotore e misurando la corrente e la potenza assorbita dal motore, che viene alimentato con una tensione inferiore rispetto al valore nominale. In tali condizioni infatti lo scorrimento risulta pari a uno e l'impedenza equivalente assume valori molto bassi.

Durante il test la corrente deve essere tenuta sotto controllo per evitare sovracorrenti indesiderate. Tipicamente si utilizzano serie di valori prefissati: $0.25 - 0.5 - 0.75 - 1 - 1.25 \cdot I_{nom}$.

Ad ogni ciclo di misura è importante la rilevazione della temperatura θ_c dell'avvolgimento di statore, derivata dalla variazione della resistenza di fase:

$$\theta_c = (234,5 + \theta_{amb}) \frac{R_{s\ mes}}{R_{s\ amb}}$$

I valori trovati vengono quindi riportati in una tabella riassuntiva come quella proposta.

N° misura	I_{cc}	V_{cc}	P_{cc}	θ_c
1	I_1	V_1	P_1	θ_{c1}
2	I_2	V_2	P_2	θ_{c2}
3	I_3	V_3	P_3	θ_{c3}
....
n	I_n	V_n	P_n	θ_{cn}

Tabella 4.1 Prova a rotore bloccato

Nel caso di prova in cortocircuito la corrente magnetizzante e le perdite nel ferro possono essere trascurate con piccoli margini di errore, portando alla scrittura delle seguenti equazioni:

$$Q_{cc} = \sqrt{9V_{cc}^2 I_{cc}^2 - P_{cc}^2} ; R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} ; X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{3I_{cc}^2}$$

Da tali espressioni ricaviamo:

$$X_{ds} = X'_{dr} = \frac{1}{2} X_{cc} ; R'_r = R_{cc} - R_{s\ mes}$$

Infine, in modo tale da riportare tutti i parametri ad una temperatura di riferimento $\theta_{réf}$, possiamo definire il coefficiente $k_{réf}$ come segue:

$$k_{réf} = \frac{234,5 + \theta_{réf}}{234,5 + \theta_c}$$

$$R_{cc}(\theta_{réf}) = k_{réf} R_{cc}(\theta_c) ; X_{cc}(\theta_{réf}) = X_{cc}(\theta_c)$$

$$V_{cc\ phase}(\theta_{réf}) = \sqrt{X_{cc}^2 + k_{réf}^2 R_{cc}^2(\theta_c)} \cdot I_{cc} ; P_{cc}(\theta_{réf}) = k_{réf} P_{cc}(\theta_c)$$

Prova a vuoto (R_{fe} ; X_m)

La prova a vuoto viene effettuata alimentando il motore ad una tensione prestabilita, lasciando il rotore libero di ruotare a velocità di regime a vuoto. In tali condizioni, dal momento che le coppie resistenti dovute ad attrito e ventilazione sono trascurabili, lo scorrimento risulta nullo e la velocità di rotazione è pari alla velocità di sincronismo ω_s . A seguito di queste ipotesi, il circuito di riferimento a vuoto è quello rappresentato nella figura seguente.

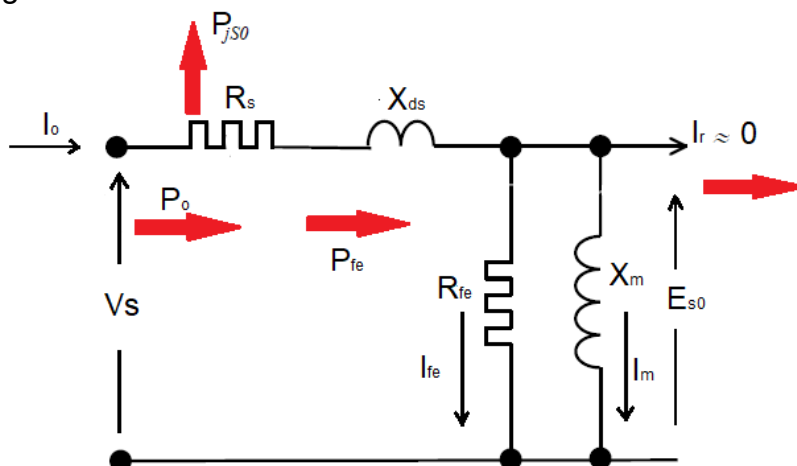


Figura 4.15 Circuito equivalente prova a vuoto

La prova viene condotta applicando valori di tensione decrescenti fino al valore minimo per cui un ulteriore abbassamento della V_s produrrebbe un incremento della corrente assorbita. Al termine della misura, come nel caso della prova a rotore bloccato, si calcola la temperatura degli avvolgimenti θ_v e si riportano i valori in una tabella riassuntiva.

N° misura	I_0	V_0	P_0
1	I_1	V_1	P_1
2	I_2	V_2	P_2
3	I_3	V_3	P_3
....
n	I_n	V_n	P_n

Tabella 4.2 Prova a vuoto

Nel funzionamento a vuoto, il motore assorbe una potenza P_0 che può essere riscritta evidenziandone le tre quote che la compongono:

- P_{js0} = perdite Joule di statore = $3R_s I_{s0}^2$
- P_{Fe} = perdite nel ferro
- P_{mec} = perdite per attrito e ventilazione

Dunque: $P_{Fe} + P_{mec} = P_0 - 3R_S I_{S0}^2$

Considerando costanti le perdite meccaniche, possiamo dedurre la perdite nel ferro, che dipendono dalla tensione di alimentazione, grazie ad un'interpolazione:

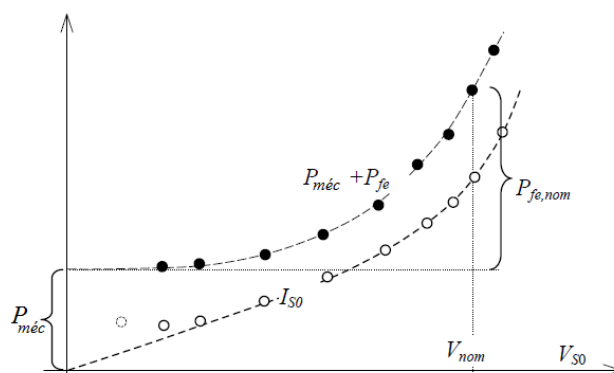


Figura 4.16 Perdite a vuoto

Dai risultati ottenuti dall'esecuzione della prova a vuoto e facendo riferimento al circuito di figura 5.15 è quindi possibile ottenere le grandezze della macchina alla tensione nominale, che permettono il calcolo dei valori necessari alla modellizzazione delle perdite a vuoto: R_{Fe} , X_m .

In primo luogo si procede con il calcolo del fattore di potenza a vuoto e della tensione indotta a statore:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0,n}}{3V_{nom}I_{S0n}}$$

$$E_{s0n} = \sqrt{[V_{0,n} - (R_S \cos \varphi_0 + X_{ds} \sin \varphi_0)I_{s0,n}]^2 + [(X_{ds} \cos \varphi_0 - R_S \sin \varphi_0)I_{s0,n}]^2}$$

I parametri trasversali saranno quindi ottenuti come:

$$R_{Fe} = \frac{3E_{s0,n}^2}{P_{Fe}} ; I_{Fe} = \frac{E_{s0,n}}{R_{Fe}}$$

$$I_m = \sqrt{I_{s0,n}^2 - I_{Fe}^2} ; X_m = \frac{E_{s0,n}}{I_m}$$

Occorre infine ricordare che le tensioni e le correnti considerate rappresentano valori di fase.

L'esecuzione delle prove descritte permette dunque la determinazione dei parametri che compaiono all'interno del circuito equivalente del motore asincrono. Grazie a tale circuito è possibile una prima stima di alcuni valori determinanti dal punto di vista del dimensionamento delle protezioni da adottare.

4.2) Modellizzazione dei sensori di corrente del relè di protezione

Il secondo aspetto relativo alla fase di modellizzazione affrontato durante lo stage è stato quello della ricerca di un modello finalizzato alla caratterizzazione dei sensori di corrente del relè di protezione.

4.2.1) Background: il sensore di corrente nel relè termico (5)

La misura delle correnti assorbite da un motore durante il suo funzionamento può essere ottenuta attraverso diverse soluzioni, a seconda del livello di protezione e di sicurezza ricercati.

I sensori di corrente assicurano due funzioni principali:

- Devono fornire un'immagine quanto più precisa e fedele della corrente misurata
- Devono assicurare la separazione elettrica tra la rete di alimentazione ed il circuito di misura, di protezione e di comando

Fornire un'immagine “precisa e fedele”

A partire dalle grandezze caratteristiche di ogni rete elettrica, ovvero tensione e corrente, gli strumenti di misura, protezione e controllo elaborano i parametri necessari per garantire la salvaguardia dei dispositivi a cui sono associati. Si hanno dunque molteplici ragioni dal punto di vista economico, della sicurezza e della continuità di servizio, per cui i segnali forniti dai sensori di corrente siano precisi e fedeli.

Possiamo dire che un sensore fornisce un'immagine precisa della corrente (segnale x_1) se il segnale in uscita (x_2) è proporzionale al segnale in ingresso a mezzo di un fattore di misura k .

$$x_1 = k \cdot x_2$$

La fedeltà del sensore in questione è invece garantita se il fattore di misura k , precedentemente introdotto, risulta essere indipendente dal tempo e dalle condizioni di funzionamento, sempre che queste ultime rientrino nei valori previsti.

Riassumendo, se per:

$$\begin{cases} t = t_1, & x_1 = k_1 \cdot x_2 \\ t = t_2, & x_1 = k_2 \cdot x_2 \end{cases}$$

E $k_1 = k_2$, allora il sensore di corrente è fedele.

Il fattore di misura, ovvero il rapporto di trasformazione, permette di adattare il segnale da misurare alle prestazioni del dispositivo di misura ed al suo sistema di analisi dei dati. Gli apparecchi destinati a tali funzioni, utilizzano segnali di ingresso di basso livello, che dunque non possono accettare le perturbazioni presenti sulla rete di alimentazione.



Separare elettricamente la rete di alimentazione ed il circuito di misura

La rete di alimentazione è sede di perturbazioni elettriche ed elettromagnetiche non trascurabili. Queste perturbazioni sono legate alle manovre dei dispositivi di interruzione (sezionatori, interruttori, disgiuntori e contattori), alle scariche atmosferiche a cui sono sottoposte le linee aeree ed alla comparsa o all'eliminazione di guasti. La nascita di questi fenomeni crea delle componenti che vanno a sovrapporsi alle grandezze nominali di corrente e tensione portando a notevoli disturbi. La bontà della misura del segnale dipenderà dunque dall'isolamento galvanico garantito dal sensore, in modo tale da separare il circuito di misura dalle perturbazioni introdotte dalla rete.

Possiamo citare due grandi famiglie di sensori di corrente:

- I trasformatori di corrente (TA)
- I sensori a Bobina di Rogowski

Trasformatori di corrente – TA

Questo tipo di sensore è formato da due circuiti elettrici, un primario ed un secondario, e da un circuito magnetico. Il segnale in uscita fornito al secondario è della stessa natura della grandezza misurata al primario, ed il sensore si comporta come un alimentatore di corrente.

Nonostante il fatto che, a seguito della presenza del circuito magnetico, la gamma di utilizzo sia limitata dai fenomeni di saturazione, i trasformatori di misura risultano essere la tipologia di sensore più utilizzata nell'ambito della media ed alta tensione.

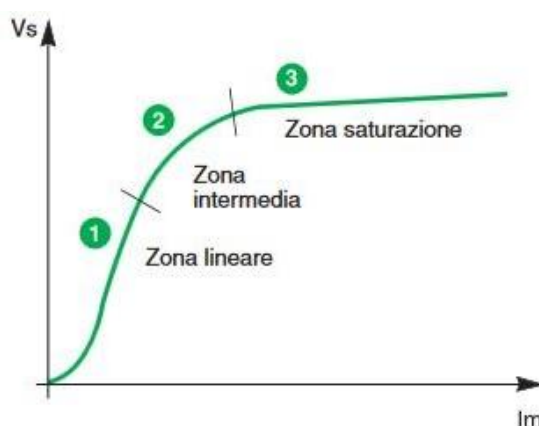


Figura 4.17 Esempio di curva di magnetizzazione del TA

Un TA può presentare diversi circuiti secondari (figura 4.18), ciascuno dei quali è destinato ad una funzione ben precisa.

- **Secondario di misura**

Il TA di misura presenta una fascia di precisione (linearità) molto ristretta, intorno ai valori di corrente nominale

- **Secondario di protezione**

In questo caso la zona di linearità è molto larga, fino a 10 – 20 volte la corrente nominale. La fascia di funzionamento di un TA di protezione è comunque di molto

superiore a quella di funzionamento, poiché devono essere considerate anche le correnti di cortocircuito.

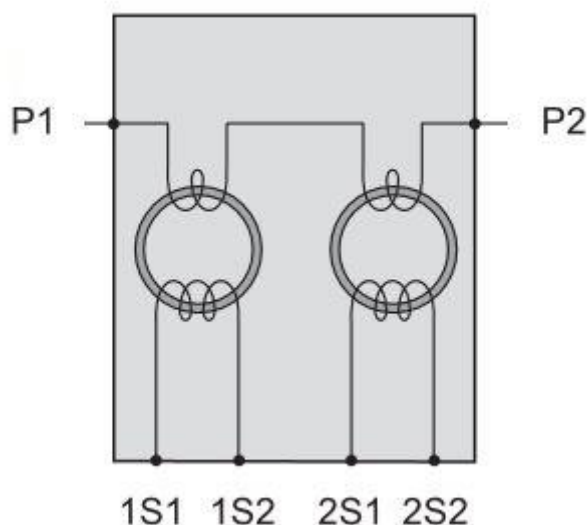


Figura 4.18 Schema di un TA a due secondari

Sensore a bobina di Rogowski

Questo tipo di sensore è costituito da una bobina avvolta in aria (o su di un supporto non ferromagnetico) e posizionata attorno al conduttore del quale vogliamo misurare la corrente. Ai capi dell'avvolgimento avremo una tensione direttamente proporzionale alla corrente misurata.

Il sensore Rogowski si differenzia dalle altre tipologie di sensori per l'assenza di materiale magnetico al suo interno. Questa caratteristica conferisce al dispositivo una perfetta linearità lungo una vasta gamma di correnti, senza alcuna dipendenza dalla frequenza.

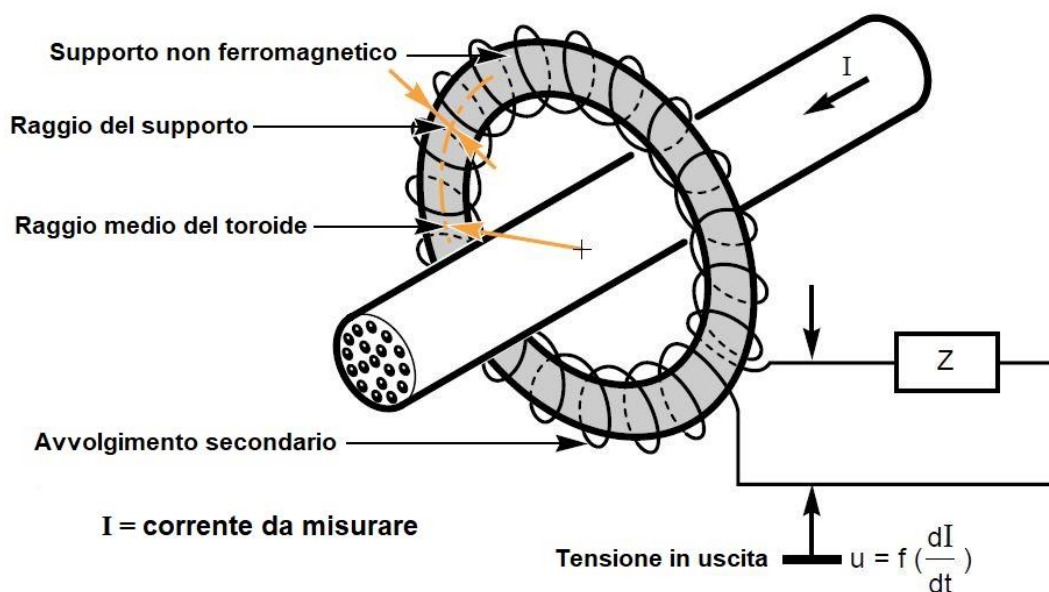
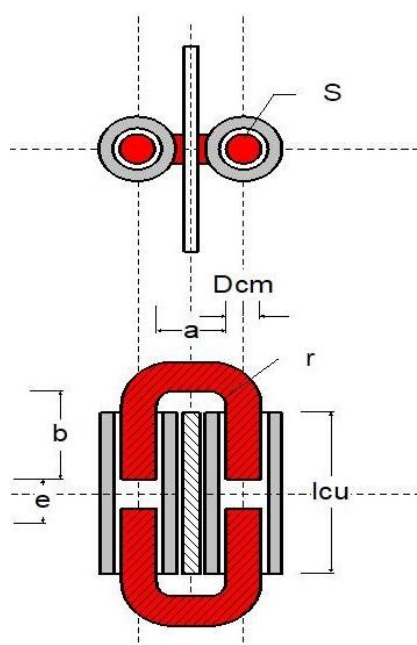


Figura 4.19 Bobina di Rogowski

4.2.2) Caratterizzazione dei sensori di corrente

Il sensore di corrente utilizzato per il relè di sovraccarico in fase di progetto è un avvolgimento di Rogowski modificato, in cui il modello classico descritto in precedenza è stato adattato per soddisfare le esigenze ed ottenere le specifiche richieste.

Il supporto non ferromagnetico tradizionale è stato sostituito con l'inserzione di un circuito magnetico ad alta permeabilità e l'avvolgimento è stato suddiviso in due bobine identiche collegate in serie e disposte sui due lati del nucleo magnetico. Tale scelta ha portato ad un guadagno in termini di spazio, ma ha introdotto i limiti conseguenti alla non linearità tipici dei TA ed assenti nei sensori specifici a bobina di Rogowski.



Parametri costanti per calibro :

U circuito magnetico	Nom	IT
b=>altezza di U	1,03E-02	2,00E-04
Dcm=>Diametro di U	3,00E-03	4,00E-05
a=>distanza interna di U	6,65E-03	2,50E-04
r=>raggio di curvatura di U	1,50E-03	5,00E-05
coef1=>coef di dispersione magn.	2,2	2,20E-01

Componenti PCB	Nom	IT
Rch=>Resistenza di carico	47000	470
R=>resistenza filtro	3,3E+05	3,3E+03
C=>capacità filtro passa basso	2,2E-08	6,6E-10

Materiali	Nom	IT
Mu0=>permeabilità del vuoto	1,3E-06	0
Mur=>permeabilità relativa	15000	1000
Bsup=>Induzione limite	0,750	0,01

Figura 4.20 Sensore di corrente

Dal momento che il relè termico deve essere specificatamente adattato al motore da proteggere e dunque alla sua corrente nominale, i sensori sono suddivisi in diverse gamme al variare della corrispondente I_n .

Tutte le gamme di sensori presentano alcune caratteristiche in comune, riassunte nella tabella di figura 4.20, relative a dimensioni, componenti e materiali utilizzati.

Al variare della serie, e dunque della corrente di riferimento, varieranno alcuni aspetti tipici quali la lunghezza del traferro, il numero di avvolgimenti di ciascuna delle due bobine, la resistenza equivalente ecc.

Gamme di sensori in funzione della corrente nominale:

- Serie 1: current range **0,15...0,6 [A]**
- Serie 2: current range **0,35...1,4 [A]**
- Serie 3: current range **1,25...5 [A]**
- Serie 4: current range **3...12 [A]**
- Serie 5: current range **4,5...18 [A]**
- Serie 6: current range **8...32 [A]**

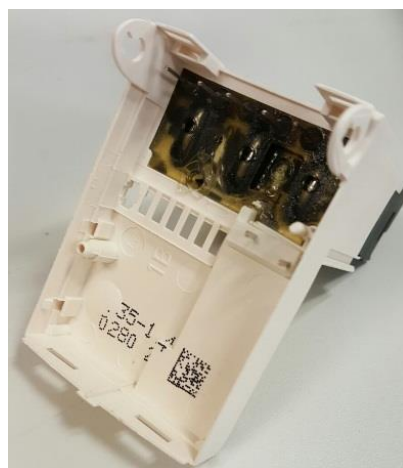


Figura 4.21 Sensore serie 2: 0.35...1.4 [A]

Per verificare il buon funzionamento dei sensori e fornire un modello sufficientemente preciso è stato dunque necessario effettuare una serie di prove in laboratorio, in modo tale da fondare gli studi su di una base di dati soddisfacente.

4.2.3) Realizzazione del banco di prova

I test sono stati effettuati su di un insieme di 60 sensori, 10 per ciascuna gamma di corrente, e per ognuno di essi sono stati utilizzati dei valori di corrente ben determinati.

L'iniezione di corrente a primario è stata realizzata attraverso un amplificatore di corrente OMICRON – CMS 356 (figura 4.22). La vasta gamma di correnti d'uscita fornite da tale dispositivo lo rendono ideale per testare i moderni relè di protezione ed una semplice interfaccia web (figura 4.23) ne garantisce la configurazione ed il monitoraggio.

