

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTROTECNICA
CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE
(DM 509/99)

Estrazione dei parametri equivalenti del motore ad induzione

Relatore: Prof. Giovanni Martinelli

Tutor: Ing. Federico Lovato

Laureando: Pace Alberto

Anno Accademico 2010-2011

Indice

Indice	3
Riassunto	5
Capitolo 1	9
Le prove.....	9
1.1 Premessa.....	9
1.2 Misura in DC della resistenza di statore.....	10
1.3 Prova a vuoto.....	12
1.4 Prova a rotore bloccato.....	16
1.5 Approfondimento sul circuito elettrico equivalente dei motori ad induzione.....	19
Capitolo 2	25
Il motore	25
2.1 Dati di targa ed ingombri	25
2.2 Lamierini Magnetici	30
2.3 Encoder.....	32
Capitolo 3	34
L'inverter	34
3.1 Caratteristiche tecniche ed ingombri.....	34
3.2 Modulo di potenza.....	37
Capitolo 4	40
Risultati	40
4.1 Estrazione della resistenza storica.....	40
4.2 Prova a vuoto : curva magnetizzante.....	40
4.3 Prova a rotore bloccato – Curva caratteristica rotorica	43
4.4 Conclusioni.....	45
Termini e definizioni	47
Strumentazione.....	49
Simboli e termini abbreviati.....	51
Riferimenti bibliografici	53

Riassunto

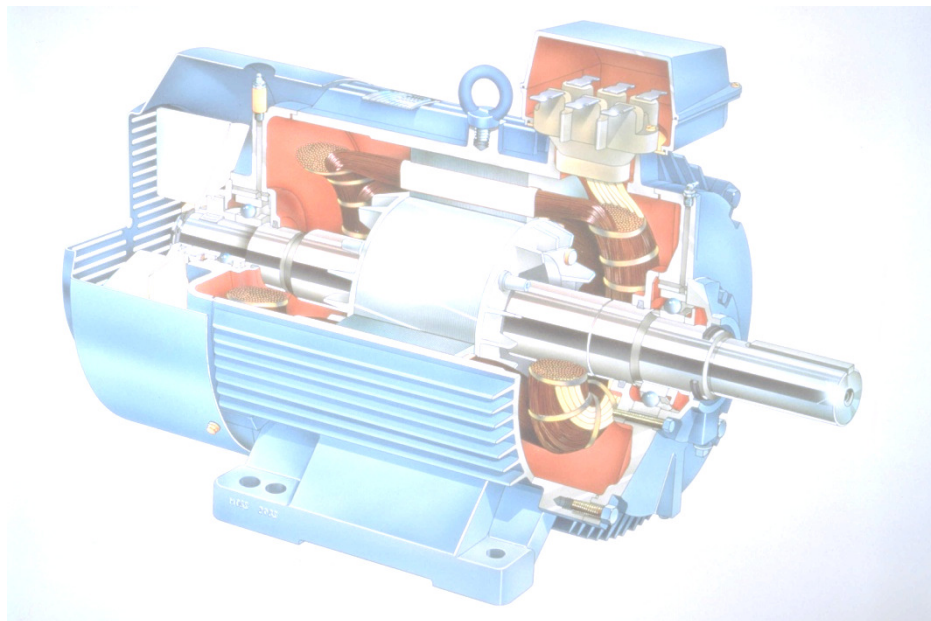
L'avvento delle tecniche di controllo vettoriali ha permesso di ottenere, con i motori asincroni, prestazioni dinamiche comparabili con quelle ottenute da azionamenti con motori in corrente continua. Allo stato attuale diverse sono le soluzioni proposte la cui complessità ed onerosità in termini di hardware e software è strettamente legata alle prestazioni ottenibili.

Lo scopo della presente tesi è di stabilire e specificare i metodi per determinare i parametri equivalenti del motore trifase ad induzione per poi essere utilizzati nel controllo "ad orientamento di campo" comunemente implementato negli inverter a controllo vettoriale.

L'identificazione dei parametri viene effettuata mediante tre prove: una misura della resistenza statorica in DC, una prova a vuoto ed una prova a rotore bloccato.

L'esecuzione di tali prove ha richiesto una modifica nel software di controllo dell'inverter in modo tale che potesse essere controllato in tensione piuttosto che in corrente.

L'acquisizione dei parametri permette di fornire un DTSH completo sulle caratteristiche dei motori per semplificare e facilitare la fase di fine tuning per il controllo.



