

**POLITECNICO DI MILANO**  
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione



**AZIONAMENTO ELETTRICO A BASSO COSTO  
PER POMPE DI TRAVASO IDROCARBURI**

Relatore: Prof. Ferdinando Luigi Mapelli

Tesi di laurea di:  
Luca Silvestri  
Matr. 781110

Anno Accademico 2014-2015







# Indice

## Capitolo 1.

<b>Motore asincrono .....</b>	<b>11</b>
1.1. Caratteristiche costruttive .....	11
1.2. Principio di funzionamento .....	12

## Capitolo 2.

<b>Motori e strumentazione .....</b>	<b>15</b>
2.1. Motori asincroni trifase .....	15
2.2. Layout di misura .....	16
2.3. Acquisizione dei dati .....	18

## Capitolo 3.

<b>Prove sperimentali.....</b>	<b>20</b>
3.1. Misura di resistenza statica .....	20
Motore MEC71 24V 50Hz .....	21
Motore MEC71 12V 50Hz .....	22
Motore MEC63 24V 50Hz .....	22
Motore MEC63 12V 50Hz .....	23
3.2. Prova a vuoto.....	23
Motore MEC71 24V 50Hz .....	25
Motore MEC71 12V 50Hz .....	26
Motore MEC71 8V 50Hz .....	27
Motore MEC63 24V 50Hz .....	29
Motore MEC63 12V 50Hz .....	30

Motore MEC63 8V 50Hz.....	31
<b>3.3. Prova a carico.....</b>	<b>33</b>
Motore MEC71 12V 50Hz .....	34
Motore MEC71 8V 50Hz.....	40
Motore MEC63 12V 50Hz .....	45
Motore MEC63 8V 50Hz.....	52
<b>3.4. Simulazione servizio periodico S3 .....</b>	<b>59</b>
Motore MEC71 8V 50Hz.....	60
Motore MEC63 8V 50Hz.....	62

## **Capitolo 4.**

### **Modulazione della tensione impressa .....64**

4.1. Space Vector Modulation.....	65
-----------------------------------	----

## **Capitolo 5.**

### **Algoritmo di ricostruzione della corrente trifase .....73**

5.1. Misura della corrente.....	73
5.2. Possibili problemi .....	76
5.3. Implementazione Simulink.....	78
5.4. Simulazioni.....	83

## **Capitolo 6.**

### **Conclusioni .....94**

### **Bibliografia .....96**







# Sommario

Oggigiorno i motori in alternata dominano il mercato dei motori elettrici, rendendo ormai obsoleti i motori in corrente continua. A partire dalla fine degli anni '80 l'avvento dell'elettronica di potenza, grazie allo sviluppo di nuovi transistor, ha permesso la realizzazione di inverter sempre più efficienti per il controllo di coppia e velocità dei motori asincroni e brushless. I pregi di questi motori in confronto a quelli in corrente continua sono considerevoli:

- dimensione minore, a parità di potenza;
- temperatura di funzionamento più elevata e nessun particolare sistema di raffreddamento;
- grado di protezione IP maggiore;
- manutenzione praticamente assente;
- momento di inerzia minore, avendo un minor diametro;
- robustezza meccanica maggiore;
- velocità maggiore;
- potenza e tensione di alimentazione maggiore;
- costante di tempo elettrica molto più bassa;
- rendimento migliore;
- costo minore;

Il principale svantaggio dei motori brushless è la presenza di magneti permanenti nel rotore che ne aumenta il costo, così che vengono solitamente impiegati solo per applicazioni in cui è richiesta un'elevata dinamica, come nella robotica, nelle macchine utensili o nell'automazione industriale. Per applicazioni semplici, come quella oggetto di questa tesi, è preferibile utilizzare i ben più economici motori asincroni di tipo industriale.

Le tecniche di controllo dei motori asincroni sono molteplici e consentono di ottenere elevate prestazioni e affidabilità. Spesso però richiedono la misura di grandezze come correnti, tensioni, posizione del rotore o altro. In questi casi il costo dei sensori incide notevolmente sul costo finale dell'azionamento.

Questo lavoro descrive la ricerca di un motore asincrono ottimale in sostituzione di un motore a corrente continua, per l'azionamento di una pompa per travaso di idrocarburi, da montare a bordo di veicoli come ad esempio autocisterne, pertanto la tensione a disposizione sarà la classica tensione continua a 12V o 24V. Inoltre verrà presentata una soluzione interessante da implementare nell'inverter, al fine di avere una misura della corrente assorbita dal motore, riducendo al minimo il costo per sensori. Questa misura potrà essere utilizzata sia come monitoraggio della corrente assorbita, sia come feedback per l'algoritmo di controllo del motore.



# Capitolo 1.

## Motore asincrono

Il motore asincrono o ad induzione è oggi uno dei motori più impiegati negli azionamenti a livello industriale e commerciale, grazie alla loro elevata robustezza, affidabilità, semplicità costruttiva e a un costo minore rispetto agli altri tipi di motori.

Questo capitolo descrive brevemente la costruzione e il principio di funzionamento del motore asincrono.

### 1.1. Caratteristiche costruttive

La macchina asincrona è costituita principalmente da uno statore cavo e da un rotore cilindrico coassiale al precedente, entrambi formati da materiale ferromagnetico laminato e separati da un traferro d'aria. L'albero è sostenuto da due calotte che chiudono le estremità dello statore. La carcassa esterna solitamente è realizzata in ghisa o alluminio e presenta delle alette per favorire l'asportazione del calore. Può eventualmente essere presente anche una ventola per il raffreddamento, direttamente calettata su una delle estremità dell'albero motore, come si vede in figura 1.1.

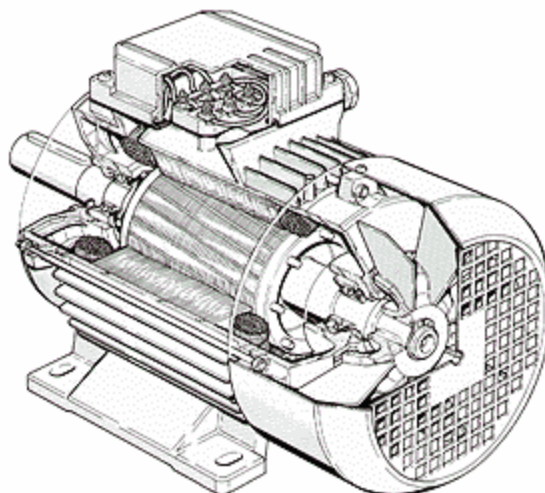


Figura 1.1: Vista di un motore asincrono

Nello statore vengono realizzate delle cave che si affacciano sul traferro, nelle quali viene inserito l'avvolgimento di statore. Questo è costituito da tre fasi identiche come numero e distribuzione delle spire, posizionate spazialmente lungo il traferro così da risultare sfasate in modo uguale. La distribuzione delle spire è realizzata in modo tale da ripetersi ogni  $\frac{1}{p}$  giro, dove  $p$  è il numero di coppie polari del campo magnetico che sarà prodotto. Le fasi saranno alimentate da una sorgente trifase esterna collegata per mezzo di una morsettiera.

Il rotore può essere di due tipi, avvolto o a gabbia di scoiattolo. Il rotore avvolto o ad anelli, presenta un avvolgimento trifase distribuito in modo del tutto analogo a quello statorico, i cui terminali fanno capo a tre anelli conduttori su cui strisciano le spazzole che consentono il collegamento ad un circuito esterno. Il rotore a gabbia di scoiattolo invece è realizzato mediante un insieme di sbarre di alluminio collegate fra loro da due anelli in modo da chiudere il circuito in corto-circuito. Il rotore a gabbia è il più diffuso in quanto è esente da tutti i problemi legati all'utilizzo delle spazzole.

## 1.2. Principio di funzionamento

Le fasi di statore, alimentate da una terna trifase equilibrata di correnti alla frequenza  $f$ , produrranno un campo magnetico rotante alla velocità  $n$ , chiamata velocità di sincronismo e definita come:

$$n = \frac{60f}{p}$$

dove ricordiamo che  $p$  è il numero di coppie polari della macchina.

La caratteristica fondamentale per il funzionamento del motore asincrono è che il rotore ruota ad una velocità diversa da quella del campo magnetico, cioè in maniera asincrona. Infatti solo in questo caso si crea una corrente indotta nel rotore per effetto del campo magnetico, la quale produrrà la coppia motrice.

Detta  $n'$  la velocità di rotazione del rotore, si definisce lo scorrimento come:

$$s = \frac{n - n'}{n}$$

Lo scorrimento quindi rappresenta la frazione di giri persi dal rotore rispetto al campo magnetico rotante, per ogni suo giro. Nel funzionamento come motore, lo scorrimento può assumere valori compresi tra 0 e 1: in particolare sarà 0 quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo e 1 quando il rotore è fermo.

Dato che la coppia sviluppata dal motore dipende dalla corrente rotorica e quindi dalla velocità del rotore, è possibile tracciare la curva della coppia che il motore fornisce al carico in funzione dello scorrimento.

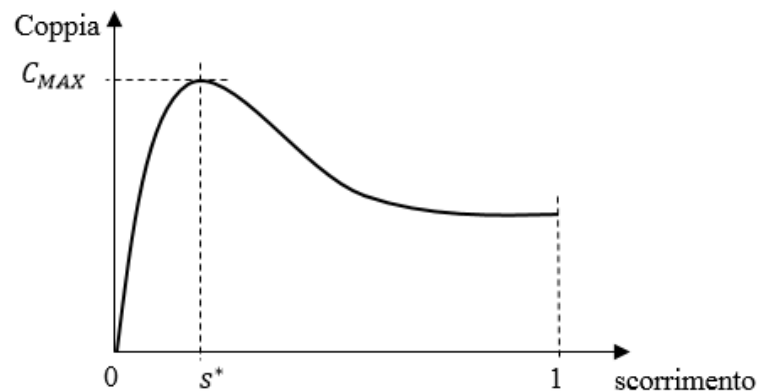


Figura 1.2: Curva della coppia motrice in funzione dello scorrimento

Dalla curva della coppia motrice di figura 1.2 si possono individuare due zone di funzionamento separate dal valore di scorrimento  $s^*$  per cui si ha la coppia massima: per scorrimenti minori di  $s^*$  si ha la zona stabile, mentre per scorrimenti maggiori di  $s^*$  si ha la zona instabile. Questo significa che nel tratto stabile il motore è in grado di autoregolarsi, ovvero ad un aumento della coppia resistente corrisponde un aumento della coppia motrice generata dal motore che contrasterà la variazione del carico; nel tratto instabile invece, ad un aumento della coppia resistente si ha una diminuzione di coppia motrice e quindi il motore rallenterà fino a fermarsi.

Nel funzionamento a vuoto, cioè in assenza di una coppia resistente applicata all'albero, il motore si porterà a una velocità prossima alla velocità di sincronismo. La corrente di rotore è quindi trascurabile e quella di statore è molto inferiore alla nominale, circa il 20÷40% della nominale. Con buona approssimazione possiamo trascurare gli effetti della resistenza e induttanza di statore, essendo molto bassa la corrente che attraversa gli avvolgimenti di statore, perciò tutta la corrente assorbita dal motore si può considerare solo come corrente di magnetizzazione.

Quando viene applicata all'albero una coppia resistente invece, il motore rallenterà, aumentando quindi lo scorrimento e inducendo delle correnti rotoriche che genereranno una coppia motrice atta a contrastare il carico. Maggiore è il carico e maggiore sarà lo scorrimento. Tutta la potenza assorbita dalla rete però non sarà fruibile all'albero motore, in quanto una parte verrà dissipata. I principali termini di potenza dissipata durante il passaggio dalla rete elettrica all'albero motore sono:

- Perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di statore e rotore;
- Perdite nel ferro, principalmente di statore, per isteresi magnetica e correnti parassite;
- Perdite meccaniche per attrito e ventilazione;

Per tenere conto della percentuale di potenza totale dissipata durante il funzionamento del motore, è possibile definire il coefficiente di rendimento:

$$\eta = \frac{P_{RESA}}{P_{ASSORBITA}} \cdot 100$$

dove  $P_{RESA}$  è la potenza utile all'albero motore e  $P_{ASSORBITA}$  è la potenza totale assorbita dalla rete. Maggiore è il coefficiente di rendimento e migliore sarà l'efficienza del motore, in quanto sarà maggiore la potenza resa e minore la potenza dissipata.

Un'altra relazione interessante che è possibile ricavare tra potenze è la seguente:

$$P_{MECCANICA} = (1 - s) \cdot P_{TRASMESSA}$$

dove  $P_{MECCANICA}$  è la totale potenza meccanica all'albero (somma tra la potenza utile e le perdite meccaniche),  $P_{TRASMESSA}$  è la totale potenza che è possibile trasmettere dallo statore al rotore (potenza assorbita dalla rete a meno delle perdite nello statore, per effetto Joule e nel ferro) e  $s$  è lo scorrimento. Da questa relazione è evidente che conviene far funzionare il motore a velocità prossime a quella di sincronismo, in quanto minore è lo scorrimento e maggiore sarà la potenza trasmessa dallo statore al rotore, che viene trasformata in potenza utile all'albero del motore.

## Capitolo 2.

# Motori e strumentazione

In questo capitolo vengono presentati i motori asincroni trifase e la strumentazione utilizzata durante le prove sperimentali a cui i motori sono stati sottoposti.

### 2.1. Motori asincroni trifase

Sulla base di un progetto preliminare, il costruttore ci ha fornito sei diversi motori asincroni trifase, targati come segue:

- MEC71 24V 50Hz
- MEC71 12V 50Hz
- MEC71 8V 50Hz
- MEC63 24V 50Hz
- MEC63 12V 50Hz
- MEC63 8V 50Hz

I motori vengono alimentati da un inverter che trasforma una tensione continua in una tensione alternata trifase; quelli targati 24V sono stati pensati per applicazioni in cui si ha a disposizione in ingresso all'inverter una tensione continua di 24V, invece quelli targati 12V e 8V, sono stati pensati anche per applicazioni in cui si ha a disposizione una tensione continua di 12V.

La dicitura 50Hz indica la frequenza nominale della tensione di alimentazione dei motori.

I motori sono dotati di alette di raffreddamento e di una ventola esterna fissata sull'albero del motore, che è possibile rimuovere. La classe di isolamento degli avvolgimenti è F, che corrisponde a una temperatura interna massima ammissibile di 155°C.

## 2.2. Layout di misura

Per eseguire le prove sperimentali, è stata utilizzata la seguente strumentazione:

- Un banco freno, che permette di selezionare la coppia resistente;
- Un generatore di tensione a 24V;
- Un inverter parametrizzabile da computer, in grado di controllare la tensione e frequenza di alimentazione del motore;
- Una scheda di acquisizione a 12 canali collegata ad un computer tramite una PCMCIA Card, per acquisire i dati ed elaborarli in tempo reale;
- Un filtro da interporre tra la scheda di acquisizione e i sensori di corrente e tensione;
- Tre sonde di temperatura;
- Un alimentatore da banco per alimentare il filtro;

In figura 2.1 è schematizzato il layout generale della strumentazione durante le prove.

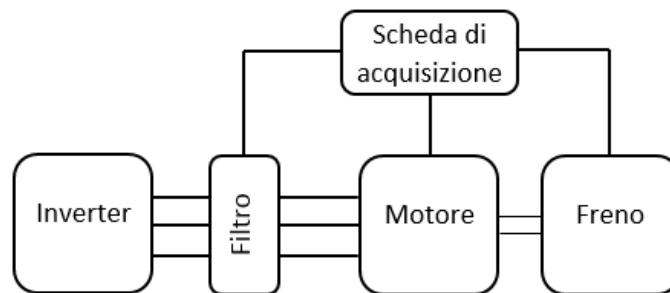


Figura 2.1: Layout di misura

La scheda di acquisizione registra la corrente e tensione all'ingresso del motore, la temperatura interna ed esterna del motore, la velocità del motore e la coppia resistente generata dal freno. Il filtro serve da interfaccia tra la scheda di acquisizione e i trasduttori di tensione e corrente.

I sensori del filtro sono stati inseriti come mostrato in figura 2.2; in particolare i sensori di corrente e tensione sono stati collegati in modo tale da simulare due wattmetri collegati secondo un'inserzione Aron. Dato che un motore asincrono trifase equivale a un carico simmetrico ed equilibrato, è sufficiente misurare due correnti di fase e due tensioni concatenate per ottenere tutte le altre grandezze derivate, come ad esempio la potenza attiva e reattiva assorbita dal motore.



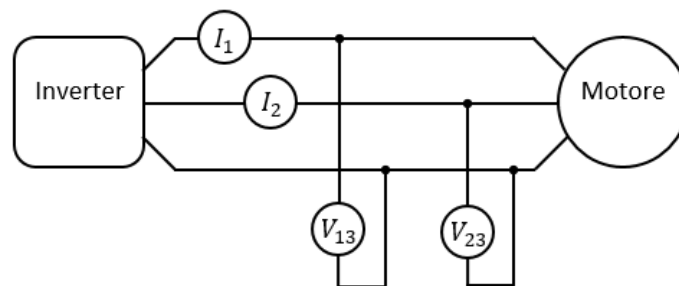


Figura 2.2: Schema di inserzione dei sensori di corrente e tensione



Figura 2.3: Banco freno e motore asincrono trifase

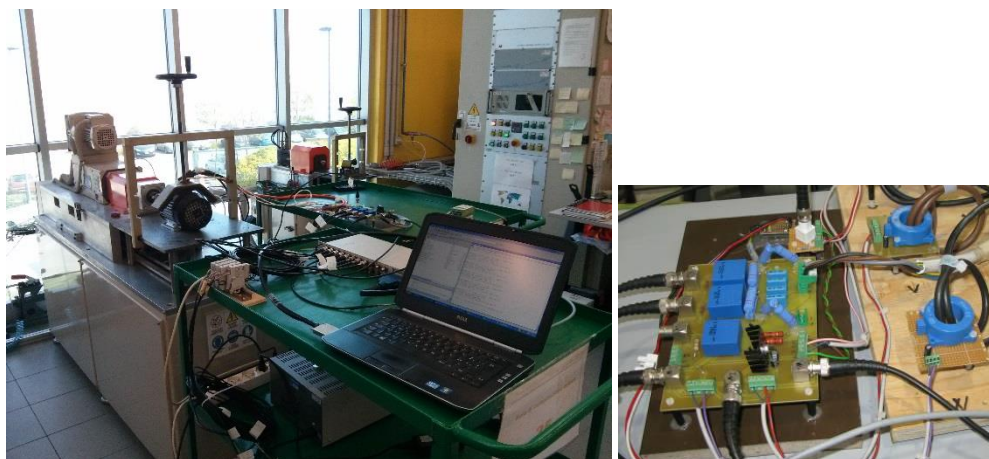


Figura 2.4: A sinistra: scheda di acquisizione collegata al computer. A destra: filtro con i sensori di tensione e corrente

## 2.3. Acquisizione dei dati

Durante le prove sono stati acquisiti i seguenti dati (si riporta la dicitura di ciascuna grandezza):

- Due tensioni concatenate di alimentazione del motore:  $V_{13}$  ,  $V_{23}$
- Due correnti di fase del motore:  $I_1$  ,  $I_2$
- La coppia resistente del banco freno: *Coppia*
- La velocità di rotazione del motore: *Velocità*
- La temperatura interna ed esterna del motore:  $T_{interna}$  ,  $T_{esterna}$
- La temperatura ambiente:  $T_{ambiente}$

Per una migliore qualità dei risultati, in post-elaborazione è stato implementato un algoritmo di filtraggio e media delle grandezze acquisite. I valori acquisiti infatti, a parte quelli relativi alla temperatura, vengono corretti per tenere conto dello sfasamento introdotto dai sensori e dal filtro.

L'algoritmo di post-elaborazione calcola inoltre tutte le altre grandezze derivate.

- Terza corrente di fase:

$$I_3 = -I_1 - I_2$$

- Tensione efficace:

$$V = \sqrt{\frac{V_{23}^2}{2} + \frac{(V_{23} - 2V_{13})^2}{6}}$$

- Corrente efficace:

$$I = \sqrt{\frac{I_1^2}{2} + \frac{(I_1 + 2I_2)^2}{6}}$$

- Potenza attiva assorbita dal motore:

$$P = V_{13}I_1 + V_{23}I_2$$

- Potenza reattiva assorbita dal motore:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [V_{13}I_1 - V_{23}I_2 + 2(V_{13} - V_{23})I_3]$$

- Fattore di potenza:

$$\cos\varphi = \cos \left[ \text{atan} \left( \frac{Q}{P} \right) \right]$$

- Potenza meccanica del motore:

$$Pm = \frac{2\pi}{60} \text{Velocità} \cdot \text{Coppia}$$

- Rendimento del motore:

$$\text{Rend} = \frac{Pm}{P}$$

- Frequenza: calcolata dall'analisi della forma d'onda di  $V_{13}$
- Scorrimento:

$$\text{Scorr} = \frac{60 \cdot \text{Frequenza} - \text{Velocità}}{60 \cdot \text{Frequenza}}$$

## Capitolo 3.

### Prove sperimentali

In questo capitolo vengono esposti i risultati ottenuti durante le prove sperimentali a cui sono stati sottoposti i motori in esame.

#### 3.1. Misura di resistenza statorica

Lo scopo di questa prova è di ottenere il valore della resistenza di statore di ciascuna fase del motore. Si vuole verificare se questo valore corrisponde a quello calcolato in fase di progetto.

La misura di resistenza avviene tramite il classico metodo voltamperometrico, come mostrato in figura 3.1:

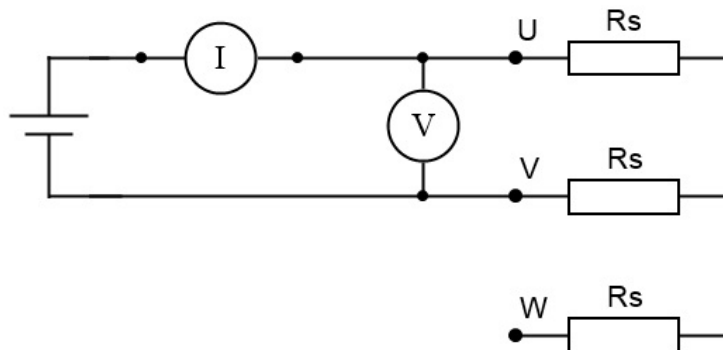


Figura 3.1: Schema misura di resistenza

Occorre applicare una corrente continua, così da escludere l'effetto delle induttanze, a una coppia di fasi. Dal rapporto tra il valore di tensione e di corrente assorbita, si ricava il valore della resistenza.

Avendo ipotizzato un collegamento delle fasi del motore di tipo stella, il valore di resistenza che si ottiene corrisponde alla serie tra due resistenze di statore  $R_s$ :

$$\text{Resistenza serie} = \frac{V}{I} = R_s + R_s$$

La resistenza statorica  $R_s$  di una singola fase, sarà quindi la metà della resistenza serie misurata.

Durante la prova sono state eseguite per ogni combinazione delle fasi, due misure a diversi valori di corrente. Il valore finale di resistenza statorica è ottenuto come media dei valori di resistenza serie calcolati.

Le prove si sono svolte ad una temperatura ambiente di 23°C.

## Motore MEC71 24V 50Hz

In tabella 3.1 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori calcolati della resistenza serie tra le due fasi di statore.

Tabella 3.1: MEC71 24V 50Hz – Dati misura di resistenza

Fasi	Corrente [A]	Tensione [V]	Resistenza serie [mΩ]
U - W	15	1,29	85,7
	30	2,6	86,8
U - V	15	1,28	85,4
	30	2,59	86,3
V - W	15	1,29	85,7
	30	2,6	86,6

Per il motore in esame, il valore di resistenza statorica è:  $R_s = 43 \text{ m}\Omega$

Il valore di resistenza ottenuto risulta molto più elevato di quello calcolato in fase di progetto. Questo indica che il costruttore ha realizzato un numero maggiore di spire e di sezione inferiore, rispetto a quanto previsto nel progetto preliminare.

## Motore MEC71 12V 50Hz

In tabella 3.2 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori calcolati della resistenza serie tra le due fasi di statore.

Tabella 3.2: MEC71 12V 50Hz - Dati misura di resistenza

Fasi	Corrente [A]	Tensione [V]	Resistenza serie [mΩ]
V - W	30	0,88	29,5
	60	1,81	30,2
U - V	30	0,88	29,5
	60	1,82	30,3
U - W	30	0,87	29,3
	60	1,79	29,8

Per il motore in esame, il valore di resistenza statorica è:  $R_s = 14,9 \text{ m}\Omega$   
 Il valore di resistenza ottenuto è prossimo a quello calcolato in fase di progetto.

## Motore MEC63 24V 50Hz

In tabella 3.3 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori calcolati della resistenza serie tra le due fasi di statore.

Tabella 3.3: MEC63 24V 50Hz - Dati misura di resistenza

Fasi	Corrente [A]	Tensione [V]	Resistenza serie [mΩ]
U - V	15	1,37	91,4
	30	2,78	92,6
U - W	15	1,38	92,1
	30	2,78	92,8
V - W	15	1,39	92,5
	30	2,85	95,1

Per il motore in esame, il valore di resistenza statorica è:  $R_s = 46,4 \text{ m}\Omega$

Il valore di resistenza ottenuto risulta molto più elevato di quello calcolato in fase di progetto. Questo indica che il costruttore ha realizzato un numero maggiore di spire e di sezione inferiore, rispetto a quanto previsto nel progetto preliminare.

## Motore MEC63 12V 50Hz

In tabella 3.4 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori calcolati della resistenza serie tra le due fasi di statore.

Tabella 3.4: MEC63 12V 50Hz - Dati misura di resistenza

Fasi	Corrente [A]	Tensione [V]	Resistenza serie [mΩ]
U - V	30	0,93	30,9
	60	1,93	32,2
U - W	30	0,94	31,3
	60	1,90	31,7
V - W	30	0,94	31,4
	60	1,91	31,8

Per il motore in esame, il valore di resistenza statorica è:  $R_s = 15,8 \text{ m}\Omega$   
 Il valore di resistenza ottenuto è prossimo a quello calcolato in fase di progetto.

## 3.2. Prova a vuoto

Lo scopo di questa prova è quello di determinare la caratteristica di magnetizzazione del motore, che rappresenta l'andamento dell'induzione magnetica in funzione del campo magnetico, durante il funzionamento a vuoto del motore, cioè in assenza di coppia resistente applicata all'albero.

L'induzione magnetica è proporzionale al flusso e quindi alla tensione di alimentazione, mentre il campo magnetico è proporzionale alla corrente assorbita, che nel funzionamento a vuoto è per gran parte solo corrente magnetizzante. Perciò si può tracciare la curva di magnetizzazione dai valori di tensione di alimentazione e corrente assorbita dal motore a vuoto. In figura 3.2 è mostrato un andamento tipico di questa curva.