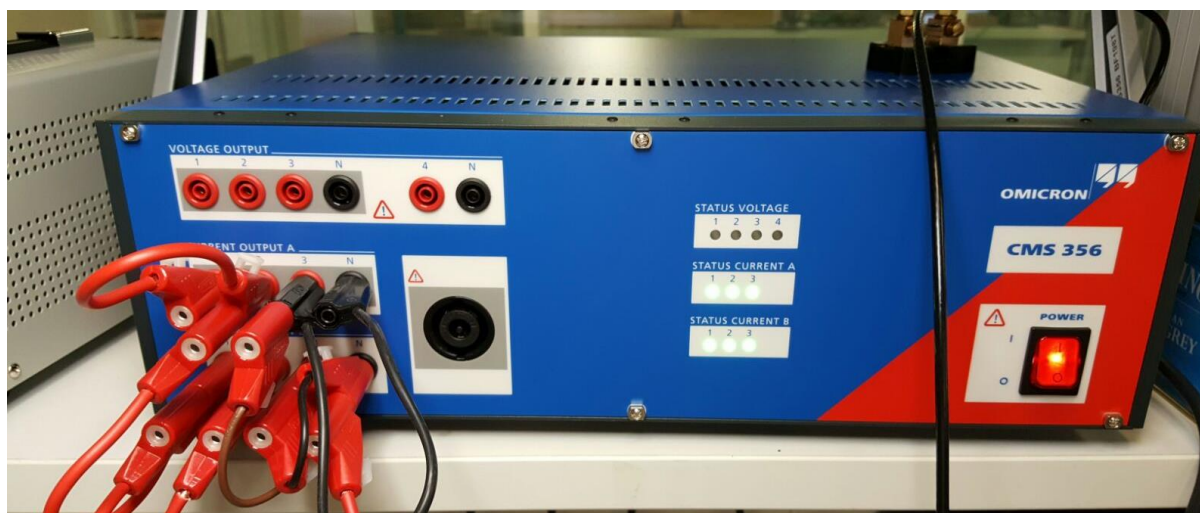


Figura 4.22 Amplificatore di tensione e corrente OMICRON – CMS 365

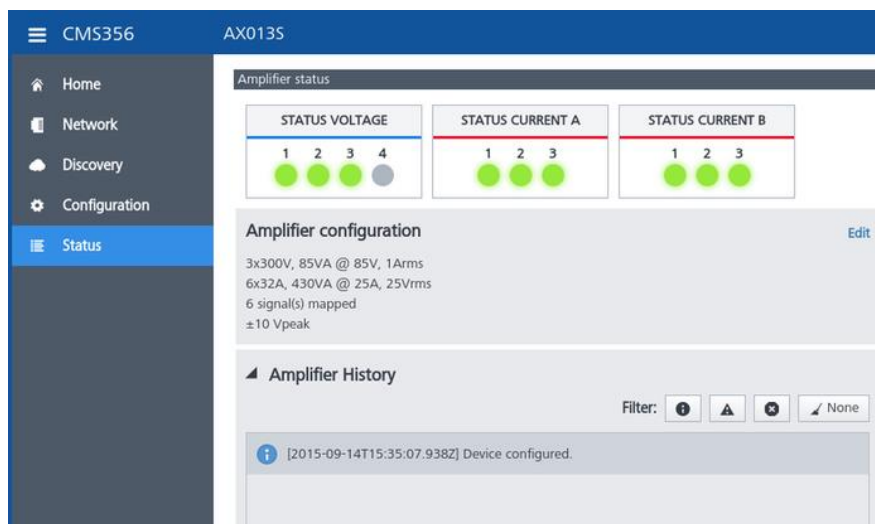


Figura 4.23 Interfaccia web OMICRON – CMS 365

Per quanto riguarda l'acquisizione e l'analisi dei dati, essa è stata realizzata utilizzando una carta DAQ USB – 6343 di National Instruments. Il controllo di tale carta è stato effettuato attraverso un software Schneider programmato tramite LabVIEW. In tale modo, collegando contemporaneamente la carta d'acquisizione all'amplificatore OMICRON ed al computer utilizzato per i test, è stato possibile controllare l'ampiezza delle correnti iniettate a primario ed inviare al computer i valori d'uscita.

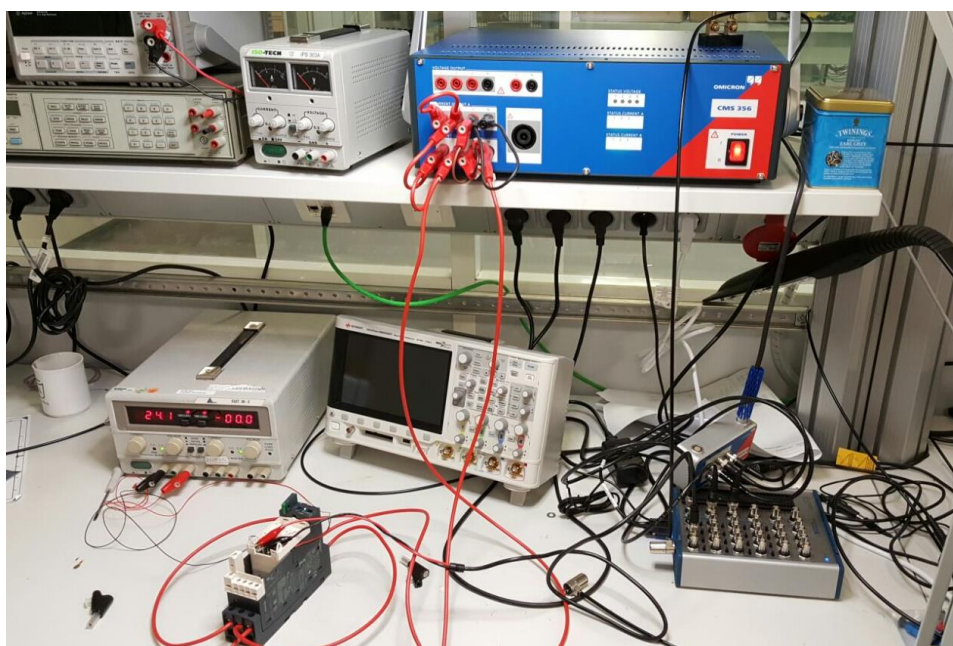


Figura 4.24 Banco di test

Grazie al software utilizzato i risultati delle misure sono stati acquisiti direttamente sul PC utilizzato per il controllo della carta, organizzati sotto forma di fogli di lavoro Excel, rendendo l'analisi più ordinata ed immediata.

Prima di procedere con l'acquisizione vera e propria è stato però necessario effettuare alcuni test preliminari per verificare il buon funzionamento del circuito di prova realizzato.

Iniettando a primario dei valori di corrente molto bassi, intorno ad $\frac{1}{10}$ del valore della corrente minima della prima serie di sensori, si è riscontrato che le forme d'onda d'uscita erano affette da una forte componente di ripple (figura 4.25), che rendeva i dati inutilizzabili ai fini della nostra applicazione.

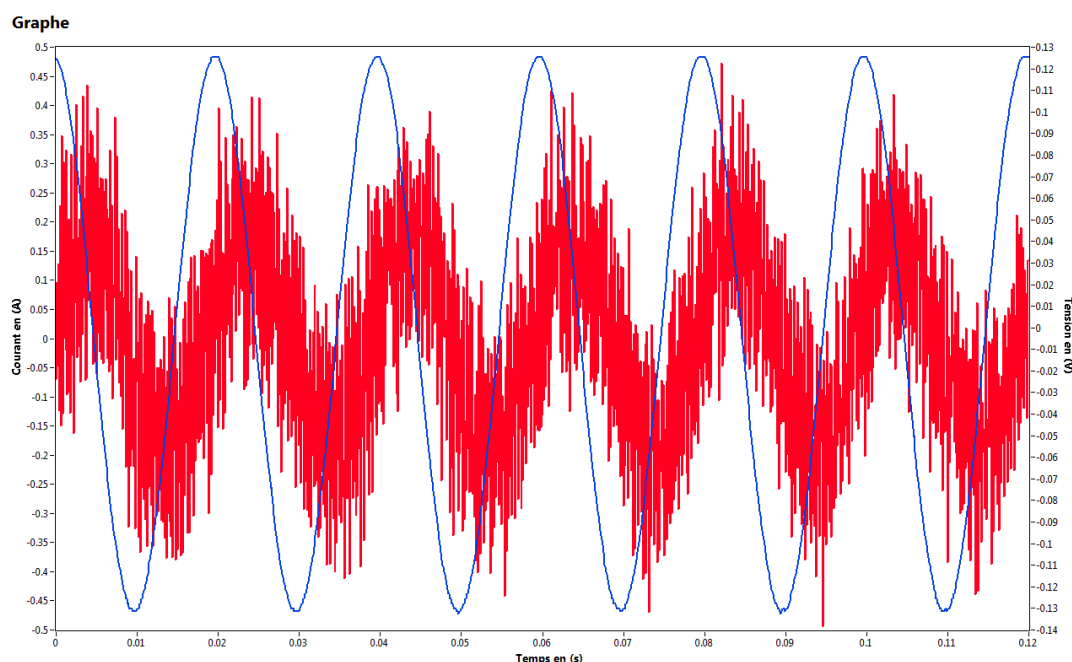


Figura 5.25 Corrente iniettata in blu – Tensione in uscita in rosso

Riconsiderando dunque l'intero banco di prova si è trovato che il rumore presente al secondario del sensore nasceva da un ripple ad alta frequenza dovuto all'amplificatore di corrente. Tale componente risulta trascurabile sulla corrente iniettata a primario ma assolutamente inaccettabile sulle forme d'onda in uscita.

Per risolvere tale inconveniente si è scelto di inserire nel circuito di misura una carta elettronica di filtraggio (figura 4.26), che permettesse di eliminare tutte le armoniche di frequenza superiore ad 1 kHz.

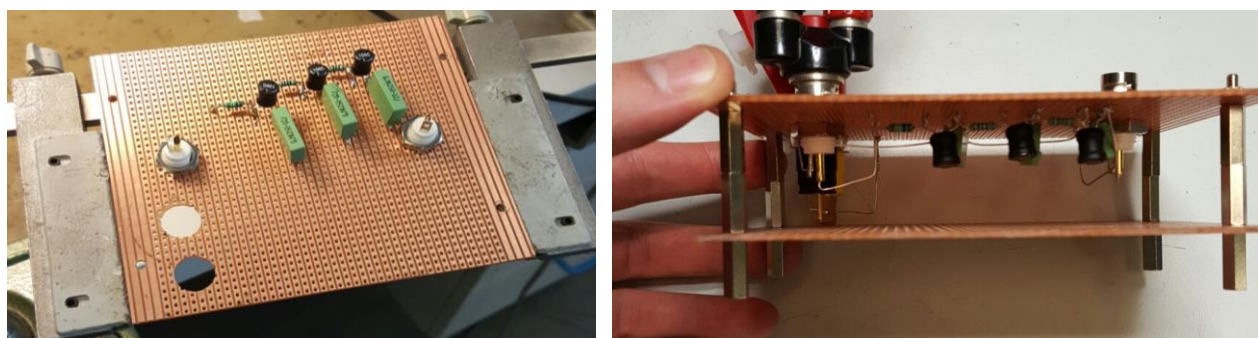


Figura 4.26 Carta elettronica di filtraggio

La scelta del filtro è stata facilitata dall'utilizzo del software di simulazione LTspice. Grazie all'aiuto di tale software, per determinare i valori dei componenti da utilizzare per la realizzazione della carta, sono state sufficienti solamente alcune simulazioni (figura 4.27, figura 4.28).

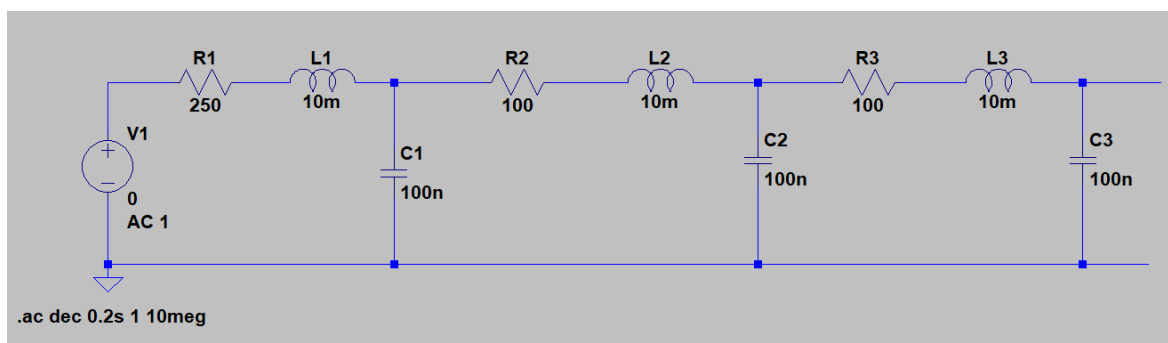


Figura 4.27 Filtro passa basso – LTspice

Una volta inserito il filtro nel circuito di misura è stato possibile eliminare il rumore di fondo ed ottenere forme d'onda in uscita sufficientemente precise anche nel caso di valori molto deboli di corrente a primario (figura 4.28).

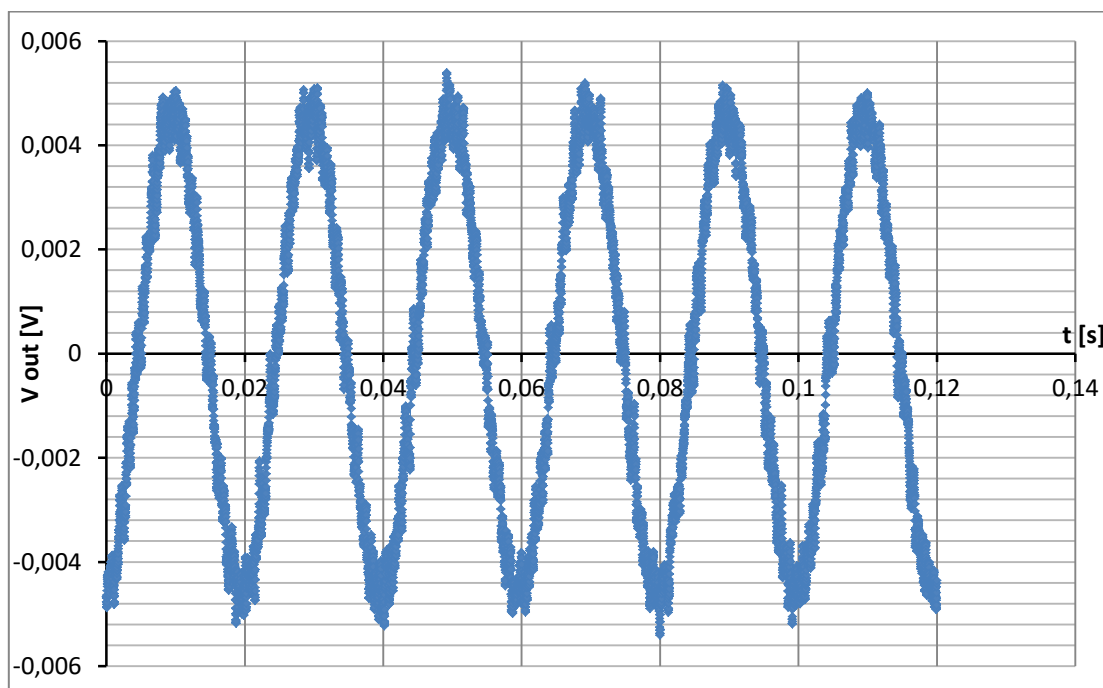


Figura 4.28 v_{out} per $I_p = 0.035$ [A]

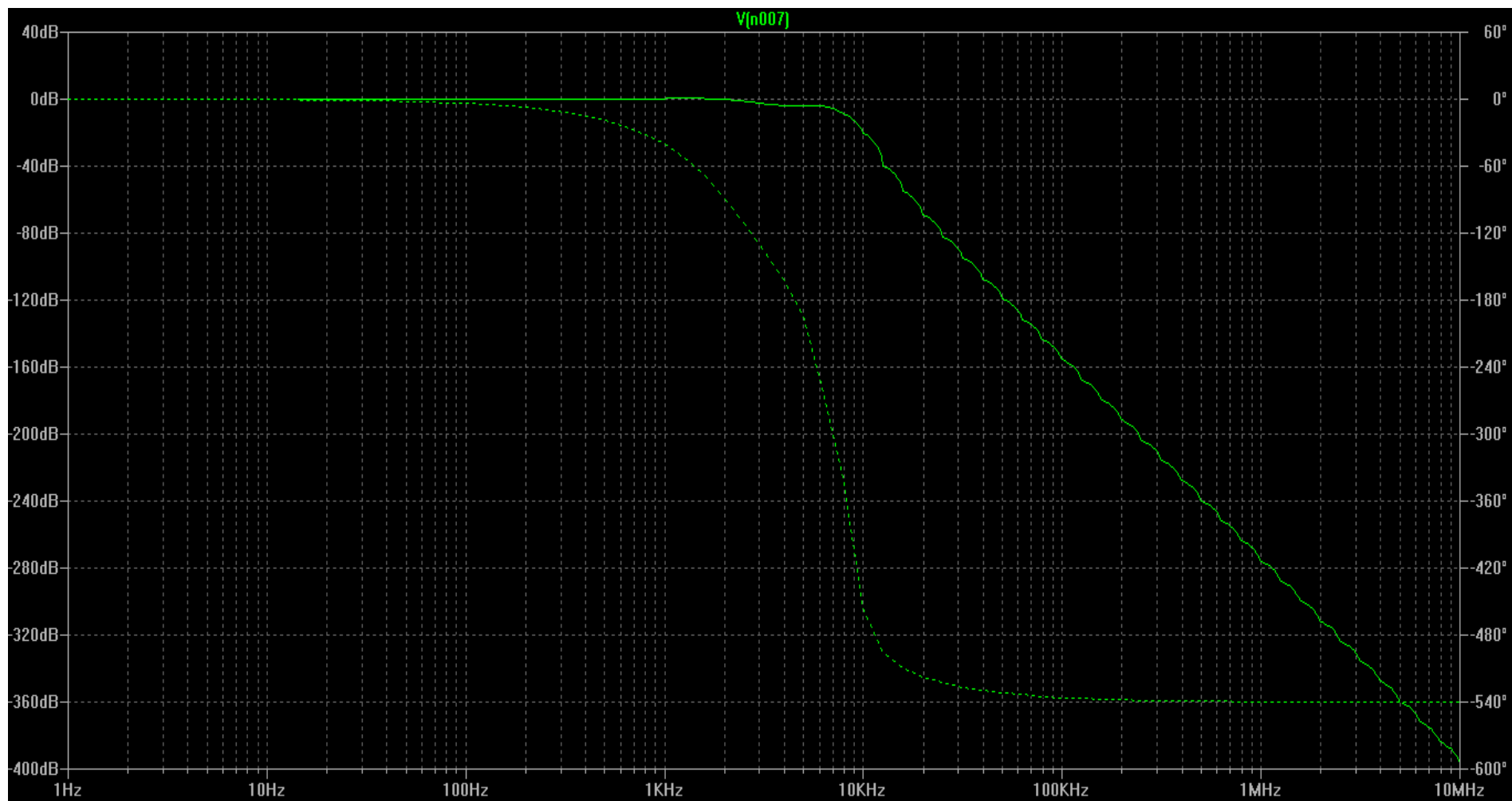


Figura 4.28 Diagramma di Bode filtro passa basso – LTspice

Eliminato il problema rappresentato dal rumore presente sulle forme d'onda in uscita, si è passati alla fase di test effettiva.

Per ciascun sensore di ognuna delle sei taglie disponibili sono state effettuate tre prove, una per ogni fase del dispositivo. Sfruttando la versatilità delle possibili configurazioni dell'amplificatore, le correnti iniettate al primario di ogni fase sono state suddivise in venti valori compresi tra $\frac{1}{10} \cdot I_{min}$ e $10 \div 20 \cdot I_{max}$.

I risultati di ogni prova, come anticipato, vengono acquisiti sotto forma di fogli di lavoro Excel. Si hanno dunque a disposizione le forme d'onda della tensione indotta a secondario per ogni corrente iniettata ed un file riassuntivo nel quale viene riportato l'andamento del valore efficace in uscita dal sensore in funzione della corrente a primario (vedi esempio pagina seguente e risultati in appendice A).

Una volta terminate le prove ed una volta raccolti tutti i dati necessari per effettuare l'analisi richiesta, è stato possibile procedere con la rielaborazione dei risultati e con la caratterizzazione del sensore di corrente.