Capitolo 1

Le prove

1.1 Premessa

I parametri del circuito equivalente delle macchine ad induzione sono cruciali quando si considerano avanzate tecniche di controllo (ad esempio il controllo vettoriale). Tali parametri non sono però ben definiti quando la macchina esce dalla produzione. L'obiettivo quindi è quello di fornire una procedura che permetta l'estrazione dei parametri del motore asincrono utilizzati per l'inverter vettoriale:

- Resistenza statorica (R_s);
- Resistenza rotorica (R'_r);
- Induttanza di magnetizzazione (L_m);
- Induttanza di dispersione di statore e rotore (L_{ls}, L'_{lr});

Le prove più comuni per determinare i parametri del motore ad induzione, sono la prova a vuoto e quella a rotore bloccato.

Il metodo presentato nel seguente documento si basa sul tradizionale modello a T relativa ad una fase del circuito equivalente della macchina ad induzione: tale modello include una resistenza R_{fe} in parallelo alla reattanza X_m di magnetizzazione, dovuta alle perdite nel ferro (vedi figura 1). I parametri rotorici sono riferiti al lato statore; ciò è indicato dalla presenza di un apostrofo ' sul simbolo.

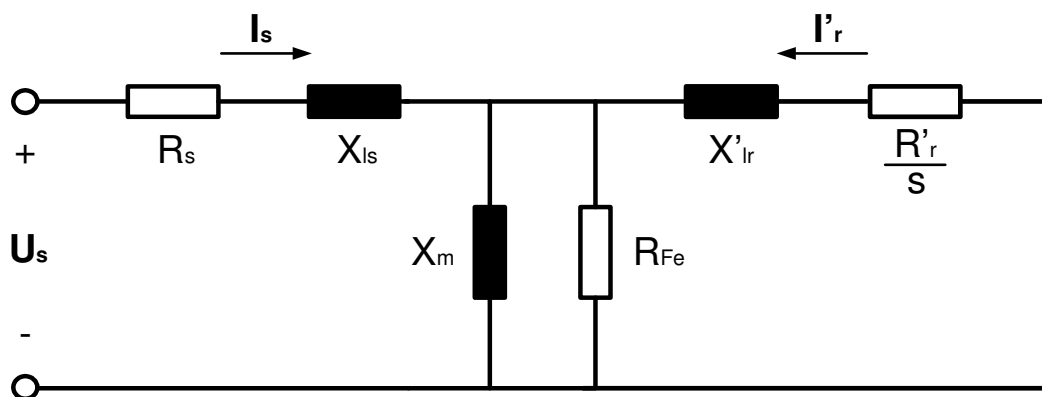


Figure 1 – circuito equivalente con modello a T della macchina asincrona

Si noti che quando si usa il metodo del modello a T del circuito equivalente , tutte le tensioni , correnti e impedenze si riferiscono alla singola fase della relativa macchina trifase con connessione a Y (a stella) ; le potenze attive e reattive si riferiscono a macchina completa
 Gli strumenti necessari per eseguire correttamente la sequenza di test sono:

- Uno strumento per la misura delle piccolo resistenze (microhmetro);
- Uno strumento di misura per la corrente (amperometro);
- Uno strumento di misura per la tensione AC (voltmetro);
- Uno strumento per la misura della Potenza elettrica (wattmetro);
- Un alimentatore trifase che fornisca una frequenza e tensione variabile .

1.2 Misura in DC della resistenza di statore

Deve essere eseguita in corrente continua, con un adeguato metodo di misura, tenendo conto del fatto che si tratta quasi sempre di una resistenza di piccolo valore . Altra cosa essenziale per una corretta misurazione è la temperatura con la quale viene eseguita la misura. Il valore della resistenza di un avvolgimento è fortemente influenzata dalla temperatura. E' importante che la macchina sia stata lungamente a riposo e che l'ambiente del laboratorio non abbia nel contempo subito importanti sbalzi termici. Solo così si può ritenere la temperatura degli avvolgimenti pari a quella ambientale ed uniforme lungo l'avvolgimento .

Si presenterà quindi la necessità di correggere il valore resistivo in funzione della temperatura d'esercizio del motore e della classe termica di isolamento

Thermal class of the insulation system	Reference temperature
105 °C (A,E)	75 °C
130 °C (B)	95 °C
155 °C (F)	115 °C
180 °C (H)	135 °C

Table 1 – Reference temperature

Nella figura 2 è illustrata la configurazione del sistema per la misura in continua della resistenza statorica nel caso di avvolgimento a Y