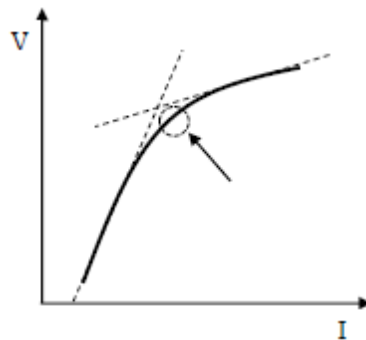


Figura 3.2: Caratteristica di magnetizzazione

Si possono notare due regioni, contraddistinte da una diversa pendenza della curva. Nella prima la pendenza è maggiore e quindi per piccole variazioni del campo magnetico si ottengono grandi variazioni di flusso. Nella seconda regione dove la pendenza è minore, occorrono grandi variazioni del campo magnetico per ottenere anche solo piccole variazioni di flusso; questo perché in questa regione il ferro della macchina è in saturazione e quindi per avere un aumento del flusso è necessario un maggiore sforzo, cioè una maggiore corrente.

Il punto di lavoro ideale della macchina è in prossimità dell'inizio della saturazione, ovvero nel tratto in cui si ha il cambio di pendenza della curva (indicato in figura 3.2 da una freccia), che è chiamato ginocchio della caratteristica di magnetizzazione. In questo tratto infatti si ha il massimo flusso magnetico in rapporto alla corrente assorbita dal motore.

Nei paragrafi successivi vengono riportati i valori di tensione e corrente, misurati durante la prova a vuoto di ogni motore e la corrispondente caratteristica di magnetizzazione. Per tracciare la curva è necessario riportare i valori di tensione alla frequenza nominale di 50Hz, come segue:

$$Tensione\ riportata\ a\ 50Hz = \frac{Tensione}{Frequenza} \cdot 50$$

È importante ricordare che la tensione di alimentazione del motore, ovvero la tensione in uscita dall'inverter, è una tensione alternata. Quindi il valore di tensione a cui si fa riferimento è il valore efficace (o rms, abbreviazione di root-mean-squared). Se all'ingresso dell'inverter si ha una tensione continua di 24V, in uscita si riesce a ottenere al massimo una tensione di valore di picco pari a 24V, se si vuole mantenere una forma d'onda di corrente sinusoidale. Il valore efficace di questa tensione è 17Vrms, calcolato come:

$$V_{ac\,rms} = \frac{V_{picco}}{\sqrt{2}}$$

Se invece si dispone di una tensione continua di 12V in ingresso all'inverter, in uscita si riesce a ottenere una tensione massima di 8,5Vrms.



## Motore MEC71 24V 50Hz

In tabella 3.5 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.5: MEC71 24V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
30	3,36	4,3	7,2
30	4,32	6,5	10,8
30	5	7,6	12,7
30	5,3	8,2	13,7
30	6,4	9,8	16,3
30	7,2	10,89	18,2
30	7,9	12	20
30	10,5	15	25
25,1	11,7	13,1	26,1
25	13,1	14	28
25	15,3	15	30
24	18,5	15,6	32,5

In figura 3.3 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

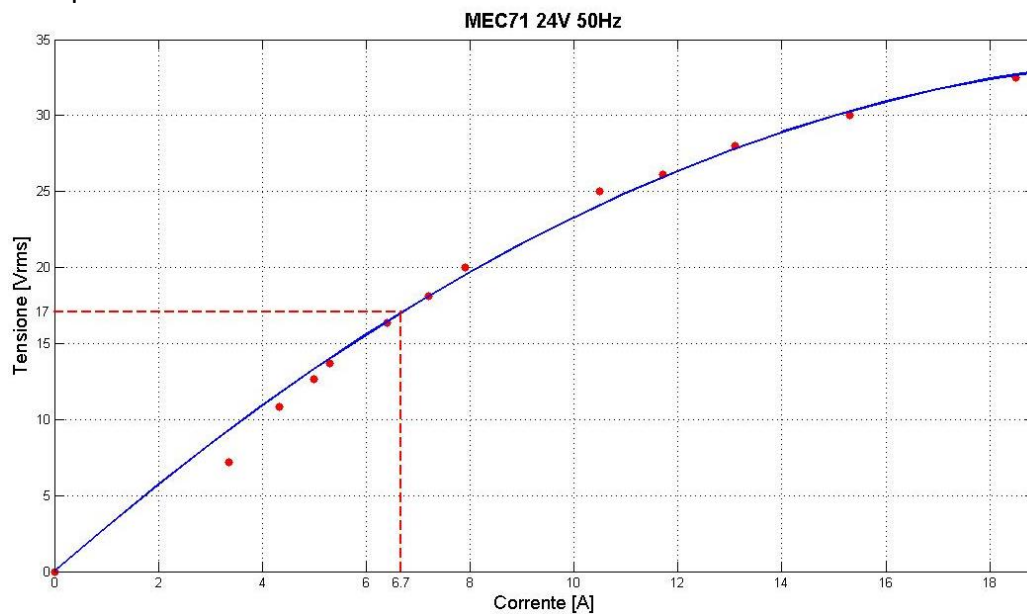


Figura 3.3: MEC71 24V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 24V. Da figura 3.3 si vede che alla massima tensione che si riesce a ottenere in uscita dall'inverter, pari a 17Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 6.7A.

Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno ai 25Vrms. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi lontano dalla zona di saturazione, perciò si ha un bassissimo utilizzo del ferro.

## Motore MEC71 12V 50Hz

In tabella 3.6 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.6: MEC71 12V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
30,5	6,65	3,1	5,1
30,5	7,7	3,8	6,2
30,6	8,8	4,5	7,4
30,7	10,2	5,3	8,6
29,8	11,6	5,8	9,7
30	13,1	6,6	11
31	13,9	7	11,3
31,1	15,6	7,8	12,5
31,2	17,3	8,5	13,6
31,5	19,2	9,2	14,6
31,6	21,5	9,9	15,7
31,9	24,2	10,6	16,6
30,5	24,7	10,3	16,9
31,9	27,4	11,2	17,6
32,5	31,4	12	18,5

In figura 3.4 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

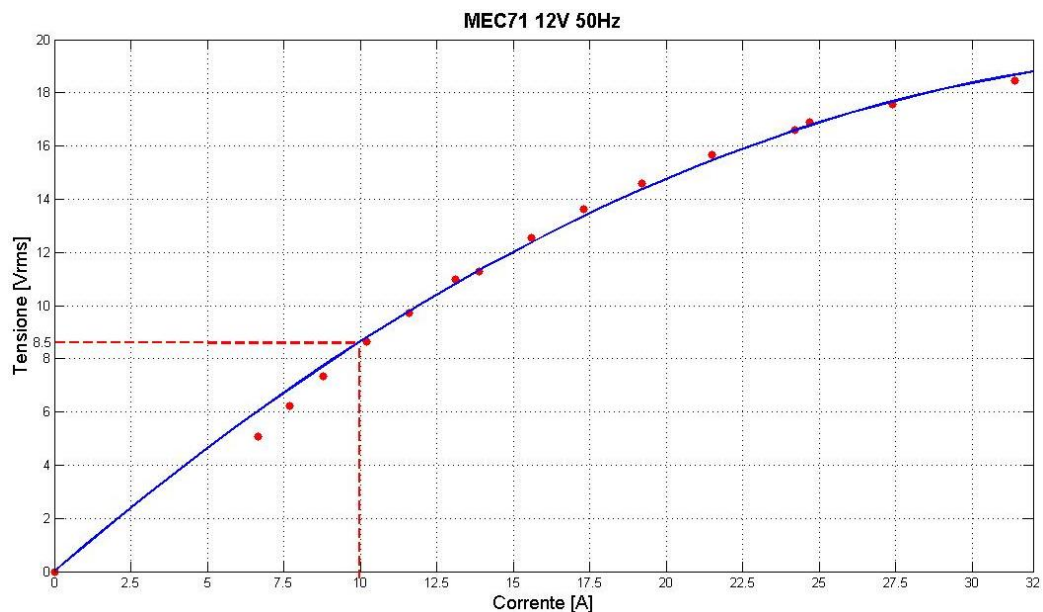


Figura 3.4: MEC71 12V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 12V. Da figura 3.4 si vede che alla massima tensione che si riesce a ottenere in uscita dall'inverter, pari a 8.5Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 10A.

Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno ai 14Vrms. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi lontano dalla zona di saturazione, perciò si ha un bassissimo utilizzo del ferro.

### Motore MEC71 8V 50Hz

In tabella 3.7 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.7: MEC71 8V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
51,4	12,6	3,8	3,7
51,4	15,5	4,8	4,7
51,4	18,7	5,8	5,6
51,5	22,4	6,7	6,5
51,6	26,3	7,7	7,5
52,1	27,0	8,0	7,6
51,6	30,6	8,6	8,4
52,8	36,6	10,0	9,4

In figura 3.5 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

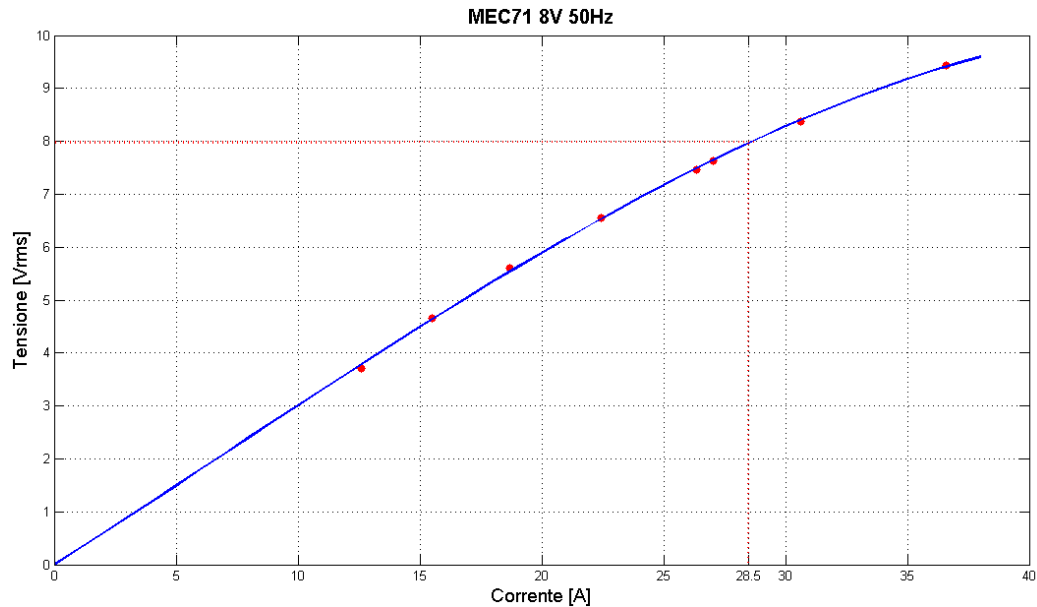


Figura 3.5: MEC71 8V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 12V. Da figura 3.5 si vede che alla presunta tensione nominale di 8Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 28.5A.

Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno a 8.5Vrms. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi prossimo alla zona di saturazione, perciò si ha un ottimo utilizzo del ferro.

## Motore MEC63 24V 50Hz

In tabella 3.8 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.8: MEC63 24V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
30,1	3,45	4,2	7
30,1	3,9	4,9	8,1
30,1	4,3	5,6	9,3
30,1	4,9	6,3	10,5
30,1	5,45	7	11,6
30,1	6	7,8	13
30,1	6,7	8,5	14,1
30,1	7,3	9,2	15,3
30,1	8	9,9	16,4
30,1	8,7	10,8	17,9
30,1	9,5	11,6	19,3
30,1	10,3	12,3	20,4
26,4	12,9	11,8	22,3
26,9	15	12,8	23,8
23,2	19,4	12	25,9

In figura 3.6 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

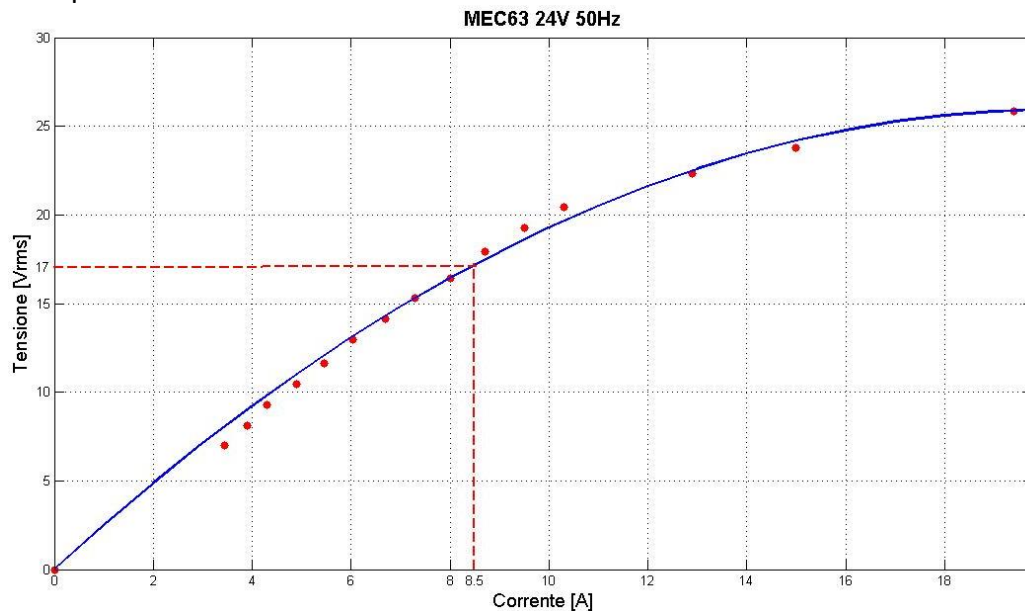


Figura 3.6: MEC63 24V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 24V. Da figura 3.6 si vede che alla massima tensione che si riesce a ottenere in uscita dall'inverter, pari a 17Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 8.5A.

Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno ai 22Vrms. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi lontano dalla zona di saturazione, perciò si ha un basso utilizzo del ferro.

## Motore MEC63 12V 50Hz

In tabella 3.9 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.9: MEC63 12V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
30,1	4,8	1,7	2,8
30,1	5,7	2,4	4
30,1	7,2	3,1	5,1
30,1	8,75	3,8	6,3
30,1	10,5	4,5	7,5
30,1	12,5	5,3	8,8
30,1	14,3	6	10
31,5	16,6	6,7	10,6
31,5	18,9	7,4	11,7
31,5	22,5	8,1	12,9
31,5	26,5	8,8	14
32,4	31,7	9,5	14,7

In figura 3.7 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

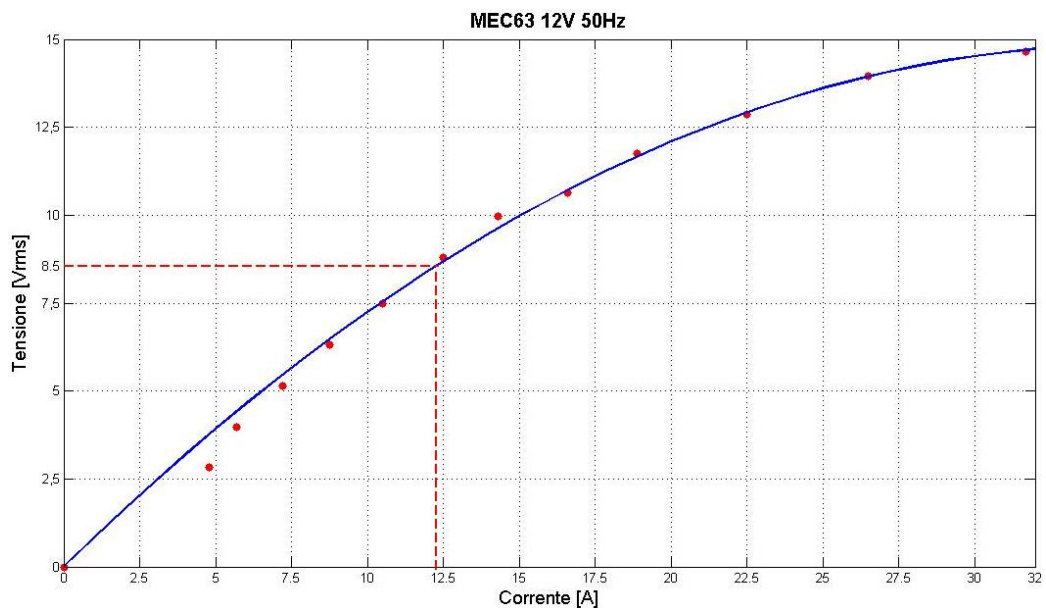


Figura 3.7: MEC63 12V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 12V. Da figura 3.7 si vede che alla massima tensione che si riesce a ottenere in uscita dall'inverter, pari a 8.5Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 12A.

Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno a 11V. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi lontano dalla zona di saturazione, perciò si ha un basso utilizzo del ferro.

### Motore MEC63 8V 50Hz

In tabella 3.10 si riportano i valori misurati durante la prova e i valori di tensione riportati a 50Hz.

Tabella 3.10: MEC63 8V 50Hz - Dati prova a vuoto

Frequenza [Hz]	Corrente [A]	Tensione [V]	Tensione [V] riportata a 50Hz
52,1	18,9	4,7	4,5
50,7	25,5	5,8	5,8
50,8	32,3	6,8	6,7
51,0	40,6	7,8	7,6
51,5	55,2	8,7	8,5
52,1	76,3	9,7	9,3

In figura 3.8 si mostrano i punti relativi ai valori di tensione riportata a 50Hz in funzione della corrente assorbita e la curva di magnetizzazione ottenuta tramite interpolazione dei dati.

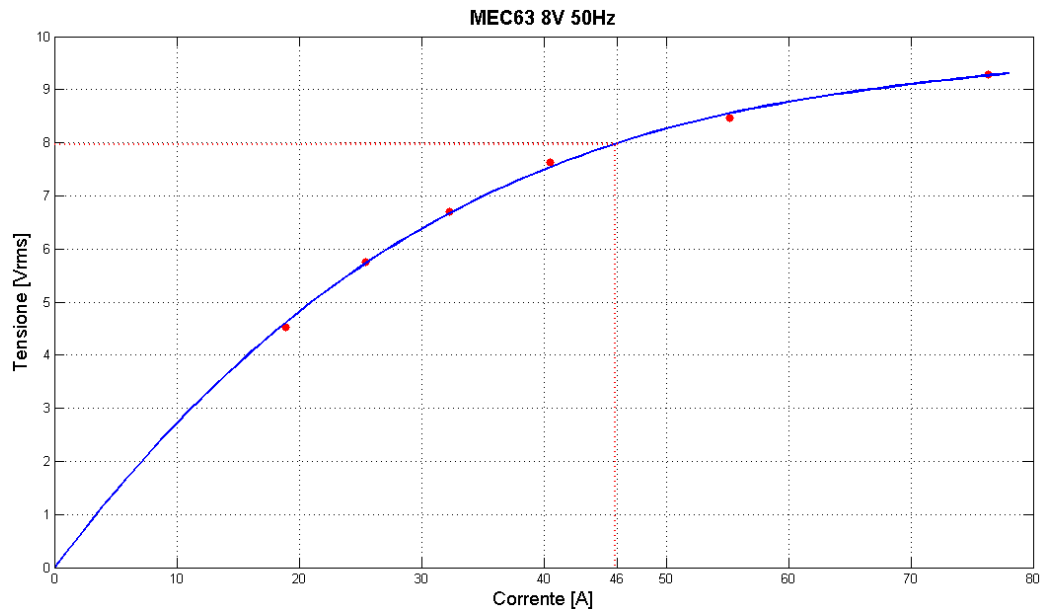


Figura 3.8: MEC63 8V 50Hz - Caratteristica di magnetizzazione

Il motore in esame è stato pensato per applicazioni in cui si dispone di un'alimentazione continua a 12V. Da figura 3.8 si vede che alla presunta tensione nominale di 8Vrms, il motore assorbe una corrente di circa 46A. Dall'analisi della curva di magnetizzazione, si individua il ginocchio della caratteristica intorno a 8Vrms. Il punto di lavoro di questo motore sarà quindi prossimo alla zona di saturazione, perciò si ha un ottimo utilizzo del ferro.



### 3.3. Prova a carico

Lo scopo principale di questa prova è quello di determinare le curve di riscaldamento del motore per i seguenti tipi di servizio:

- Servizio continuativo: funzionamento del motore in condizioni nominali (coppia nominale costante) fino al raggiungimento dell'equilibrio termico.
- Servizio in sovraccarico: funzionamento del motore in condizioni di sovraccarico (coppia costante di valore 1.5 volte la coppia nominale) per un tempo ridotto.

Dalla curva di riscaldamento si ottiene la temperatura interna raggiunta durante il servizio. Il valore di interesse non è tanto la temperatura interna massima, quanto il salto di temperatura, ovvero la differenza tra la temperatura all'inizio del servizio e quella raggiunta alla fine. In questo modo i risultati ottenuti saranno validi indipendentemente dalle condizioni iniziali della prova, come ad esempio la temperatura ambiente alla quale è stata eseguita.

Occorre verificare che la temperatura interna del motore durante il servizio, non superi la temperatura imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti, che per tutti i motori in esame è di 155°C. Questa condizione deve essere verificata per qualunque temperatura ambiente a cui si trovi dover lavorare il motore, quindi i risultati della prova verranno valutati nella condizione peggiore, ovvero per una temperatura ambiente di 45°C.

La prova viene eseguita alimentando il motore a una tensione costante e applicando un carico costante, fino al raggiungimento del regime termico. Per problemi di tempo non è stato possibile attendere il raggiungimento della temperatura di regime, tuttavia i dati acquisiti durante la prova sono stati interpolati con una funzione esponenziale, così da estrapolare la costante di tempo del motore e la temperatura di regime.

La pompa per l'applicazione in esame, viene simulata tramite il banco freno. In particolare si considera una coppia resistente di 1.7Nm per il funzionamento a carico nominale, e una coppia resistente di 2.5Nm per il funzionamento in sovraccarico.

I motori MEC71 e MEC63 a 24V, non sono stati provati a carico per la mancanza di un'adeguata alimentazione in ingresso inverter, in quanto servirebbero almeno 34Vdc per ottenere 24Vrms, cioè la tensione nominale ipotizzata in fase di progetto. Dalla prova a vuoto di questi motori si è visto infatti che a 17Vrms si ha un bassissimo utilizzo del ferro, quindi non conviene utilizzare questi motori per realizzare l'azionamento in esame.

## Motore MEC71 12V 50Hz

### Estrazione punti di funzionamento a vuoto

Dalla prova a vuoto del motore in esame si è visto che il ginocchio della caratteristica di magnetizzazione si trova intorno a 14V, quindi per sfruttare al meglio la macchina, le prove a carico verranno effettuate ad una tensione di 12V, anziché 8.5V come considerato in precedenza. In tabella 3.11 si riportano alcuni dati relativi al funzionamento a vuoto del motore.

Tabella 3.11: MEC71 12V 50Hz - Dati funzionamento a vuoto

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Frequenza [Hz]	T_interna [°C]
13,98	18,27	0,20	0,089	0,43	0	51,0	27,1
12,08	15,14	0,23	0,072	0,31	0	51,3	27,8
10,04	12,17	0,28	0,059	0,20	0	51,6	28,0

### Estrazione punti di funzionamento a carico

Prima di effettuare le prove di riscaldamento, il motore è stato sottoposto a dei gradini di coppia crescente, al fine di valutarne le prestazioni in termini di rendimento e scorrimento. In tabella 3.12 si riportano alcuni dei punti di funzionamento rilevati durante la prova del motore in esame, con ventola di raffreddamento. In particolare si riportano i dati relativi al funzionamento a:

- 12V e coppia crescente fino al sovraccarico;
- 14V e coppia nominale ;

Tabella 3.12: MEC71 12V 50Hz - Dati funzionamento a carico

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
11,7	23,8	0,78	0,38	0,30	0,30	0,76	2881	79	50,8	5,4	31,1
11,6	30,2	0,86	0,52	0,31	0,40	1,14	2826	77	50,8	7,2	32,9
11,5	38,0	0,90	0,68	0,33	0,49	1,53	2755	71	50,8	9,6	35,9
11,4	42,0	0,92	0,76	0,34	0,53	1,72	2703	70	50,8	11,2	41,5
11,3	49,4	0,92	0,89	0,38	0,59	2,01	2655	66	51,3	13,8	46,7
11,2	61,3	0,93	1,11	0,43	0,64	2,35	2491	58	51,4	19,2	52,4
11,1	67,5	0,94	1,22	0,46	0,65	2,51	2364	53	51,4	23,3	59,0
11,1	71,6	0,94	1,29	0,47	0,62	2,55	2248	49	51,4	27,1	65,8
13,5	37,9	0,87	0,77	0,44	0,56	1,77	2805	73	51,1	8,5	47,4
13,5	38,1	0,87	0,77	0,44	0,56	1,77	2804	73	51,1	8,6	47,7

Si nota che il rendimento e lo scorrimento peggiorano significativamente all'aumentare del carico. In particolare si passa da un rendimento del 70% e scorrimento del 11% a carico nominale, a un rendimento del 50% e scorrimento del 25% in condizioni di sovraccarico.

A parità di condizioni di carico, si vede inoltre che alimentando il motore a 14V anziché 12V, si ha un leggero miglioramento delle prestazioni, ovvero un rendimento del 73% e scorrimento del 8.5%.

### Prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

In tabella 3.13 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 12V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm (nominale)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 23°C

Tabella 3.13: MEC71 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
2	11,4	42,8	0,92	0,78	0,34	0,54	1,75	2703	69	50,8	11,3	39,4
4	11,4	42,1	0,92	0,76	0,33	0,53	1,72	2703	69	50,8	11,3	41,3
6	11,4	42	0,92	0,76	0,33	0,53	1,74	2703	70	50,8	11,3	43,0
8	11,4	42	0,92	0,76	0,33	0,53	1,72	2698	70	50,8	11,4	44,4
10	11,5	41,6	0,92	0,76	0,33	0,53	1,70	2698	70	50,8	11,4	45,4
12	11,5	41,5	0,92	0,76	0,33	0,53	1,72	2693	70	50,8	11,6	46,5
14	11,5	41,5	0,92	0,75	0,33	0,52	1,69	2695	69	50,8	11,5	47,5
16	11,5	41,5	0,92	0,76	0,33	0,53	1,73	2691	70	50,8	11,6	48,1
18	11,5	41,5	0,92	0,76	0,32	0,53	1,72	2690	70	50,8	11,7	48,9
20	11,5	41,6	0,92	0,76	0,32	0,53	1,72	2684	70	50,8	11,9	49,5
22	11,5	41,5	0,92	0,76	0,33	0,53	1,73	2683	70	50,7	11,9	50,2
24	11,5	41,7	0,92	0,76	0,33	0,53	1,73	2681	70	50,7	12,0	50,5
26	11,5	41,5	0,92	0,76	0,33	0,53	1,73	2683	70	50,7	11,9	50,9
28	11,5	41,6	0,92	0,76	0,32	0,52	1,70	2682	69	50,8	12,0	51,3
30	11,5	41,7	0,92	0,76	0,33	0,53	1,72	2680	69	50,7	12,0	51,6

La prova di riscaldamento, della durata di 30 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.9 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

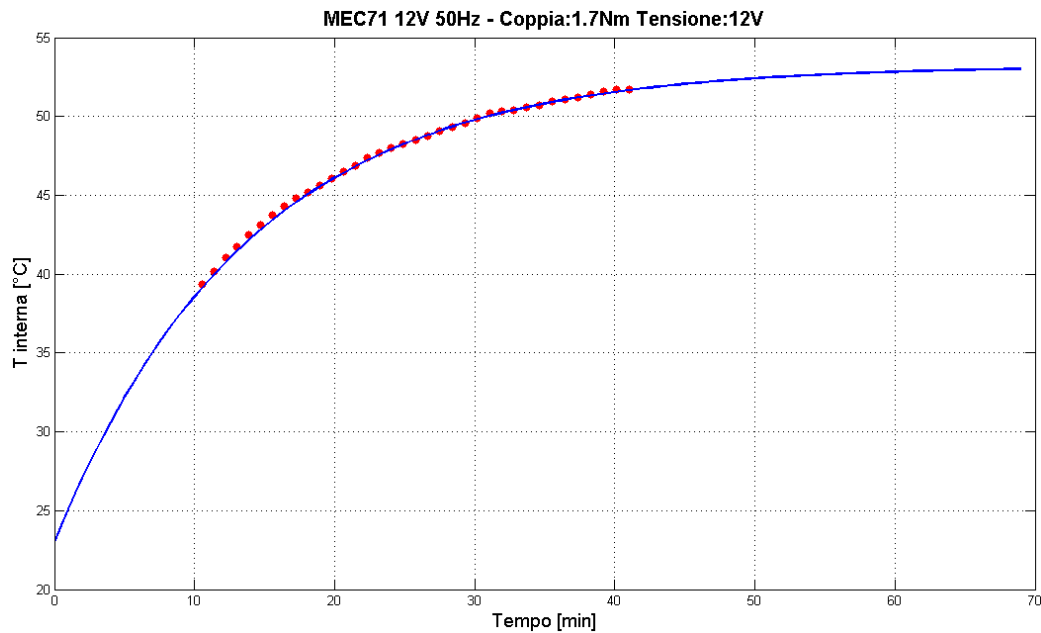


Figura 3.9: MEC71 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.9, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 13.8 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 30°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 75°C, che è sicuramente minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

### Prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

In tabella 3.14 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 12V
- Coppia impostata al banco freno: 2.5Nm (sovraccarico)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 23°C

Tabella 3.14: MEC71 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
0,4	11,0	71,8	0,94	1,29	0,47	0,62	2,55	2238	48	51,4	27,4	66,4
0,8	11,0	72,4	0,94	1,30	0,47	0,62	2,56	2218	48	51,3	28,0	67,7
1,2	11,0	73,0	0,94	1,31	0,48	0,62	2,56	2194	47	51,4	28,8	69,0
1,6	11,0	73,4	0,94	1,32	0,48	0,61	2,55	2181	46	51,4	29,2	70,0
2	11,0	74,0	0,94	1,33	0,48	0,60	2,55	2165	45	51,3	29,7	71,4

In figura 3.10 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

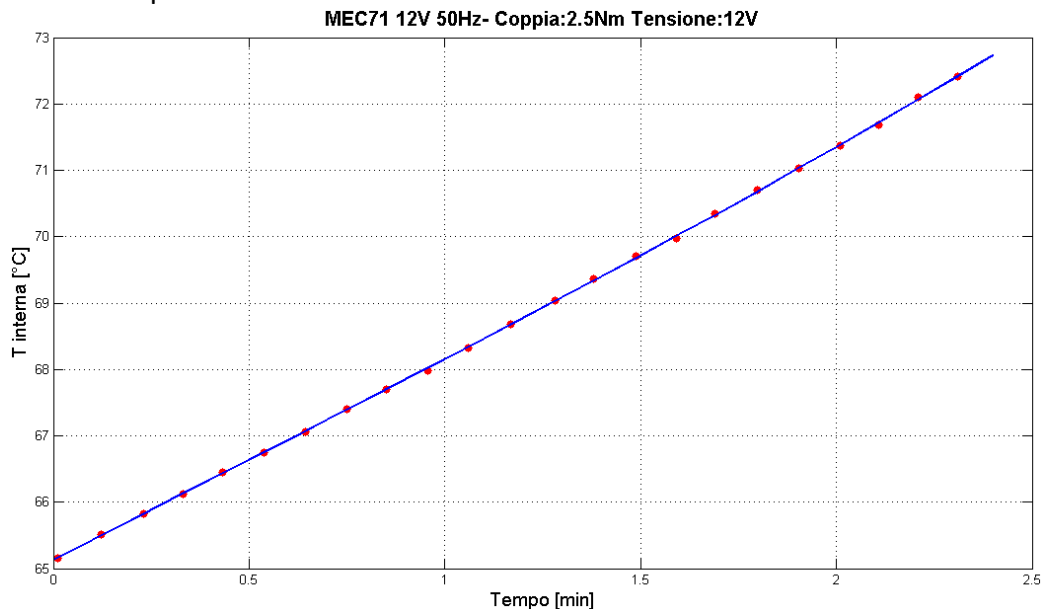


Figura 3.10: MEC71 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Considerando una durata della prova di 2 minuti, si ha un aumento della temperatura interna di 5°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 80°C, che è ancora minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

### Prova di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

In tabella 3.15 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 12V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm (nominale)
- Motore senza ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

A causa di un problema con un sensore di corrente, non è stato possibile acquisire i valori di corrente assorbita dal motore e quindi calcolare le altre grandezze derivate dalla corrente.

Tabella 3.15: MEC71 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
2	11,4						1,80	2675		51,5	13	70,6
4	11,4						1,80	2675		51,5	13	73,2
6	11,4						1,76	2668		51,5	14	75,5
8	11,4						1,77	2665		51,5	14	77,2
10	11,4						1,78	2657		51,5	14	79,0
12	11,4						1,74	2655		51,5	14	80,7
14	11,4						1,77	2650		51,5	14	82,3

La prova di riscaldamento, della durata di 14 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.11 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

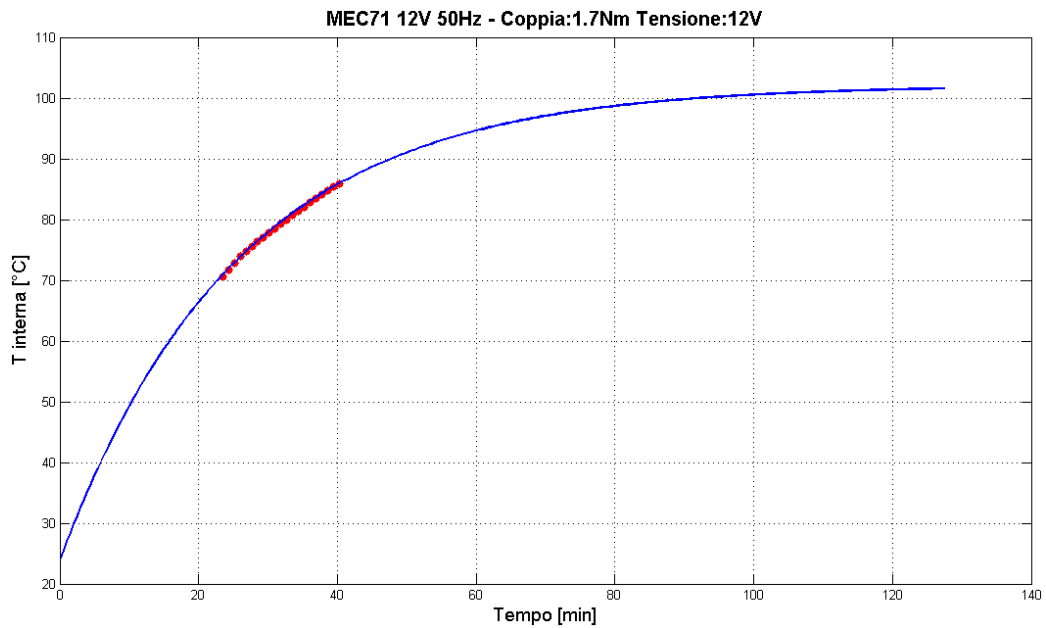


Figura 3.11: MEC71 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.11, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 25.6 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 78°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 123°C, che è sicuramente minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

## Motore MEC71 8V 50Hz

### Estrazione punti di funzionamento a vuoto

Dalla prova a vuoto del motore in esame si è visto che il ginocchio della caratteristica di magnetizzazione si trova intorno a 8.5V, quindi le prove a carico verranno eseguite a tensioni prossime al ginocchio. In tabella 3.16 si riportano alcuni dati relativi al funzionamento a vuoto del motore.

Tabella 3.16: MEC71 8V 50Hz - Dati funzionamento a vuoto

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Frequenza [Hz]	T_interna [°C]
6,7	22,4	0,20	0,05	0,26	0	51,5	36,1
7,7	26,3	0,18	0,06	0,35	0	51,6	35,7
8,0	27,0	0,18	0,07	0,37	0	52,1	37,0
8,6	30,6	0,17	0,08	0,45	0	51,6	36,8
10,0	36,6	0,15	0,09	0,62	0	52,8	37,5

### Estrazione punti di funzionamento a carico

Prima di effettuare le prove di riscaldamento, il motore è stato sottoposto a dei gradini di coppia crescente, al fine di valutarne le prestazioni in termini di rendimento e scorrimento. In tabella 3.17 si riportano alcuni dei punti di funzionamento rilevati durante la prova del motore in esame, con ventola di raffreddamento. In particolare si riportano i dati relativi al funzionamento a:

- 7.5V e coppia crescente fino al sovraccarico;
- 7.5V, 8.5V e 9.5V a coppia nominale;
- 8.5V e 9.5V in sovraccarico;

Tabella 3.17: MEC71 8V 50Hz - Dati funzionamento a carico

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
7,3	47,1	0,83	0,50	0,34	0,31	1,0	2899	63	51,7	7	58,7
7,3	51,7	0,86	0,56	0,34	0,36	1,2	2883	65	51,8	7	60,9
7,2	60,0	0,89	0,66	0,34	0,41	1,4	2849	63	52,0	9	65,2
7,1	68,1	0,91	0,76	0,35	0,48	1,6	2809	64	52,3	10	72,2
7,0	90,1	0,93	1,01	0,39	0,59	2,0	2751	58	54,4	16	92,5
7,0	70,5	0,92	0,79	0,35	0,49	1,7	2757	62	52,2	12	97,1
8,0	67,3	0,90	0,84	0,41	0,53	1,7	2962	63	54,9	10	103,9
9,0	60,5	0,84	0,80	0,50	0,52	1,7	2880	65	52,3	8	118,6
7,3	100,7	0,94	1,20	0,44	0,62	2,3	2602	51	54,3	20	138,9
8,7	76,6	0,90	1,04	0,51	0,65	2,3	2743	63	51,7	11	129,4
8,6	83,8	0,91	1,14	0,51	0,70	2,5	2705	61	51,9	13	132,5



In corrispondenza di una tensione di 7.5V, il motore presenta un rendimento del 62% e scorrimento del 12% a coppia nominale; in sovraccarico invece presenta un significativo peggioramento delle prestazioni.

In condizioni di sovraccarico conviene quindi alimentare il motore a una tensione maggiore, in quanto si ha una corrente assorbita minore e un rendimento e scorrimento migliori; ad una coppia di 2.5Nm per esempio, per una tensione di 9.5V si ottiene un rendimento del 61% e scorrimento del 13%.

### Prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

In tabella 3.18 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 7.5V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm (nominale)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

Tabella 3.18: MEC71 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
2	7,0	70,5	0,92	0,79	0,35	0,48	1,7	2756	61	52,2	12	97,1	79,0
4	7,1	70,1	0,91	0,78	0,35	0,49	1,7	2756	62	52,2	12	98,4	82,1
6	7,1	69,5	0,91	0,78	0,34	0,48	1,6	2758	61	52,2	12	100,2	84,9
8	7,1	69,0	0,91	0,77	0,34	0,47	1,6	2758	61	52,2	12	102,0	87,3
10	7,1	68,6	0,91	0,77	0,34	0,47	1,6	2758	62	52,2	12	103,6	89,4
12	7,1	68,3	0,91	0,76	0,34	0,47	1,6	2758	61	52,2	12	105,1	91,3
14	7,1	68,1	0,91	0,76	0,34	0,47	1,6	2761	61	52,2	12	106,4	93,2
16	7,1	68,1	0,91	0,76	0,34	0,47	1,6	2754	62	52,2	12	107,8	95,0
18	7,1	67,9	0,91	0,76	0,34	0,46	1,6	2755	61	52,2	12	109,1	96,5
20	7,1	68,1	0,91	0,76	0,34	0,46	1,6	2754	61	52,2	12	110,3	98,1
22	7,1	68,1	0,91	0,76	0,34	0,46	1,6	2754	60	52,2	12	111,5	99,6
24	7,1	68,0	0,91	0,76	0,34	0,46	1,6	2751	61	52,2	12	112,6	101,0
26	7,1	68,3	0,91	0,76	0,34	0,47	1,6	2749	61	52,2	12	113,7	102,1

La prova di riscaldamento, della durata di 26 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.12 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

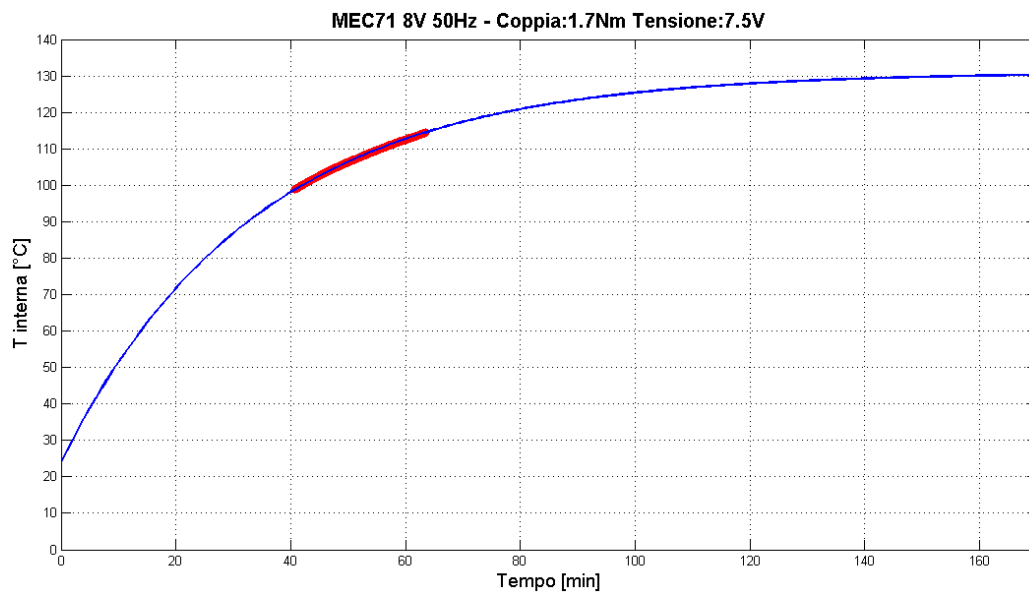


Figura 3.12: MEC71 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.12, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 34 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 107°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 152°C, che è prossima alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

Si nota che la costante di tempo è molto maggiore di quella ottenuta per il MEC71 12V 50Hz. I due motori, avendo la stessa carcassa, dovrebbero avere costanti di tempo simili. In figura 3.13 è stata fatta quindi un'altra estrapolazione della curva di riscaldamento, considerando alcuni punti della prova di riscaldamento e alcuni punti rilevati durante la prima fase di estrazione dei punti di funzionamento a carico.

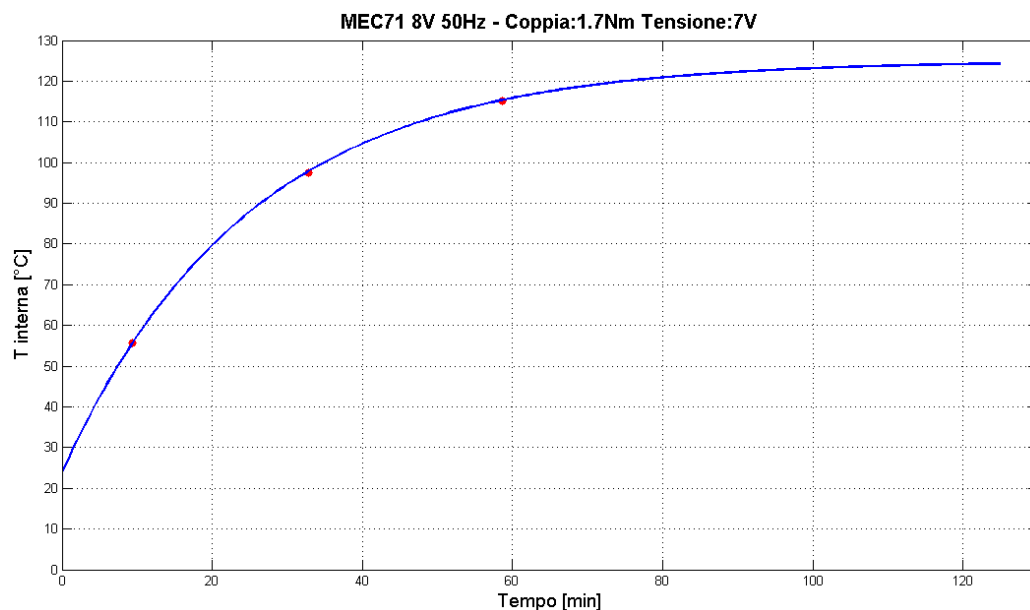


Figura 3.13: MEC71 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.13, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 25 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 101°C. La costante di tempo trovata è più attendibile della precedente, essendo più vicina a quella del MEC71 12V 50Hz.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 146°C, che è minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

### Prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

In tabella 3.19 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 9V
- Coppia impostata al banco freno: 2.5Nm (sovraccarico)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24.5°C

Tabella 3.19: MEC71 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
0,5	8,6	84,0	0,91	1,14	0,51	0,74	2,5	2705	65	51,8	13	131,3	119,4
1	8,6	83,9	0,91	1,14	0,51	0,75	2,5	2707	66	51,9	13	132,8	119,8
1,5	8,6	83,5	0,91	1,13	0,51	0,74	2,5	2705	66	51,8	13	133,8	120,2
2	8,6	82,9	0,91	1,12	0,50	0,74	2,4	2704	65	51,8	13	134,7	120,9
2,5	8,5	82,0	0,91	1,10	0,50	0,73	2,4	2704	66	51,8	13	135,5	121,7

In figura 3.14 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

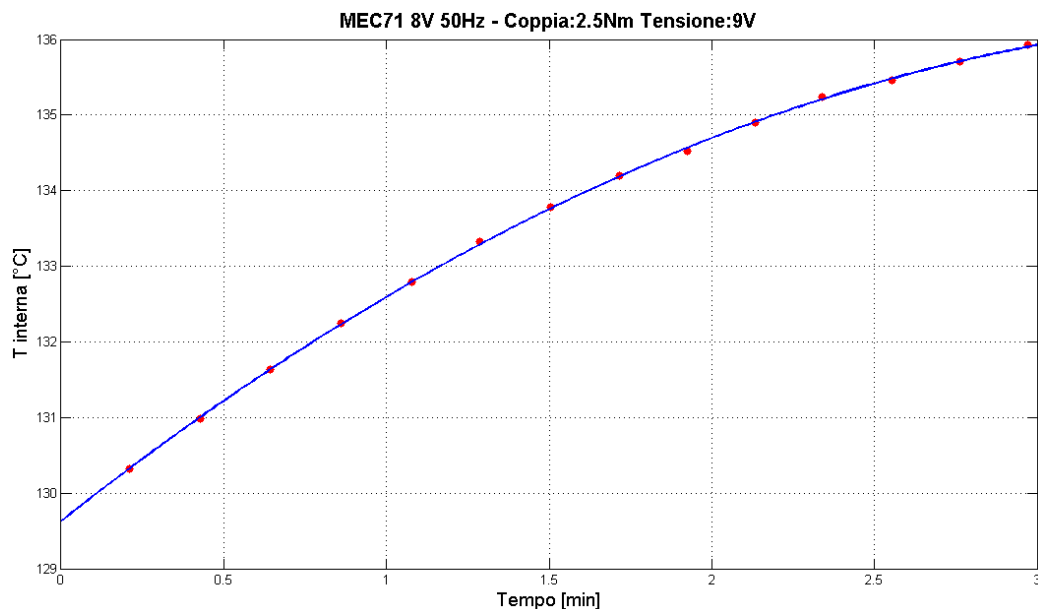


Figura 3.14: MEC71 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Considerando una durata della condizione di sovraccarico di 2 minuti, si ha un aumento medio della temperatura interna di 4°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 150°C, restando ancora di poco minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

## Motore MEC63 12V 50Hz

### Estrazione punti di funzionamento a vuoto

Dalla prova a vuoto del motore in esame si è visto che il ginocchio della caratteristica di magnetizzazione si trova intorno a 11V, quindi per sfruttare al meglio la macchina, le prove a carico verranno eseguite a tensioni prossime al ginocchio, anziché 8.5V come considerato in precedenza. In tabella 3.20 si riportano alcuni dati relativi al funzionamento a vuoto del motore.

Tabella 3.20: MEC63 12V 50Hz - Dati funzionamento a vuoto

V [V]	I [A]	Frequenza [Hz]
10	14,3	50
11,7	18,9	50
14	26,5	50

### Estrazione punti di funzionamento a carico

Prima di effettuare le prove di riscaldamento, il motore è stato sottoposto a dei gradini di coppia crescente, al fine di valutarne le prestazioni in termini di rendimento e scorrimento. In tabella 3.21 si riportano alcuni dei punti di funzionamento rilevati durante la prova del motore in esame, con ventola di raffreddamento.

In particolare si riportano i dati relativi al funzionamento a:

- 12V e coppia crescente fino alla nominale;
- 14V e coppia crescente fino al sovraccarico;

Tabella 3.21: MEC63 12V 50Hz - Dati funzionamento a carico

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
11,9	23,5	0,49	0,24	0,42	0,11	0,35	2915	45	50,9	4%	35,0
11,8	27,8	0,49	0,28	0,49	0,23	0,76	2857	82	50,8	6%	37,5
11,4	46,2	0,88	0,80	0,44	0,49	1,78	2606	61	50,9	15%	48,2
14,0	27,9	0,34	0,23	0,63	0,06	0,21	2975	28	51,5	4%	61,3
13,7	33,3	0,67	0,53	0,58	0,32	1,06	2864	60	51,5	7%	58,9
13,5	42,7	0,81	0,81	0,58	0,51	1,79	2737	63	51,5	11%	59,1
13,3	52,5	0,87	1,05	0,59	0,64	2,30	2652	61	52,3	16%	60,6
13,2	59,1	0,89	1,20	0,61	0,67	2,47	2603	56	53,6	19%	63,4
13,1	61,6	0,90	1,25	0,62	0,69	2,60	2532	55	53,6	21%	66,9

A coppia nominale, il motore presenta un rendimento del 61% e scorrimento del 15% se alimentato a 12V, e un rendimento del 63% e scorrimento del 11% se alimentato a 14V. In sovraccarico invece, se alimentato a 14V presenta circa un rendimento del 55% e scorrimento del 21%. Perciò alimentando il motore a tensione maggiore, si ottiene un miglioramento delle prestazioni.

### Prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

In tabella 3.22 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 12V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm (nominale)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 23°C

Tabella 3.22: MEC63 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
2	11,4	45,9	0,88	0,80	0,44	0,48	1,77	2604	61	50,8	15	49,7	39,3
4	11,4	46,1	0,88	0,80	0,44	0,48	1,76	2590	60	50,8	15	52,4	42,1
6	11,4	46,0	0,88	0,80	0,44	0,47	1,76	2584	59	50,8	15	54,8	44,7
8	11,4	45,9	0,88	0,80	0,43	0,48	1,77	2572	60	50,9	16	56,7	46,9
10	11,4	46,0	0,88	0,80	0,43	0,47	1,75	2561	59	50,8	16	58,3	49,2
12	11,4	46,2	0,88	0,80	0,43	0,47	1,77	2554	59	50,8	16	59,9	51,0
14	11,4	46,2	0,88	0,81	0,43	0,47	1,77	2543	58	50,8	17	61,2	52,7
16	11,4	46,2	0,88	0,81	0,43	0,47	1,76	2539	58	50,8	17	62,3	54,3
18	11,4	46,2	0,88	0,81	0,43	0,47	1,77	2536	58	50,8	17	63,4	55,6
20	11,4	46,3	0,88	0,81	0,43	0,47	1,78	2529	58	50,8	17	64,4	56,9

La prova di riscaldamento, della durata di 20 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.15 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

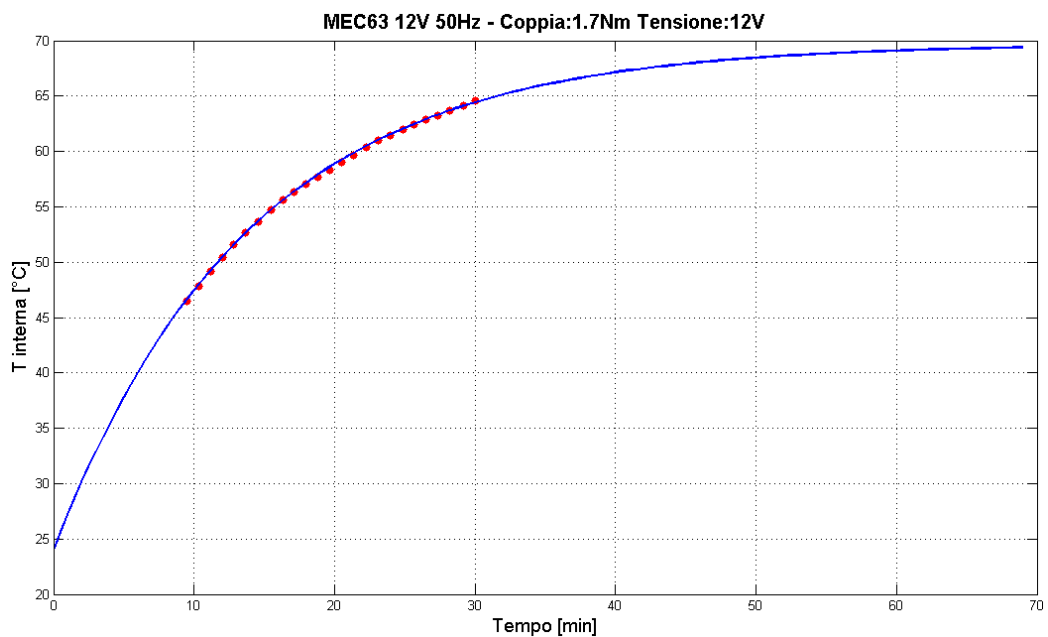


Figura 3.15: MEC63 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.15, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 13.9 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 46°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 91°C, che è sicuramente minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

### Prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

In tabella 3.23 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 14V
- Coppia impostata al banco freno: 2.6Nm (sovraccarico)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 25°C

Tabella 3.23: MEC63 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
0,5	13,1	62,5	0,90	1,27	0,62	0,69	2,62	2507	54	53,6	22	69,5	57,4
1	13,1	61,9	0,90	1,26	0,62	0,68	2,61	2502	54	53,6	22	70,9	58,3
1,5	13,1	62,0	0,90	1,26	0,62	0,68	2,59	2492	53	53,6	22	72,4	58,2
2	13,1	61,8	0,90	1,26	0,61	0,68	2,61	2485	54	53,6	23	73,7	60,3
2,5	13,1	62,0	0,90	1,27	0,61	0,67	2,60	2475	53	53,6	23	74,9	61,7

In figura 3.16 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

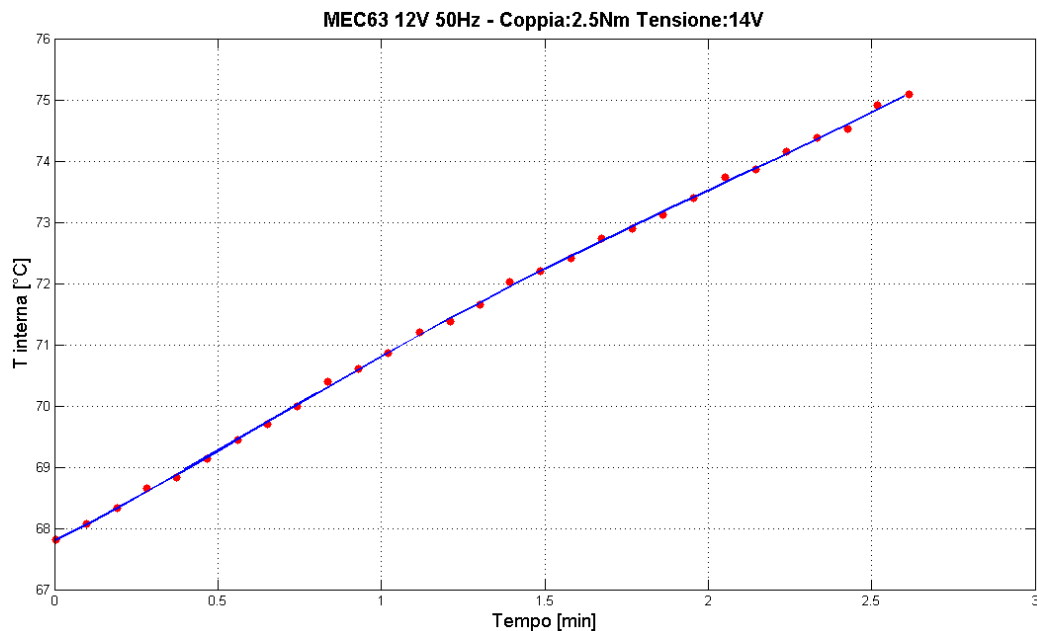


Figura 3.16: MEC63 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

Considerando una durata della prova di 2 minuti, si ha un aumento della temperatura interna di 5°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 96°C, che è ancora minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.