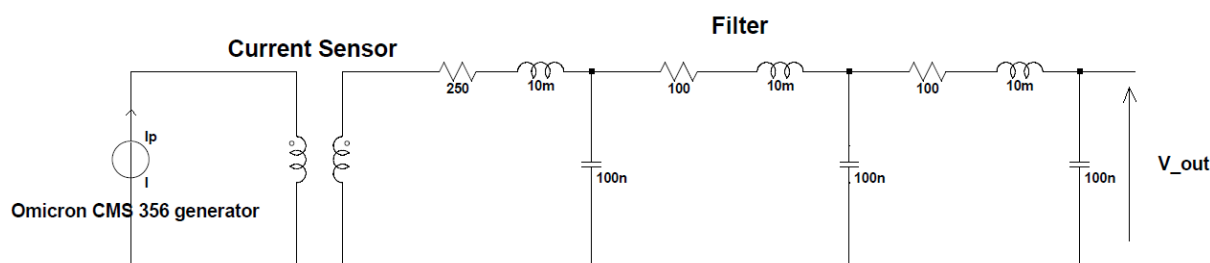


Figura 4.29 Circuito di misura

Esempio: Serie 3: Current Range 1.25...5 [A] Sensori: SN63 - SN69 - SN70

Sensor Current Range 1,25...5 [A]									
Serial Number	63			69			70		
Current [A]	Current phase 1	Current phase 2	Current phase 3	Current phase 1	Current phase 2	Current phase 3	Current phase 1	Current phase 2	Current phase 3
0,125	0,003813	0,003812	0,003772	0,003756	0,00379	0,003786	0,003456	0,003814	0,003849
0,25	0,0076	0,007598	0,007515	0,007484	0,007545	0,007538	0,006888	0,007596	0,007657
0,5	0,015221	0,015226	0,01505	0,014992	0,015113	0,015106	0,013803	0,015216	0,015335
0,75	0,02286	0,02286	0,022599	0,022517	0,022694	0,022685	0,020735	0,022851	0,023027
1,25	0,038214	0,038212	0,037777	0,037647	0,037943	0,037925	0,034658	0,038214	0,038484
2,5	0,076774	0,076767	0,075931	0,075713	0,076268	0,076195	0,069632	0,076849	0,077334
5	0,154476	0,154462	0,152899	0,152635	0,15351	0,153253	0,140009	0,154855	0,155689
10	0,31153	0,311429	0,308263	0,307982	0,309416	0,308776	0,281879	0,312328	0,313928
15	0,468967	0,468762	0,463854	0,463548	0,465569	0,464654	0,424007	0,470008	0,472427
20	0,626163	0,625853	0,619173	0,618871	0,621464	0,620297	0,56592	0,627428	0,630655
25	0,782898	0,782494	0,774036	0,773725	0,776945	0,775514	0,707444	0,784376	0,788419
30	0,939147	0,938644	0,928436	0,92811	0,931954	0,930271	0,848588	0,940828	0,945693
40	1,24996	1,249342	1,235599	1,235286	1,240384	1,238208	1,129553	1,25211	1,258548
50	1,558499	1,557796	1,54052	1,540165	1,546602	1,543929	1,408749	1,561067	1,569235
70	2,168246	2,166249	2,141361	2,142934	2,150857	2,146207	1,961462	2,170017	2,181461
80	2,465184	2,462067	2,431613	2,436738	2,444126	2,436429	2,231575	2,465374	2,477195
90	2,747533	2,743345	2,705473	2,716798	2,721942	2,7083	2,490447	2,744928	2,755514
100	3,004092	3,000617	2,955404	2,971723	2,975279	2,954409	2,7277	2,999873	3,008411
110	3,233916	3,230945	3,180194	3,199708	3,202194	3,174525	2,940456	3,228447	3,234836
120	3,441123	3,438094	3,383312	3,40489	3,406654	3,373398	3,132111	3,434678	3,438769

Figura 4.30 Estratto Tabella riassuntiva Range 1.25...5 [A]



current-range-1_25-5 sensore: SN 63 Fase 1

	Ip (A)	Freq (Hz)	Us1 Rms Mesurée (V)
Palier 1	0,12	50	0,003813
Palier 2	0,25	50	0,0076
Palier 3	0,5	50	0,015221
Palier 4	0,75	50	0,02286
Palier 5	1,25	50	0,038214
Palier 6	2,5	50	0,076774
Palier 7	5	50	0,154476
Palier 8	10	50	0,31153
Palier 9	15	50	0,468967
Palier 10	20	50	0,626163
Palier 11	25	50	0,782898
Palier 12	30	50	0,939147
Palier 13	40	50	1,24996
Palier 14	50	50	1,558499
Palier 15	70	50	2,168246
Palier 16	80	50	2,465184
Palier 17	90	50	2,747533
Palier 18	100	50	3,004092
Palier 19	110	50	3,233916
Palier 20	120	50	3,441123

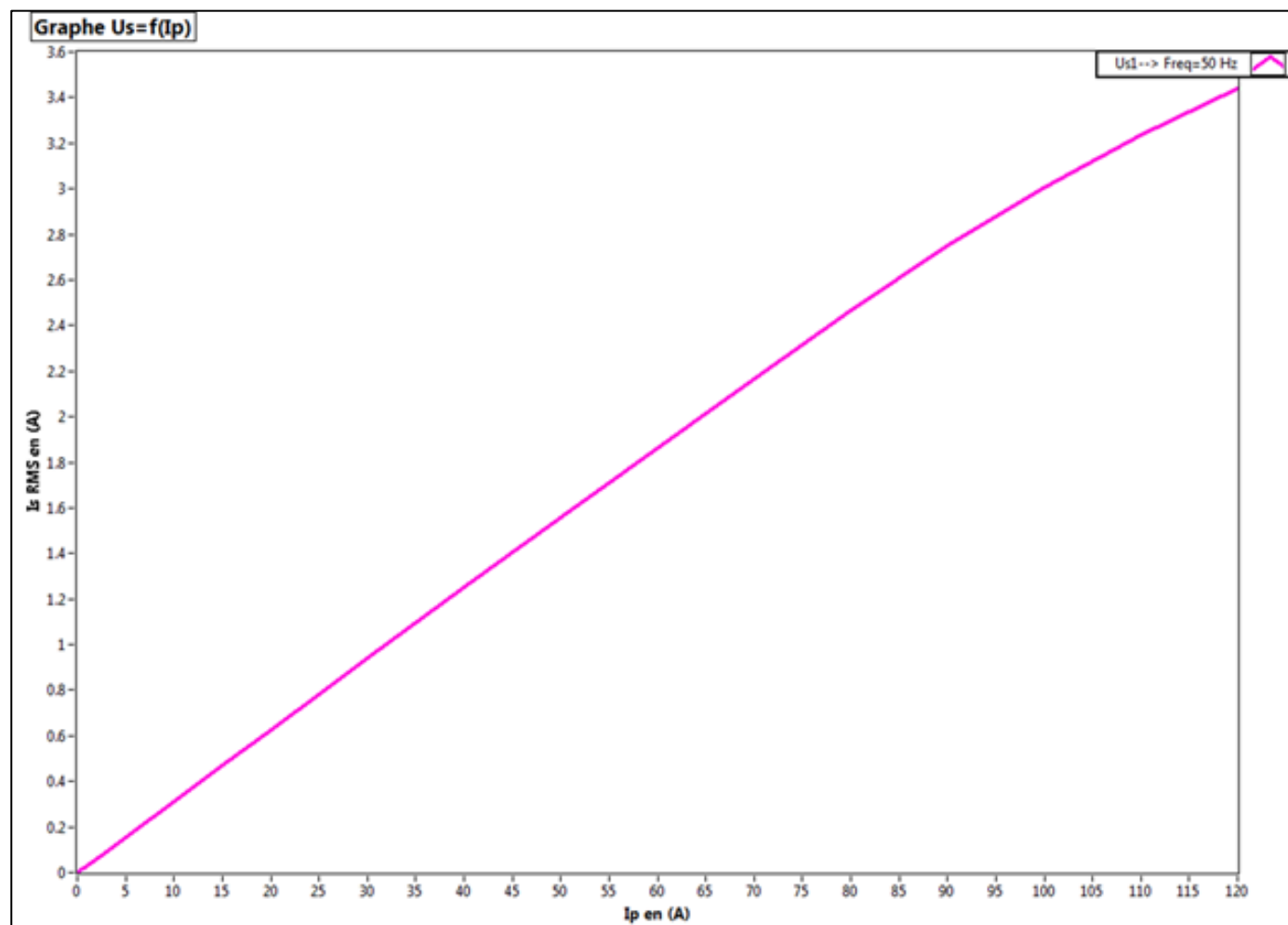
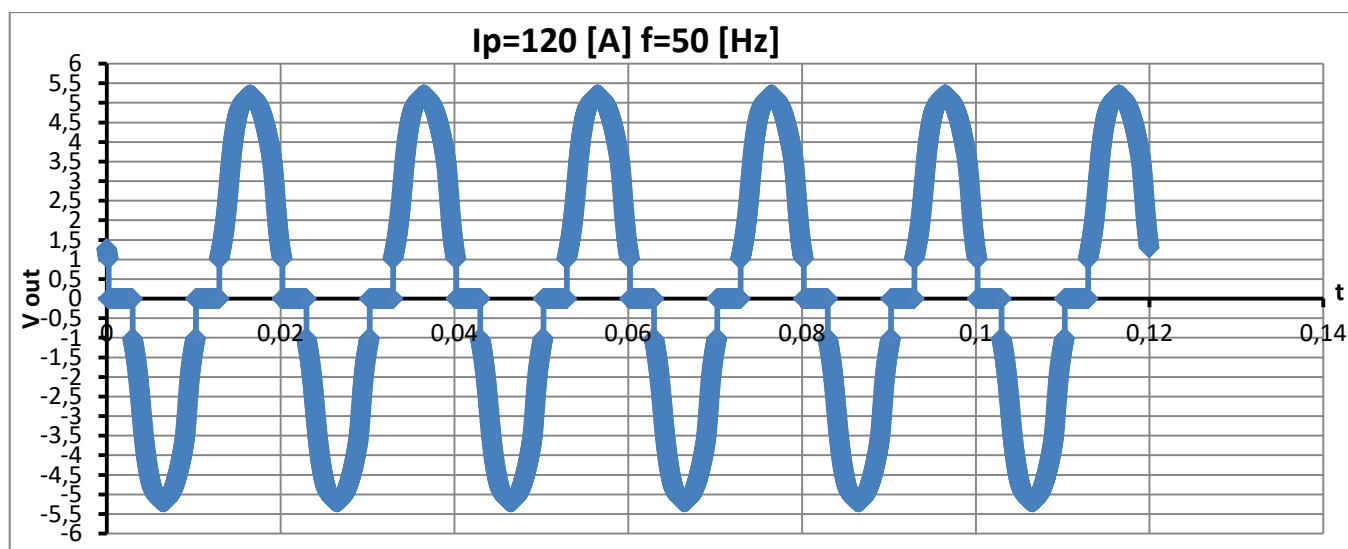
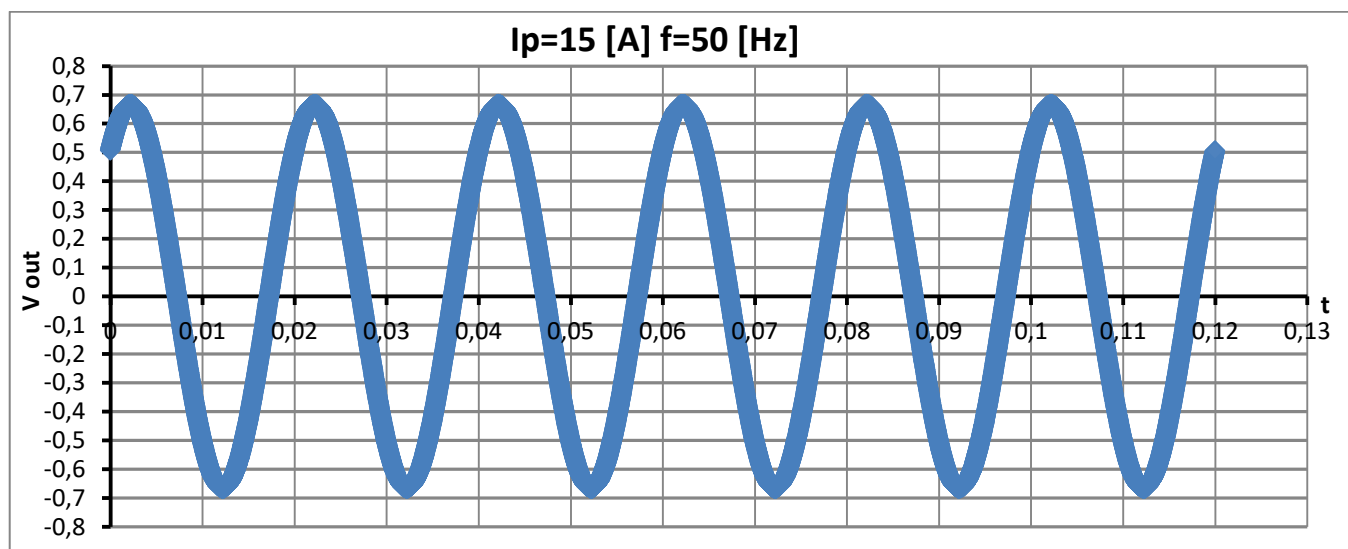


Figura 4.31 Esempio sensore SN 63

Esempio: Serie 3: Current Range 1.25...5 [A] Sensore SN63: Saturazione del nucleo magnetico



4.2.4) Modello di base: guadagno medio e deviazione standard

Il primo approccio alla modellizzazione del dispositivo è stata la determinazione di un guadagno costante, ovvero del rapporto di trasformazione del sensore (vedi sezione 4.2.1).

L'operazione preliminare è stata quella di riassumere i risultati delle prove, riguardanti le tre fasi di ciascun sensore, in un unico foglio di lavoro (un estratto della tabella è presentato in figura 4.30). Per ogni serie abbiamo poi calcolato il valore medio della tensione misurata al secondario di ciascuna fase, al variare della corrente primaria iniettata.

Ip	MEDIA	G
0,125	0,0037868	9,64301E-05
0,25	0,007543233	9,60434E-05
0,5	0,015121833	9,62686E-05
0,75	0,022716633	9,64124E-05
1,25	0,037991433	9,67444E-05
2,5	0,076388833	9,72613E-05
5	0,153809767	9,79183E-05
10	0,310027933	9,8685E-05
15	0,4665248	9,89996E-05
20	0,622778333	9,91183E-05
25	0,778581267	9,9132E-05
30	0,9339034	9,90902E-05
40	1,2429126	9,89078E-05
50	1,549619533	9,86518E-05
70	2,154284267	9,79614E-05
80	2,4468207	9,73559E-05
90	2,723240867	9,63149E-05
100	2,975069333	9,46994E-05
110	3,201104167	9,26312E-05
120	3,405143833	9,03242E-05

A partire dai valori medi d'uscita così ottenuti abbiamo calcolato il guadagno medio relativo ad ogni valore di corrente iniettata:

$$G_{Ip} = \frac{MEDIA}{I_p}$$

Facendo infine riferimento alla fascia di valori tipici della corrente di funzionamento, compresa tra $20\%I_{rmin}$ e $20 \cdot I_{rmax}$, abbiamo determinato un guadagno nominale costante valido per tutti i sensori della serie considerata.

Considerando ancora il caso d'esempio della serie 3:

$$G_{nominale} = \frac{\sum_{G_{Ip=0.25}}^{G_{Ip=100}} G}{17} = 9.76215E-05$$

Figura 4.31 Guadagno medio range 1.25...5 [A]

20% Irmin	0,25	Gnom	9,76215E-05	Gain moyen dans les valeurs d'utilisation
20*Irmax	100			

Per completare lo studio dei dati a disposizione e dei risultati ottenuti, è stata in seguito effettuata una semplice analisi statistica. L'obiettivo è stato quello di calcolare l'errore massimo relativo al guadagno di ciascuna corrente per rapporto al guadagno nominale.



SDmin	SDmax
8,90347E-05	0,00010383
8,86688E-05	0,00010342
8,88331E-05	0,0001037
8,89521E-05	0,00010387
8,9203E-05	0,00010429
8,96119E-05	0,00010491
9,01167E-05	0,00010572
9,07364E-05	0,00010663
9,09949E-05	0,000107
9,1091E-05	0,00010715
9,10994E-05	0,00010716
9,10646E-05	0,00010712
9,09172E-05	0,0001069
9,07164E-05	0,00010659
9,02421E-05	0,00010568
8,98532E-05	0,00010486
8,91382E-05	0,00010349
8,78385E-05	0,00010156
8,60265E-05	9,9236E-05
8,39412E-05	9,6707E-05

Tale analisi è stata effettuata ricorrendo al calcolo della scarto quadratico medio (SD – Standard Deviation).

Facendo ancora una volta riferimento alla serie d'esempio, sono stati ottenuti i risultati riportati in tabella:

$$SD_{max} = (AN7 + 4 * ECARTYPE.STANDARD(B7:AE7)) / (AM7 * 2 * 50 * PI())$$

$$SD_{min} = (AN7 - 4 * ECARTYPE.STANDARD(B7:AE7)) / (AM7 * 2 * 50 * PI())$$

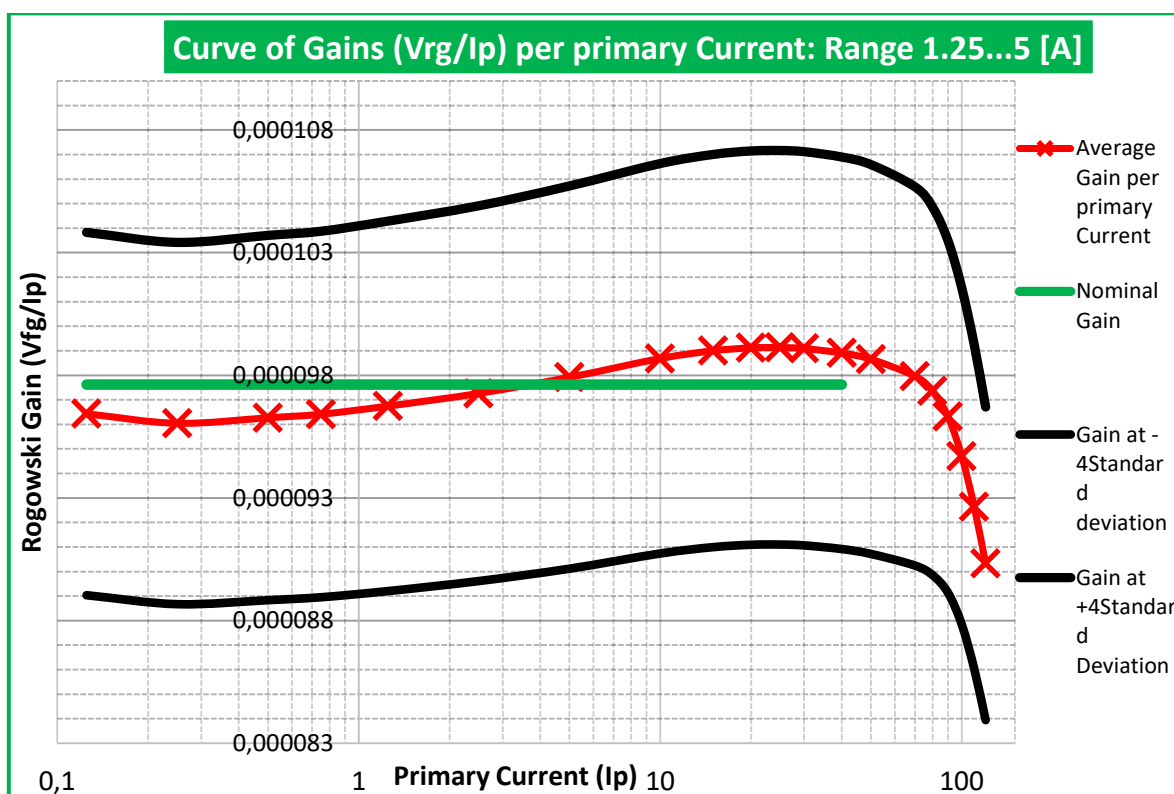
Valore medio
della tensione
in uscita

Deviazione standard tensione
in uscita

Corrente iniettata a primario

Errore min	Errore max	Errore min %	Errore max %
0,00008784	0,00010716	-0,10021282	0,0978

I Dati derivanti dallo studio descritto sono stati infine raggruppati all'interno di grafici riassuntivi nei quali sono riportati gli andamenti del guadagno medio, dell'errore e del guadagno nominale, il tutto in funzione della corrente iniettata a primario.



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	97,6	μV/A	Average of gains over measurement dynamic (20%I _{rmin} ..15I _{rmax})
Max Error	±10	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation



L'analisi sin qui condotta ha portato ad una prima modellizzazione del dispositivo, basata sul guadagno nominale relativo a ciascuna serie di sensori. Tale modello, realizzato sul software Simulink, rappresenta il sensore nel suo aspetto base, schematizzandolo come un blocco di derivazione seguito da un guadagno costante (figura 4.32).

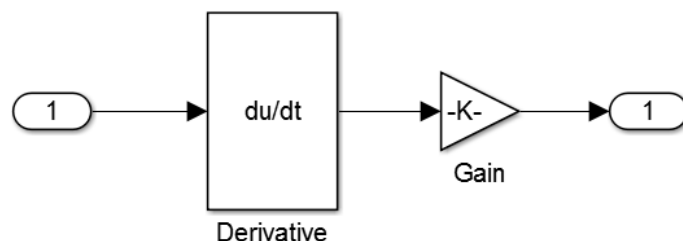


Figura 4.32 Sensore a guadagno costante

Il guadagno K inserito nel modello rappresenta il guadagno nominale precedentemente calcolato e deve essere regolato in funzione della corrente considerata (rotary switch figura 4.33).

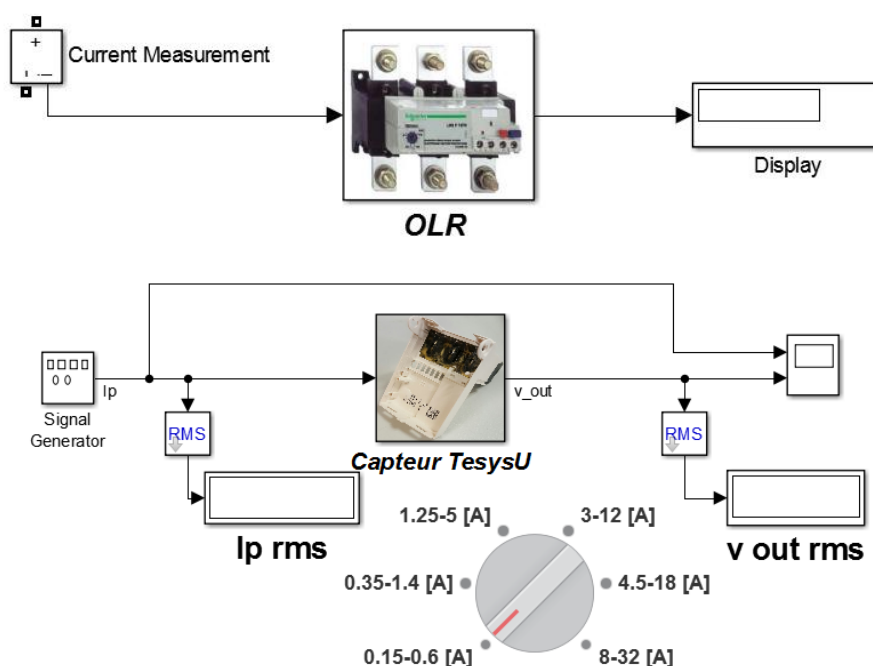


Figura 4.32 Sensore a guadagno costante, regolabile a seconda della gamma considerata

La soluzione proposta, benché sia sufficiente per la descrizione del comportamento del sensore, non raggiunge il livello di precisione necessario, in particolare nel caso di rilevamento di guasto a terra. In tale situazione risulta fondamentale prendere in considerazione lo sfasamento e le armoniche introdotte dalla saturazione del nucleo magnetico.