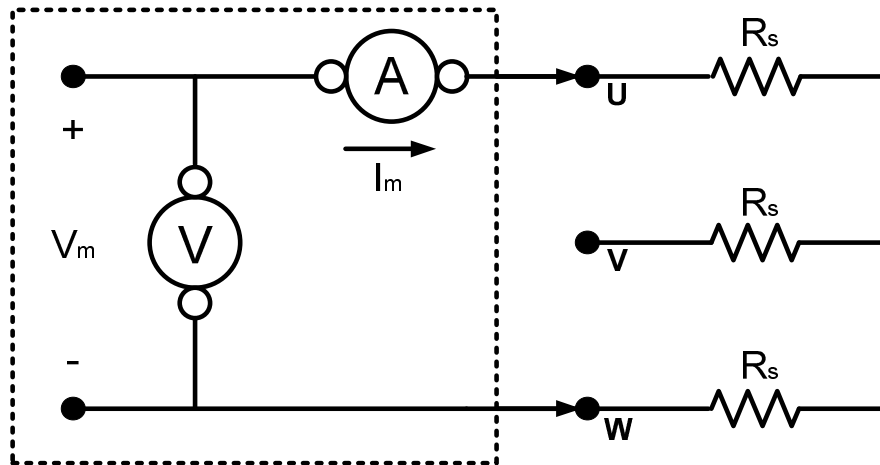


Figura 2 – Configurazione per la misura della resistenza degli avvolgimenti di statore

In questo test è necessario misurare il valore resistivo per ogni combinazione delle fasi di statore (U-V, U-W, V-W) prendendo a due a due i morsetti degli avvolgimenti. Per una corretta misura è necessario misurarne la temperatura con una sonda termica .

Per determinare i parametri resistivi del motore nel seguente paragrafo viene adottata la formula:

$$R^{T_r} = R^{T_m} \frac{\frac{1}{\alpha} + T_r}{\frac{1}{\alpha} + T_m} \quad (\text{F.1})$$

Il valore R^{T_m} , misurato alla temperatura T_m , è riportato alla temperatura T_r di riferimento. Il reciproco del coefficiente di temperatura del rame equivale a 235 mentre per l'alluminio è 225

La resistenza media di fase a temperatura ambiente per una macchina trifase con collegamento a Y equivale a :

$$R_s = \frac{1}{3} \left(\frac{R_{U-V}}{2} + \frac{R_{U-W}}{2} + \frac{R_{V-W}}{2} \right) = \frac{1}{6} (R_{U-V} + R_{U-W} + R_{V-W}) \quad (\text{F.2})$$

Nel caso di avvolgimento trifase a Δ , la resistenza media di fase equivale a :

$$R_s = \frac{1}{3} \left(\frac{3}{2} R_{U-V} + \frac{3}{2} R_{U-W} + \frac{3}{2} R_{V-W} \right) = \frac{1}{2} (R_{U-V} + R_{U-W} + R_{V-W}) \quad (\text{F.3})$$

Il modello in Figura 1 suppone che il motore sia connesso ad Y , così per il nostro scopo pratico si calcola la resistenza di fase come indicata in F.2

Esempio: misura della resistenza in continua (rame, classe B)

Valori misurati delle resistenze concatenate a @ 20°C:

$$R_{U-V}^{20^{\circ}C} = 0.0046\Omega$$

$$R_{U-W}^{20^{\circ}C} = 0.0045\Omega$$

$$R_{V-W}^{20^{\circ}C} = 0.0044\Omega$$

Valori misurati delle resistenze riportate a @ 95°C:

$$R_{U-V}^{95^{\circ}C} = R_{U-V}^{20^{\circ}C} \frac{235 + 95}{235 + 20} = 0.0059\Omega$$

$$R_{U-W}^{95^{\circ}C} = R_{U-W}^{20^{\circ}C} \frac{235 + 95}{235 + 20} = 0.0058\Omega$$

$$R_{V-W}^{95^{\circ}C} = R_{V-W}^{20^{\circ}C} \frac{235 + 95}{235 + 20} = 0.0057\Omega$$

Resistenza di fase statorica @ 95°C:

$$R_s^{95^{\circ}C} = \frac{1}{6} (R_{U-V}^{95^{\circ}C} + R_{U-W}^{95^{\circ}C} + R_{V-W}^{95^{\circ}C}) = 0.0029\Omega$$

1.3 Prova a vuoto

La prova a vuoto, come la prova a circuito aperto del trasformatore, dà informazioni riguardanti la corrente di eccitazione e perdite rotazionali. Il test si svolge applicando la tensione e la frequenza nominale agli avvolgimenti di statore. La bassa potenza assorbita dalla macchina tiene conto delle perdite nel rame di statore, delle perdite nel ferro sempre di statore e delle perdite meccaniche per attriti e per effetto ventilante. Il rotore ruota praticamente in sincrono con il campo magnetico quindi lo scorrimento è prossimo allo zero e di conseguenza le perdite per isteresi e correnti parassite nel ferro di rotore sono trascurabili.