### Prova di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

In tabella 3.24 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 14V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm (nominale)
- Motore senza ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 25°C

Tabella 3.24: MEC63 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
2	13,5	42,5	0,81	0,80	0,58	0,50	1,77	2698	62	50,9	12	79,6	76,6
4	13,5	42,0	0,80	0,79	0,58	0,49	1,74	2700	62	50,9	12	82,2	79,2
6	13,5	42,1	0,81	0,79	0,58	0,50	1,76	2694	63	50,9	12	84,5	81,5
8	13,5	41,9	0,80	0,79	0,58	0,50	1,76	2693	63	50,9	12	86,7	84,1
10	13,5	41,9	0,80	0,79	0,58	0,49	1,74	2695	63	50,9	12	87,5	84,7

La prova di riscaldamento, della durata di 10 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.17 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.17, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 11.2 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 72°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 117°C, che è sicuramente minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

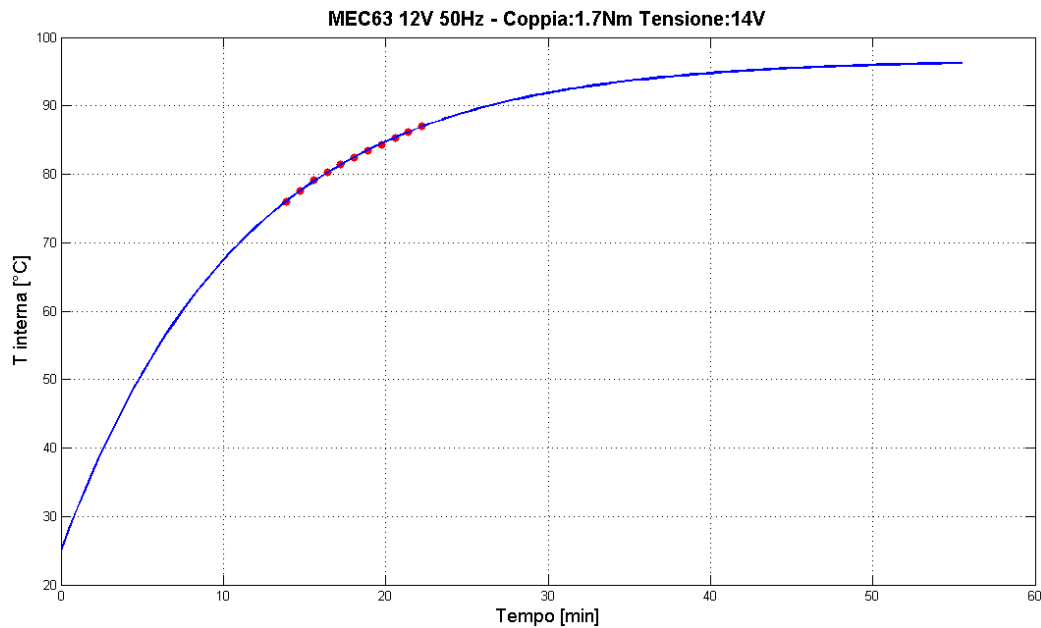


Figura 3.17: MEC63 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali senza ventola di raffreddamento

### Prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico senza ventola di raffreddamento

In tabella 3.25 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 14V
- Coppia impostata al banco freno: 2.5Nm (sovraccarico)
- Motore senza ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 25°C

Tabella 3.25: MEC63 12V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico senza ventola di raffreddamento

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
0	13,2	55,8	0,89	1,14	0,58	0,64	2,35	2586	56	53,8	20	97,6	91,7
0,5	13,2	55,5	0,89	1,13	0,58	0,64	2,35	2584	56	53,8	20	99,1	92,8
1	13,2	56,0	0,89	1,14	0,58	0,63	2,34	2576	55	54,0	21	100,5	94,4
1,5	13,2	57,6	0,89	1,18	0,59	0,64	2,40	2540	54	54,0	22	101,9	95,6
2	13,2	58,6	0,90	1,20	0,59	0,64	2,44	2517	54	54,0	22	103,4	97,3
2,5	13,1	59,5	0,90	1,22	0,59	0,65	2,48	2488	53	54,0	23	105,0	98,9

In figura 3.18 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

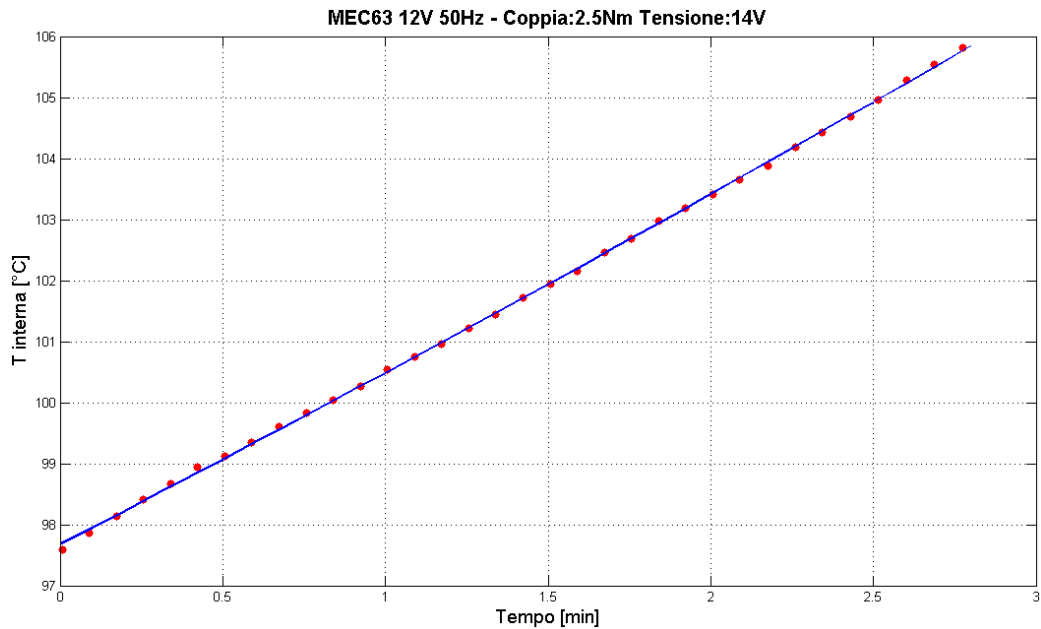


Figura 3.18: MEC63 12V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico senza ventola di raffreddamento

Considerando una durata della prova di 2 minuti, si ha un aumento della temperatura interna di 6°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 123°C, che è ancora minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

## Motore MEC63 8V 50Hz

### Estrazione punti di funzionamento a vuoto

Dalla prova a vuoto del motore in esame si è visto che il ginocchio della caratteristica di magnetizzazione si trova intorno a 8V, quindi le prove a carico verranno eseguite a tensioni prossime al ginocchio. In tabella 3.26 si riportano alcuni dati relativi al funzionamento a vuoto del motore.

Tabella 3.26: MEC63 8V 50Hz - Dati funzionamento a vuoto

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Frequenza [Hz]	T_interna [°C]
6,8	32,3	0,13	0,05	0,38	0	50,8	37,5
7,8	40,6	0,12	0,07	0,55	0	51,0	39,6
8,7	55,2	0,13	0,11	0,82	0	51,5	43,1
9,7	76,3	0,14	0,17	1,27	0	52,1	49,5

### Estrazione punti di funzionamento a carico

Prima di effettuare le prove di riscaldamento, il motore è stato sottoposto a dei gradini di coppia crescente, al fine di valutarne le prestazioni in termini di rendimento e scorrimento. Durante questa fase, si è deciso di fermarsi ad una coppia resistente di 1.9Nm, in quanto il motore presentava già sintomi di sovraccarico; cioè elevate correnti assorbite, basso rendimento e aumento dello scorrimento. Per questo motore quindi si è deciso di considerare come coppia nominale 1.2Nm e coppia di sovraccarico 1.9Nm.

In tabella 3.27 si riportano alcuni dei punti di funzionamento rilevati durante la prova del motore in esame, con ventola di raffreddamento.

In particolare si riportano i dati relativi al funzionamento a:

- 8V e coppia crescente fino al sovraccarico;
- 7V, 8V e 9V a coppia nominale;

Tabella 3.27: MEC63 8V 50Hz - Dati funzionamento a carico

V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]
7,6	47,3	0,63	0,39	0,49	0,20	0,6	2960	51	52,3	6	44,9
7,6	52,4	0,72	0,49	0,48	0,28	0,9	2925	57	52,4	7	49,9
7,5	59,6	0,79	0,61	0,48	0,36	1,2	2886	60	52,6	9	51,7
7,4	65,7	0,82	0,69	0,48	0,41	1,4	2841	59	52,8	10	62,0
7,3	72,4	0,85	0,78	0,48	0,46	1,6	2790	59	53,0	12	70,7
7,3	75,3	0,86	0,82	0,48	0,48	1,7	2746	58	53,1	14	83,9
7,2	88,6	0,89	0,98	0,51	0,52	1,9	2597	53	53,8	20	118,3
6,4	67,2	0,87	0,65	0,37	0,35	1,2	2692	54	52,9	15	102,3
7,5	60,1	0,81	0,63	0,46	0,37	1,2	2813	58	52,6	11	107,3
8,4	61,0	0,70	0,62	0,63	0,37	1,2	2879	59	52,3	8	105,3

A coppia nominale conviene alimentare il motore a 8V, in quanto si ottengono rendimento e scorrimento migliori rispetto ad alimentarlo a 7V, e si ottiene un miglior fattore di potenza rispetto ad alimentarlo a 9V.

In particolare, per un'alimentazione a 8V, si passa da un rendimento del 60% e scorrimento del 9% a carico nominale, a un rendimento del 53% e scorrimento del 20% in condizioni di sovraccarico.

### Prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento

In tabella 3.28 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 8V
- Coppia impostata al banco freno: 1.2Nm (nominale)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

Tabella 3.28: MEC63 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento – Coppia 1.2Nm

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
1	7,5	60,3	0,81	0,63	0,46	0,37	1,2	2812	59	52,6	11	106,7	90,3
2	7,5	60,2	0,81	0,63	0,46	0,37	1,3	2813	59	52,6	11	107,2	91,0
3	7,5	60,3	0,81	0,63	0,46	0,37	1,2	2811	58	52,6	11	107,6	91,8
4	7,4	60,8	0,81	0,64	0,46	0,37	1,3	2809	58	52,6	11	108,1	92,4
5	7,4	60,5	0,81	0,63	0,46	0,36	1,2	2809	58	52,6	11	108,7	92,9

La prova di riscaldamento, della durata di 5 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.19 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

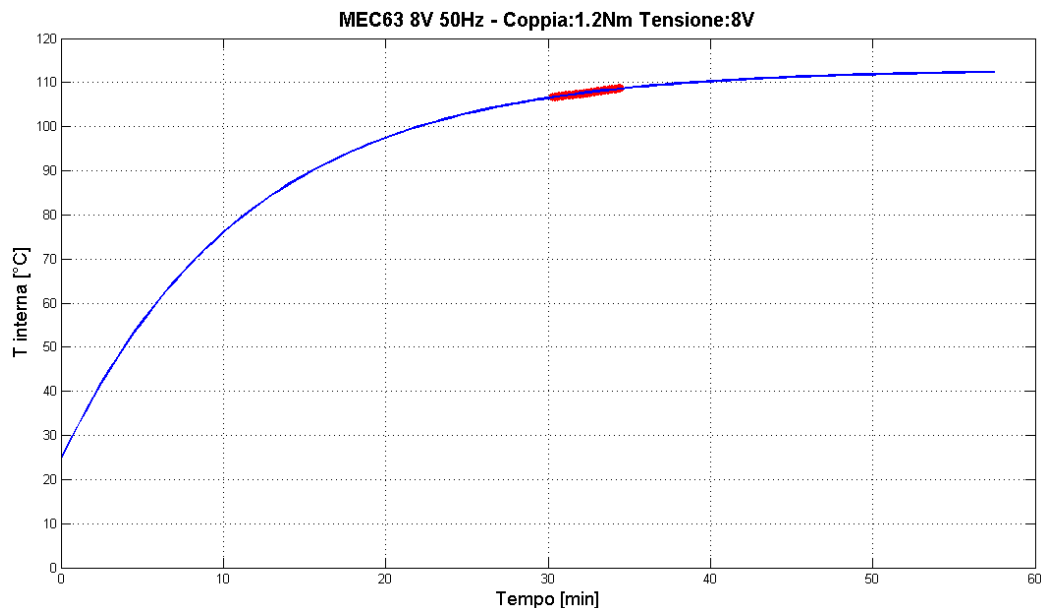


Figura 3.19: MEC63 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento – Coppia 1.2Nm

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.19, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 11.5 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 88°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 133°C, che è sicuramente minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

In tabella 3.29 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame considerando invece una coppia di 1.7Nm, così da poter fare un confronto con gli altri motori. La prova si è svolta nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 8V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

Tabella 3.29: MEC63 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento – Coppia 1.7Nm

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
2	7,3	74,7	0,86	0,81	0,49	0,49	1,7	2784	60	53,0	12	65,8	44,8
4	7,3	72,0	0,85	0,78	0,48	0,47	1,6	2785	60	52,9	12	73,8	49,9
6	7,3	74,5	0,86	0,81	0,48	0,48	1,6	2756	59	53,0	13	82,1	56,0
8	7,3	75,4	0,87	0,82	0,48	0,48	1,7	2738	58	53,0	14	86,9	61,8
10	7,3	74,2	0,86	0,81	0,47	0,48	1,7	2737	59	53,0	14	92,0	67,2
12	7,3	74,9	0,87	0,82	0,47	0,48	1,7	2721	58	53,0	14	97,9	72,6
14	7,3	74,1	0,87	0,81	0,47	0,46	1,6	2721	57	53,0	14	101,9	77,7
16	7,3	73,4	0,86	0,80	0,47	0,46	1,6	2718	57	53,0	15	105,7	82,5

La prova di riscaldamento, della durata di 16 minuti, non ha permesso il raggiungimento del regime termico. Tuttavia in figura 3.20 è mostrata la curva di riscaldamento del motore, a partire dalla temperatura ambiente fino al raggiungimento del regime termico, ottenuta interpolando i risultati della prova con una funzione esponenziale, tipica dei fenomeni termici.

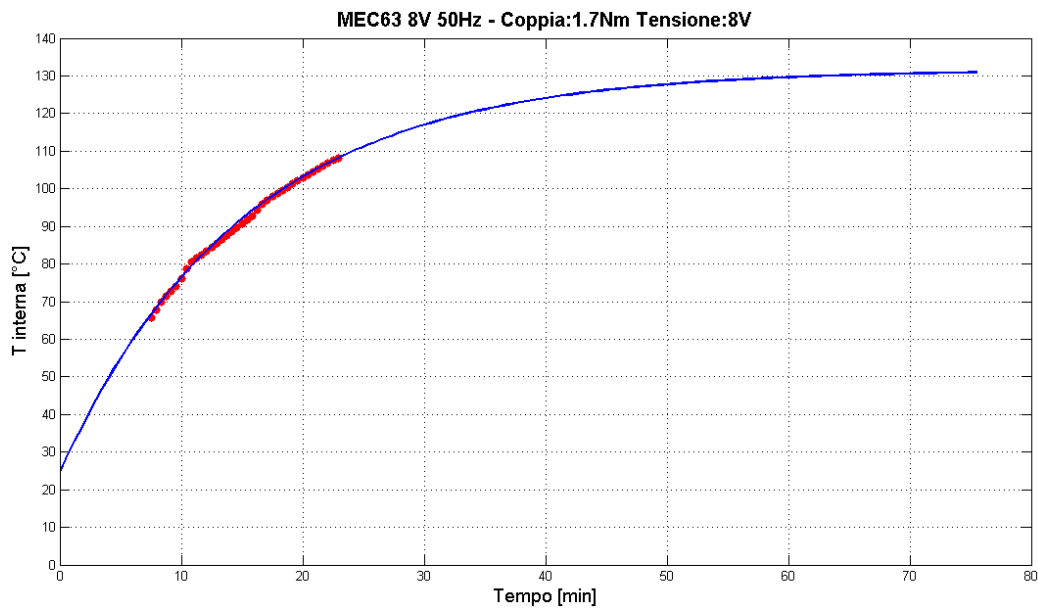


Figura 3.20: MEC63 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni nominali con ventola di raffreddamento – Coppia 1.7Nm

Dall'analisi della curva di riscaldamento di figura 3.20, si ricava la costante di tempo termica del motore, pari a circa 15 minuti, e il salto di temperatura tra quella ambiente e quella di regime termico, che risulta essere di 107°C.

Supponendo di sottoporre a servizio continuativo il motore in esame, a una temperatura ambiente di 45°C, la temperatura interna raggiungerebbe 152°C, che è prossima alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

Quindi per il motore in esame è bene considerare una coppia nominale di 1.2Nm anziché 1.7Nm.

### Prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento

In tabella 3.30 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame, svoltasi nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 8V
- Coppia impostata al banco freno: 1.9Nm (sovraccarico)
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

Tabella 3.30: MEC63 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento – Coppia 1.9Nm

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
0,5	7,2	85,3	0,88	0,94	0,51	0,52	1,9	2659	55	53,7	18	103,4	86,9
1	7,2	88,9	0,89	0,98	0,51	0,53	1,9	2619	54	53,9	19	107,9	87,3
1,5	7,2	88,8	0,89	0,99	0,51	0,52	1,9	2609	53	53,9	19	112,5	88,1
2	7,2	89,4	0,89	0,99	0,51	0,53	1,9	2596	53	53,9	20	116,2	89,2
2,5	7,2	88,5	0,89	0,98	0,51	0,52	1,9	2598	53	53,8	20	118,8	90,3
3	7,2	88,9	0,89	0,99	0,50	0,53	2,0	2584	53	53,9	20	121,3	92,0



In figura 3.21 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

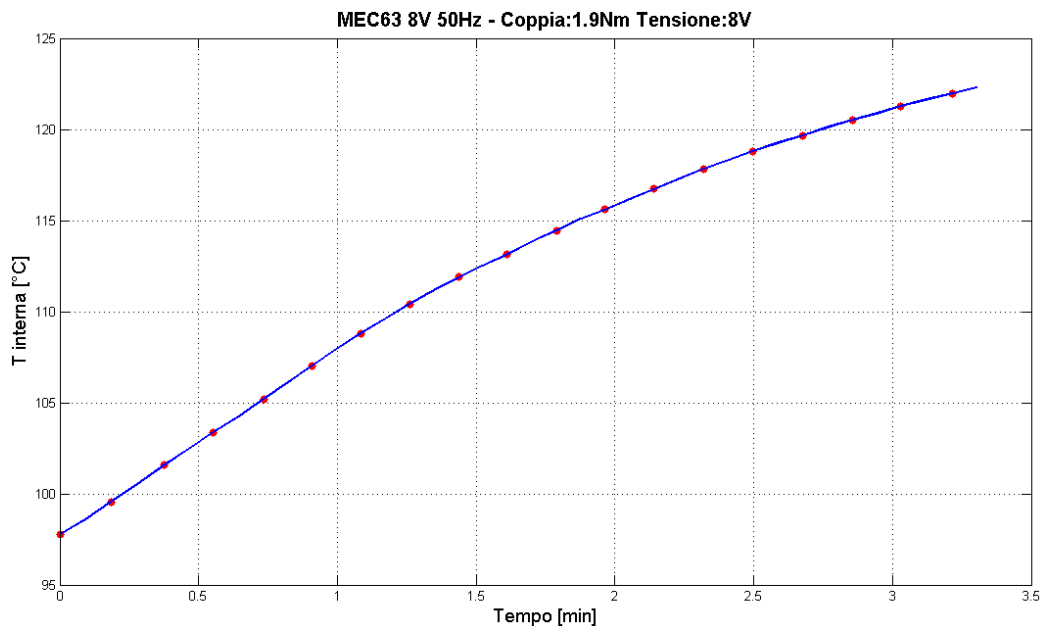


Figura 3.21: MEC63 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento – Coppia 1.9Nm

Considerando una durata della condizione di sovraccarico di 2 minuti, si ha un aumento della temperatura interna di 13°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 146°C, che è ancora minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

In tabella 3.31 si riportano alcuni dati rilevati durante la prova di riscaldamento del motore in esame considerando invece una coppia di sovraccarico di 1.7Nm, cioè del 40% superiore a 1.2Nm. La prova si è svolta nelle seguenti condizioni:

- Tensione in uscita dall'inverter: 8V
- Coppia impostata al banco freno: 1.7Nm
- Motore con ventola di raffreddamento
- Temperatura ambiente: 24°C

Tabella 3.31: MEC63 8V 50Hz - Dati prova di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento – Coppia 1.7Nm

Tempo [min]	V [V]	I [A]	cosφ	P [kW]	Q [kVAR]	Pm [kW]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]	Rend. [%]	Freq. [Hz]	Scorr. [%]	T_interna [°C]	T_esterna [°C]
0,5	7,3	74,9	0,87	0,82	0,47	0,47	1,7	2721	58	53,0	14	98,0	72,8
1	7,3	74,7	0,87	0,82	0,47	0,47	1,7	2719	58	53,0	15	99,1	74,2
1,5	7,3	74,3	0,87	0,81	0,47	0,47	1,6	2720	57	53,0	14	100,1	75,4
2	7,3	74,2	0,87	0,81	0,47	0,46	1,6	2721	57	53,0	14	101,1	76,6
2,5	7,3	74,1	0,87	0,81	0,47	0,47	1,6	2719	58	53,0	15	102,1	78,0
3	7,3	73,8	0,86	0,81	0,47	0,46	1,6	2718	57	53,0	15	103,1	79,2
3,5	7,3	73,5	0,86	0,80	0,47	0,46	1,6	2719	57	53,0	14	103,9	80,4
4	7,3	73,9	0,87	0,81	0,47	0,47	1,6	2715	57	53,0	15	104,9	81,5

In figura 3.22 si mostra l'andamento della temperatura interna del motore durante la prova.

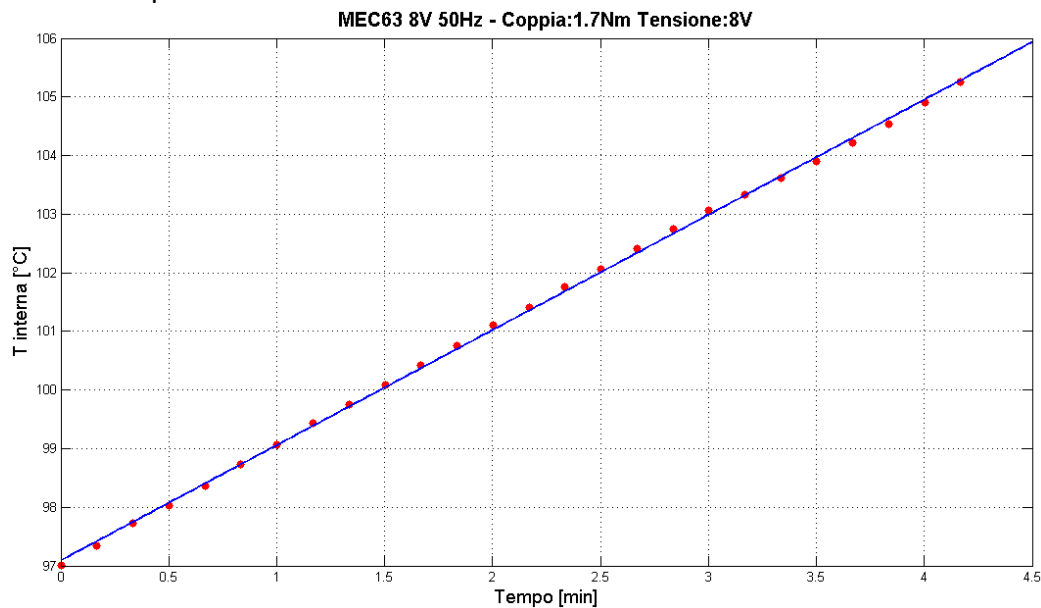


Figura 3.22: MEC63 8V 50Hz – Curva di riscaldamento in condizioni di sovraccarico con ventola di raffreddamento – Coppia 1.7Nm

Considerando una durata della condizione di sovraccarico di 2 minuti, si ha un aumento medio della temperatura interna di 4°C.