Questo aspetto rappresenta proprio l'inconveniente dovuto all'introduzione del materiale ferromagnetico e deve essere adeguatamente caratterizzato, così da poter progettare correttamente la centralina di elaborazione dei dati.

4.2.5) Studio dello sfasamento e della distorsione armonica

Come anticipato nella sezione precedente, per caratterizzare la distorsione della tensione d'uscita legata alla saturazione del nucleo magnetico, è stato necessario studiare le armoniche e lo sfasamento introdotti da tale fenomeno.

Lo studio è stato condotto attraverso un'analisi basata sulla rielaborazione dei dati tramite la trasformata discreta di Fourier.

La trasformata discreta di Fourier, indicata come DFT (Discrete Fourier Trasform) è l'equivalente della trasformata di Fourier applicata ad un segnale campionato, noto solo ad N istanti di tempo (Dove N indica il numero di campionamenti).

Considerando un generico segnale campionato $x(n)$:

$$DFT(x(n)) = Re + i \cdot Im$$

Dove:

$$Re = \frac{2}{N_{campionamenti}} \cdot \sum_{n=0}^{N_{campionamenti}} x(n) \cdot \cos(2\pi f_i t_c)$$
$$Im = \frac{2}{N_{campionamenti}} \cdot \sum_{n=0}^{N_{campionamenti}} x(n) \cdot \sin(2\pi f_i t_c)$$

In tali espressioni f_i rappresenta la frequenza dell'ordine armonico considerato e t_c indica l'istante di campionamento.

Il segnale così scomposto può quindi essere ricostruito attraverso la trasformazione inversa:

$$\|H_i\| = \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad ; \quad arg(H_i) = \tan^{-1}(Im/Re)$$

$$H_i(n) = \|H_i\| \cdot \cos(2\pi F_i t_{camp} + Arg(H_i)) + \|H_i\| \cdot \sin(2\pi F_i t_{camp} + Arg(H_i))$$

L'analisi sin qui descritta è stata applicata ai dati forniti in uscita da ciascun sensore, focalizzando l'attenzione sulle prime tre armoniche dispari:

$$H_1: F_1 = 50Hz$$

$$H_3: F_3 = 150Hz$$

$$H_5: F_5 = 250Hz$$

Una volta calcolati i tre segnali $H_1(t)$, $H_2(t)$, $H_3(t)$ è stato possibile calcolare il tasso di distorsione armonica tramite la formula seguente:

$$\text{Total Harmonic Distortion:} \quad THD\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{H_3^2 + H_5^2}{H_1^2 + H_3^2 + H_5^2}}$$



Tutti i calcoli relativi alla DFT sono stati eseguiti su di un foglio di lavoro Excel , applicando direttamente le formule riportate ai valori campionati. Come nei casi precedenti, i frutti dello studio effettuato sono stati riorganizzati all'interno di tabelle riassuntive che permettessero una più rapida presentazione dei risultati.

Si riporta a titolo d'esempio il caso dell'analisi della serie 1: **0,15...0,6 [A]**.

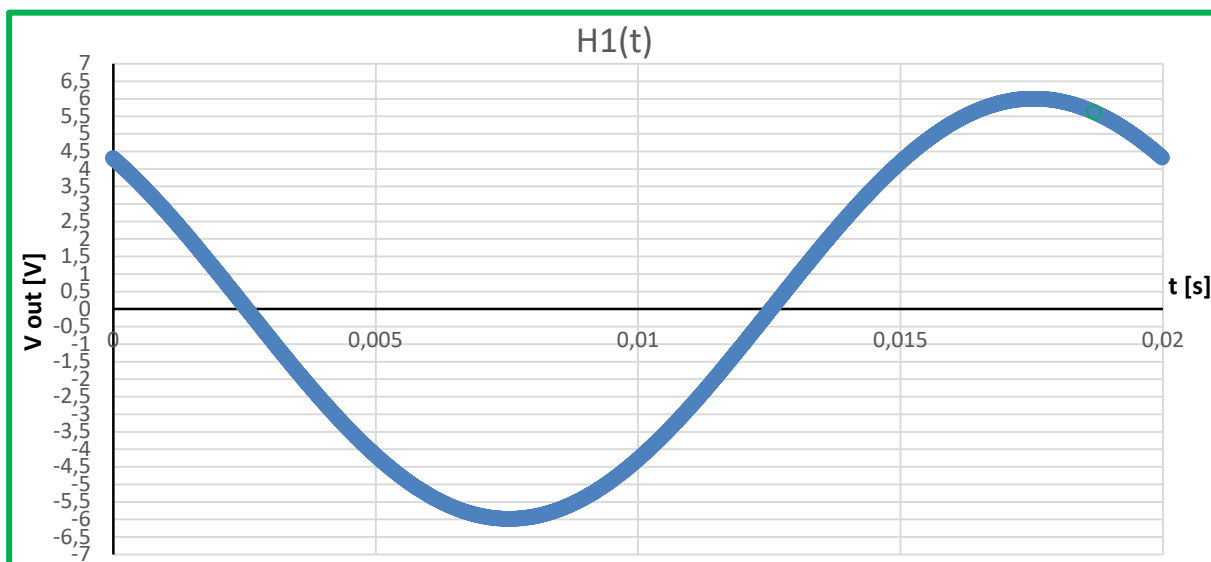


Figura 4.33 Armonica fondamentale per $I_p = 12 \text{ A}$ ($20 \times I_{max}$)

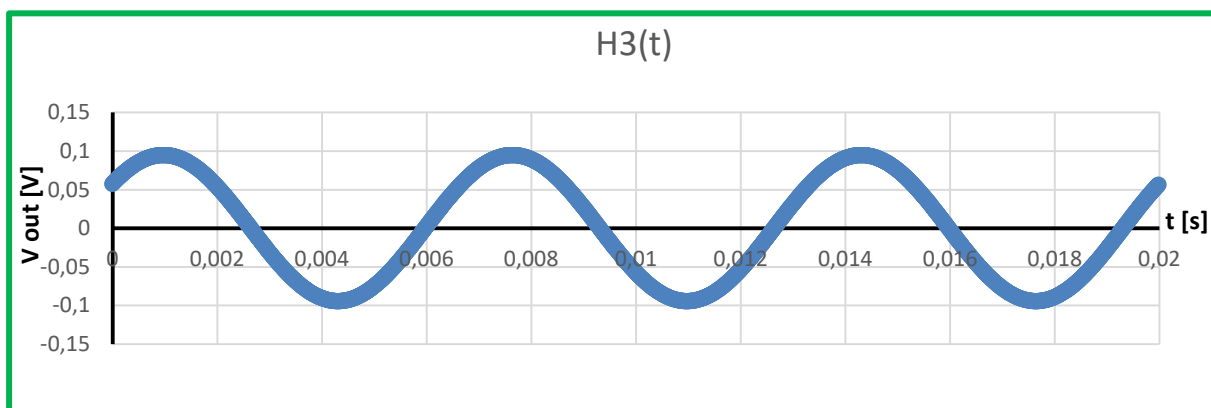


Figura 4.34 Terza armonica per $I_p = 12 \text{ A}$ ($20 \times I_{max}$)

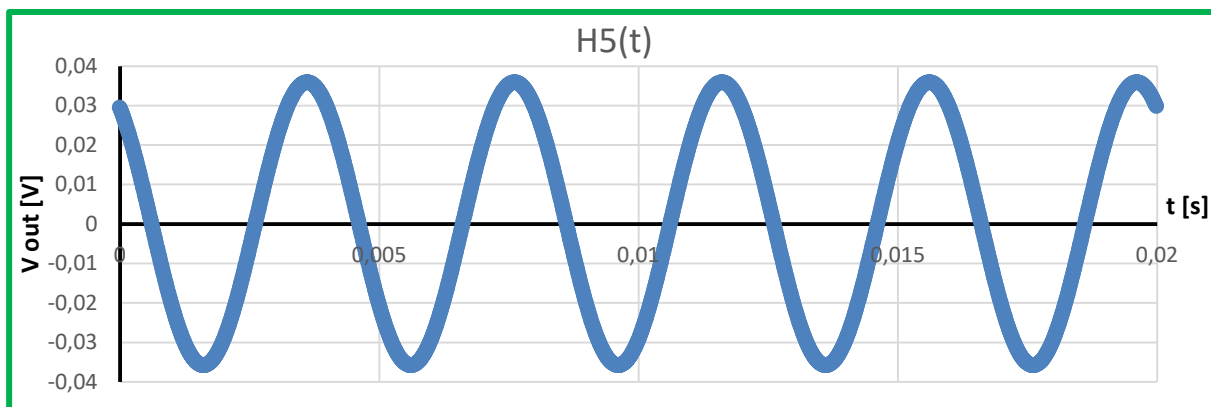


Figura 4.33 Quinta armonica per $I_p = 12 \text{ A}$ ($20 \times I_{max}$)

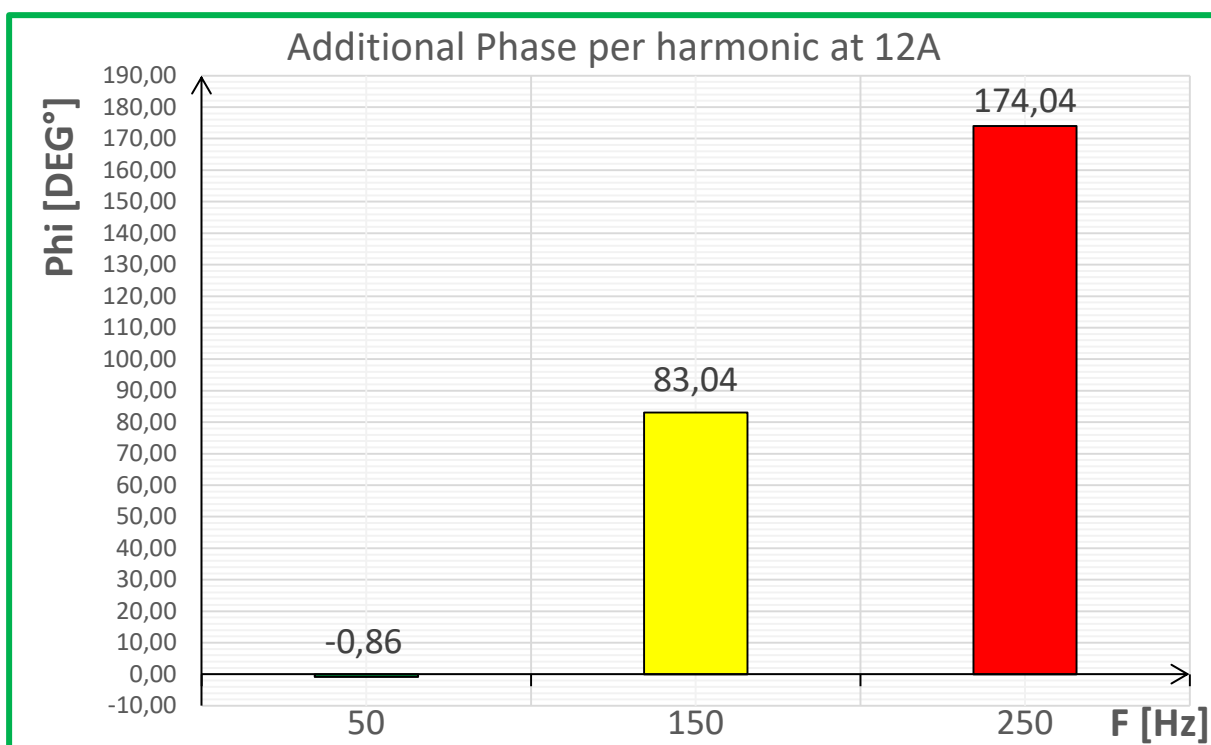
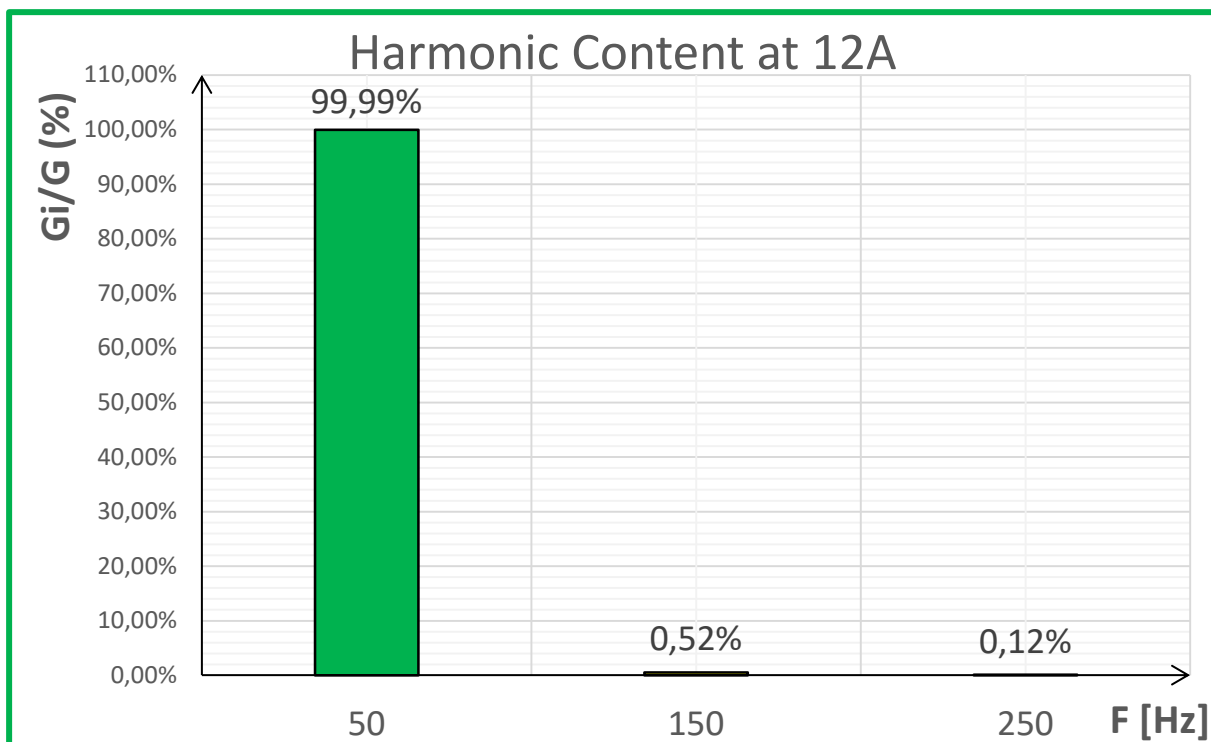
PHASE 1	f [Hz]	H	phi [rad]	phi [DEG°]	Additional phi [DEG°]	G [H/lp]
Harmonic 1	50	4.239000594	1.556445086	89.17773448	-0.822265521	0.000795092
Harmonic 3	150	0.06687779	-0.136134926	172.2000433	82.20004327	4.18133E-06
Harmonic 5	250	0.025350721	1.39138786	-100.279348	169.720652	9.50986E-07
THD	1.69%					

PHASE 2	f [Hz]	H	phi [rad]	phi [DEG°]	Additional phi [DEG°]	G [H/lp]
Harmonic 1	50	4.237548694	1.556136688	89.16006454	-0.839935461	0.00079482
Harmonic 3	150	0.064253142	-0.112856479	173.5338001	83.53380009	4.01723E-06
Harmonic 5	250	0.023687504	1.513537563	-93.2806855	176.7193145	8.88594E-07
THD	1.62%					

PHASE 3	f [Hz]	H	phi [rad]	phi [DEG°]	Additional phi [DEG°]	G [H/lp]
Harmonic 1	50	4.31065326	1.55469877	89.07767795	-0.922322053	0.000808532
Harmonic 3	150	0.068588555	-0.115578093	173.3778631	83.37786305	4.28829E-06
Harmonic 5	250	0.024628852	1.495608803	-94.30792779	175.6920722	9.23907E-07
THD	1.69%					

Average Values	f [Hz]	Gain	phi [rad]	Additional phi [DEG°]	phi [DEG°]	Gi/G [%]
Harmonic 1	50	0,000799481	1,555760181	-0,86	89,14	99,99%
Harmonic 3	150	4,16229E-06	-0,121523166	83,04	173,04	0,52%
Harmonic 5	250	9,21162E-07	1,466844742	174,04	-95,96	0,12%
THD	1,66%					
G capteur	0,000799601					





Alla luce di queste nuove informazioni, il modello precedente è stato modificato, così da tener conto degli effetti della saturazione.

Il guadagno nominale costante è stato sostituito da tre guadagni corrispondenti alle tre armoniche considerate, alle frequenze di 50 Hz, 150 Hz e 250 Hz. Il blocco di derivazione è stato infine completato con un blocco che introduce un ulteriore sfasamento (in aggiunta ai 90° dovuti alla derivata).

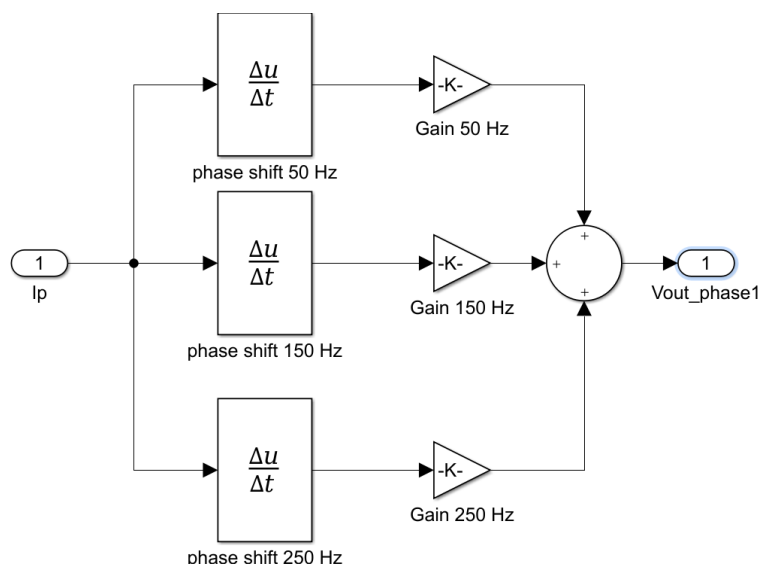


Figura 4.34 Modello con distorsione armonica

4.3) Conclusioni

Il processo di modellizzazione, suddiviso nei due aspetti descritti, ha permesso di applicare le conoscenze acquisite durante il ciclo di studi ed integrarle con alcuni aspetti pratici

I risultati così ricavati sono stati inseriti all'interno della catena di funzionamento del relè di protezione. Il modello del sensore di corrente in particolare, è stato fornito al team che si occupa della progettazione del centro di acquisizione e trattamento dati (figura 4.2 pagina 35), in modo tale da verificare la corretta calibrazione del sistema. La fase conclusiva dello stage è stata infine dedicata alla realizzazione di un sistema di simulazione Hardware in the Loop, attraverso l'utilizzo di una carta Raspberry Pi.



5) Simulazione HIL (Hardware in the Loop)

5.1) Background: la simulazione HIL

5.1.1) Che cos'è la simulazione HIL?

La simulazione Hardware in the Loop è una tecnica utilizzata in fase di progettazione per le prove di verifica di sistemi complessi. Consiste in una simulazione in tempo reale che permette di testare il design dello schema di controllo ed allo stesso tempo di verificare la validità del modello utilizzato per il sistema fisico.

Questo tipo di soluzione si differenzia dalla classica simulazione real-time grazie all'introduzione all'interno dell'anello di controllo di un componente reale, quale ad esempio la scheda ADC (Analog to Digital Converter) ed il sistema di acquisizione e trattamento dei dati.

Per la simulazione HIL si utilizza un modello matematico del sistema che si intende simulare, caricato sul computer di test, che viene integrato con una versione reale del componente hardware da verificare.

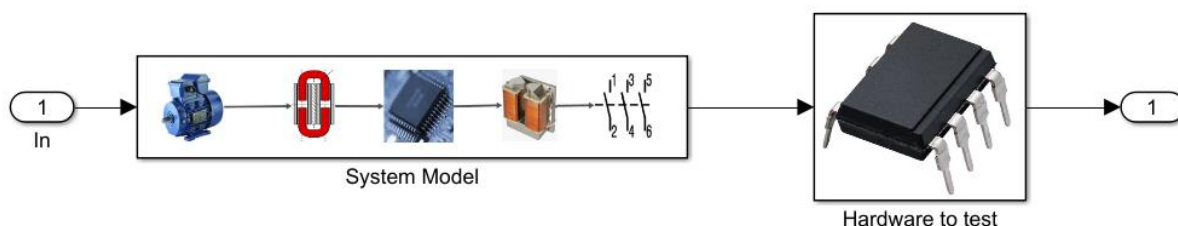


Figura 5.1 Simulazione Hardware in the Loop

Come mostrato in figura 5.1, l'hardware in fase di verifica, riceve il codice generato dal modello, che rappresenta il funzionamento dell'intero sistema. Nel caso in esempio dunque, l'obiettivo della tecnica HIL è quello di fornire tutti gli input necessari al centro di controllo, in modo tale da testare il dispositivo come se fosse realmente connesso ad un circuito reale.