Nel modello a T del circuito equivalente la prova a vuoto viene rappresentata nel seguente modo (Figura 3)

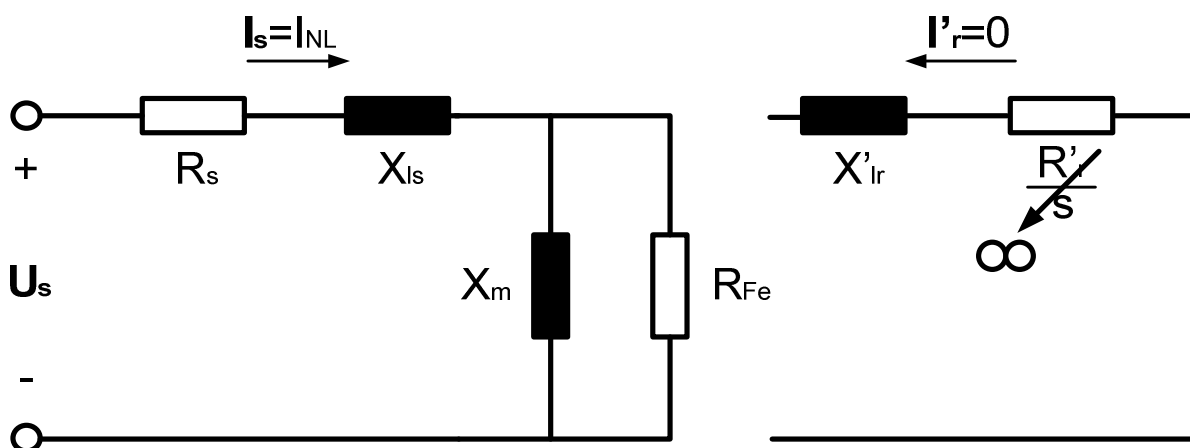


Figure 3 – Circuito equivalente della prova a vuoto

L'impostazione del sistema di prova è rappresentato in figura 4.

I valori misurati sono la corrente e l'angolo di sfasamento con la tensione. In questo modo possiamo calcolare la potenza totale assorbita dalla macchina. Assumendo che R_{Fe} è molto più grande di R_s e X'_{ls} possiamo calcolare R_{Fe} e L_m dal circuito equivalente.

Prova motore a vuoto		
Tensioni concatenate	U_{NL}	V_{rms}
Correnti di fase	I_{NL}	A_{rms}
Frequenza	f_s	Hz
Potenza	P_{NL}	W

Table 2 – Valori misurati durante la prova a vuoto

Per ottenere valori più precisi nella misura è opportuno riferire tutte le misure rilevate alla temperatura T_m , alla temperatura di riferimento T_r come indicato in tabella 1.

Le formule ed i calcoli sono elencati di seguito.

- Potenza di fase

$$P_{ph} = \frac{P_{NL}}{3} \quad [\text{W}]$$

- Tensione di fase

$$U_{ph} = \frac{U_{NL}}{\sqrt{3}} \quad [\text{V}_{rms}]$$

- Resistenza statorica riferita alla temperatura di riferimento

$$R_S^{T_r} = R_S^{T_m} \frac{\frac{1}{\alpha_{Cu}} + T_r}{\frac{1}{\alpha_{Cu}} + T_m} \quad [\Omega]$$