Perciò, se al termine del servizio continuativo considerato al punto precedente, il motore viene sottoposto a servizio in sovraccarico per 2 minuti, la temperatura interna raggiungerebbe 137°C, che è ancora minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

### 3.4. Simulazione servizio periodico S3

Utilizzando i dati ricavati dalla prova a carico in condizioni nominali, è stato simulato l'andamento della temperatura interna del motore durante il servizio di tipo S3:50%. Si considera un ciclo costituito da 30 minuti di funzionamento a coppia nominale, seguiti da 30 minuti di riposo.

Per studiare il comportamento termico del motore, si può fare riferimento al seguente modello, ottenuto tramite analogia elettrica:

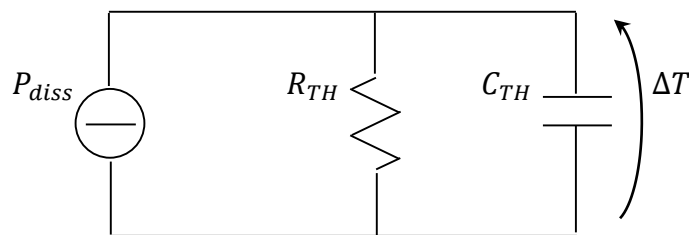


Figura 3.23: Circuito termico del motore

Dove:

- $P_{diss} = P - P_m$  è la potenza dissipata in calore del motore
- $R_{TH}$  è la resistenza termica del motore
- $C_{TH}$  è la capacità termica del motore
- $\Delta T$  è la sovratemperatura del motore, cioè la differenza tra la temperatura interna del motore e la temperatura ambiente

Per calcolare l'andamento della sovratemperatura del motore, occorre considerare le seguenti equazioni:

- $\Delta T(t) = \Delta T_{max} + (\Delta T(0) - \Delta T_{max})e^{-t/\tau}$  durante il funzionamento a coppia costante
- $\Delta T(t) = \Delta T(0)e^{-t/\tau}$  durante il periodo di riposo

Dove:

- $\Delta T_{max} = P_{diss} \cdot R_{TH}$  è la sovratemperatura massima del motore, cioè la differenza tra la temperatura interna di regime del motore e la temperatura ambiente
- $\Delta T(0)$  è la sovratemperatura iniziale del motore
- $\tau = R_{TH} \cdot C_{TH}$  è la costante di tempo termica del motore

Infine quindi la temperatura interna del motore si calcola come:

$$T_{interna}(t) = T_{ambiente} + \Delta T(t)$$

## Motore MEC71 8V 50Hz

Dalla prova di riscaldamento a coppia nominale del motore in esame, si ricavano i seguenti parametri:

- $\Delta T_{max} = 101\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\tau = 25\text{ min}$

In figura 3.24 si mostra l'andamento simulato della temperatura interna durante il servizio S3, considerando una temperatura ambiente di 24°C.

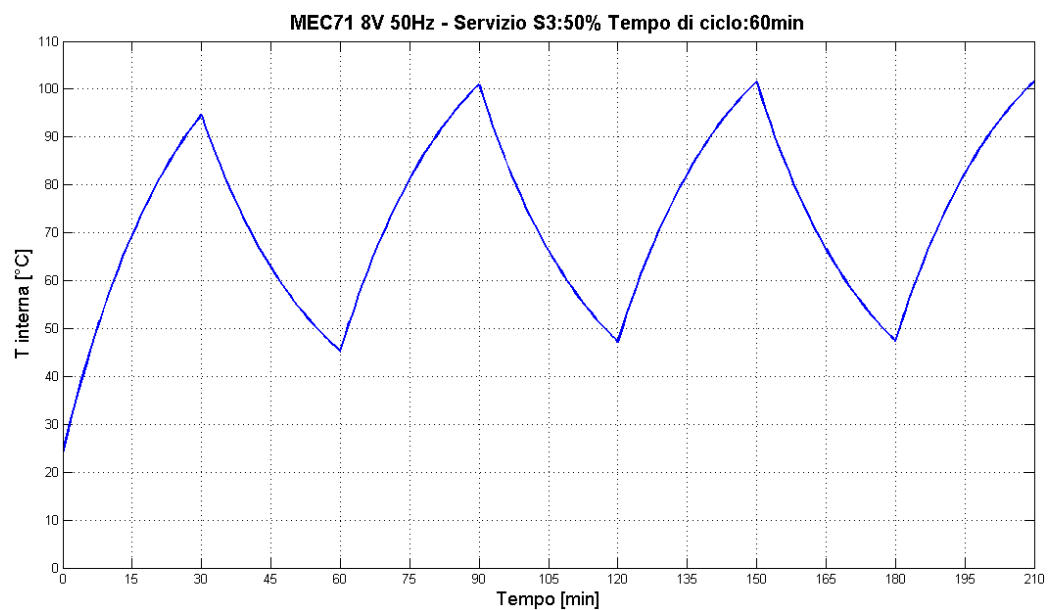


Figura 3.24: MEC71 8V 50Hz – Andamento della sovratemperatura durante il servizio S3

Dopo due cicli la temperatura interna varia tra i 47°C alla fine del periodo di riposo, e i 101°C alla fine del periodo di funzionamento a coppia nominale.

Se al termine del periodo di funzionamento a coppia nominale, il motore viene fatto funzionare in sovraccarico per un tempo di 2 minuti, la temperatura interna massima che raggiunge è 105°C, che è minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

In figura 3.25 si mostra l'andamento simulato della temperatura interna del motore in esame, durante il servizio S3, considerando invece una temperatura ambiente di 45°C.

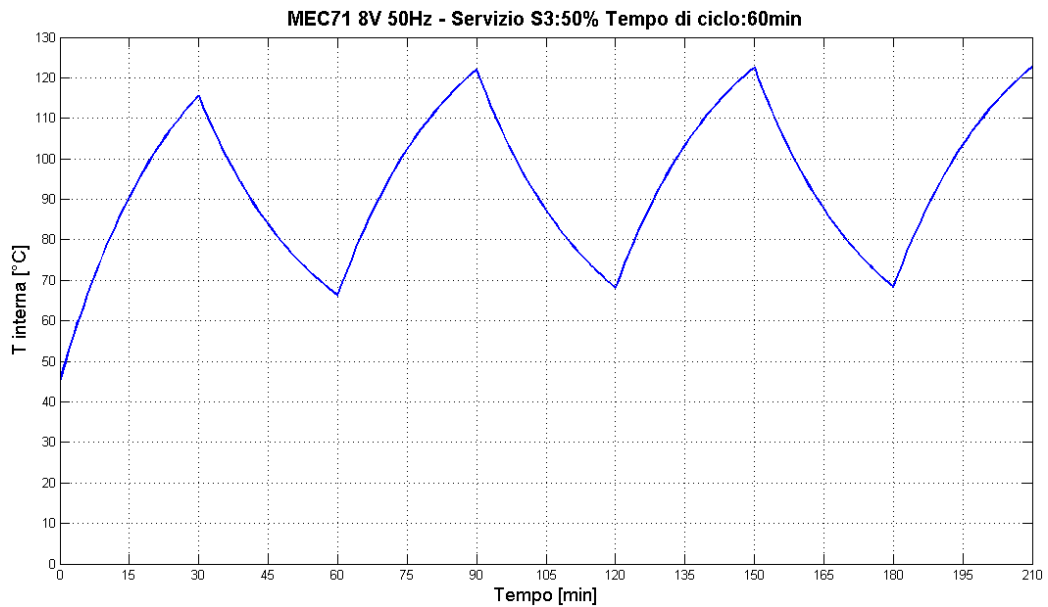


Figura 3.25: MEC71 8V 50Hz – Andamento della sovratemperatura durante il servizio S3

Dopo due cicli la temperatura interna varia tra i 68°C alla fine del periodo di riposo, e i 122°C alla fine del periodo di funzionamento a coppia nominale. Se al termine del periodo di funzionamento a coppia nominale, il motore viene fatto funzionare in sovraccarico per un tempo di 2 minuti, la temperatura interna massima che raggiunge è 126°C, che è minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti

## Motore MEC63 8V 50Hz

Dalla prova di riscaldamento a coppia nominale del motore in esame, si ricavano i seguenti parametri:

- $\Delta T_{max} = 88 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\tau = 11.5 \text{ min}$

In figura 3.26 si mostra l'andamento simulato della temperatura interna durante il servizio S3, considerando una temperatura ambiente di 24°C.

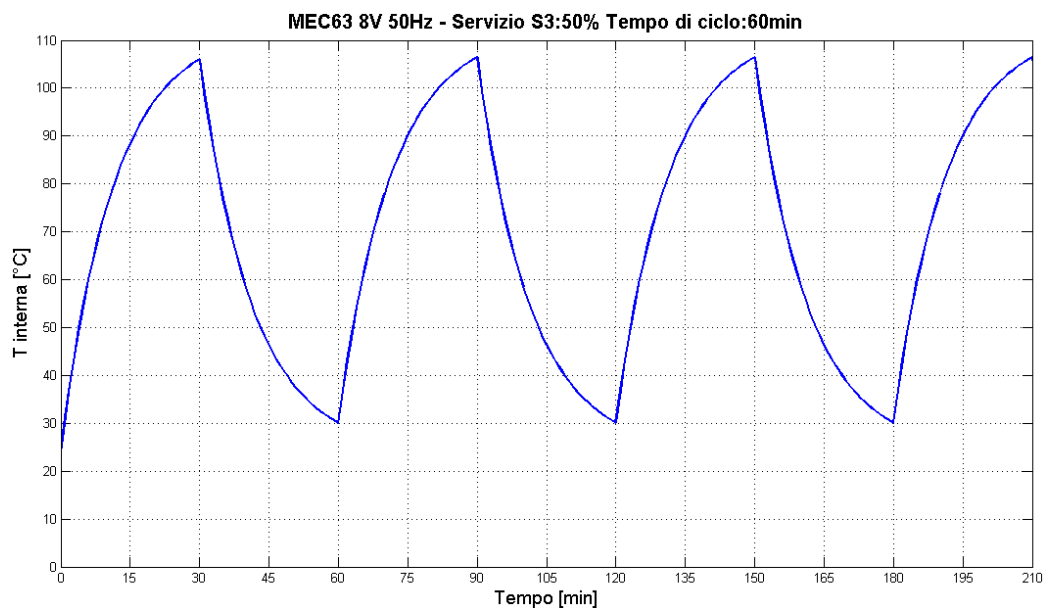


Figura 3.26: MEC63 8V 50Hz – Andamento della sovratemperatura durante il servizio S3

Dopo due cicli la temperatura interna varia tra i 30°C alla fine del periodo di riposo, e i 106°C alla fine del periodo di funzionamento a coppia nominale.

Se al termine del periodo di funzionamento a coppia nominale, il motore viene fatto funzionare in sovraccarico, con coppia di 1.9Nm, per un tempo di 2 minuti, la temperatura interna massima che raggiunge è 119°C, che è minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

In figura 3.27 si mostra l'andamento simulato della temperatura interna del motore in esame, durante il servizio S3, considerando invece una temperatura ambiente di 45°C.

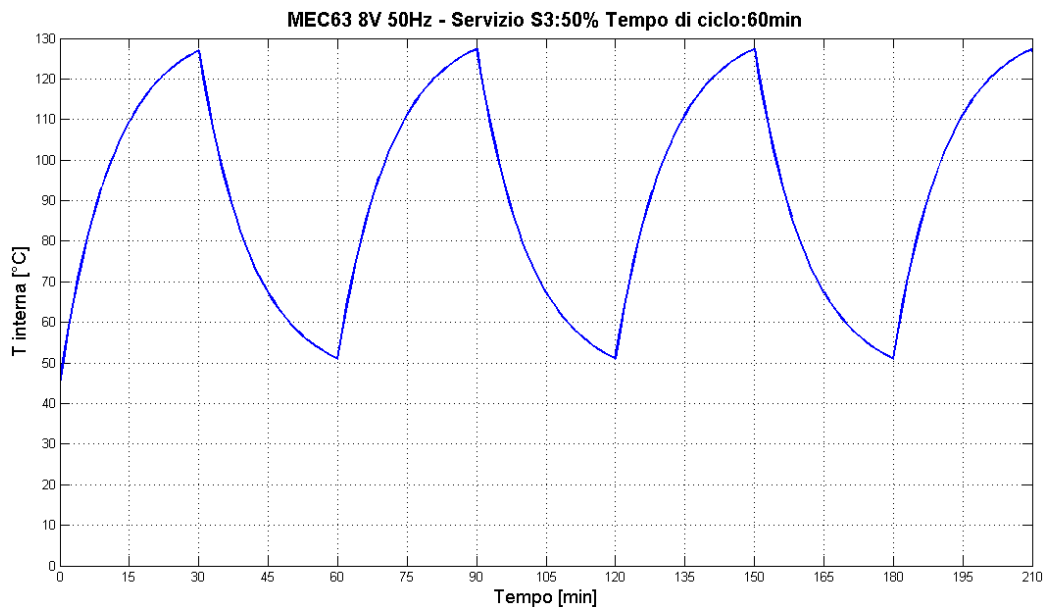


Figura 3.27: MEC63 8V 50Hz – Andamento della sovratemperatura durante il servizio S3

Dopo due cicli la temperatura interna varia tra i 51°C alla fine del periodo di riposo, e i 127°C alla fine del periodo di funzionamento a coppia nominale, come mostrato in figura.

Se al termine del periodo di funzionamento a coppia nominale, il motore viene fatto funzionare in sovraccarico, con coppia di 1.9Nm, per un tempo di 2 minuti, la temperatura interna massima che raggiunge è 140°C, che è minore rispetto alla temperatura limite di 155°C imposta dalla classe di isolamento degli avvolgimenti.

## Capitolo 4.

# Modulazione della tensione impressa

Per il controllo della velocità o della coppia dei motori in alternata, esistono svariate tecniche, ad esempio il controllo a orientamento di campo (FOC) o il controllo Volt su Hertz (V/hz). Queste tecniche definiscono i valori di tensione che occorre applicare al motore, al fine di seguire un riferimento di velocità o coppia. Il problema ora è individuare la strategia più opportuna che consenta a queste tensioni di essere effettivamente applicate tramite l'uso dell'inverter. Questo problema, comunemente conosciuto come problema della modulazione della tensione impressa, consiste nell'individuare la legge di commutazione dell'inverter più opportuna, ovvero la sequenza con cui comandare gli interruttori statici che compongono l'inverter, in funzione della tensione di alimentazione del motore desiderata.

In questo capitolo verrà presentata una delle più diffuse tecniche di modulazione trifase per inverter a tensione impressa, chiamata Space Vector Modulation o SVM. Questa tecnica si basa sul controllo del comportamento globale del sistema trifase e non sul controllo separato di ciascuna fase, e non necessita della ricerca di intersezioni tra un segnale a priori incognito e una portante triangolare, come avviene nelle tecniche PWM (Pulse-width modulation); risulta quindi di facile implementazione ad esempio su di un microprocessore e consente di ridurre il numero di commutazioni all'interno dell'inverter e il contenuto armonico delle correnti negli avvolgimenti del motore.



## 4.1. Space Vector Modulation

Un classico inverter trifase ideale può essere schematizzato come in figura 4.1.

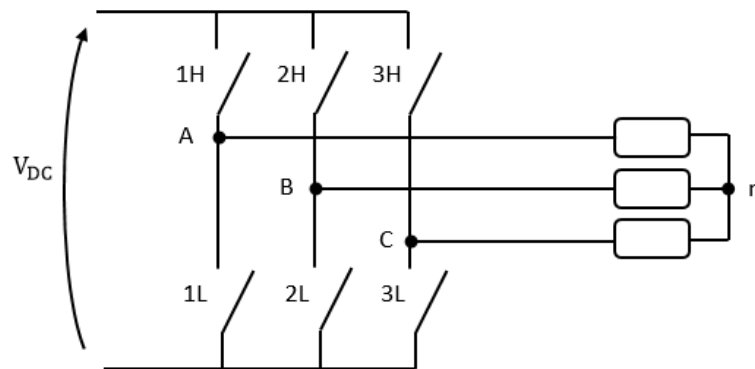


Figura 4.1: Schema di un inverter trifase ideale

Se si considera di comandare le valvole di uno stesso ramo dell'inverter in modo complementare, ovvero evitando che entrambe siano contemporaneamente chiuse o aperte, l'inverter allora può assumere solo otto diversi stati di conduzione, caratterizzabili da una terna di bit. Ogni bit si riferisce ad un ramo dell'inverter: lo stato "1" del bit significa che la valvola superiore, connessa alla polarità positiva del DC Bus di alimentazione, è chiusa (ON) mentre quella inferiore, connessa alla polarità negativa, è aperta (OFF); viceversa lo stato "0" del bit significa che la valvola superiore è aperta (OFF) e quella inferiore è chiusa (ON). In tabella 4.1 si riporta ogni possibile combinazione delle valvole e la terna di bit corrispondente.

Tabella 4.1: Stati di conduzione delle valvole dell'inverter

N°	bit	1H	2H	3H	1L	2L	3L
0	000	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
1	001	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
2	010	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
3	011	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
4	100	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
5	101	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
6	110	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
7	111	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF

Per ogni stato di conduzione è possibile calcolare le tensioni di fase e le tensioni corrispondenti ottenute tramite la trasformazione di Park.

Si ricorda che la trasformata di Park su assi fissi è:

$$V_{\alpha} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{An}$$

$$V_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (V_{Bn} - V_{Cn}) = \frac{1}{\sqrt{2}} (2V_{Bn} + V_{An})$$

Tabella 4.2: Tensioni di fase e tensioni di Park

Stato di conduzione		Tensione di fase			Tensione di Park	
N° vettore	bit	$V_{An}$	$V_{Bn}$	$V_{Cn}$	$V_{\alpha}$	$V_{\beta}$
0	000	0	0	0	0	0
1	001	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$
2	010	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$
3	011	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC}$	0
4	100	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC}$	0
5	101	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$
6	110	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$
7	111	0	0	0	0	0

Il modulo della tensione di Park vale  $\sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC}$  per ogni stato di conduzione attivo ed è nullo per gli stati "0" e "7" che corrispondono a stati inattivi (valvole superiori tutte aperte o tutte chiuse).

Come mostrato in figura 4.2, è possibile rappresentare su un piano complesso la tensione di Park per ogni stato di conduzione.

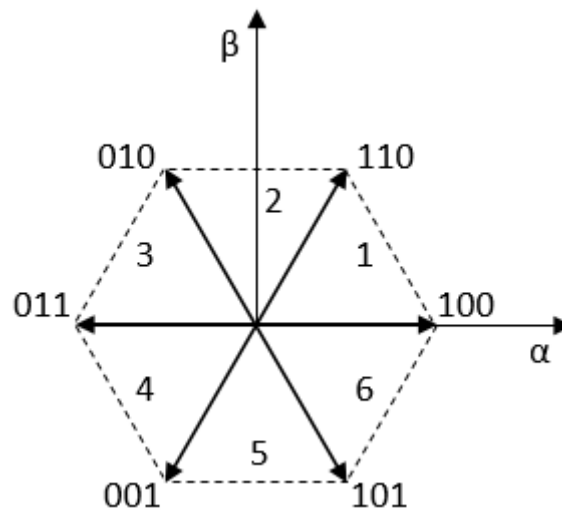


Figura 4.2: Vettori della tensione di Park

Si può notare come due configurazioni attive adiacenti differiscano di un solo bit, quindi per passare da uno stato attivo ad uno stato attivo adiacente, è sufficiente variare lo stato di un solo ramo dell'inverter, il che implica un minor numero di commutazioni delle valvole.

Tramite una qualunque tecnica di controllo vettoriale, come ad esempio il FOC, è possibile trovare il vettore di tensione statorica  $V_S$  che l'inverter deve generare per ottenere una certa velocità o coppia del motore. In generale questo vettore non coinciderà con uno dei sei vettori base della tensione di Park. Consideriamo ad esempio la situazione di figura 4.3, in cui il vettore  $V_S$  si trova nel primo settore.

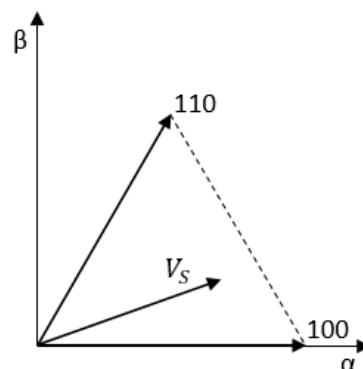


Figura 4.3: Vettore della tensione statorica  $V_S$  nel primo settore

È evidente quindi che nessuna configurazione dell'inverter consente di ottenere esattamente il vettore  $V_S$ . Tuttavia, definito un certo tempo di ciclo  $T_C$ , si può considerare di applicare al motore, per un certo intervallo di tempo, uno dei vettori base adiacenti a  $V_S$  e per il resto del tempo, l'altro vettore base adiacente, in modo tale da produrre una tensione che mediamente, nel periodo  $T_C$ , possieda un modulo e fase prossimi a  $V_S$ .

Facendo riferimento alla situazione di figura 4.3, occorre quindi che sia verificata la seguente condizione:

$$\bar{V}_S T_C = \bar{V}_4 T_4 + \bar{V}_6 T_6$$

Dove  $T_4$  e  $T_6$  sono rispettivamente i tempi di applicazione dei vettori base  $V_4$  e  $V_6$ ; la somma di questi due tempi deve essere sempre minore o al più uguale al tempo di ciclo  $T_C$ . Nel caso in cui la somma sia minore del tempo di ciclo, verrà applicato il vettore nullo, corrispondente a uno stato inattivo, per il restante del tempo, che verrà indicato come  $T_0$ :

$$T_0 = T_C - T_4 - T_6$$

Per semplificare i calcoli, è possibile scomporre i vettori base nelle rispettive proiezioni sugli assi  $\alpha$  e  $\beta$ , che corrispondono alle tensioni di Park riportate precedentemente in tabella 4.2. Per la situazione considerata si ha che:

$$\begin{aligned} V_{\alpha 4} &= \sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC} & V_{\beta 4} &= 0 \\ V_{\alpha 6} &= \frac{1}{\sqrt{6}} V_{DC} & V_{\beta 6} &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_{DC} \end{aligned}$$

Scomponendo anche il vettore  $V_S$ , la condizione da verificare diventa quindi:

$$\begin{aligned} V_{\alpha S} T_C &= \left( \sqrt{\frac{2}{3}} T_4 + \frac{1}{\sqrt{6}} T_6 \right) V_{DC} \\ V_{\beta S} T_C &= \left( \frac{1}{\sqrt{2}} T_6 \right) V_{DC} \end{aligned}$$

Risolvendo le precedenti equazioni rispetto ai tempi  $T_4$  e  $T_6$ , si ottiene:

$$T_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\sqrt{3} V_{\alpha S} - V_{\beta S}) \frac{T_C}{V_{DC}} \quad T_6 = (\sqrt{2} V_{\beta S}) \frac{T_C}{V_{DC}}$$

Che possono essere riscritte come:

$$T_4 = h_1 - h_2 \quad T_6 = 2h_2$$

Dove:

$$h_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{T_C}{V_{DC}} V_{\alpha S} \quad h_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T_C}{V_{DC}} V_{\beta S}$$

Una volta definiti il tempo di ciclo  $T_C$  e la tensione di bus  $V_{DC}$ , i coefficienti  $h_1$  e  $h_2$  si possono calcolare semplicemente dalla proiezione del vettore tensione  $V_S$  sugli assi  $\alpha$  e  $\beta$ . Si può dimostrare, tramite considerazioni trigonometriche, che questi coefficienti permettono di individuare il settore in cui si trova il vettore  $V_S$  e, tramite calcoli analoghi ai precedenti, permettono di calcolare i tempi di applicazione dei vettori base corrispondenti a quel settore.

In tabella 4.3 si riporta la condizione sui coefficienti  $h_1$  e  $h_2$  per individuare il settore e per il calcolo dei tempi.

Tabella 4.3: Calcolo dei tempi di applicazione dei vettori base

Settore	Angolo	Stati attivi	Condizioni	Tempi
1	$0^\circ - 60^\circ$	4 - 6	$h_2 > 0$ $h_1 > h_2$	$T_4 = h_1 - h_2$ $T_6 = 2h_2$ $T_0 = T_C - T_4 - T_6$
2	$60^\circ - 120^\circ$	6 - 2	$h_2 \geq h_1$ $h_2 \geq -h_1$	$T_2 = -h_1 + h_2$ $T_6 = h_1 + h_2$ $T_0 = T_C - T_2 - T_6$
3	$120^\circ - 180^\circ$	2 - 3	$h_2 > 0$ $h_2 < -h_1$	$T_2 = 2h_2$ $T_3 = -h_1 - h_2$ $T_0 = T_C - T_2 - T_3$
4	$180^\circ - 240^\circ$	3 - 1	$h_2 \leq 0$ $h_2 > h_1$	$T_3 = -h_1 + h_2$ $T_1 = -2h_2$ $T_0 = T_C - T_3 - T_1$
5	$240^\circ - 300^\circ$	1 - 5	$h_2 \leq h_1$ $h_2 \leq -h_1$	$T_5 = h_1 - h_2$ $T_1 = -h_1 - h_2$ $T_0 = T_C - T_5 - T_1$
6	$300^\circ - 360^\circ$	5 - 4	$h_2 \leq 0$ $h_2 > -h_1$	$T_5 = -2h_2$ $T_4 = h_1 + h_2$ $T_0 = T_C - T_5 - T_4$

Dopo aver calcolato i tempi di applicazione dei vettori base, occorre stabilire la sequenza con cui effettivamente applicare questi vettori durante il tempo di ciclo. Esistono varie tecniche, di tipo simmetrico o asimmetrico. Nel nostro caso, al fine di ridurre il numero di commutazioni delle valvole e ottenere un miglior spettro della tensione, verrà considerata la tecnica di modulazione simmetrica a sette settori. Questa tecnica prevede di considerare un intervallo  $T$  di ampiezza pari al doppio del tempo di ciclo  $T_C$ , in modo che la sequenza di

applicazione dei vettori nella prima metà del ciclo, venga ripetuta in senso inverso nella seconda metà. Inoltre il tempo  $T_0$  viene suddiviso equamente tra gli stati nulli "0" e "7", che vengono applicati all'inizio, a metà e alla fine dell'intervallo  $T$ .

In figura 4.4 viene mostrata la sequenza di applicazione dei vettori per il caso considerato in precedenza, in cui il vettore di tensione  $V_S$  si trova nel primo settore.