Lo scopo della simulazione Hardware in the Loop è quindi quello di fornire una piattaforma completa per il design ed il test di sistemi integrati, direttamente in parallelo con la progettazione della parte hardware. Lo sviluppo del software non necessita più di attendere che il sistema fisico sia ultimato, ma può essere determinato in modo indipendente facendo riferimento ad un modello sufficientemente preciso.

Gli step principali nella realizzazione di una simulazione HIL possono essere riassunti in:

1. Sviluppo di un modello matematico che simuli il sistema in cui il dispositivo reale deve essere inserito
2. Test del dispositivo reale attraverso il modello matematico
3. Implementazione del dispositivo nell'ambiente reale

5.1.2) La simulazione HIL applicata alla metodologia Model Based Design

La tecnica Hardware in the Loop rappresenta uno degli elementi cardine della metodologia MBD (figura 5.2).

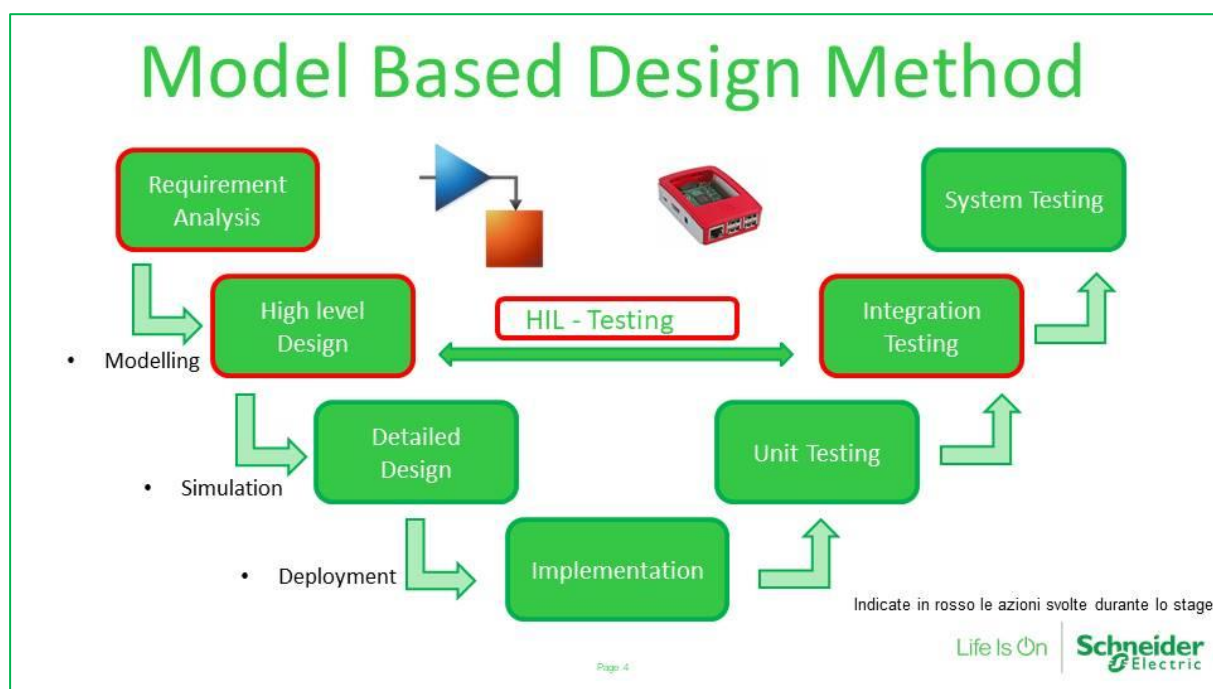


Figura 5.2 Simulazione Hardware in the Loop applicata al MBD

Il processo di validazione (System Testing) richiede l'utilizzo effettivo del sistema hardware finale, così da testare il dispositivo in condizioni di funzionamento reali. Ricorrendo alla simulazione HIL non occorre disporre degli elementi fisici del sistema e non è necessario preparare un banco di prova. Questa tecnica ci permette di rappresentare il sistema tramite un modello, con notevoli vantaggi sotto l'aspetto pratico e finanziario.

Rispetto al processo di validazione, la simulazione HIL, risulta essere più economica dal punto di vista delle modifiche delle scelte progettuali. Dal momento che essa può essere condotta anticipatamente, rende possibile l'identificazione e la ricerca di soluzioni tecniche per problemi relativi al progetto preliminare.

La proposta anticipata di nuove soluzioni tecniche porta ai seguenti benefici:

- Il team risulta più propenso ad accettare eventuali modifiche
- Le modifiche del progetto presentano un impatto meno influente sul resto del team e sui costi
- I tempi necessari alle modifiche risultano notevolmente ridotti

L'utilizzo di un sistema simulato permette infine la realizzazione di test specifici che potrebbero distruggere il dispositivo o essere dannosi per i tecnici. La simulazione HIL dunque, oltre ad essere vantaggiosa per la riduzione dei tempi e dei costi e per l'incremento della qualità, assicura una maggiore sicurezza nell'esecuzione delle prove di verifica.

5.2) Realizzazione della simulazione

5.2.1) Raspberry Pi

Il dispositivo utilizzato per implementare il sistema di simulazione hardware in the loop è una scheda Raspberry Pi (figura 5.3).

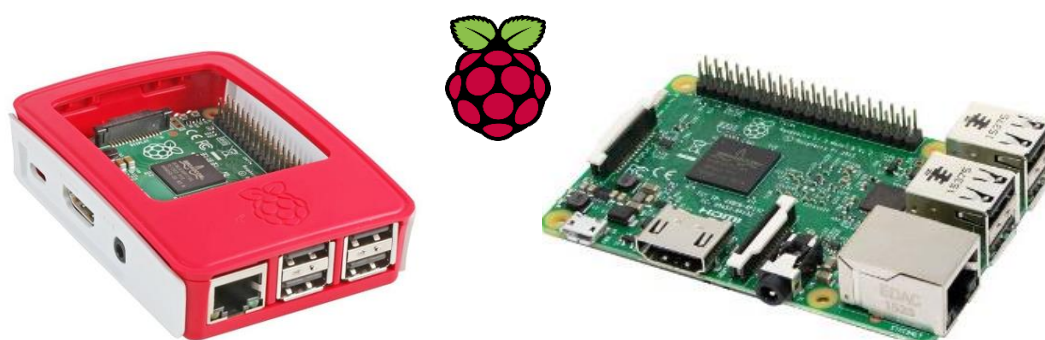


Figura 5.3 Raspberry Pi 3 Model B

Il Raspberry Pi è un single-board computer molto versatile, concepito per funzionare tramite il sistema operativo Raspbian (basato su GNU/Linux). La carta è dotata numerose porte di input/output che la rendono adatta a numerose applicazioni. L'elemento di interesse dal punto di vista del nostro obiettivo è rappresentato dall'interfaccia SPI (figura 5.4) disponibile su tale scheda elettronica.

L'interfaccia di comunicazione SPI (Serial Peripheral Interface) è un bus di collegamento molto utilizzato per lo scambio di dati tra microcontrollori e dispositivi periferici quali sensori o schede di memoria. Permette di collegare più apparecchi contemporaneamente e di scegliere tramite linee di codice con quale elemento si intende comunicare.

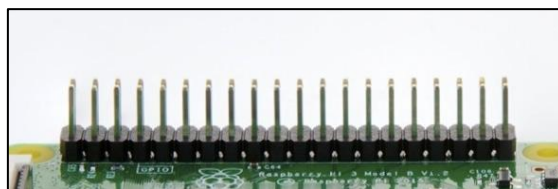
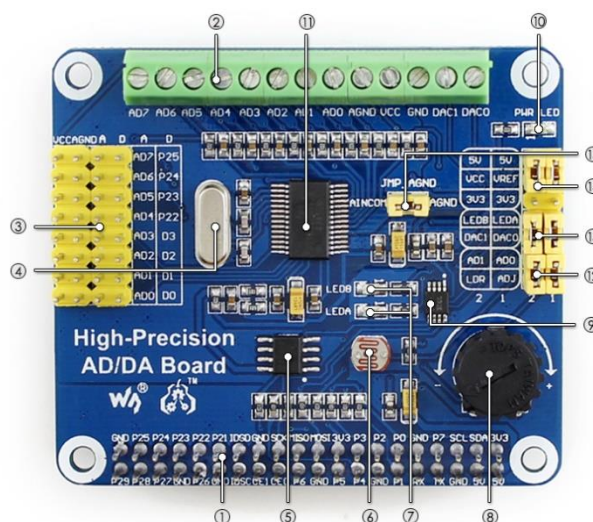


Figura 5.4 Interfaccia SPI

Dal momento che il dispositivo utilizzato non è dotato della funzione di conversione AD/DA, per quanto riguarda l'acquisizione dei segnali, è stato necessario integrare il Raspberry Pi con una carta elettronica che ovviasse a tale problema (figura 5.5).

La scheda utilizzata è una carta d'espansione prodotta da Waveshare appositamente per l'integrazione con i dispositivi Raspberry.



1. Raspberry Pi GPIO interface : for connecting with the Pi

Figura 5.5 Carta d'espansione Waveshare

Tale carta è facilmente collegabile grazie alle sue interfacce GPIO (General Purpose Input/Output) ed è dotata di numerose porte di ingresso analogiche.

Il primo passo per la realizzazione della simulazione è stato quello di connettere la nuova carta con il Raspberry in modo tale da poter testare gli ingressi analogici. Una volta collegato il dispositivo ad uno schermo ed una tastiera, per controllare la scheda d'acquisizione è stato sufficiente, grazie all'interfaccia grafica, lanciare dei semplici comandi Linux .

Il test degli ingressi è stato effettuato utilizzando il fotosensore ed il potenziometro di cui è dotata la carta, ed i valori acquisiti sono stati visualizzati direttamente sullo schermo collegato al Raspberry (figura 5.6).

```
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~$ cd /home/pi/ADC/ADS1256
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ ads1256_test
-bash: ads1256_test: command not found
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ ls
ads1256_test  ads1256_test.o  bcm2835.h  Makefile  Makefile.in
ads1256_test.c  bcm2835.c  log.txt  Makefile.am  test.c
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ ads1256_test
-bash: ads1256_test: command not found
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ Makefile
-bash: Makefile: command not found
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ makefile
-bash: makefile: command not found
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ test
pi@raspberrypi-R2GwK1zuuY:~/ADC/ADS1256$ sudo ./ads1256_test

ID=
Ok, ASD1256 Chip ID = 0x3
0=74B022, 7647266 ( 4.579 201 V)
1=213B0E, 2177806 ( 1.304 075 V)
2=1FC729, 2082601 ( 1.247 066 V)
3=1FC660, 2082400 ( 1.246 946 V)
4=1FC685, 2082437 ( 1.246 968 V)
5=1FC6B8, 2082488 ( 1.246 998 V)
6=1FC729, 2082601 ( 1.247 066 V)
7=1FC6DA, 2082522 ( 1.247 019 V)
```

Potenziometro
Sensore

Figura 5.6 Linea di comando Linux

Lo step successivo è stato dunque quello di caricare sul Raspberry un modello valido del sistema da testare, in modo tale da rendere possibile la simulazione HIL.

5.2.2) MATLAB/Simulink

Per poter connettere con il computer il sistema hardware adottato si è optato per l'utilizzo del software MATLAB/Simulink. Tale software rende infatti disponibili apposite estensioni (figura 5.7) dedicate all'utilizzo di carte Raspberry Pi, che permettono di progettare ed eseguire modelli direttamente sul dispositivo collegato.

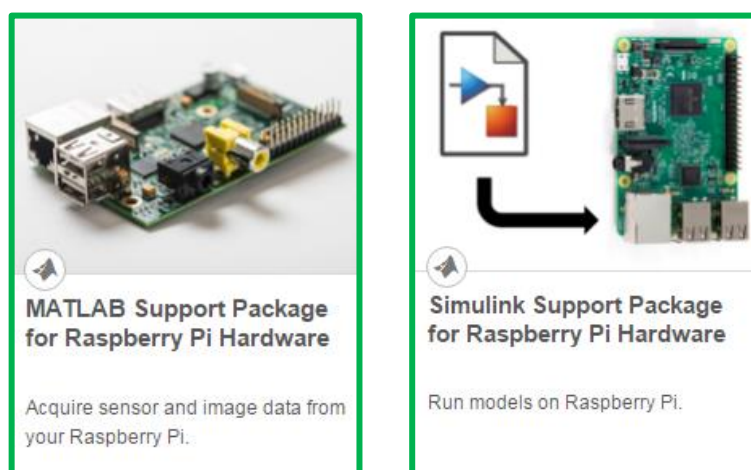


Figura 5.7 MATLAB/Simulink Support Packages

Tali estensioni sono state caricate sul Raspberry ed infine, per rendere effettiva la compatibilità della scheda di acquisizione con i supporti MATLAB/Simulink, è stata richiesta l'installazione dei codici sorgente della carta sul sistema operativo Raspian.

Utilizzando MATLAB il primo obiettivo è stato quello di misurare gli stessi dati ottenuti in precedenza attraverso l'utilizzo della linea di comando Linux, ma questa volta controllando l'acquisizione tramite un codice caricato sul dispositivo.

Per la scrittura del codice necessario all'esecuzione di questo passaggio si è fatto riferimento alla scheda tecnica del convertitore AD/DA Waveshare. Su tale datasheet viene descritto come l'acquisizione dei segnali ed il dialogo con le interfacce SPI sia reso possibile dall'invio di precise sequenze di bit (figura 5.8).

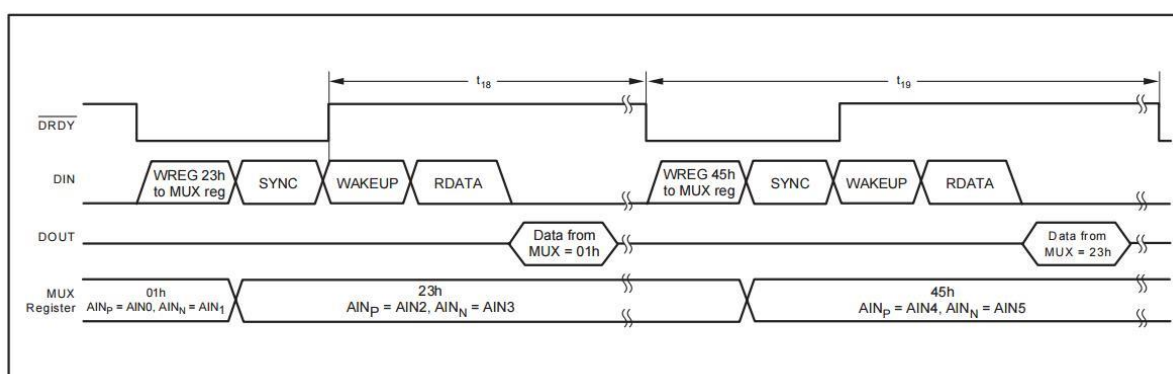


Figura 5.8 Cycling the ADS1256 Input Multiplexer

La sequenza di input descritta dal datasheet del convertitore AD/DA è stata quindi convertita in un codice MATLAB (figura 5.9) che, una volta caricato sul Raspberry Pi ha portato agli stessi risultati ottenuti nella prova di figura 5.6.

```

1 clear all
2
3 mypi = raspi; %connect to Raspberry Pi
4 myspidevice = spidev(mypi,'CE0',1,500000); %connect to SPI pins
5
6 writeRead(myspidevice, [hex2dec('FE')]) %reset
7 t = linspace(0,999,1000);
8 i = 1;WREG
9 while i < 1001
10     writeRead(myspidevice, [hex2dec('51') hex2dec('00') hex2dec('08')]);
11     %WREG: 1st byte = register address 2nd byte: number of registers to be read/written 3rd byte = MUX address
12     writeRead(myspidevice, [hex2dec('FC')]); %SYNC synchronize the A/D conversion
13     writeRead(myspidevice, [hex2dec('FF')]); %WAKEUP complete SYNC and exits standby mode
14     writeRead(myspidevice, [hex2dec('01')]); %RDATA
15     buf = writeRead(myspidevice, [hex2dec('00') hex2dec('00') hex2dec('00')]);
16     buf = double(buf);
17     sample = (((buf(1))*2^16) + (buf(2))*2^8 + (buf(3)))/1000000;
18     sample1(i) = (sample*100)/167;
19     i = i +1;
20     pause(1)
21 end
22 V_out = [transpose(t), transpose(sample1)];
23 hold on
24 plot(t, sample1)

```

Figura 5.9 Codice MATLAB per acquisizione dati

Una volta presa confidenza con la tipologia di dispositivi utilizzati e con le sequenze di comandi necessarie al loro funzionamento si è passati all'utilizzo del software Simulink.

Tramite una rapida configurazione guidata (figura 5.10), il “support package” fornito da MathWorks è stato installato direttamente sul Raspberry Pi rendendo la comunicazione con la carta ancora più rapida ed efficace, grazie anche al collegamento dei dispositivi ad una rete Wi-Fi comune.

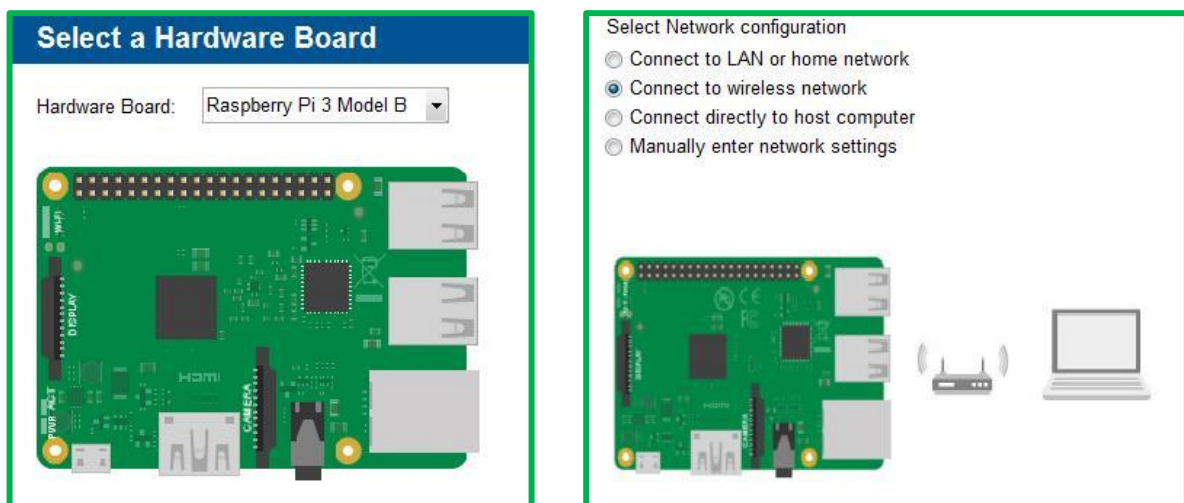


Figura 5.10 Configurazione Raspberry Pi per l'utilizzo di Simulink

Come anticipato, l'utilizzo di Simulink semplifica notevolmente il dialogo con il dispositivo Raspberry grazie ai blocchi specifici presenti nella libreria del software (figura 5.11), che permettono di inviare segnali direttamente all'interfaccia SPI.

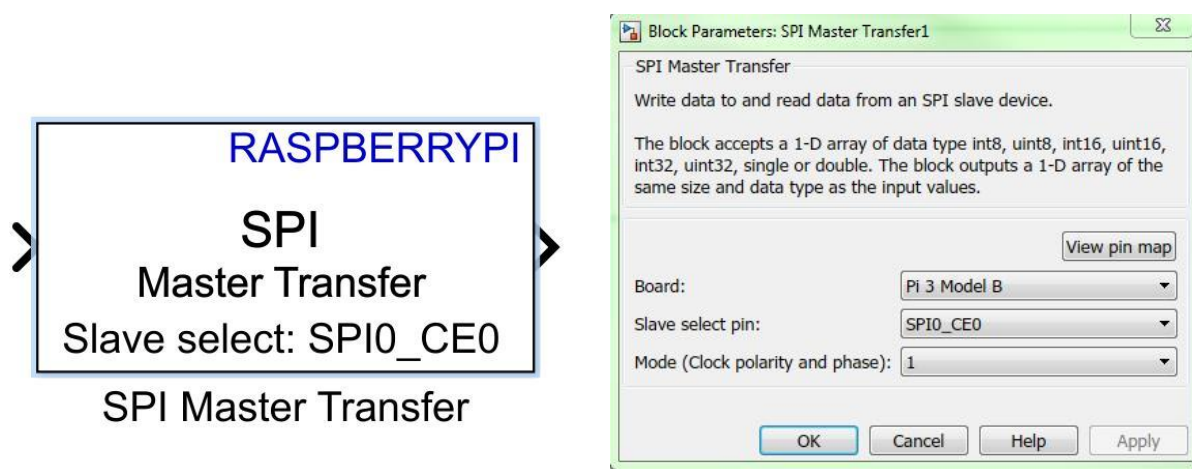


Figura 5.11 Configurazione Raspberry Pi per l'utilizzo di Simulink

L'input di ciascun blocco è la sequenza di bit che si intende inviare alla carta di acquisizione dati, che viene espressa sotto forma di un vettore di valori costanti (figura 5.12).