- Power factor

$$\cos(\varphi_{NL}) = \frac{P_{ph}}{U_{ph} I_{NL}} \quad [-]$$

- Angolo di sfasamento

$$\varphi_{NL} \quad [^\circ]$$

- Corrente reattiva

$$I_{X_m} = I_{NL} \sin(\varphi_{NL}) \quad [A_{\text{rms}}]$$

- Corrente attiva

$$I_{R_{Fe}} = I_{NL} \cos(\varphi_{NL}) \quad [A_{\text{rms}}]$$

- Reattanza di magnetizzazione

$$X_m = \frac{U_{ph}}{I_{X_m}} \quad [\Omega]$$

- Induttanza di magnetizzazione

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f_s} \quad [H]$$

- Resistenza R_{Fe}

$$R_{Fe} = \frac{U_{ph}}{I_{R_{Fe}}} \quad [\Omega]$$

- Perdite rotazionali

$$P_{RL} = P_{NL} - (3R_s^T I_{NL}^2) \quad [W]$$

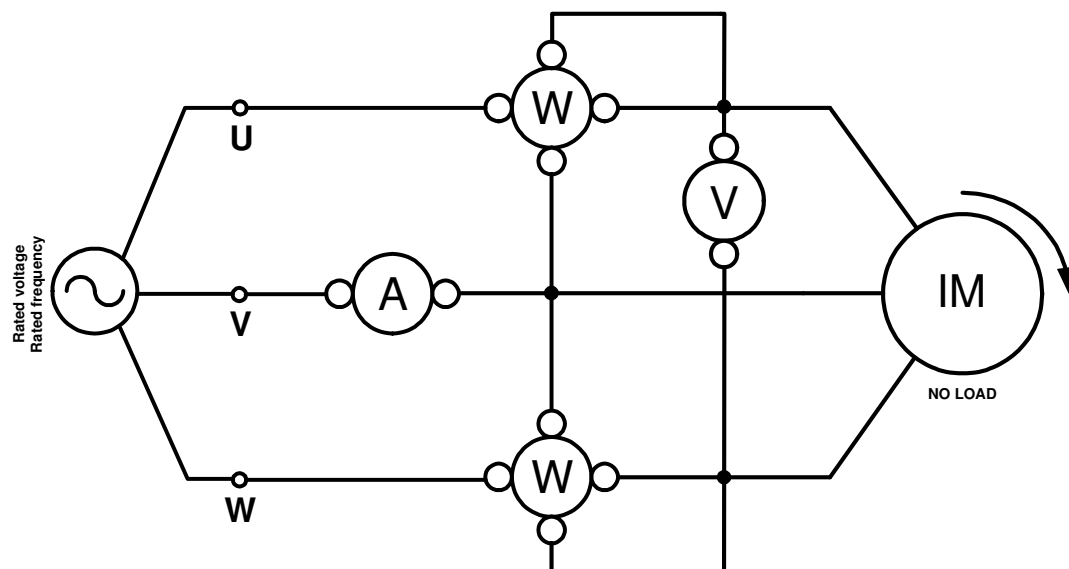


Figure 4 – Configurazione di sistema per la prova a vuoto

Esempio : Prova a vuoto

Valore dalla misura in DC @ 20 °C:

$$\text{Resistenza statorica} \dots \dots \dots R_S^{20^\circ C} = 0.00225\Omega$$

Valori misurati durante la prova a vuoto :

$$\text{Frequenza di statore} \dots \dots \dots f_s = 110.00\text{Hz}$$

$$\text{Tensioni di linea} \dots \dots \dots U_{NL} = 22.50\text{V}$$

$$\text{Correnti di linea} \dots \dots \dots I_{NL} = 68.31\text{A}$$

$$\text{Potenza in ingresso} \dots \dots \dots P_{NL} = 350.98\text{W}$$

Potenza della singola fase :

$$P_{ph} = \frac{P_{NL}}{3} = \frac{350.98}{3} = 116.99\text{W}$$

Tensione di fase:

$$U_{ph} = \frac{U_{NL}}{\sqrt{3}} = \frac{22.50}{\sqrt{3}} = 12.99\text{V}$$

Resistenza di statore alla temperature di riferimento (95 °C - Classe B)

$$R_S^{95^\circ C} = R_S^{20^\circ C} \frac{\frac{1}{\alpha_{Cu}} + 95}{\frac{1}{\alpha_{Cu}} + 20} = 0.00225 \frac{235 + 95}{235 + 20} = 0.00291\Omega$$

Fattore di potenza :

$$\cos(\varphi_{NL}) = \frac{P_{ph}}{U_{ph} I_{NL}} = \frac{116.99}{12.99 \cdot 68.31} = 0.132 \quad \rightarrow \quad \varphi_{NL} = \cos^{-1}(0.132) = 82.4^\circ$$

Corrente attiva:

$$I_{R_{Fe}} = I_{NL} \cos(\varphi_{NL}) = 68.31 \cdot 0.132 = 9.017\text{A}$$

Corrente reattiva:

$$I_{X_m} = I_{NL} \sin(\varphi_{NL}) = 68.31 \cdot 0.991 = 67.70\text{A}$$

Reattanza/induttanza magnetizzante :

$$X_m = \frac{U_{ph}}{I_{X_m}} = \frac{12.99}{67.70} = 0.1919\Omega \rightarrow L_m = \frac{X_m}{2\pi f_s} = \frac{0.1919}{2\pi \cdot 110.00} = 0.00028H = 0.28mH$$

Resistenza dovuta alle perdite nel ferro :

$$R_{Fe} = \frac{U_{ph}}{I_{R_{Fe}}} = \frac{12.99}{9.017} = 1.44\Omega$$

Perdite rotazionali :

$$P_{RL} = P_{NL} - (3R_S^{95^\circ C} I_{NL}^2) = 350.98 - [3 \cdot 0.00291 \cdot (68.31)^2] = 310.2W$$

1.4 Prova a rotore bloccato

Il test a rotore bloccato, similmente alla prova in corto circuito del trasformatore, fornisce le informazioni relative alle reattanze di dispersione e alla resistenza rotorica. Al rotore viene impedito di girare, mentre viene applicata una tensione tale che negli avvolgimenti di statore circoli la corrente nominale. Poiché lo scorrimento s è unitario, il circuito equivalente si riduce al seguente schema a T. (figura 5).