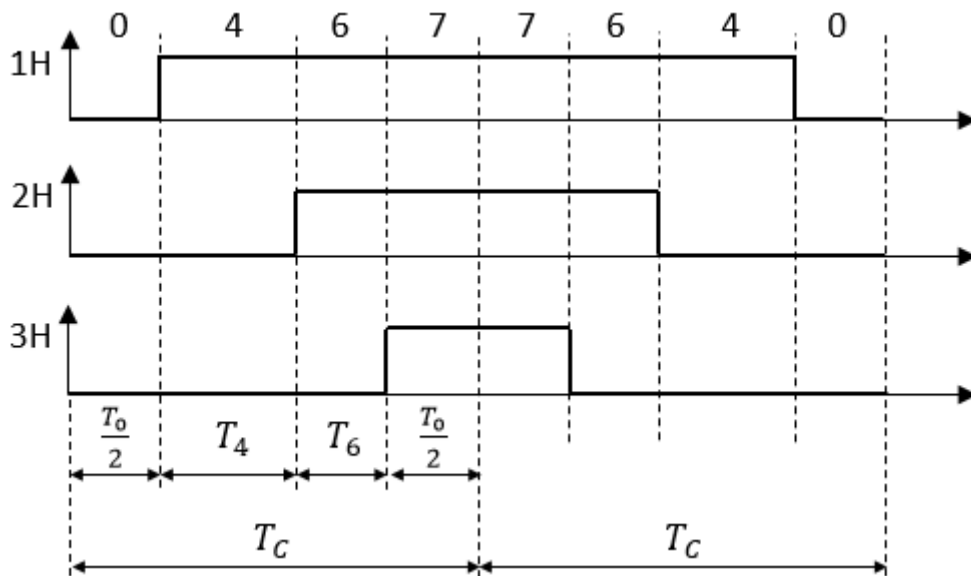


Figura 4.4: Commutazioni delle valvole nel tempo di ciclo

Un altro vantaggio dell'utilizzo di questa tecnica di modulazione, è che dal calcolo dei tempi di applicazione dei vettori base, si può ottenere l'istante di accensione e spegnimento delle valvole dell'inverter, semplicemente per confronto di un segnale triangolare con alcuni segnali di valore opportuno, costanti per ogni ciclo.

Solitamente il modulo dei vettori base viene normalizzato rispetto al valore della tensione di bus e i tempi di applicazione dei vettori vengono calcolati considerando un tempo di ciclo unitario.

In funzione del settore in cui si trova il vettore  $V_S$  e dei tempi di applicazione dei vettori base, si determinano i valori dei riferimenti  $T_A$ ,  $T_B$  e  $T_C$ , come mostrato in tabella 4.4.

Tabella 4.4: Calcolo dei riferimenti

Settore	Tempi	Riferimenti
1	$T_4$ $T_6$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2}$ $T_B = \frac{T_0}{2} + T_4$ $T_C = \frac{T_0}{2} + T_4 + T_6$
2	$T_2$ $T_6$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2} + T_2$ $T_B = \frac{T_0}{2}$ $T_C = \frac{T_0}{2} + T_2 + T_6$
3	$T_2$ $T_3$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2} + T_2 + T_3$ $T_B = \frac{T_0}{2}$ $T_C = \frac{T_0}{2} + T_2$
4	$T_3$ $T_1$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2} + T_1 + T_3$ $T_B = \frac{T_0}{2} + T_1$ $T_C = \frac{T_0}{2}$
5	$T_5$ $T_1$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2} + T_1$ $T_B = \frac{T_0}{2} + T_1 + T_5$ $T_C = \frac{T_0}{2}$
6	$T_5$ $T_4$ $T_0$	$T_A = \frac{T_0}{2}$ $T_B = \frac{T_0}{2} + T_4 + T_5$ $T_C = \frac{T_0}{2} + T_4$

I riferimenti per l'accensione e lo spegnimento delle valvole, si impostano secondo la tabella 4.5, dove ad esempio 1H si riferisce alla valvola superiore del primo ramo dell'inverter, con ON si identifica il riferimento per l'accensione e con OFF per lo spegnimento. Le valvole inferiori saranno comandate in modo complementare e, per evitare contemporanee accensioni, si può considerare un certo intervallo di tempo, chiamato tempo morto, tra lo spegnimento della valvola superiore e l'accensione di quella inferiore e viceversa.

Tabella 4.5: Assegnazione dei riferimenti di accensione e spegnimento delle valvole

1H		2H		3H	
ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
$T_A$	$1 - T_A$	$T_B$	$1 - T_B$	$T_C$	$1 - T_C$

Viene poi generato un segnale a dente di sega, di ampiezza unitaria e frequenza pari a quella di commutazione delle valvole dell'inverter desiderata. Infine quindi gli istanti di commutazione delle valvole sono individuati dal confronto tra il segnale a dente di sega e i riferimenti di accensione e spegnimento calcolati ad ogni inizio ciclo. In figura 4.5 è mostrata la situazione relativa all'esempio considerato in precedenza.

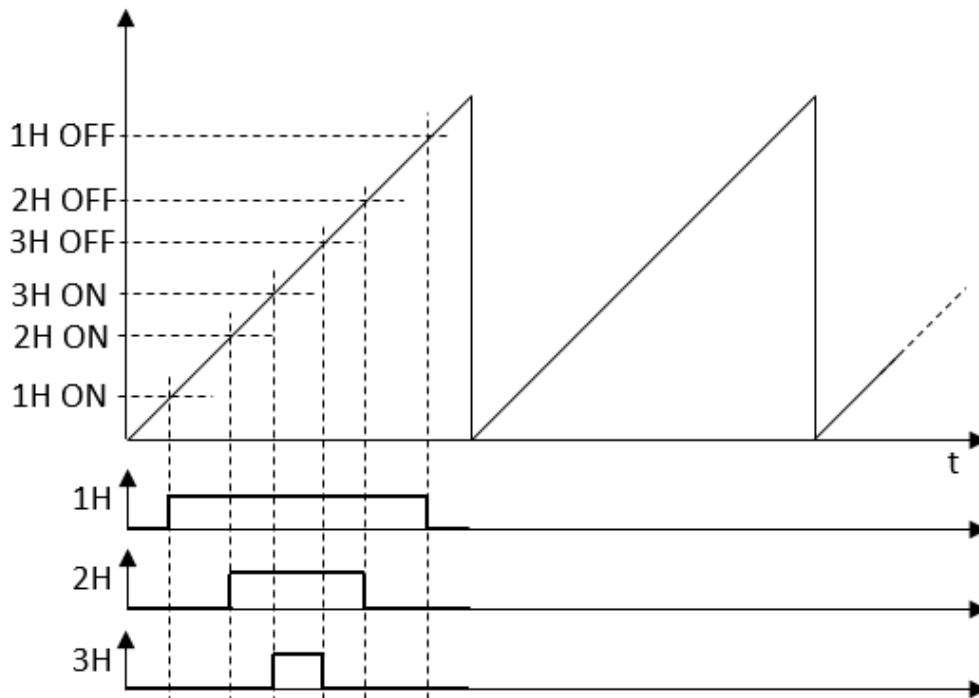


Figura 4.5: Generazione degli istanti di accensione e spegnimento delle valvole



## Capitolo 5.

# Algoritmo di ricostruzione della corrente trifase

Spesso si ha la necessità di dover misurare la corrente assorbita dal motore, sia per essere utilizzata direttamente come variabile di controllo, sia ad esempio per la stima della posizione del motore. A tale scopo esistono svariati tipi di sensori di corrente, come le sonde a effetto Hall o i trasformatori TA. Il problema è che solitamente questi sensori vengono posti direttamente sulle fasi del motore e il loro costo può incidere notevolmente sul costo finale del sistema di controllo.

In questo capitolo verrà presentata una soluzione per applicazioni di basso costo, in cui non sono richieste particolari prestazioni e quindi non si ha la necessità di una misura veramente accurata e tempestiva di corrente.

La soluzione proposta consente la ricostruzione delle tre correnti di fase del motore, tramite l'utilizzo di un solo dispositivo di misura posizionato a monte dell'inverter. Il pregio di utilizzare un solo sensore e circuito di misura, sta non solo in una riduzione dei costi, ma anche nell'avere misure affette da uno stesso offset e da uno stesso errore di guadagno, rendendone più semplice la compensazione.

### 5.1. Misura della corrente

Ripensando allo schema di un motore trifase comandato da un inverter, è facile vedere che la corrente assorbita dal motore proviene dal bus, quindi dal circuito a monte dell'inverter. L'idea quindi è di misurare la corrente di bus, tramite l'inserimento di una resistenza di shunt e l'utilizzo di un circuito di amplificazione e campionamento della caduta di tensione sulla resistenza, come mostrato in figura 5.1.

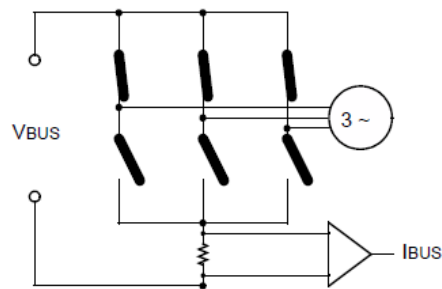


Figura 5.1: Circuito di misura della corrente di bus

Analizziamo ora la configurazione delle valvole dell'inverter in alcune particolari situazioni, qualora si utilizzi la tecnica di modulazione SVM, presentata nel precedente capitolo.

Se si considera di applicare il vettore di base corrispondente alla terna di bit "100", la situazione è quella di figura 5.2. In particolare si vede che la corrente di bus è uguale alla corrente entrante nella prima fase del motore

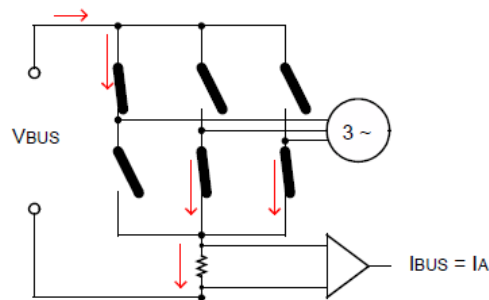


Figura 5.2: Corrente di bus nello stato di conduzione "100"

Se invece si considera di applicare il vettore "101", si vede che la corrente di bus è uguale alla corrente uscente dalla seconda fase del motore.

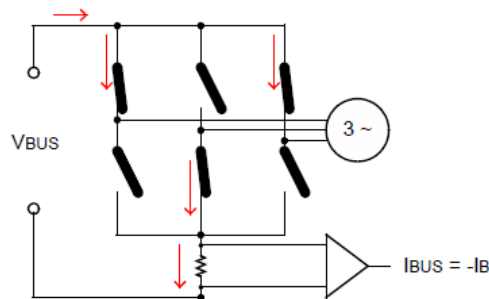


Figura 5.3: Corrente di bus nello stato di conduzione "101"

Infine se si considera di applicare uno stato inattivo, ad esempio "000", si vede che nel bus non circola nessuna corrente.

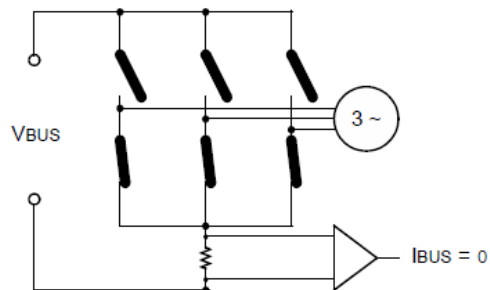


Figura 5.4: Corrente di bus nello stato di conduzione "000"

In modo analogo, è possibile analizzare la situazione per ogni combinazione di commutazione delle valvole. In tabella 5.1 si riportano tutte le condizioni e le correnti di bus che è possibile misurare.

Tabella 5.1: Corrente di bus per ogni stato di conduzione delle valvole

1H	2H	3H	1L	2L	3L	I <sub>bus</sub>
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	+I <sub>A</sub>
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	+I <sub>B</sub>
OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	+I <sub>C</sub>
OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-I <sub>A</sub>
ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	+I <sub>B</sub>
ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	-I <sub>C</sub>
ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0
OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0

All'interno di un intero ciclo di modulazione della tensione, si riusciranno a misurare soltanto due correnti di fase. La terza corrente potrà però essere calcolata dalle altre due correnti misurate, considerando che deve valere la legge di Kirchhoff delle correnti:

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

Inoltre la misura verrà effettuata soltanto nella prima metà del ciclo, in quanto nella seconda metà si misurerebbero le stesse correnti.

## 5.2. Possibili problemi

Considerando i tempi di commutazione delle valvole durante un ciclo, emergono possibili problemi di misura della corrente.

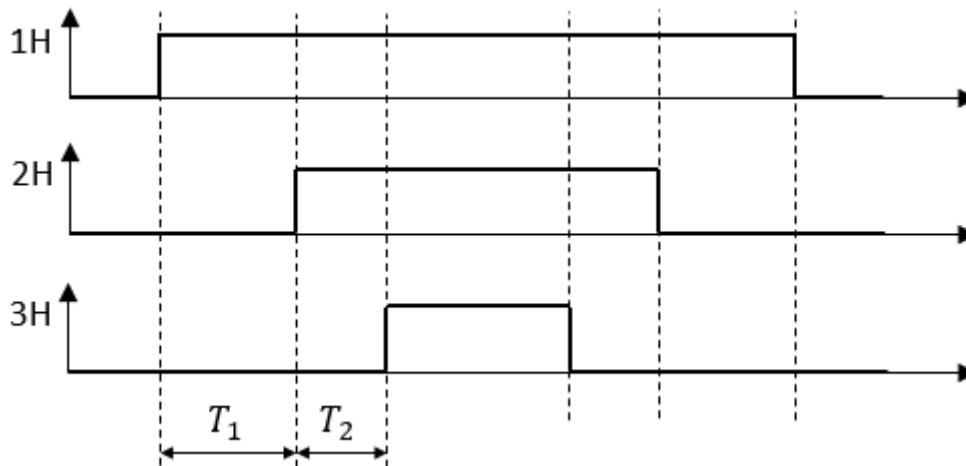


Figura 5.5: Intervalli utili per la misura della corrente

Gli intervalli di tempo utili infatti per poter misurare la corrente sono  $T_1$  e  $T_2$ , quindi la loro ampiezza deve essere sufficiente a effettuare la misura.

Esistono però alcuni fattori che possono ridurre l'intervallo utile alla misura:

- Il tempo morto, cioè il lasso di tempo che è necessario interporre tra lo spegnimento e l'accensione delle valvole di uno stesso ramo, per evitare contemporanee accensioni che causerebbero corto-circuiti.
- Il tempo di applicazione dei vettori base, in quanto se l'indice di modulazione è basso, ovvero quando il modulo della tensione  $V_S$  è piccolo, oppure nel caso di passaggio di settore, ovvero quando il vettore di tensione  $V_S$  è prossimo ad un vettore base, gli intervalli  $T_1$  o  $T_2$  possono avere ampiezza molto piccola, in quanto il tempo di applicazione del vettore base è molto breve.
- Il tempo di campionamento della caduta di tensione sulla resistenza di shunt: infatti se si utilizza un semplice circuito di amplificazione e sample-and-hold, la misura non è istantanea, ma richiede un certo tempo dovuto alle non linearità dell'amplificatore operazionale e al tempo di carica del condensatore del sample-and-hold; inoltre, dopo la commutazione di una valvola dell'inverter, occorre attendere che la corrente si stabilizzi per poter misurarla correttamente.

Non è quindi possibile semplicemente campionare la corrente di bus in corrispondenza di alcune determinate combinazioni delle valvole dell'inverter. Occorre innanzitutto accertarsi di avere un intervallo sufficientemente grande da poter effettuare la misura e inoltre attendere che la corrente sia stabile. Una prima soluzione nel caso in cui l'intervallo di misura sia troppo piccolo, è quella di evitare di misurare la corrente, ma questo è possibile solo se la corrente non viene utilizzata poi dal sistema di controllo. Un'altra soluzione potrebbe essere quella di stimare la misura di corrente che non è possibile effettuare, ma questo richiederebbe un modello accurato del sistema.

La soluzione migliore, che in seguito verrà implementata, è di imporre che l'intervallo di misura sia maggiore di un certo tempo minimo. Se l'intervallo risulta troppo piccolo, allora l'algoritmo provvederà a modificare gli istanti di accensione delle valvole dell'inverter durante la prima metà del ciclo, in modo da espandere l'intervallo e consentire la misura. Questo provocherà però una modifica dei tempi di applicazione dei vettori base, quindi l'algoritmo dovrà ridurre in modo analogo lo stesso intervallo nella seconda metà del ciclo, così da compensare i tempi di applicazione dei vettori base nell'intera durata del ciclo. Perciò se è necessario aumentare di una certa quantità l'intervallo nella prima metà del ciclo, occorre anche diminuire della stessa quantità l'intervallo relativo nella seconda metà, come mostrato ad esempio in figura 5.6.

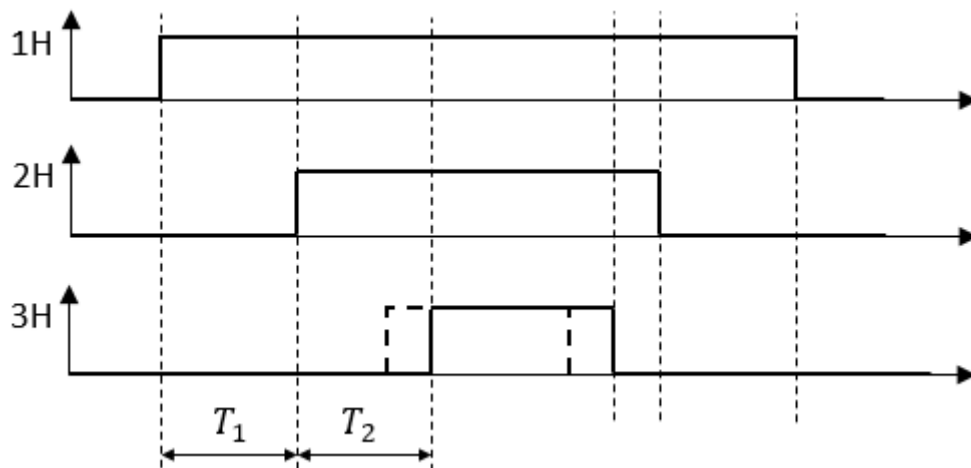


Figura 5.6: Modifica dell'intervallo  $T_2$  e spostamento degli istanti di accensione e spegnimento della valvola del terzo ramo dell'inverter

### 5.3. Implementazione Simulink

Per implementare l'algoritmo, che nel seguito chiameremo semplicemente algoritmo single-shunt, è stato utilizzato il controllo di velocità di un motore asincrono schematizzato in figura 5.7.

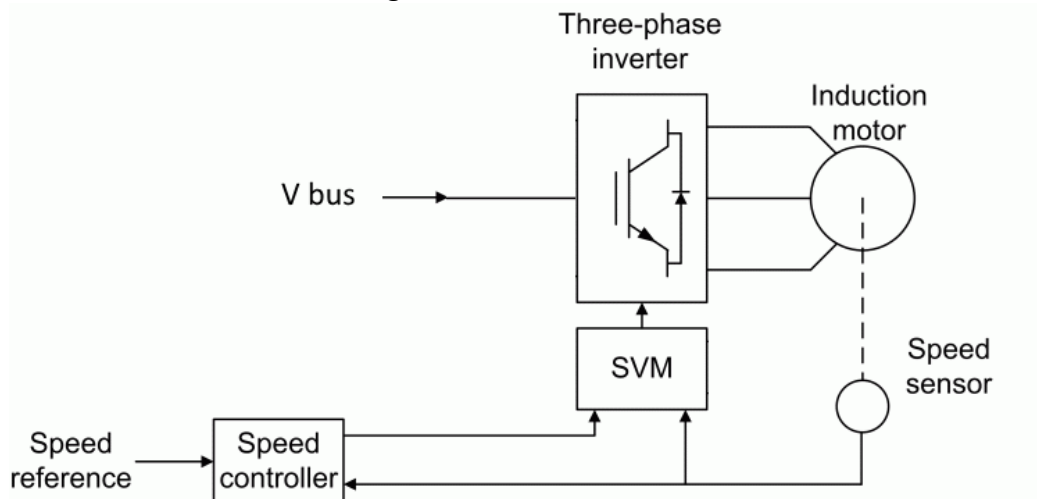


Figura 5.7: Schema del controllo di velocità di un motore asincrono

Il controllo di velocità è realizzato utilizzando la tecnica del Volt su Hertz (V/Hz). È un tecnica di tipo scalare, che realizza il controllo dello scorrimento e mantiene costante il rapporto tra tensione e frequenza, in modo che il modulo del flusso di statore rimanga costante.

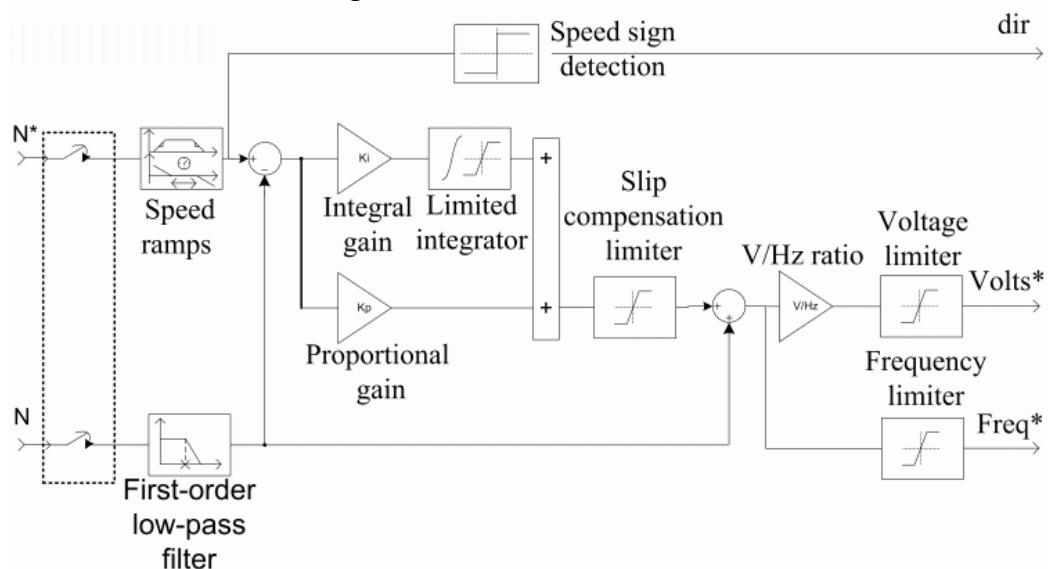


Figura 5.8: Schema del controllo V/Hz

Come si vede da figura 5.8, il controllo V/Hz fornisce in uscita il valore della tensione e della frequenza con cui occorre alimentare il motore per ottenere la velocità desiderata.

La modulazione della tensione viene poi realizzata dall'inverter, utilizzando la tecnica SVM, schematizzata in figura 5.9.

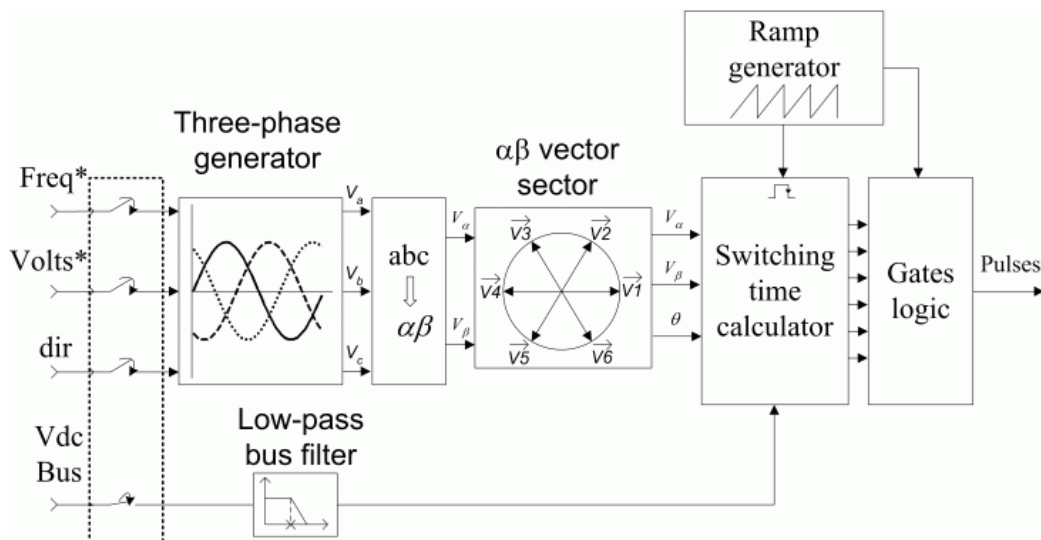


Figura 5.9: Schema della modulazione SVM

Dopo aver trasformato la tensione e frequenza in ingresso nelle due componenti  $V_\alpha$  e  $V_\beta$ , e aver individuato il settore in cui si trova il riferimento di tensione, nel blocco denominato "Switching time calculator" vengono calcolati i valori dei riferimenti per la commutazione delle valvole dell'inverter. Infine il blocco denominato "Gates logic", comanda l'accensione e spegnimento delle valvole, confrontando i riferimenti con il segnale a dente di sega.

L'algoritmo single-shunt si compone di due parti: la prima consiste in una modifica del blocco denominato "Switching time calculator" al fine di poter modificare i tempi utili alla misura di corrente, qualora sia necessario, e individuare gli istanti a cui effettuare la misura; la seconda parte realizza la misura e ricostruzione delle tre correnti di fase del motore.

## Prima parte: Modifica dei riferimenti

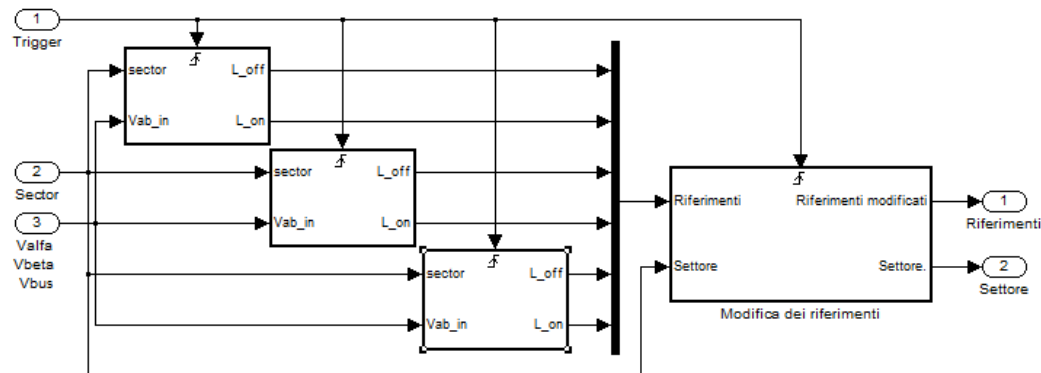


Figura 5.10: Schema Simulink del blocco "Switching time calculator"

Nel blocco "Switching time calculator", riportato in figura, viene eseguito il calcolo dei tempi di applicazione dei vettori base, in funzione del settore e dei valori di  $V_\alpha$  e  $V_\beta$ ; vengono quindi individuati i riferimenti per l'accensione e spegnimento delle valvole.