Dal momento che il segnale viene inviato direttamente all'interfaccia SPI non si avrà alcun output significativo dal blocco "SPI Master Transfer" (per evitare messaggi di errore durante il processo di build si può ricorrere ad un "Terminator Block").

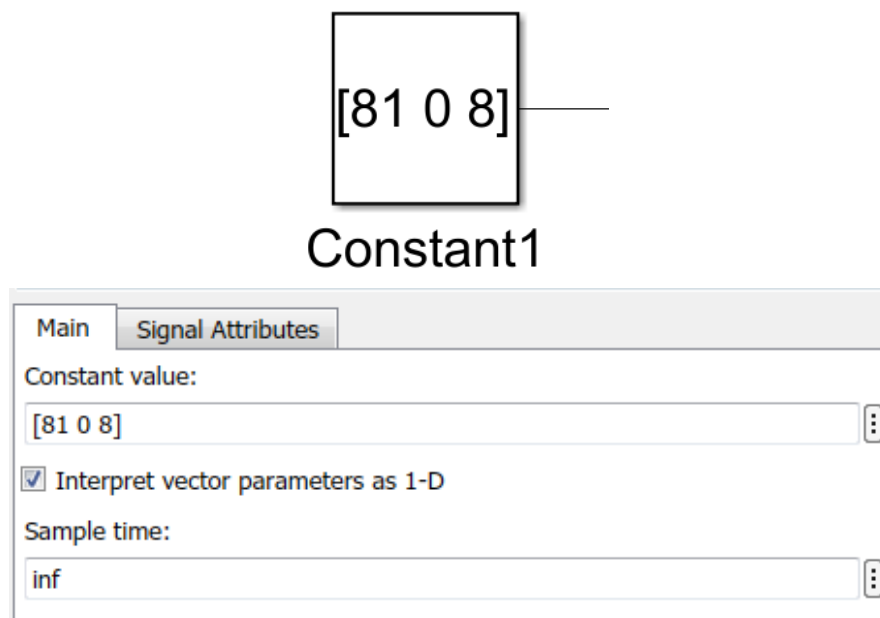


Figura 5.12 Input interfaccia SPI

Utilizzando dunque i vantaggi messi a nostra disposizione dall'utilizzo di Simulink, abbiamo realizzato uno schema che ricreasse i comandi necessari all'acquisizione dei dati tramite la scheda Waveshare; comandi che in precedenza erano stati descritti attraverso un codice MATLAB (figura 5.9).

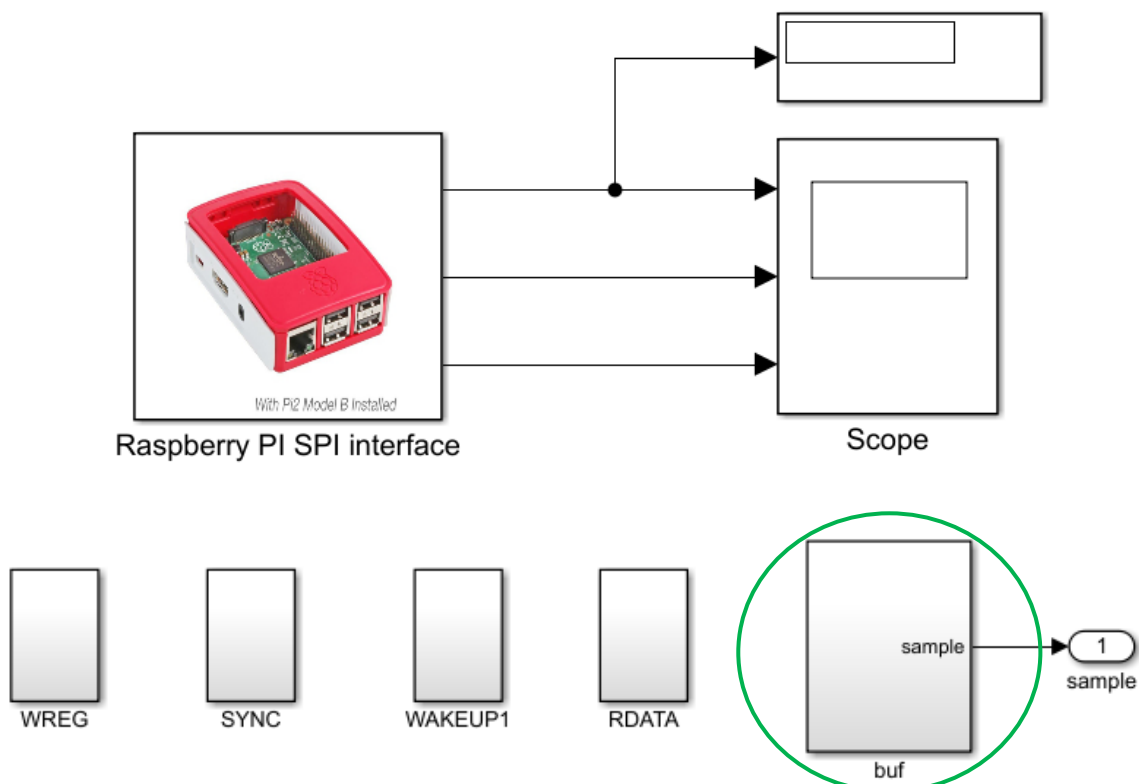


Figura 5.13 Acquisizione dati tramite simulink

Il blocco evidenziato nella figura precedente contiene i comandi necessari per inviare al Raspberry il segnale di lettura dei dati e poter visualizzare tali risultati sul computer utilizzato per i test, ad esempio tramite un blocco “scope”.

L'invio di tali segnali deve essere correttamente convertito in una grandezza decimale, seguendo ancora una volta le indicazioni fornite dal datasheet della carta AD/DA (figura 5.14).

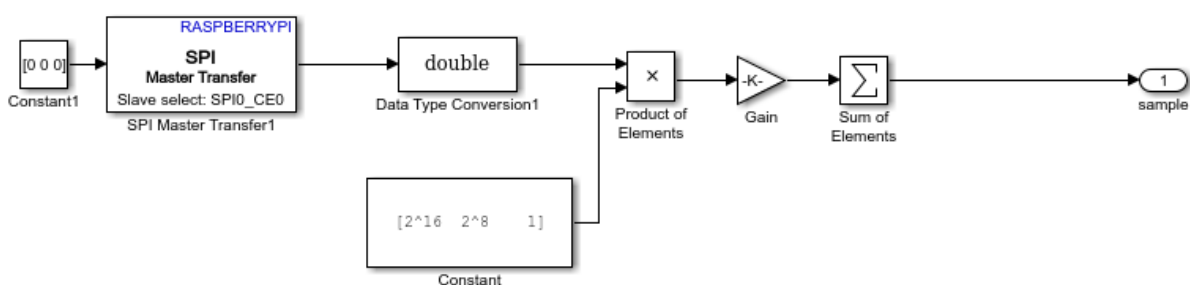


Figura 5.15 Lettura dei dati tramite simulink

Lo step finale quindi, su richiesta del tutore di stage, è stato quello di rendere possibile il collegamento ed il controllo del Raspberry Pi attraverso l'utilizzo di uno smartphone, con la creazione di un'applicazione dedicata.

5.2.3) Creazione di un'applicazione Android

La creazione di un'applicazione Android che permettesse il collegamento del dispositivo Raspberry Pi con uno smartphone è stata ancora una volta facilitata dai pacchetti di espansione messi a disposizione da Simulink.



Figura 5.16 Android Support Package

L'utilizzo di tale app va a sostituire il PC di test nell'impostazione del circuito di prova, rendendo la simulazione più rapida ed immediata.

L'applicazione viene progettata sotto forma di schema simulink, ricorrendo all'utilizzo dei blocchi presenti nella libreria del software. Una volta ottenuto il modello desiderato, l'applicazione viene generata sul dispositivo selezionato (collegato tramite cavo USB) utilizzando la funzione "build" (figura 5.17).

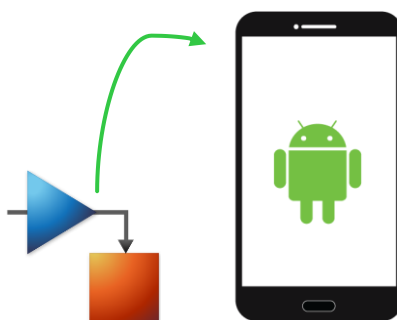


Figura 5.17 Android Support Package

La comunicazione tra smartphone e Raspberry è ottenuta grazie ad un blocco specifico presente nella libreria Simulink, che utilizza il protocollo UDP (User Datagram Protocol). Tale sistema permette ai due dispositivi (smartphone e Raspberry) di inviare e ricevere segnali (datagrammi) composti da un insieme di byte. Lo scambio di informazioni avviene attraverso la rete Wi-Fi comune alla quale i dispositivi sono stati collegati (figura 5.18).

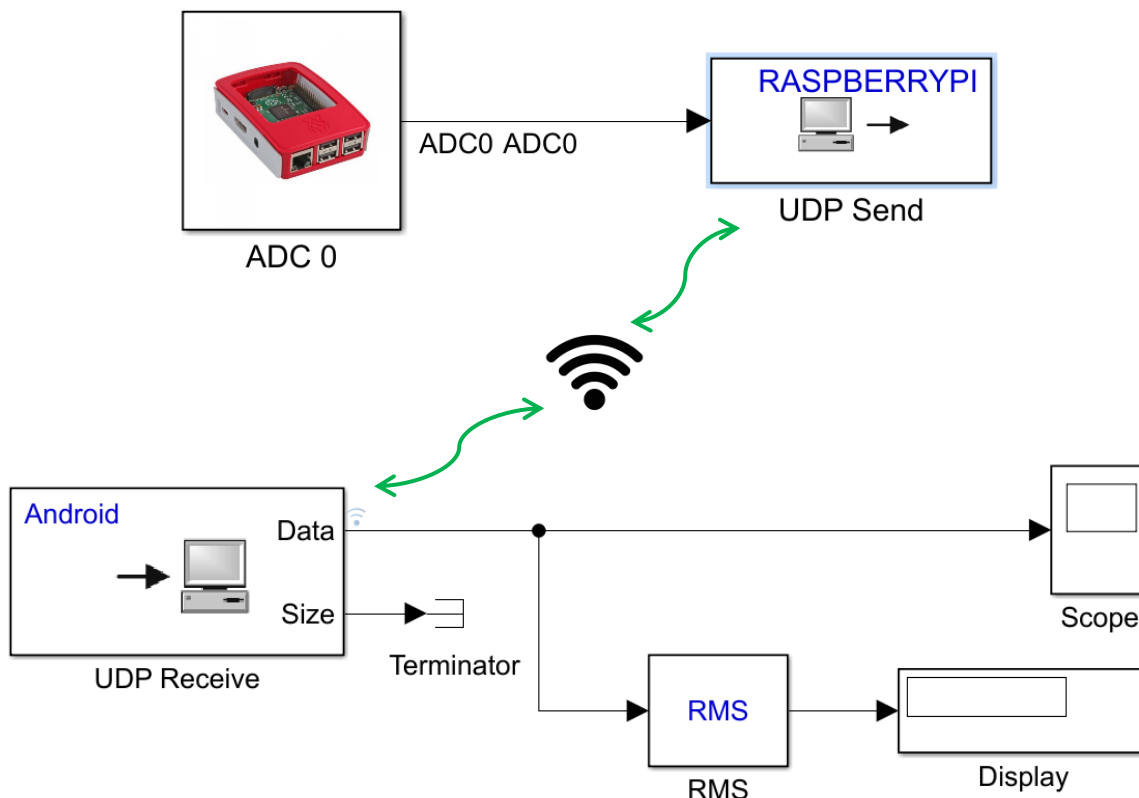


Figura 5.18 Comunicazione tra smartphone e Raspberry

Il modello riportato nella figura precedente rappresenta il primo tentativo di acquisizione dati effettuato utilizzando l'applicazione generata. Consiste in un semplice oscilloscopio che visualizza i dati misurati direttamente sullo smartphone, senza bisogno di utilizzare il computer.

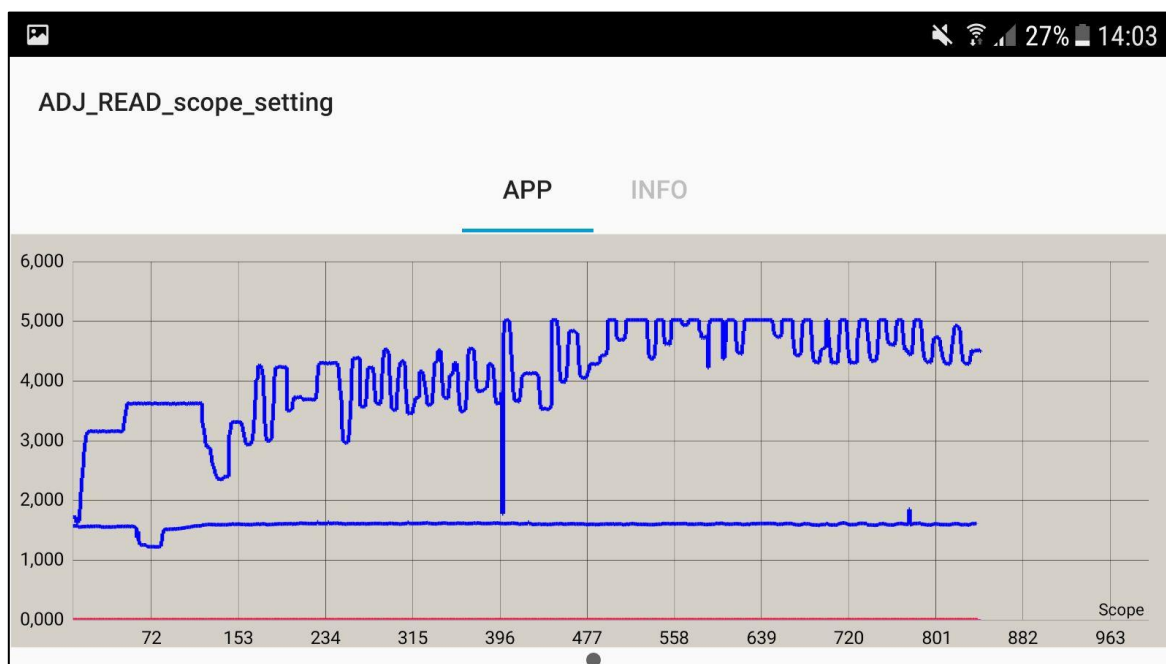


Figura 5.19 Comunicazione tra smartphone e Raspberry

5.2.4) Esempio

Una volta implementato il sistema di simulazione HIL, sono stati effettuati alcuni test preliminari che permettessero di verificarne il buon funzionamento.

Nell'esempio di figura 5.20 è riportato il caso in cui si è scelto di utilizzare come componente HW il sensore di corrente del relè di protezione. In tale simulazione, i valori in uscita dal sensore, acquisiti utilizzando la scheda ADC connessa al Raspberry, vengono inviati al modello della centralina di elaborazione dati. I risultati prodotti da tale modello vengono quindi confrontati con una soglia prestabilita ed in caso di superamento di tale valore si ha un allarme dato dall'accensione del led frontale del dispositivo Raspberry.

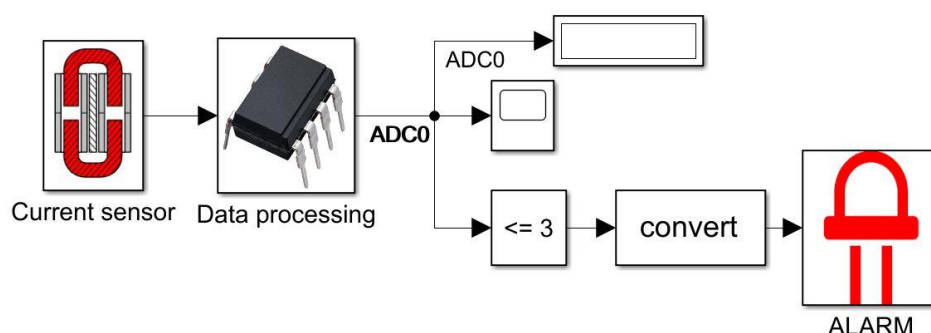


Figura 5.20 Esempio di simulazione HIL

5.2.5) Conclusioni

Il modello di simulazione così realizzato è stato utilizzato, come accennato, per alcuni test preliminari, quali quello riportato nell'esempio precedente, che hanno dimostrato la validità della scelta delle soluzioni adottate. L'utilizzo del Raspberry Pi si è rivelato semplice ed efficace, anche grazie ai supporti forniti dal software simulink. L'unico difetto presentato da tale dispositivo è stata l'assenza della funzione di conversione AD/DA, colmata con l'integrazione della scheda prodotta da Waveshare. Tale scheda, benché la sua installazione abbia creato alcuni problemi, si è poi rivelata molto efficiente. Il circuito di simulazione HIL proposto è risultato dunque valido e versatile, pronto ad essere utilizzato per il test di diversi dispositivi. Nonostante il modello HIL fosse ultimato, la prova sull'unità di raccolta e trattamento dei dati del relè di sovraccarico, che era stata prefissata come obiettivo, non è stata tuttavia possibile a causa della mancanza del tempo necessario alla sua realizzazione.



Conclusione

Lo stage semestrale descritto all'interno del presente elaborato è risultato molto gratificante sia per gli obiettivi raggiunti durante il suo svolgimento sia per il sostegno e la partecipazione dimostrati dall'intero team. L'aver vissuto questa esperienza mi ha permesso di entrare concretamente a far parte di un progetto in via di sviluppo e di scoprirne le diverse sfaccettature.

La collaborazione alla definizione delle specifiche tecniche ed alla gestione della loro tracciabilità è stata un'attività interessante e formativa, che ha fornito l'occasione di esplorare un campo poco trattato in ambito accademico. Tale attività, svolta per l'intera durata dello stage, è stata affrontata in collaborazione con un team internazionale, in un ambiente stimolante sotto il punto di vista della cooperazione e del lavoro di squadra. Il frutto di tale lavoro ha portato alla definizione di 170 specifiche tecniche, 100 delle quali approvate in maniera definitiva ed ad una copertura del 65% delle esigenze marketing.

Il processo di modellizzazione, suddiviso nei due aspetti descritti, ha permesso di applicare le conoscenze acquisite durante il ciclo di studi ed integrarle con alcuni aspetti pratici. In particolare l'esecuzione di numerosi test è stata interessante poiché ha fornito l'occasione di prendere confidenza con differenti dispositivi di uso comune in ambito elettrotecnico, ed ha portato ad un'analisi numerica approfondita dei dati raccolti.

La realizzazione della simulazione Hardware In the Loop ha rappresentato poi l'aspetto più innovativo affrontato durante lo stage. Tale argomento è stato molto interessante dal momento che, come nel caso della gestione delle specifiche tecniche, ha permesso di trattare argomenti non trattati durante gli studi accademici, legati all'informatica ed all'elettronica. La simulazione realizzata è risultata completa e funzionante ed è stata utilizzata per diversi test preliminari.

L'aver partecipato a questo stage è stato infine di grande apporto dal punto di vista formativo poiché ha offerto l'opportunità di toccare con mano le problematiche legate al mondo del lavoro e di vivere a pieno i vincoli che presenta la realizzazione di un progetto, a partire dalle richieste del cliente e dai limiti temporali imposti fino ai problemi dovuti alla presenza di diversi team ed alle difficoltà introdotte dalla restrizione del budget.