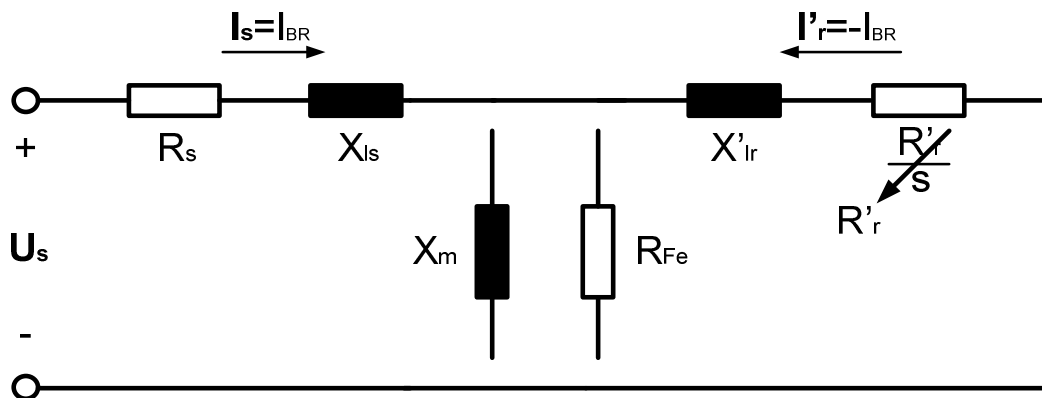


Figure 5 – Equivalent circuit for blocked rotor test

La resistenza R'_r e la reattanza X'_{l2} è molto più piccola della resistenza R_{Fe} . Per questo motivo parte del circuito si trascura.

La configurazione del sistema di prova è evidenziata in Figure 6.

I valori misurati durante la prova a rotore bloccato sono evidenziati nella seguente tabella.

LOCKED ROTOR TEST

Line-to-line voltage	U_{BR}	V_{rms}
Phase current	I_{BR}	A_{rms}
Frequency	f_s	Hz
Power	P_{BR}	W

Table 3 – Valori misurati nella prova a rotore bloccato

Assumendo di conoscere R_S ed i valori nella tabella 3, possiamo calcolare L_{ls} , L'_{lr} e R'_r , come mostrato di seguito.

- Potenza di fase:

$$P_{ph} = \frac{P_{BR}}{3} \quad [W]$$

- Tensione di fase:

$$U_{ph} = \frac{U_{BR}}{\sqrt{3}} \quad [V]$$

- Power factor:

$$\cos(\varphi_{BR}) = \frac{P_{ph}}{U_{ph} I_{BR}} \quad [-]$$

- Angolo di sfasamento:

$$\varphi_{BR} \quad [^\circ]$$

- Impedenza a rotore bloccato:

$$Z_{BR} = \frac{U_{ph}}{I_{BR}} \quad [\Omega]$$

- Resistenza a rotore bloccato alla temperature di rilevamento:

$$R_{BR}^{T_m} = Z_{BR} \cos(\varphi_{BR}) \quad [\Omega]$$

- Resistenza a rotore bloccato alla temperatura di riferimento:

$$R_{BR}^{T_r} = R_{BR}^{T_m} \frac{\frac{1}{\alpha_{Al}} + T_r}{\frac{1}{\alpha_{Al}} + T_m} \quad [\Omega]$$

- Resistenza rotorica alla temperature di riferimento:

$$R'_r = R_{BR}^{T_r} - R_S \quad [\Omega]$$

- Reattanza a rotore bloccato:

$$X_{BR} = Z_{BR} \sin(\varphi_{BR}) \quad [\Omega]$$

$$X_{BR} = X_{ls} + X'_{lr} \quad [\Omega]$$

- Reattanza di dispersione rotorica/statorica:

$$X_{ls} = X'_{lr} = \frac{X_{BR}}{2} \quad [\Omega]$$

- induttanza di dispersione rotorica/statorica

$$L_{ls} = L'_{lr} = \frac{X_{ls}}{2\pi f_s} = \frac{X'_{lr}}{2\pi f_s} \quad [\text{H}]$$