Nel blocco indicato come "Modifica dei riferimenti" è implementata la prima parte dell'algoritmo single-shunt. In particolare questa calcola i valori degli intervalli  $T_1$  e  $T_2$  utili alla misura della corrente e se necessario, modifica i riferimenti per garantire una durata di questi intervalli maggiore di un tempo minimo impostato; inoltre l'algoritmo crea due ulteriori riferimenti per gli istanti a cui effettuare la misura della corrente.

```

if Settore==1
    T1=L2on-L1on;
    T2=L3on-L2on;
    if T1<Tempo_minimo
        x=Tempo_minimo-T1;
        L1on=L1on-x;
        L1off=L1off-x;
    end
    if T2<Tempo_minimo
        x=Tempo_minimo-T2;
        L3on=L3on+x;
        L3off=L3off+x;
    end
    s1=L1on+tau;
    s2=L2on+tau;

```

Figura 5.11: Parte dell'algoritmo implementato nel blocco "Modifica dei riferimenti"



Nella parte di codice relativa al settore 1, riportata in figura 5.11, si vede appunto la verifica della larghezza minima degli intervalli  $T_1$  e  $T_2$ , e la modifica dei riferimenti di accensione e spegnimento delle valvole.

Con  $s_1$  e  $s_2$  si indicano i riferimenti per l'istante a cui effettuare la misura di corrente, che vengono impostati un certo tempo  $\tau$  dopo l'accensione della valvola.

### Seconda parte: Ricostruzione delle correnti

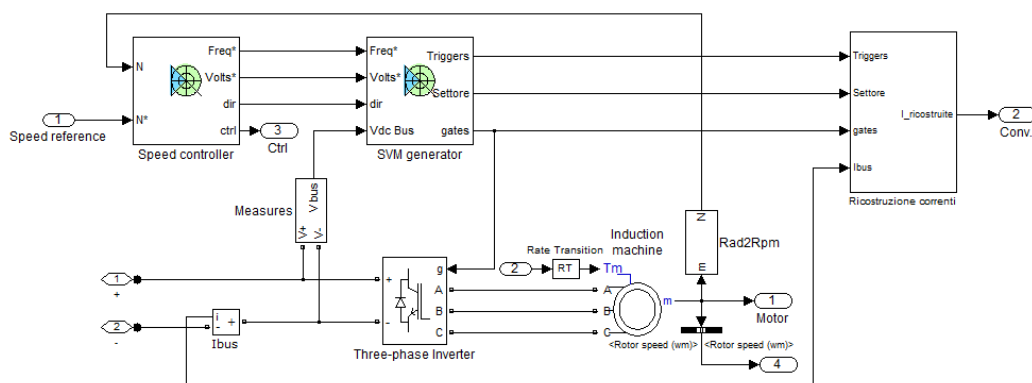


Figura 5.12: Schema Simulink del controllo del motore e misura della corrente di bus

La seconda parte dell'algoritmo single-shunt è implementata nel blocco indicato come "Ricostruzione correnti" in figura 5.12. In particolare questa misura la corrente di bus e, in funzione del settore e della configurazione delle valvole, determina a quali correnti di fase assegnare la misura e quale corrente occorre calcolare, secondo quanto riportato in tabella 5.2.

Tabella 5.2: Correnti misurate e corrente da calcolare

Settore	Ordine accensione valvole			Ordine correnti misurate		Corrente da calcolare
	1H	2H	3H	$I_A$	$-I_C$	
1	1H	2H	3H	$I_A$	$-I_C$	$I_B$
2	2H	1H	3H	$I_B$	$-I_C$	$I_A$
3	2H	3H	1H	$I_B$	$-I_A$	$I_C$
4	3H	2H	1H	$I_C$	$-I_A$	$I_B$
5	3H	1H	2H	$I_C$	$-I_B$	$I_A$
6	1H	3H	2H	$I_A$	$-I_B$	$I_C$

Come si vede in figura 5.13, nei punti A e B vengono misurate le due correnti che in seguito, in funzione del settore, vengono assegnate alle fasi corrispondenti. La terza corrente viene calcolata nel punto C, in corrispondenza della metà del tempo di ciclo dell'SVM, applicando la legge di Kirchhoff delle correnti. Questo è un errore, in quanto le correnti vengono misurate a istanti diversi e non rimangono costanti durante l'intero ciclo. Tuttavia, come vedremo in seguito, l'errore che si commette considerando le due correnti misurate e la corrente calcolata, come le esatte correnti assorbite dal motore a metà del ciclo dell'SVM, è accettabile.

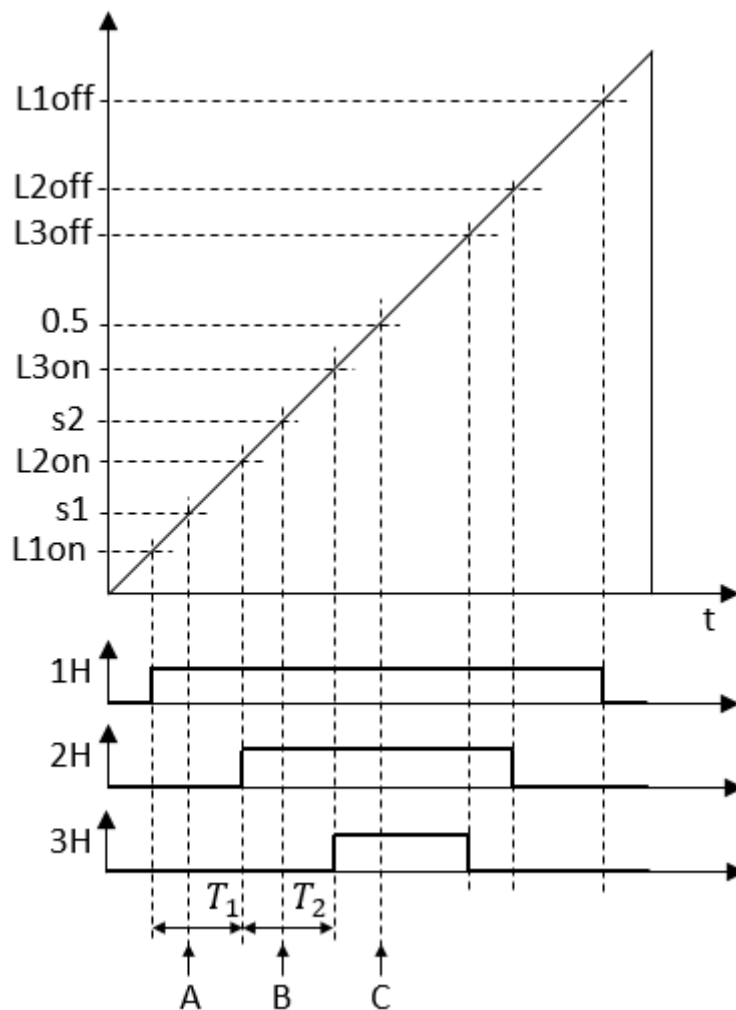


Figura 5.13: Generazione degli istanti di accensione e spegnimento delle valvole e degli istanti di misura delle correnti

## 5.4. Simulazioni

Vengono riportati ora i risultati di alcune simulazioni eseguite in Simulink, dell'implementazione dell'algoritmo single-shunt.

Per le simulazioni è stato utilizzato il modello di un motore asincrono a 220V 60Hz, una frequenza di commutazione dell'inverter di 4500Hz e sono stati considerati i profili di velocità di riferimento e coppia resistente di figura 5.14.

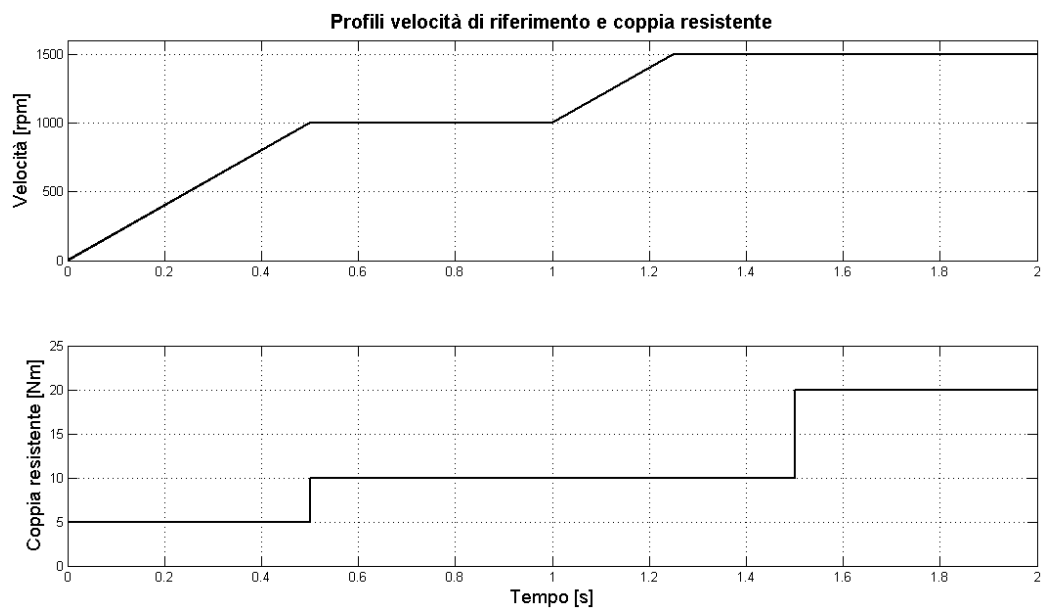


Figura 5.14: Velocità di riferimento e coppia resistente

Innanzitutto vediamo come vengono modificati gli intervalli per la misura delle correnti, ovvero la distanza tra i riferimenti di accensione delle valvole. In questa simulazione è stato considerato un intervallo minimo di 0.05, che alla frequenza di 4500Hz corrisponde ad un tempo minimo di 11 $\mu$ s.

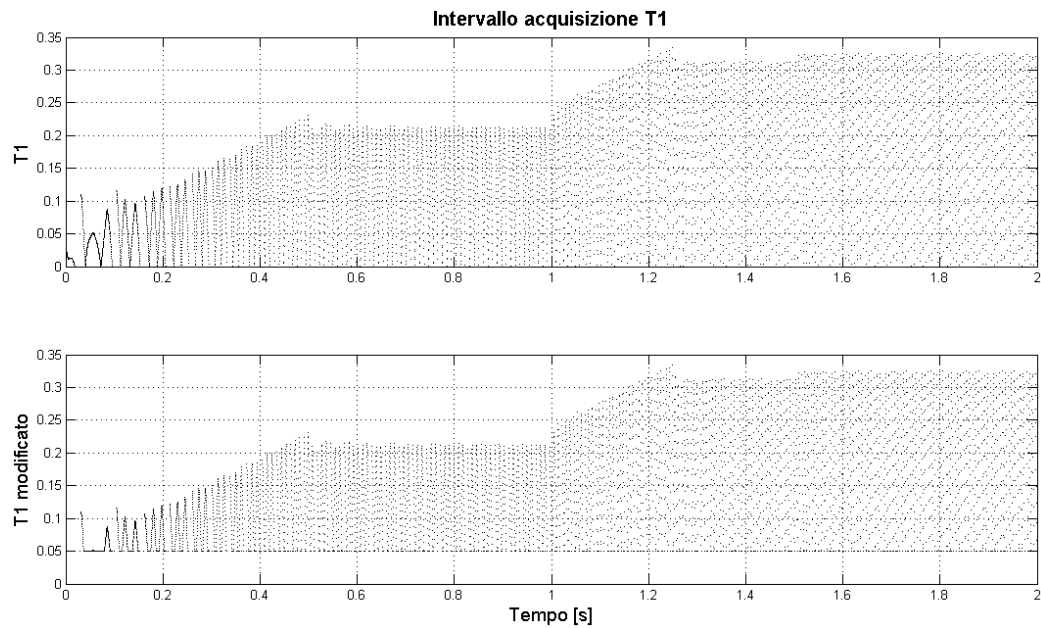


Figura 5.15: Intervallo di acquisizione  $T_1$  prima e dopo la modifica effettuata dall'algoritmo single-shunt

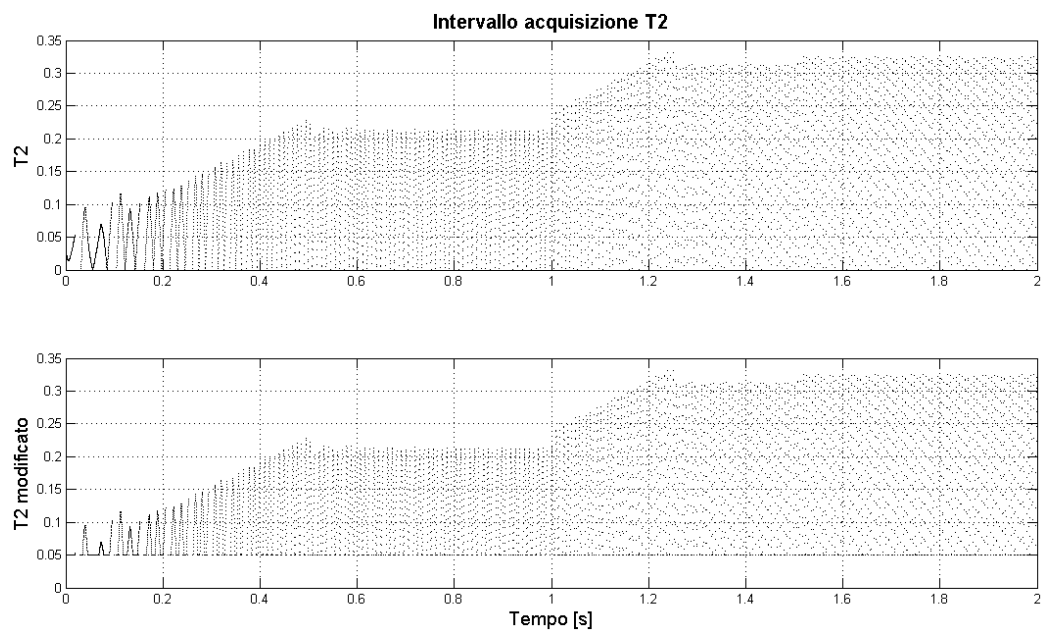


Figura 5.16: Intervallo di acquisizione  $T_2$  prima e dopo la modifica effettuata dall'algoritmo single-shunt

Come si può notare, dopo la modifica introdotta dall'algoritmo single-shunt, gli intervalli  $T_1$  e  $T_2$  sono sempre maggiori dell'intervallo minimo considerato.

Confrontiamo poi le correnti reali assorbite dal motore (indicate come  $I_1, I_2, I_3$ ) con quelle ricostruite tramite l'algoritmo single-shunt (indicate come  $I_a, I_b, I_c$ ).

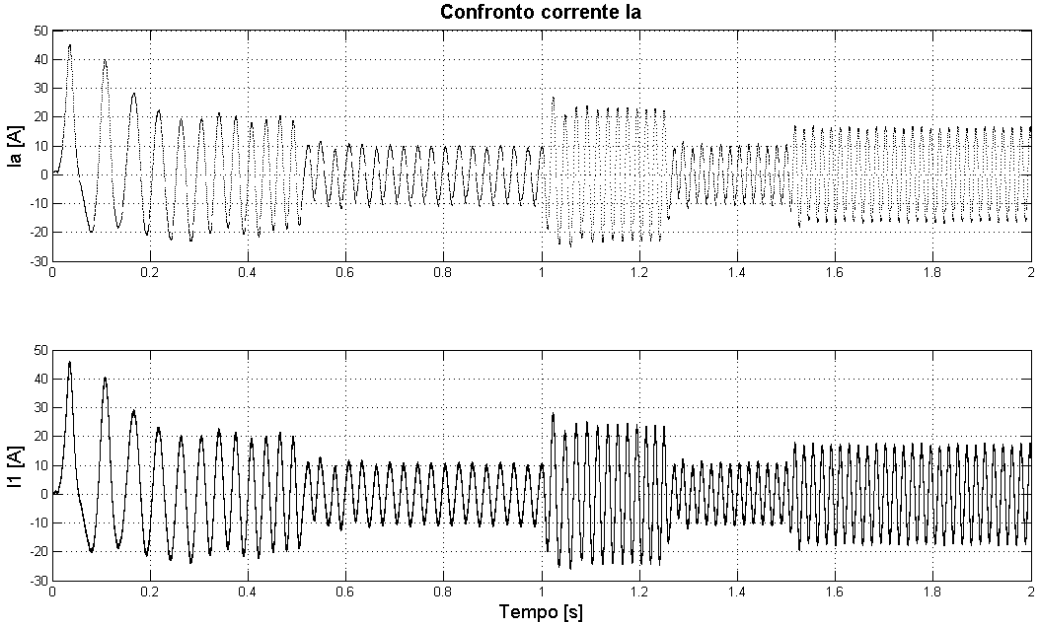


Figura 5.17: Corrente ricostruita e reale della prima fase del motore

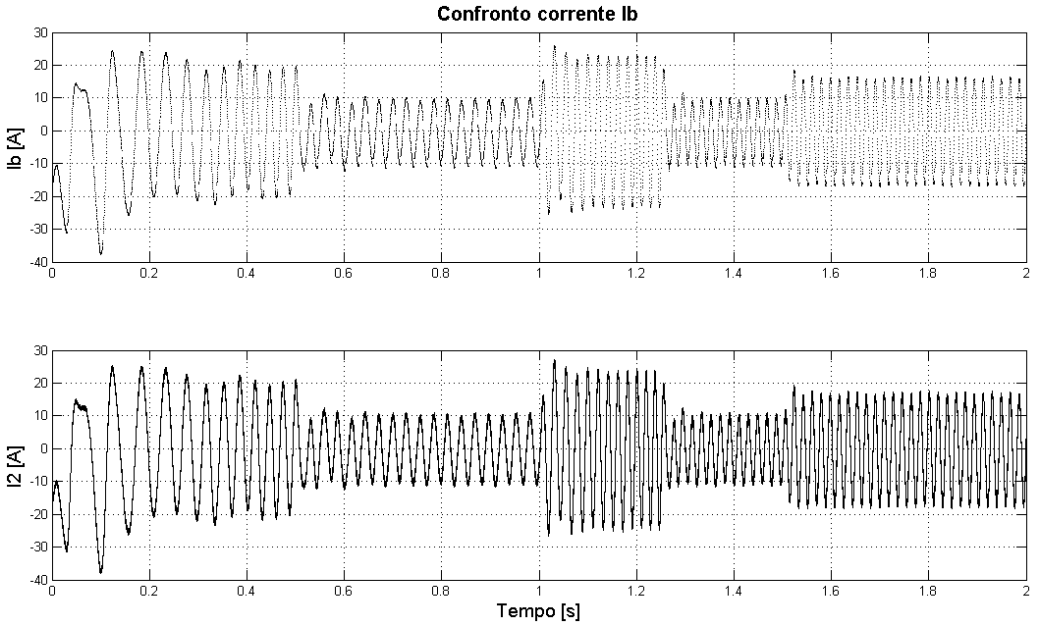


Figura 5.18: Corrente ricostruita e reale della seconda fase del motore

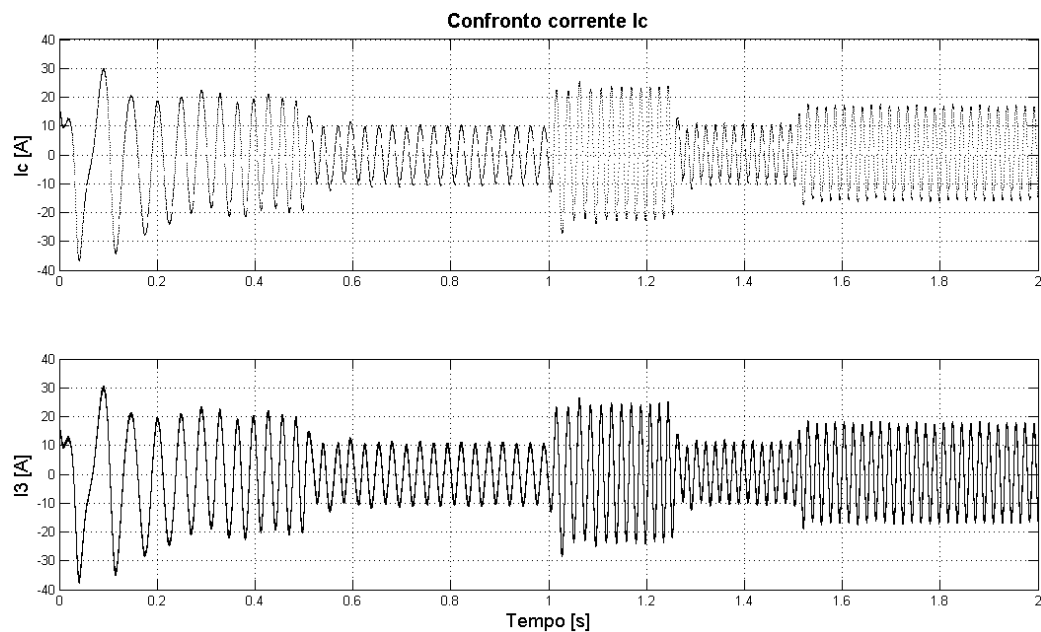


Figura 5.19: Corrente ricostruita e reale della terza fase del motore

Come si vede dalle figure 5.17-18-19, le correnti ricostruite rispecchiano molto bene le reali correnti assorbite dal motore. Infatti se si calcola la differenza tra le reali correnti e le rispettive correnti ricostruite, si ottiene un errore medio di 0.5A e un errore massimo di 1.5A.

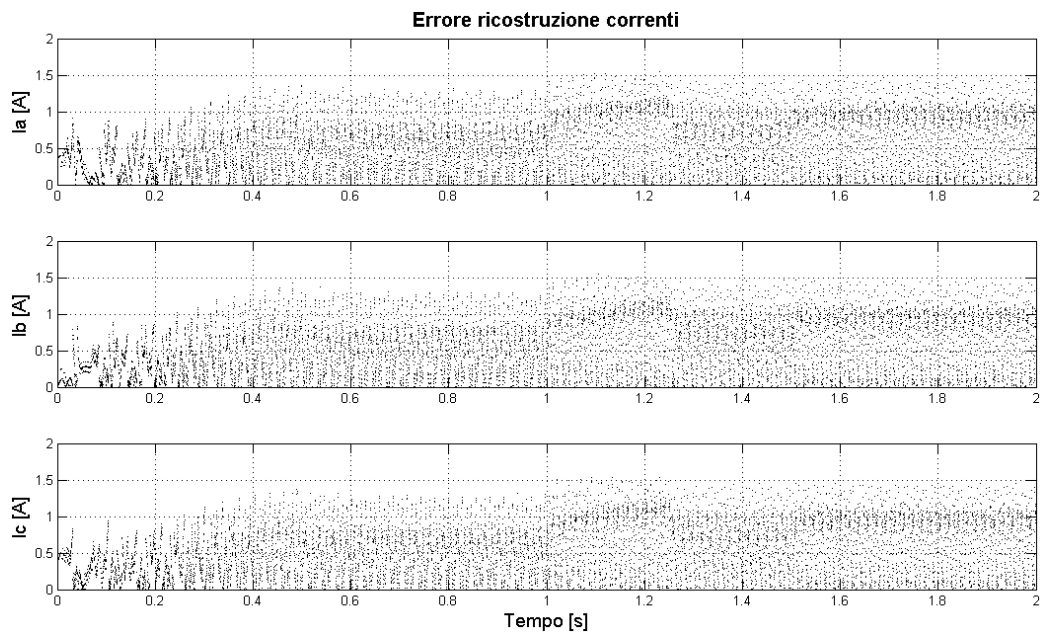


Figura 5.20: Differenza tra le correnti ricostruite e quelle reali

Analizzando meglio le correnti ricostruite (si veda figura 5.21), si può notare una interruzione nell'andamento della corrente dovuta al passaggio da un settore in cui quella corrente è misurata, a un settore in cui invece è calcolata o viceversa.

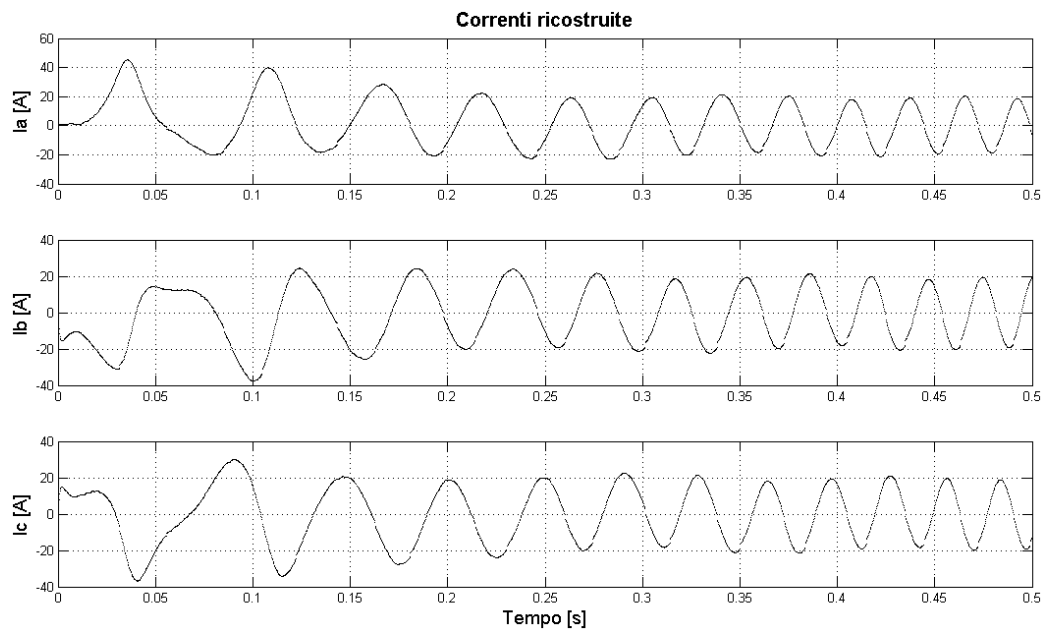


Figura 5.21: Andamento delle correnti ricostruite

Le correnti riportate prima, sono state misurate imponendo un certo intervallo di misura minimo, tenendo conto del tempo morto e del tempo di assestamento della corrente. Se invece misurassimo la corrente durante il tempo morto, la situazione sarebbe quella di figura 5.22, in cui si vede che spesso la corrente misurata è nulla.