Appendice A) Risultati delle prove sui sensori di corrente

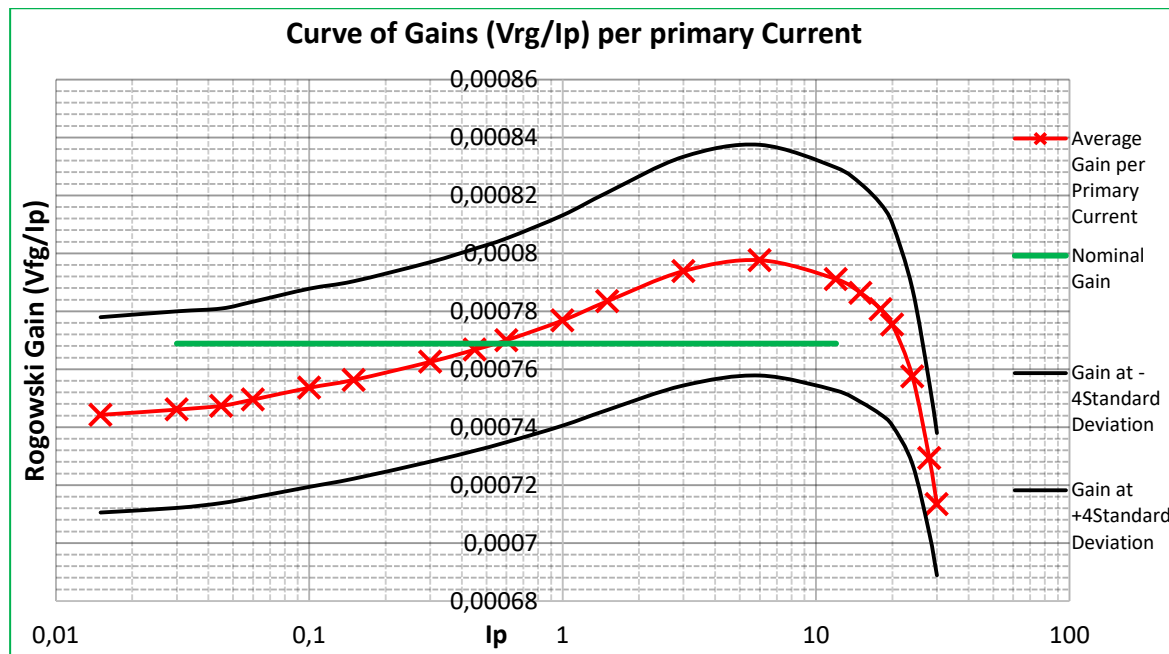
A.1) Guadagno nominale e deviazione standard

Modelling of current sensors

Model based on average gain and standard deviation

By Michele MAZZINI

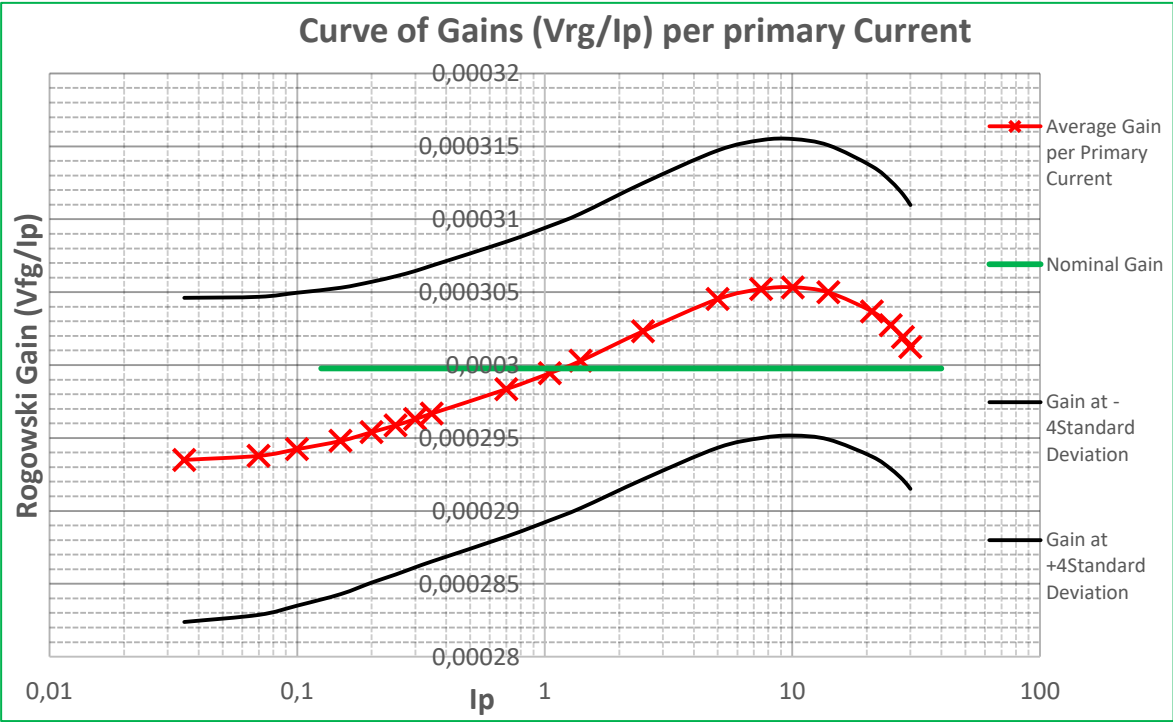
Current Range 0.15...0.6 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	769	$\mu V/A$	Average of gains over measurement dynamic (20% I_{rmin} ..15% I_{rmax})
Max Error	± 9	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation



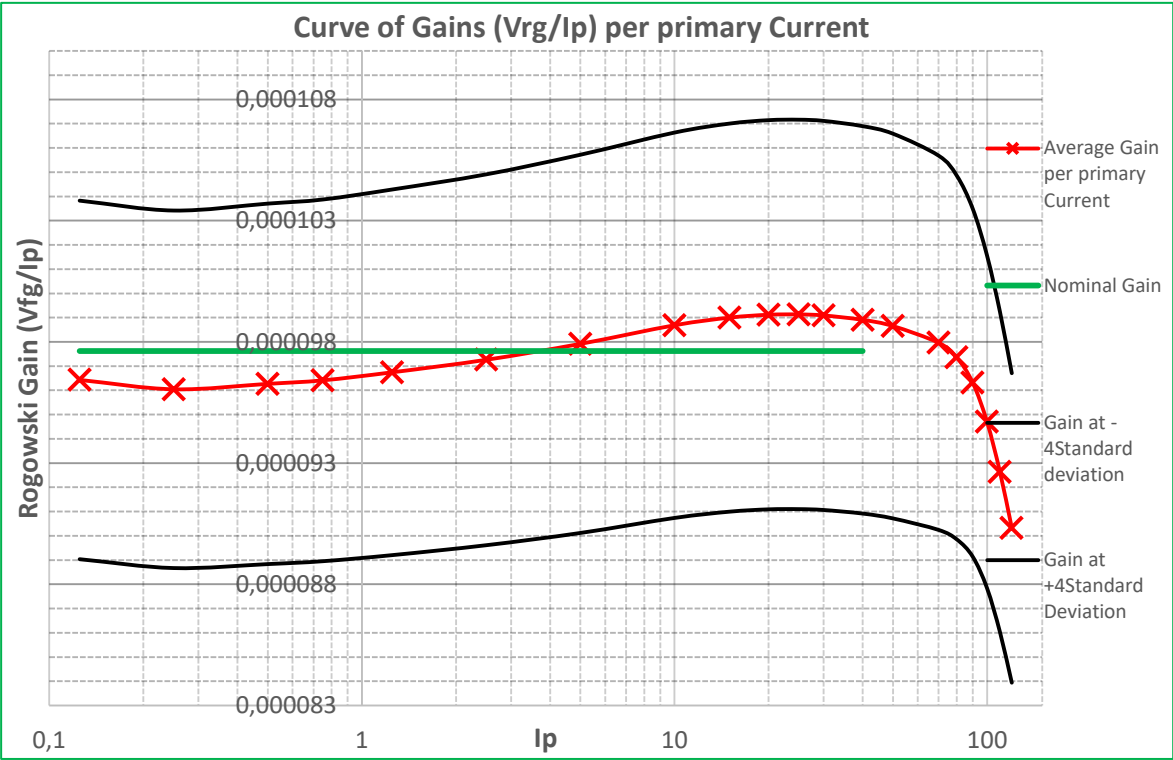
Current Range 0.35...1.4 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	300	$\mu\text{V/A}$	Average of gains over measurement dynamic (20%Irmin..15Irmax)
Max Error	± 6	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation



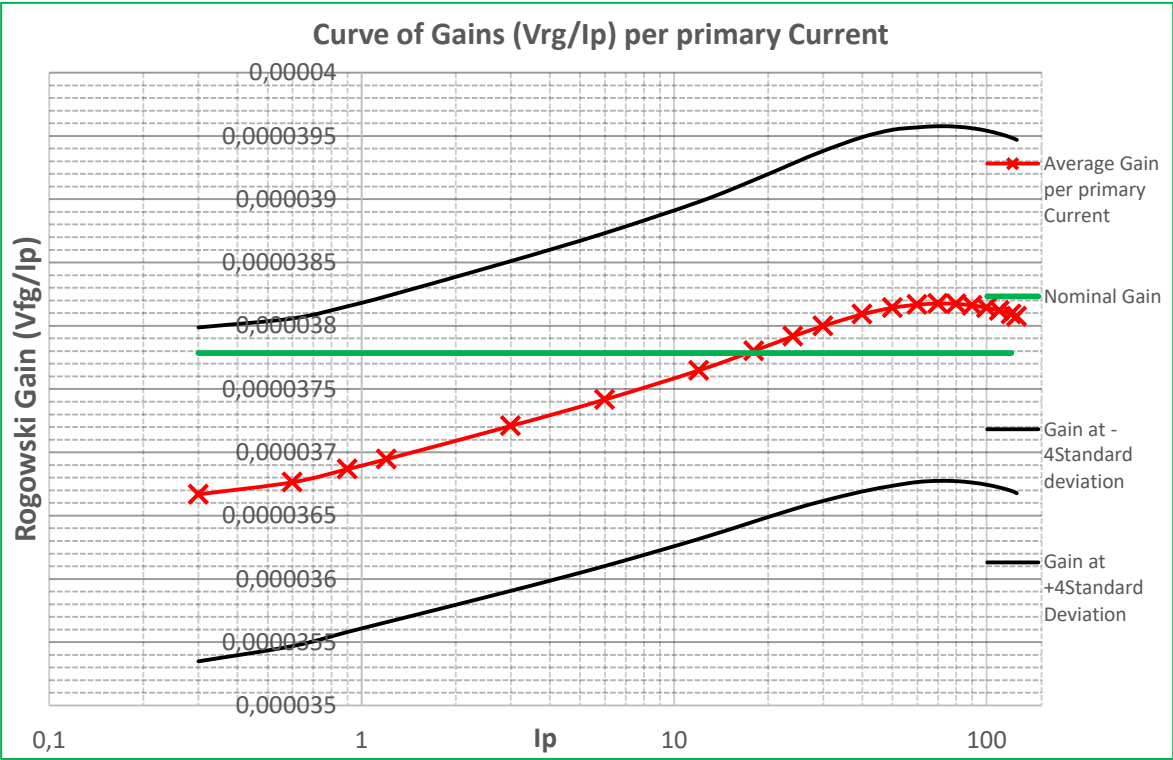
Current Range 1.25...5 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	97,6	$\mu\text{V/A}$	Average of gains over measurement dynamic (20%Irmin..15Irmax)
Max Error	± 10	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation

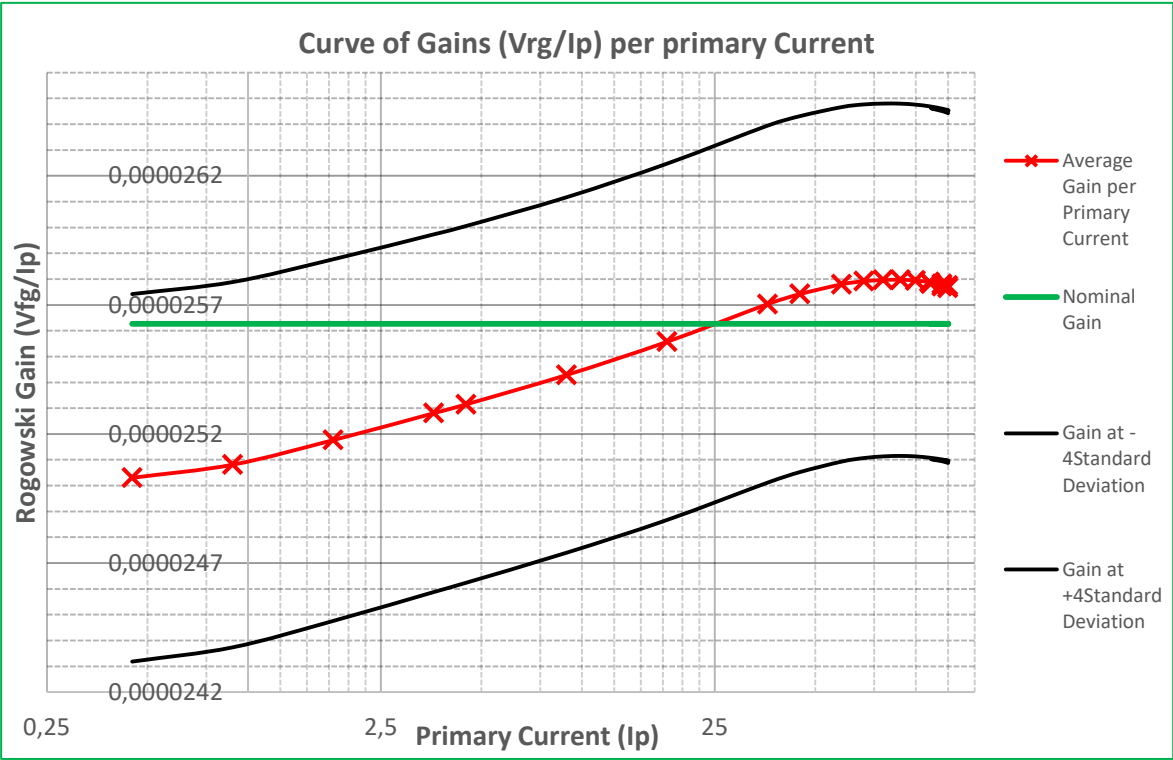


Current Range 3...12 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	37,8	$\mu V/A$	Average of gains over measurement dynamic (20% I_{rmin} ..15% I_{rmax})
Max Error	± 6.5	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation

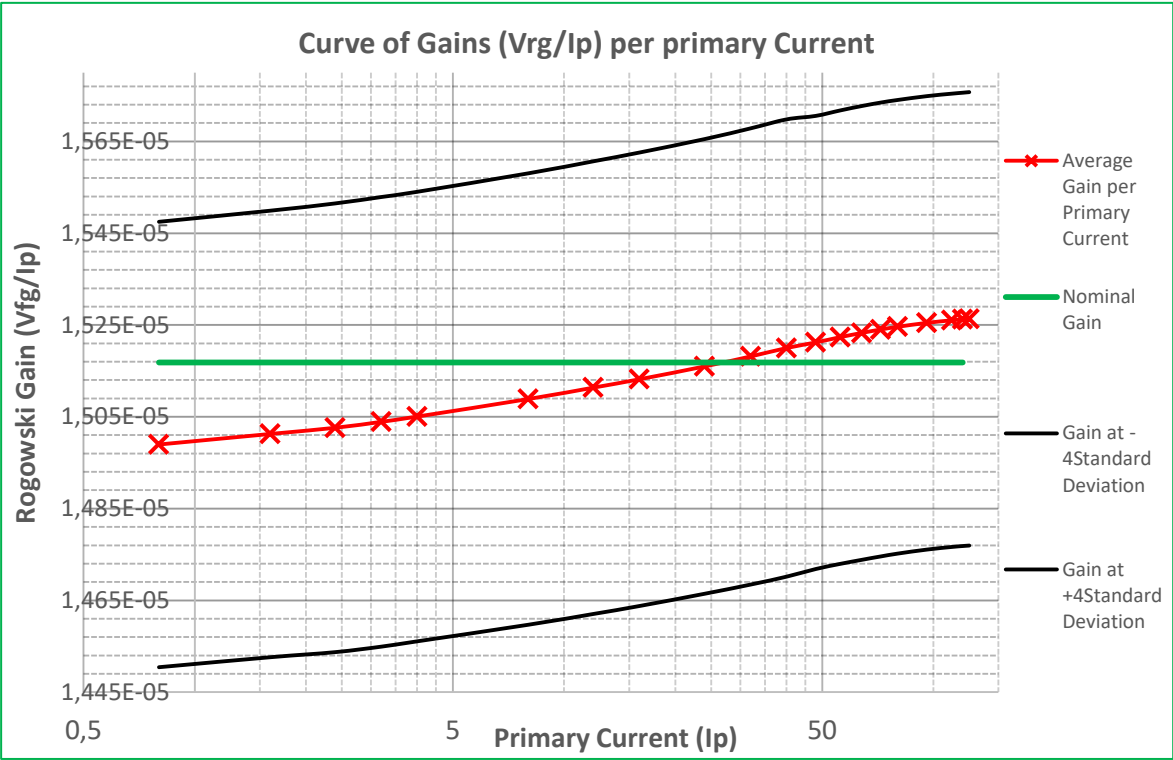
Current Range 4.5...18 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	15.6	µV/A	Average of gains over measurement dynamic (20%Irmin..15Irmax)
Max Error	±5	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation



Current Range 8...32 [A]



Sensor Parameter	Value	Unit	Description
Nominal gain	15.2	µV/A	Average of gains over measurement dynamic (20%Irmin..15Irmax)
Max Error	±4.5	%	Maximum error of sensor gain to Nominal Gain, at 4 Standard Deviation



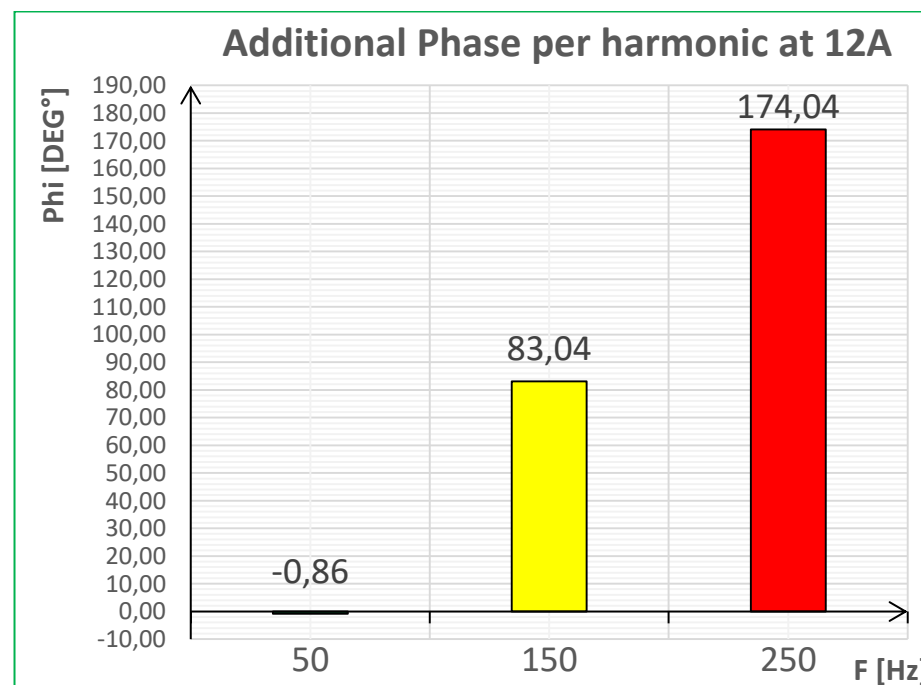
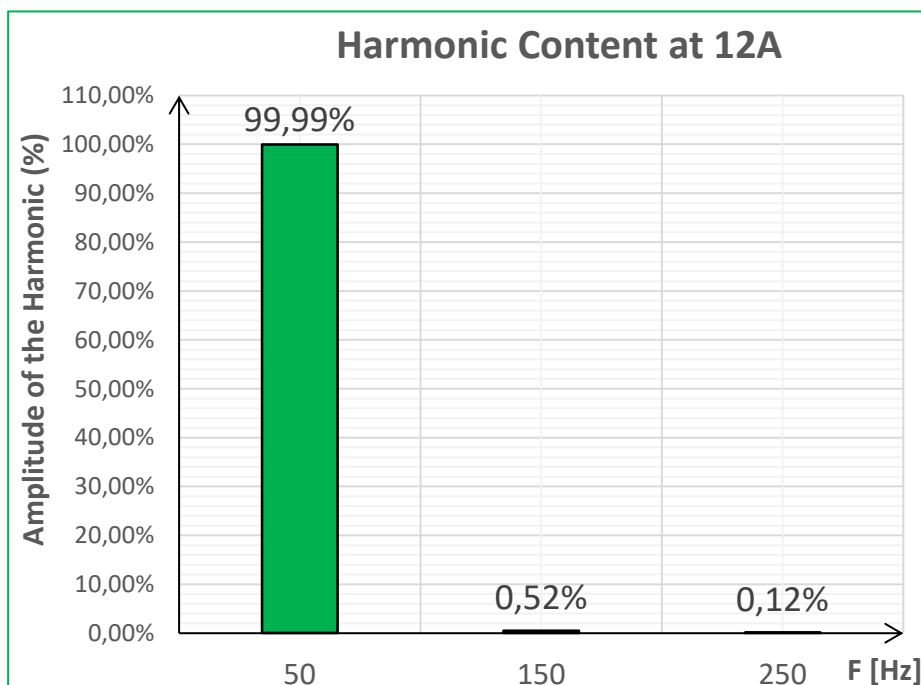
A.2) Studio dello sfasamento e della distorsione armonica