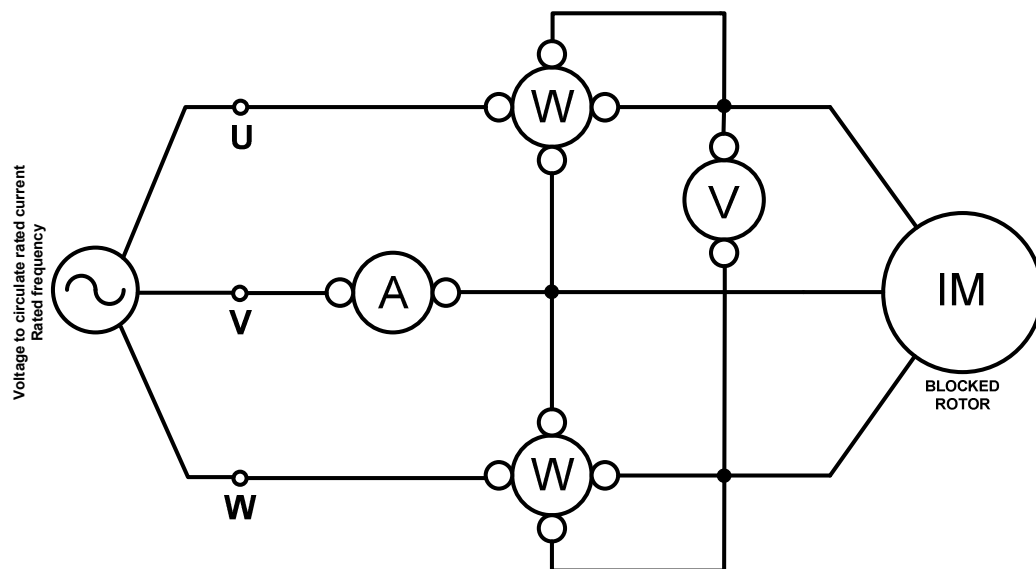


Figure 6 – configurazione di sistema per prova a rotore bloccato

Esempio : prova a rotore bloccato

Valore dalla misura in DC @ 20 °C:

Resistenza di statore..... $R_S^{20^\circ\text{C}} = 0.00225\Omega$

Valori misurati durante la prova:

Frequenza di statore $f_s = 6.80\text{Hz}$

Tensione di linea $U_{BR} = 4.35\text{V}$

Correnti di linea $I_{BR} = 450.07\text{A}$

Potenza di ingresso $P_{BR} = 3235.00\text{W}$

Potenza di fase:

$$P_{ph} = \frac{P_{BR}}{3} = \frac{3235.00}{3} = 1078.33W$$

Tensione di fase:

$$U_{ph} = \frac{U_{BR}}{\sqrt{3}} = \frac{4.35}{\sqrt{3}} = 2.51V$$

Fattore di Potenza :

$$\cos(\varphi_{BR}) = \frac{P_{ph}}{U_{ph} I_{BR}} = \frac{1078.33}{2.51 \cdot 450.07} = 0.955 \quad \rightarrow \quad \varphi_{BR} = \cos^{-1}(0.955) = 17.25^\circ$$

Impedenza a rotore bloccato :

$$Z_{BR} = \frac{U_{ph}}{I_{BR}} = \frac{2.51}{450.07} = 0.00558\Omega$$

Resistenza a rotore bloccato alla temperatura misurata:

$$R_{BR}^{20^\circ C} = Z_{BR} \cos(\varphi_{BR}) = 0.00558 \cdot 0.955 = 0.00533\Omega$$

Resistenza a rotore bloccato alla temperature di riferimento :

$$R_{BR}^{95^\circ C} = R_{BR}^{20^\circ C} \frac{\frac{1}{\alpha_{Al}} + 95}{\frac{1}{\alpha_{Al}} + 20} = 0.00533 \frac{225 + 95}{225 + 20} = 0.00696\Omega$$

Resistenza di rotore alla temperatura di riferimento :

$$R_r^{95^\circ C} = R_{BR}^{95^\circ C} - R_s^{95^\circ C} = 0.00696 - 0.00291 = 0.00405\Omega = 4.05m\Omega$$

Reattanza di rotore bloccato :

$$X_{BR} = Z_{BR} \sin(\varphi_{BR}) = 0.00558 \cdot 0.297 = 0.00166\Omega$$

Reattanza di dispersione di store/rotore:

$$X_{ls} = X'_{lr} = \frac{X_{BR}}{2} = \frac{0.00166}{2} = 0.00083\Omega$$

Induttanza di dispersione di store/rotore:

$$L_{ls} = L'_{lr} = \frac{X_{ls}}{2\pi f_s} = \frac{X'_{lr}}{2\pi f_s} = \frac{0.00083}{2\pi \cdot 6.80} = 19.43\mu H$$

1.5 Approfondimento sul circuito elettrico equivalente dei motori ad induzione

Per rappresentare il circuito elettrico equivalente che descrive un motore asincrono trifase si è scelto il sistema di riferimento solidale con lo statore . Le equazioni vettoriali di statore e di rotore , in questo sistema di riferimento sono :

$$\begin{aligned} \overline{u_s} &= R_s \overline{i_s} + \frac{d\overline{\lambda_s}}{dt} & \text{(EQ. A.1)} \\ \overline{\lambda_s} &= \overline{\lambda_{ss}} + \overline{\lambda_{sr}} = L_s \overline{i_s} + L_m \overline{i_r} \end{aligned}$$

$$0 = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\lambda}_R}{dt} - j\omega_{me} \bar{\lambda}_R \quad (\text{EQ. A.2})$$

$$\bar{\lambda}_R = \bar{\lambda}_{RR} + \bar{\lambda}_{RS} = L_R \bar{i}_R + L_m \bar{i}_S$$