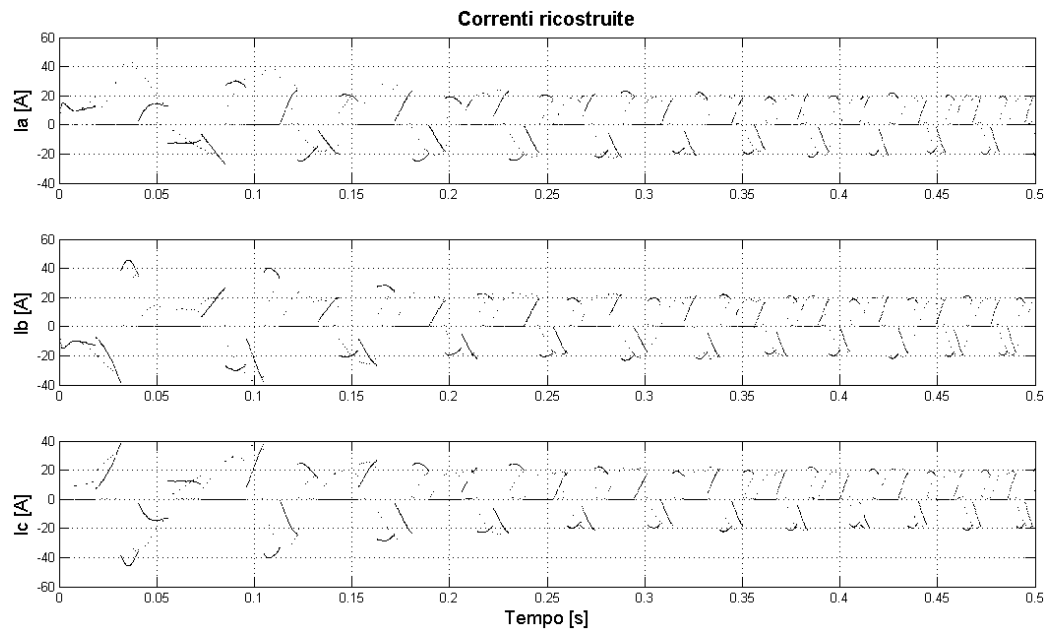


Figura 5.22: Andamento delle correnti ricostruite misurate durante il tempo morto

Infine se misurassimo la corrente non verificando prima di avere un intervallo sufficiente a effettuare la misura, la situazione sarebbe quella di figura 5.23, in cui si nota che spesso la corrente misurata è assegnata ad una fase diversa da quella prevista.

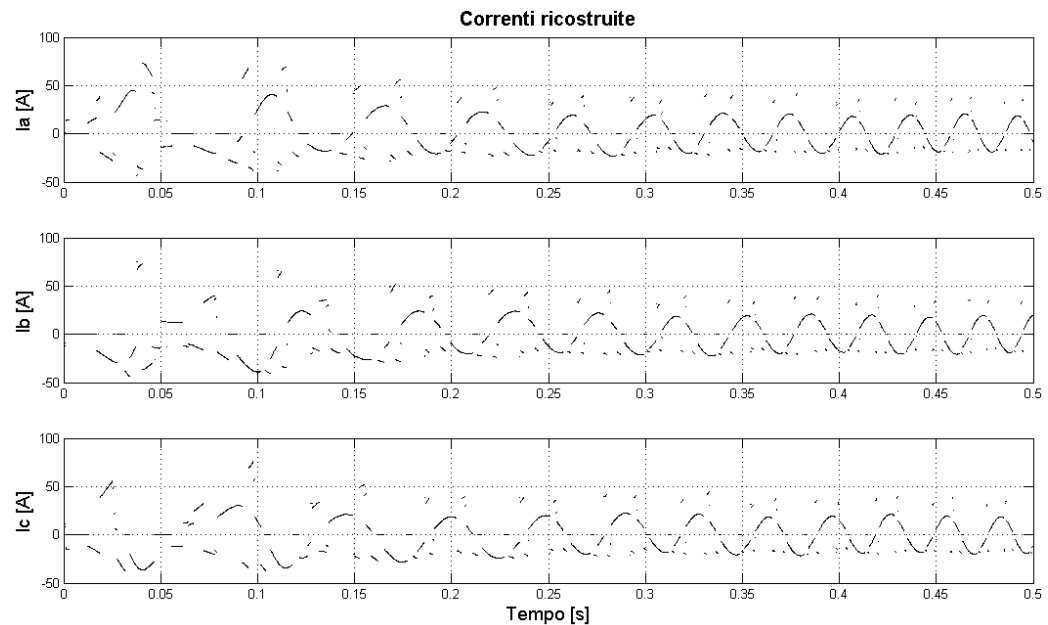


Figura 5.23: Andamento delle correnti ricostruite senza la verifica dell'intervallo di acquisizione



Uno degli svantaggi dell'algoritmo single-shunt è proprio quello di dover modificare gli intervalli di applicazione dei vettori base, per garantire un certo tempo minimo. Questo può avere ripercussioni sulle prestazioni del sistema di controllo, ovvero sulla velocità effettiva del motore. Confrontando però il profilo di velocità e coppia elettromagnetica ottenuti con il sistema di controllo originale, con quelli ottenuti con il sistema di controllo in cui è stato implementato l'algoritmo single-shunt, non si riscontrano particolari variazioni di prestazioni.

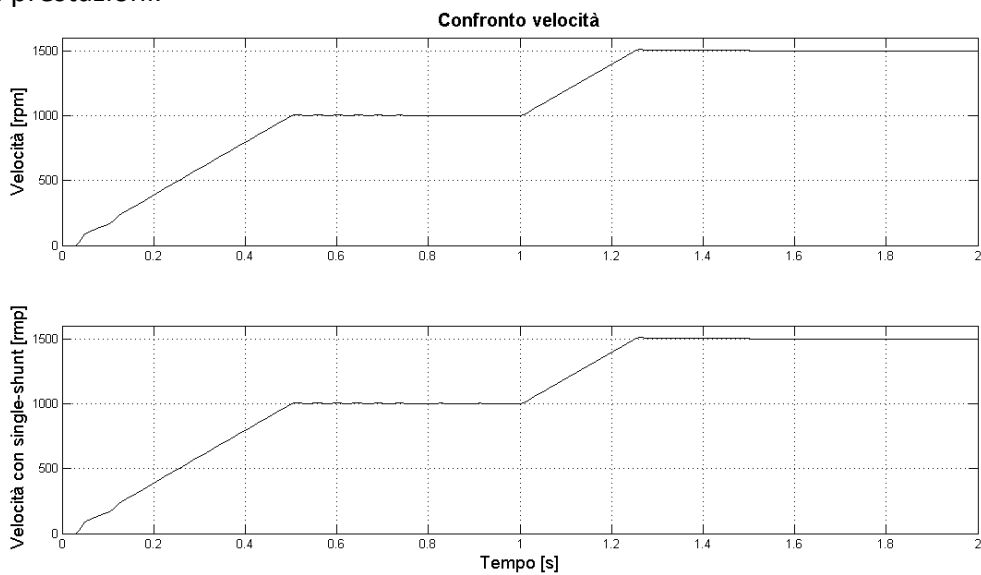


Figura 5.24: Confronto della velocità del motore

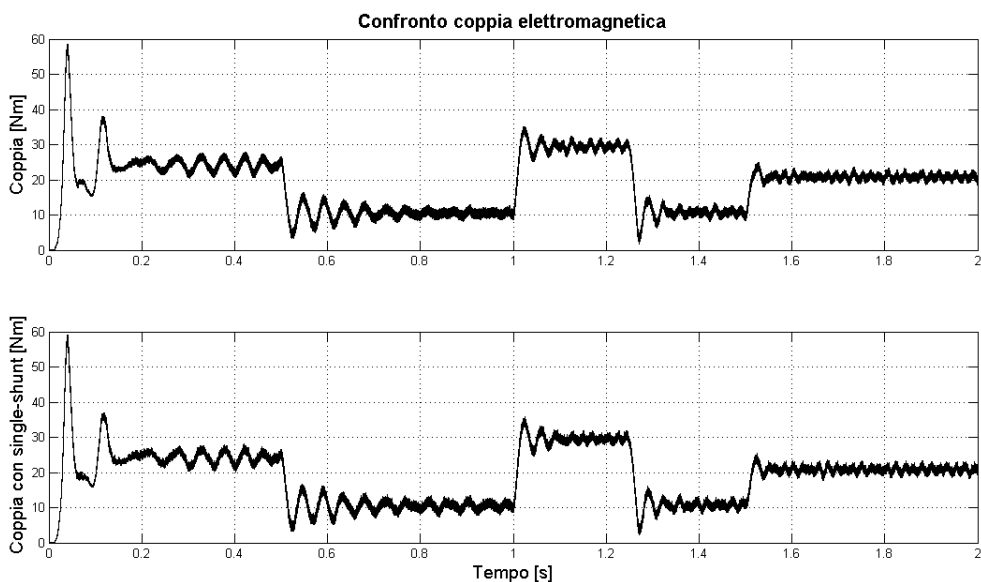


Figura 5.25: Confronto della coppia elettromagnetica del motore

Dopo aver verificato il corretto funzionamento dell'algoritmo single-shunt, è stata fatta una simulazione considerando il modello del motore MEC71 8V 50Hz. In figura 5.26 sono riportati i profili della velocità di riferimento e della coppia resistente utilizzati per la simulazione. Per il carico è stato considerato un andamento quadratico, tipico nel caso di azionamento di pompe; in particolare la coppia resistente è proporzionale al quadrato della velocità, fino al raggiungimento del valore di regime di 1.7Nm.

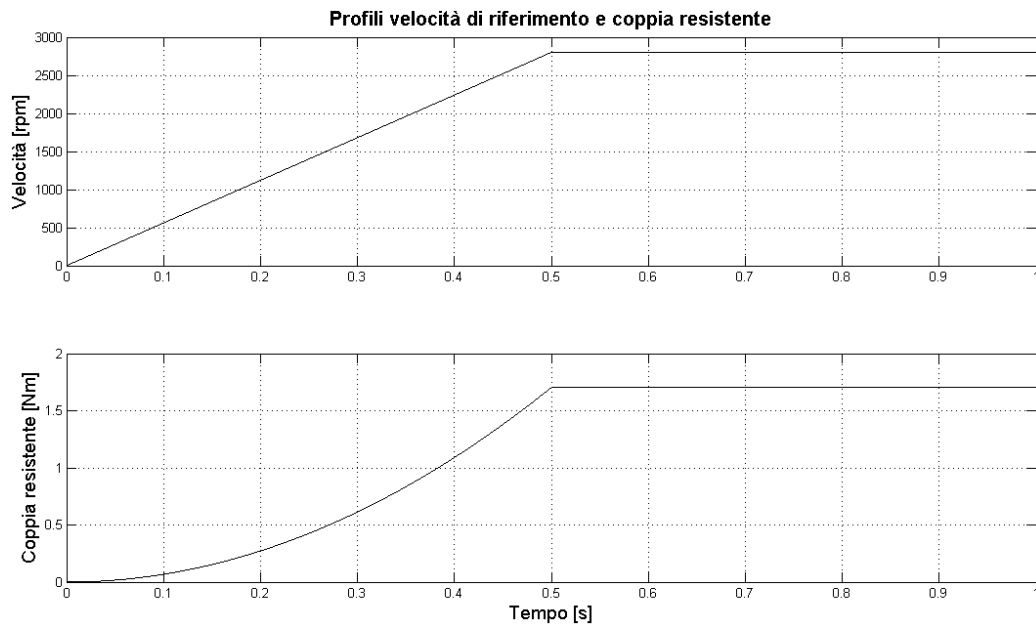


Figura 5.26: Velocità di riferimento e coppia resistente

Confrontando le correnti reali assorbite dal motore (indicate come  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) con quelle ricostruite tramite l'algoritmo single-shunt (indicate come  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), anche in questo caso notiamo una buona corrispondenza.

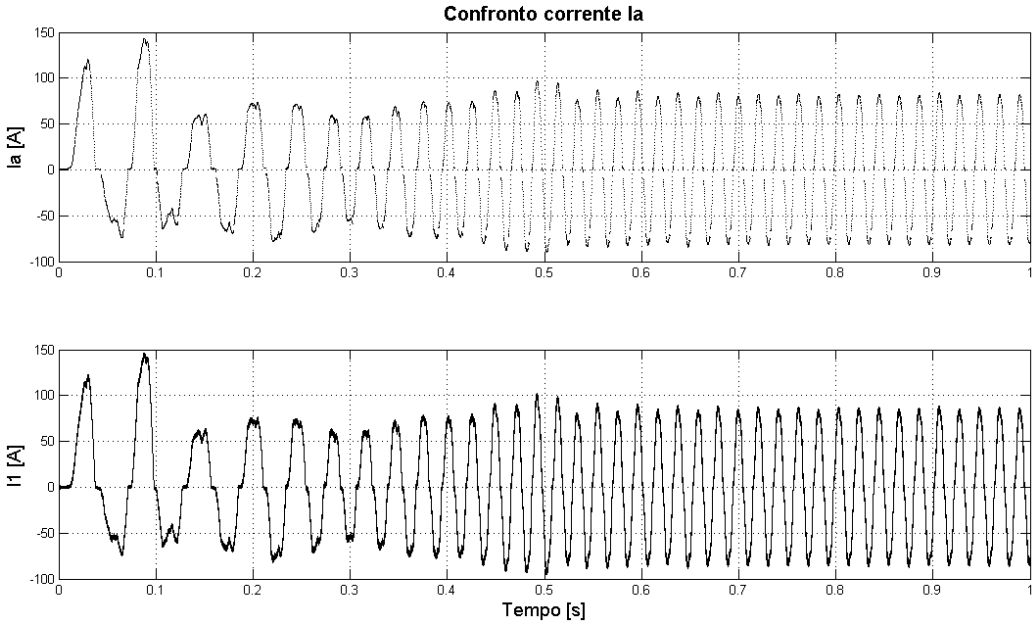


Figura 5.27: Corrente ricostruita e reale della prima fase del motore

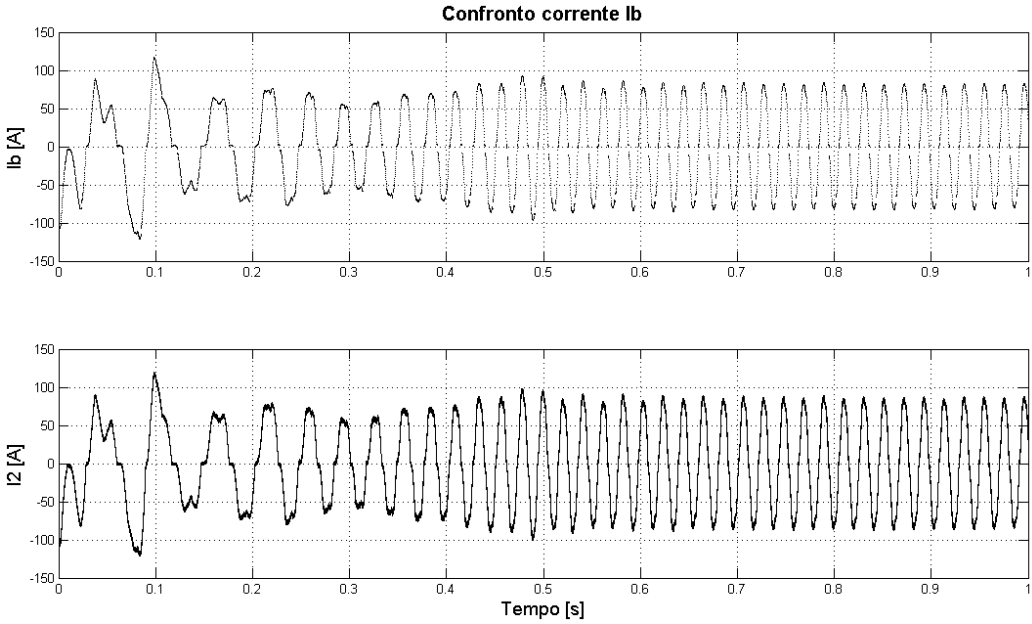


Figura 5.28: Corrente ricostruita e reale della seconda fase del motore

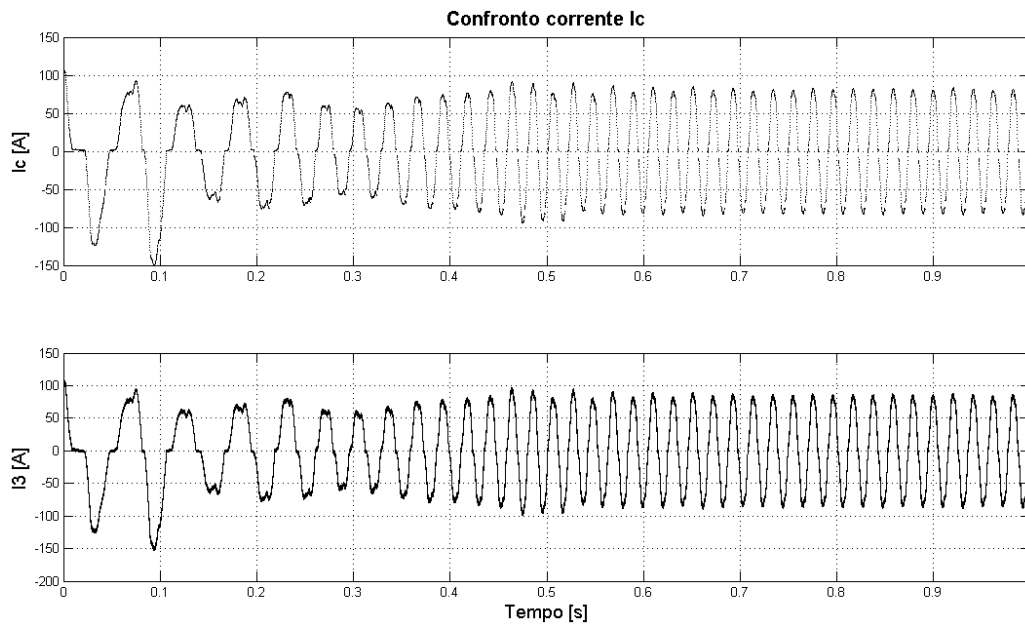


Figura 5.29: Corrente ricostruita e reale della terza fase del motore

Valutando la differenza tra le correnti reali e quelle ricostruite si ottiene infatti un errore medio di 1.7A e un errore massimo di 5A.

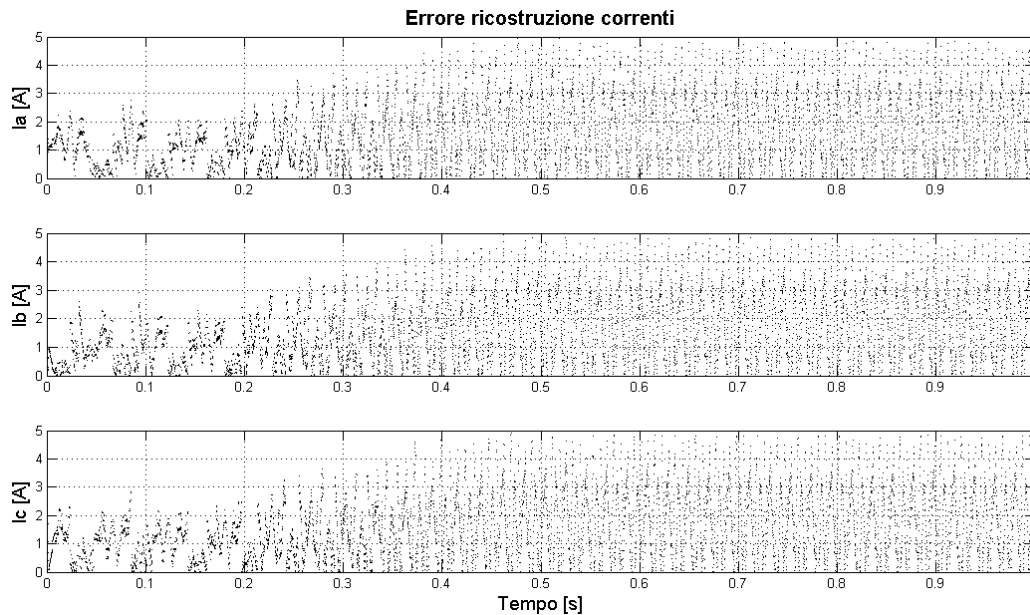


Figura 5.30: Differenza tra le correnti ricostruite e quelle reali

Come è possibile vedere in figura 5.31, i valori di corrente ottenuti durante la simulazione sono prossimi a quelli riscontrati durante la prova a carico nominale del motore MEC71 8V 50Hz.

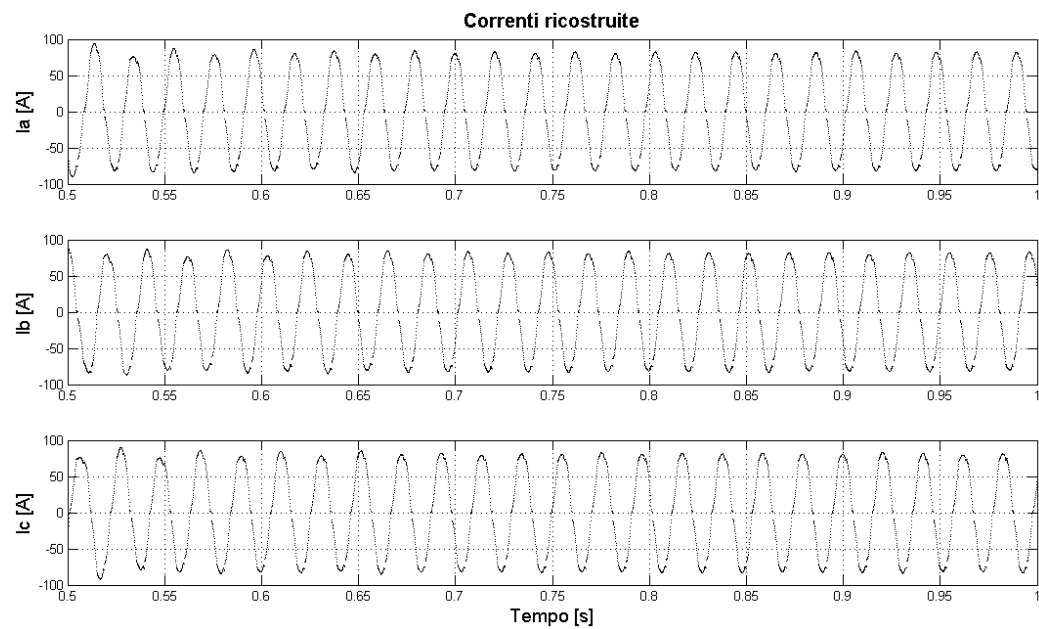


Figura 5.31: Andamento delle correnti ricostruite

## Capitolo 6.

### Conclusioni

La necessità di realizzare un azionamento elettrico a basso costo per una pompa di travaso idrocarburi, ha portato alla ricerca di un motore asincrono trifase idoneo e allo sviluppo di un sistema economico per la misura delle correnti di fase del motore. A conclusione di questo lavoro si intende quindi sottolineare i risultati ottenuti.

Tra i motori asincroni trifase sottoposti a prove sperimentali, si possono considerare non idonei all'applicazione in esame i motori MEC71 24V 50Hz e MEC63 24V 50Hz. Dalla prova a vuoto di questi motori infatti si è visto che il punto di lavoro sarebbe troppo lontano dal ginocchio della caratteristica di magnetizzazione, quindi non si sfrutterebbe appieno la macchina.

I motori MEC71 12V 50Hz e MEC63 12V 50Hz sono risultati idonei per l'applicazione in esame, qualora si disponga di un'alimentazione a 24V. Entrambi i motori presentano un buon rendimento e scorrimento se alimentati a 14V e rispettano il limite massimo di temperatura imposto dalla classe d'isolamento degli avvolgimenti, sia nel funzionamento con ventola di raffreddamento che senza ventola, permettendo in quest'ultimo caso un maggiore grado di protezione IP.

I motori MEC71 8V 50Hz e MEC63 8V 50Hz invece, possono essere impiegati per l'applicazione in esame, sia qualora si disponga di un'alimentazione a 12V, che a 24V. Infatti nel caso di un'alimentazione a 12V, la tensione in uscita dall'inverter sarà la massima possibile, mentre nel caso di un'alimentazione a 24V, l'inverter dovrà essere impostato per fornire una tensione in uscita limitata. Inoltre entrambi i motori rispettano il limite massimo di temperatura imposto dalla classe d'isolamento degli avvolgimenti.

Questi ultimi motori risultano interessanti nel caso in cui si voglia realizzare un unico prodotto per entrambe le fasce di mercato, ovvero un unico azionamento che può funzionare sia a 12V, che a 24V.

Per quanto riguarda l'algoritmo di ricostruzione della corrente trifase, è risultato essere una valida ed economica soluzione al problema della misura delle correnti di fase del motore, consentendo infatti di ottenere una misura piuttosto accurata, senza incidere sulle prestazioni del controllo e con una riduzione dei costi per i sensori di misura. L'algoritmo risulta inoltre di facile

implementazione all'interno della tecnica di modulazione della tensione SVM, senza richiedere particolari risorse in termini di memoria o potenza di calcolo. Tuttavia l'algoritmo presenta dei limiti, sostanzialmente legati alla velocità del sistema di misura della corrente. Infatti se il sistema di misura è troppo lento rispetto alla frequenza di commutazione dell'inverter, la modifica che occorre effettuare per garantire un tempo sufficiente a eseguire la misura, risulterebbe eccessiva, producendo un vettore di tensione medio durante il ciclo dell'SVM diverso da quello richiesto dal controllo.

Per concludere, alcuni sviluppi futuri di questo lavoro potrebbero essere:

- Testare il funzionamento dei motori nell'applicazione reale, ovvero direttamente calettati alla pompa anziché simularla tramite banco freno;
- Utilizzare le correnti ricostruite tramite l'algoritmo single-shunt come feedback per effettuare il controllo del motore, ad esempio all'interno di un classico controllo a orientamento di campo (FOC);

# Bibliografia

- [1] M. Dal Prà *“Confronto tra motori AC e DC”*
- [2] R. Manigrasso, F. Mapelli, M. Mauri *“Azionamenti Elettrici – Parte I: Generalità e Macchine rotanti”*, Pitagora Editrice 2007
- [3] CEI 2-3 EN 60034-1 *Macchine elettriche rotanti “Parte 1: Caratteristiche nominali e di funzionamento”*
- [4] CEI 2-6 EN 60034-2 *Macchine elettriche rotanti “Parte 2: Metodi per la determinazione, mediante prove, delle perdite e del rendimento delle macchine elettriche rotanti”*
- [5] R. Manigrasso, F. Mapelli, M. Mauri *“Azionamenti Elettrici – Parte II: Convertitori e Controllo”*, Pitagora Editrice 2007
- [6] M. Mauri *“Tecniche di Modulazione”* 2000
- [7] AN1299 D. Torres, J. Zambada *“Single-Shunt Three-Phase Current Reconstruction Algorithm for Sensorless FOC of a PMSM”*
- [8] BPRA077 Texas Instruments *“Three phase current measurements using a single line resistor on the TMS320F240”*