Modelling of current sensors

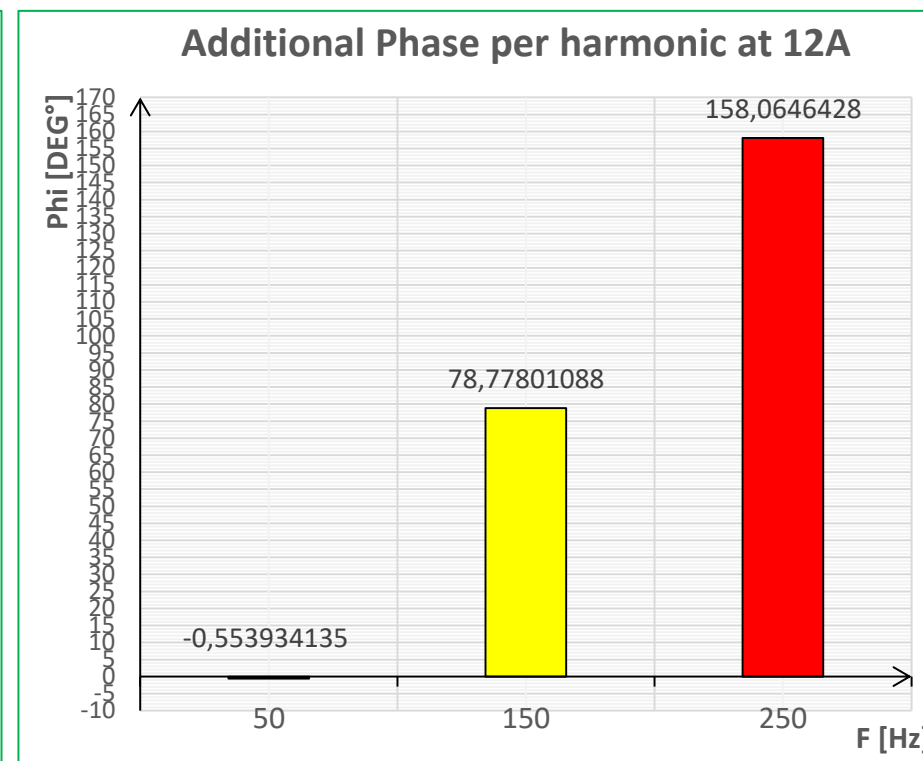
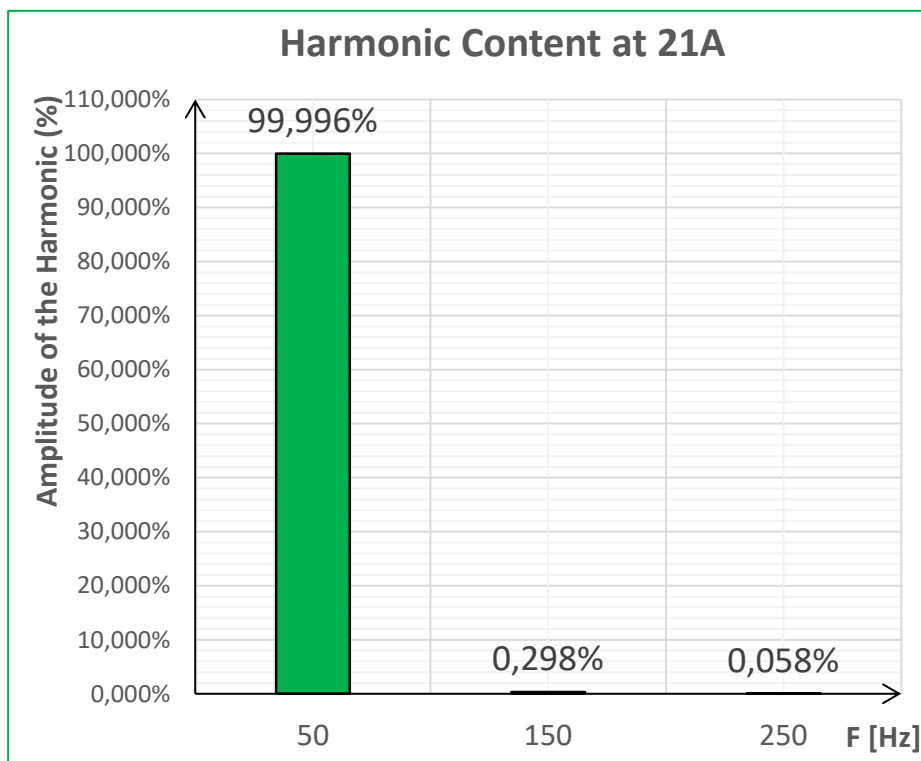
Model based on harmonic distortion

By Michele MAZZINI, inspired by Amine Hamza

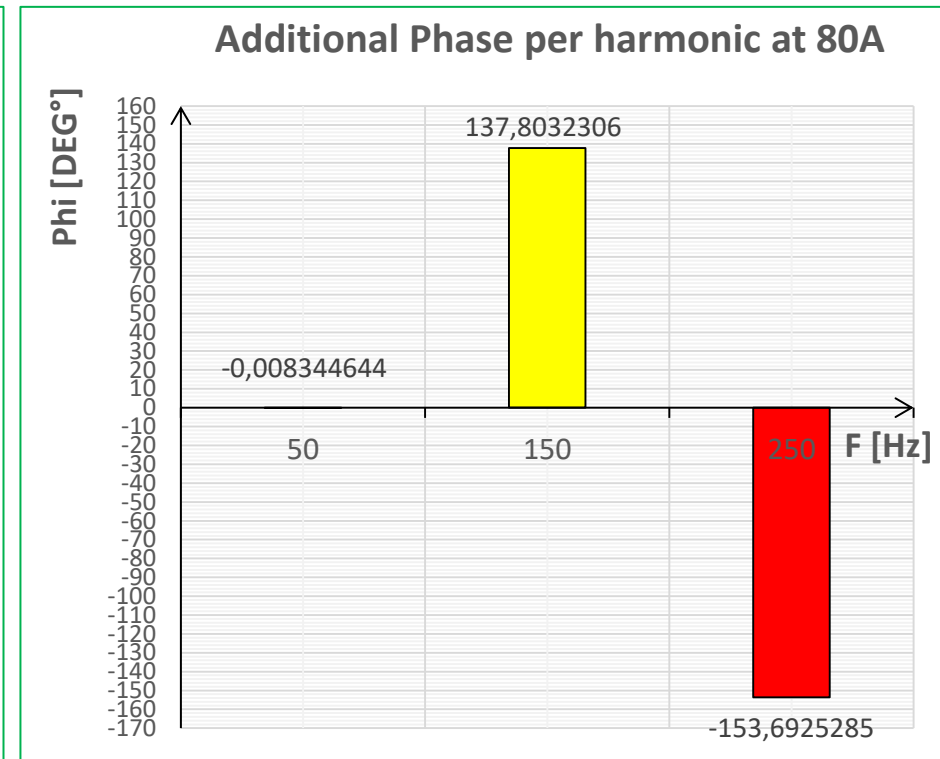
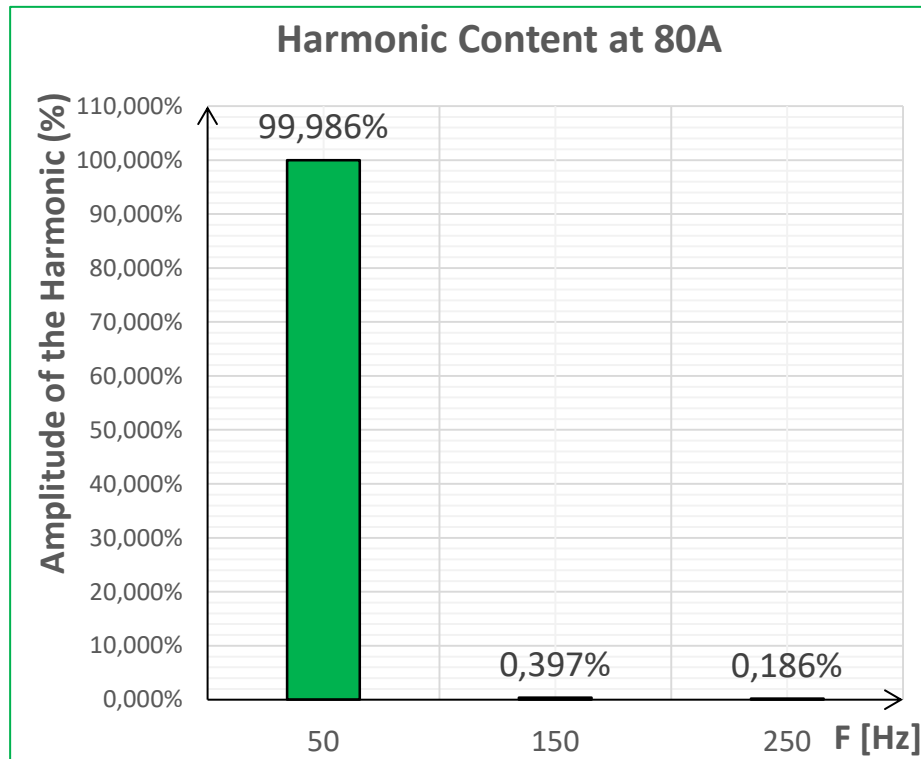
Current Range 0.15...0.6 [A]



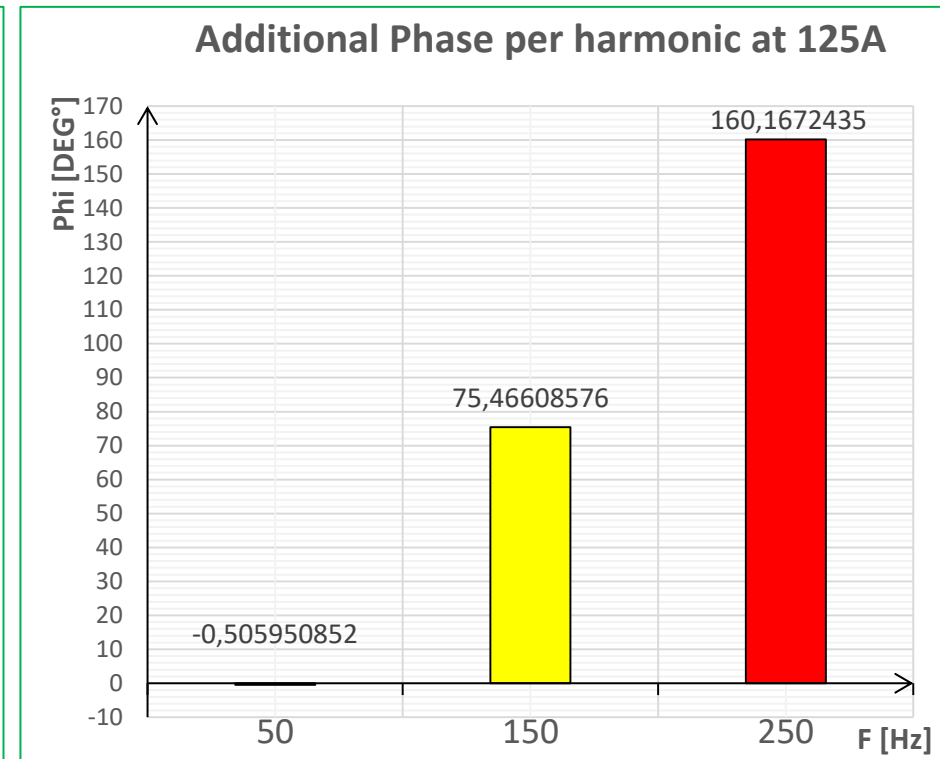
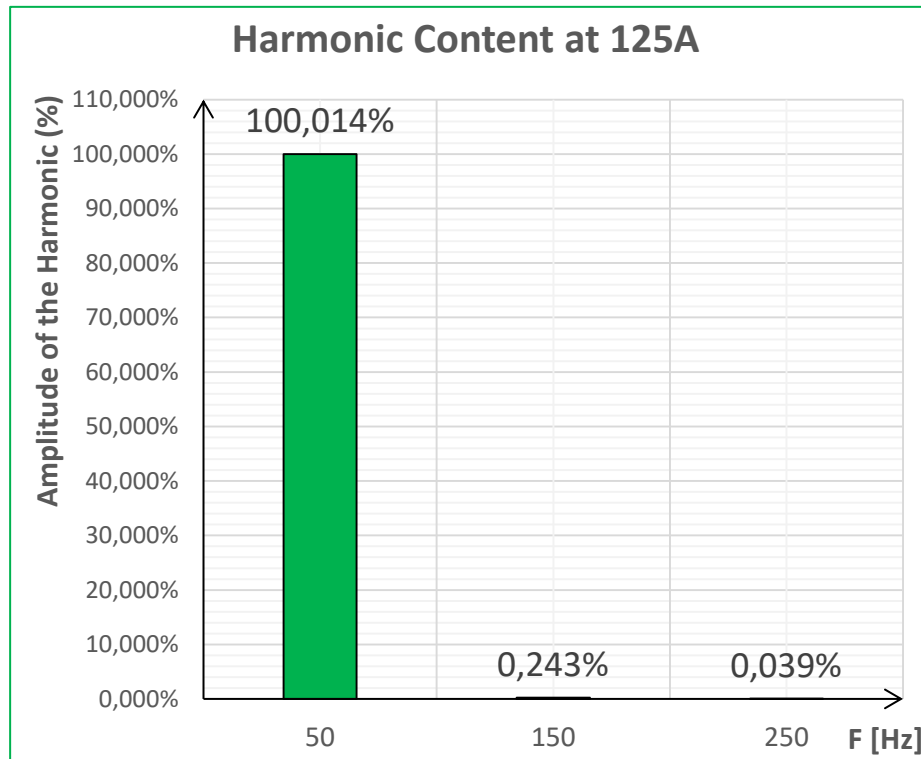
Current Range 0.35...1.4 [A]



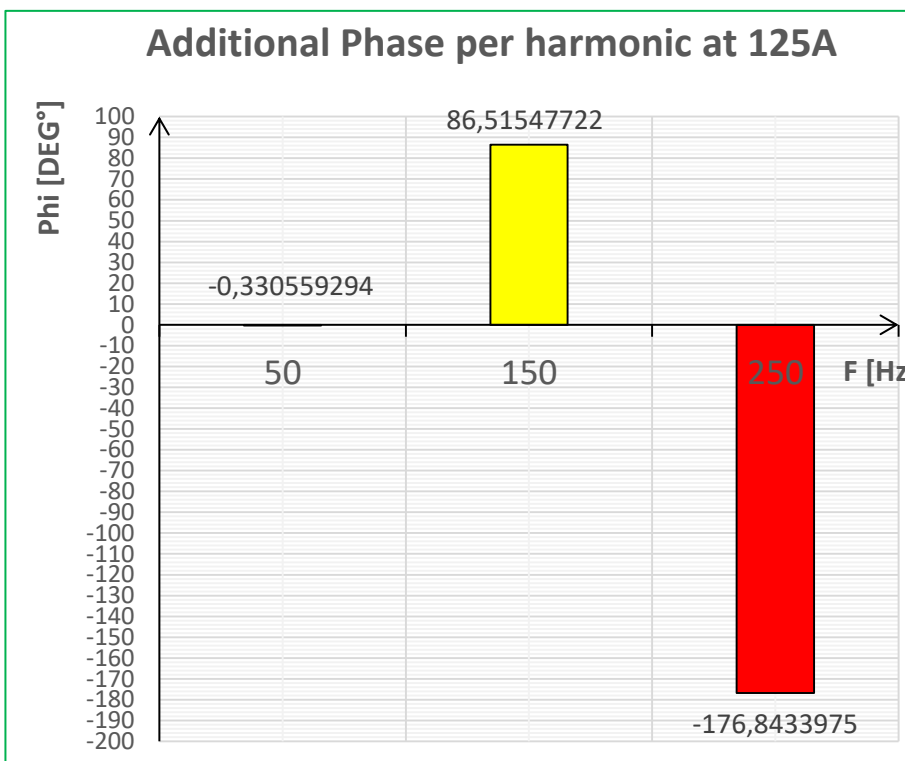
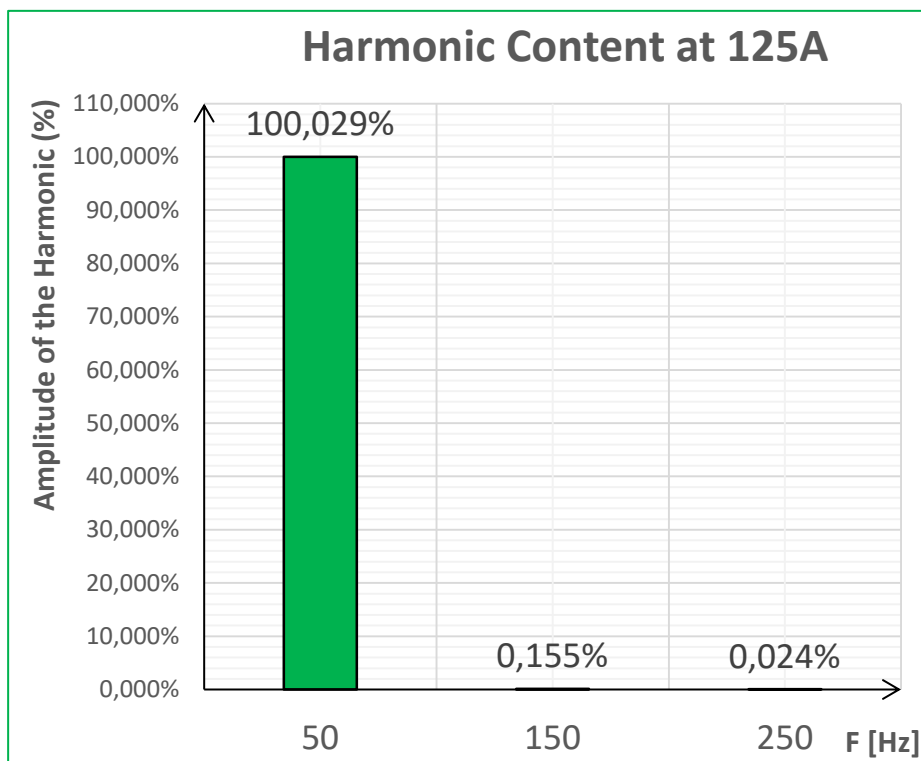
Current Range 1.25...5 [A]



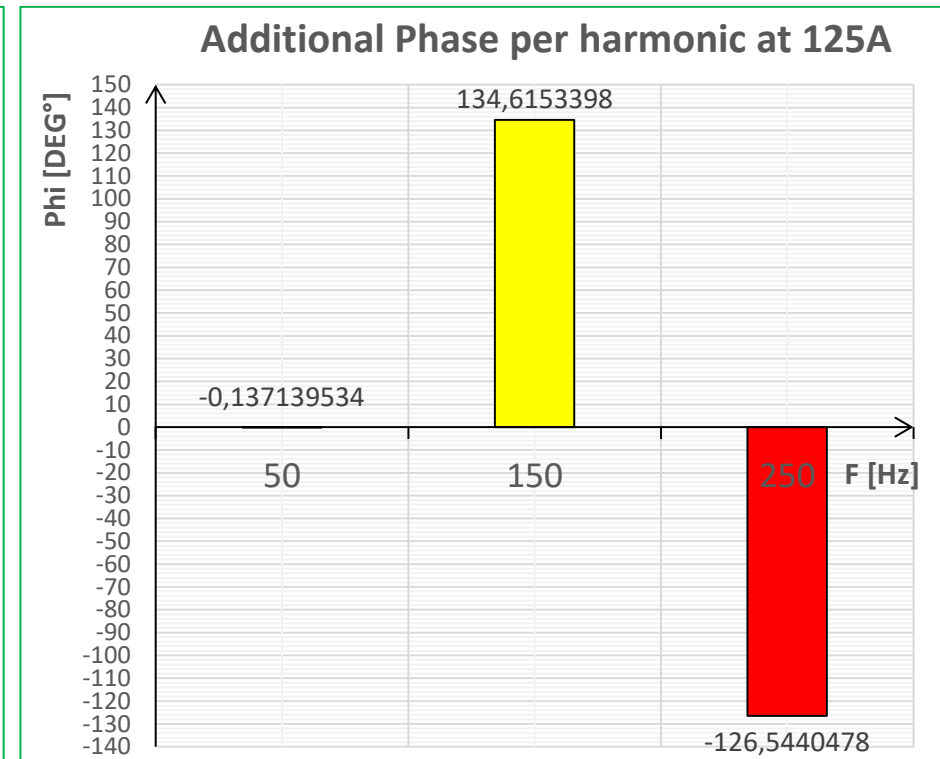
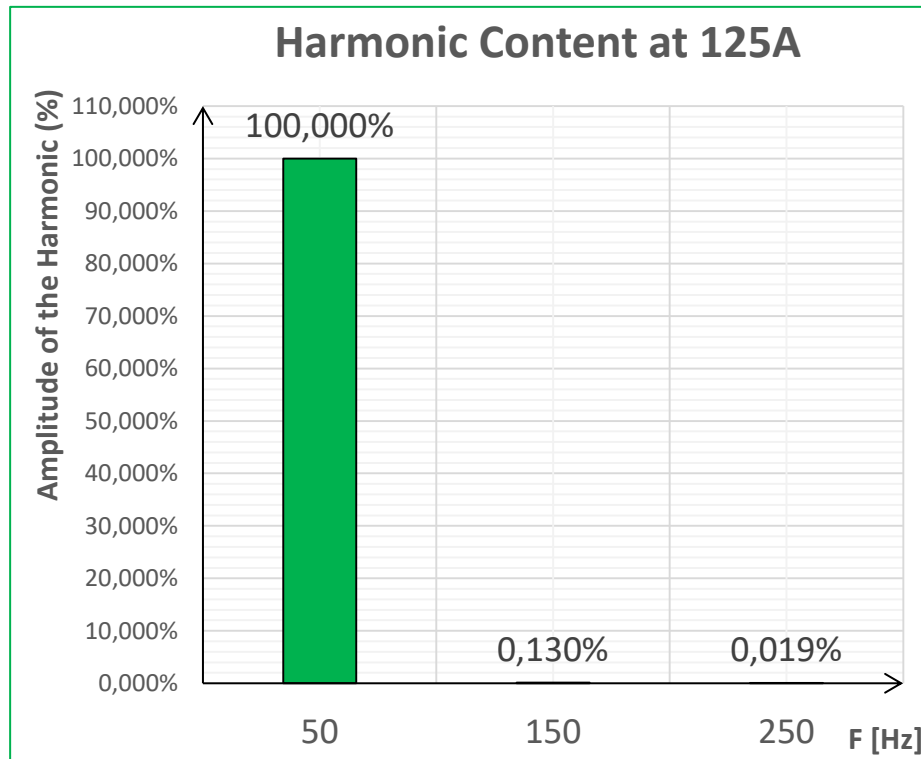
Current Range 3...12 [A]



Current Range 4.5...18 [A]



Current Range 8...32 [A]



Bibliografia

1. **Schneider Electric.** *170 ans d'histoire.* s.l. : Schneider Electric, 2005.
2. **Baurand G., Moliton V.** *The Protection of LV Motors.* s.l. : Schneider Electric, 2007.
3. **A., Cavagnino.** *Macchine Elettriche.* 2005.
4. **Schneider Electric.** AC motors starting and protection systems. s.l. : Schneider Electric.
5. **TeyssandierC.** *From current transformers to hybrid sensors.* 1995.