Per la prima coppia di equazioni EQ. A.1: \bar{u}_s è il vettore relativo alla tensione di statore, \bar{i}_s e \bar{i}_r sono i vettori delle correnti di statore e rotore, $\bar{\lambda}_s$ è il vettore del flusso di statore, R_s è la resistenza di statore, L_s è l'induttanza di statore media, L_m mutua induttanza di magnetizzazione, $\bar{\lambda}_{ss}$ è il flusso magnetico generato da statore e concatenato col statore, $\bar{\lambda}_{sr}$ è il flusso magnetico generato da rotore e concatenato con lo statore. Per la seconda coppia di equazioni EQ. A.2: ω_{me} è la velocità angolare elettrica, $\bar{\lambda}_r$ è il vettore relative al flusso di rotore, $\bar{\lambda}_{rr}$ è il flusso magnetico generato dal rotore e concatenato col rotore, $\bar{\lambda}_{rs}$ è il flusso magnetico generato dal rotore e concatenato con lo statore.

Le equazioni EQ. A.1 e EQ. A.2 permettono di disegnare il seguente schema equivalente:

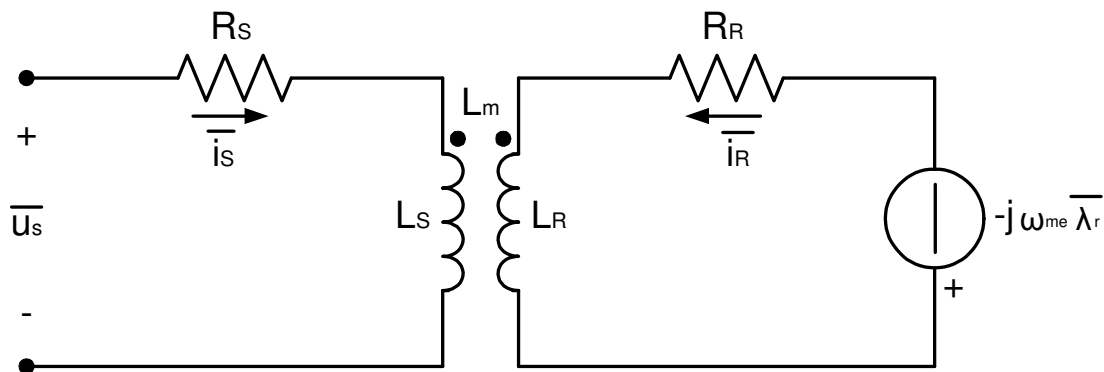


Figura 7 - primo schema elettrico equivalente del motore ad induzione

Lo schema elettrico equivalente è riferito al modello dinamico matematico del motore per il quale tutti i valori sono vettori spaziali. In condizioni sinusoidali stazionarie vi è una corrispondenza matematica tra i vettori spaziali ed i fasori, così il circuito in figura 7 può esser letto come circuito equivalente in condizioni sinusoidali.

Genericamente ogni mutua induttanza può essere rappresentata come un sistema a doppia porta di induttanze, mettendo in evidenza quelle di dispersione, (Figura 8).

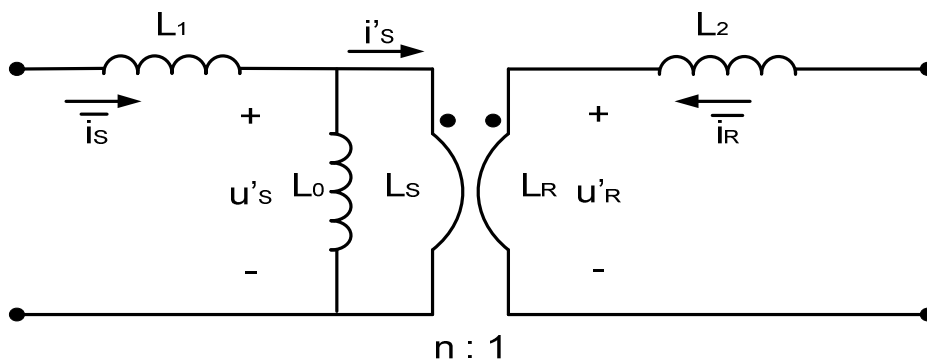


Figure 8 – Equivalent circuit of a mutual inductance

Qualsiasi sia il rapporto spire n del trasformatore ideale, in riferimento al circuito equivalente del motore asincrono, abbiamo le seguenti relazioni :

$$\begin{cases} L_S = L_1 + L_0 \\ L_m = \frac{L_0}{n} \\ L_R = L_2 + \frac{L_0}{n^2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L_0 = nL_m \\ L_1 = L_S - nL_m \\ L_2 = L_R - \frac{L_m}{n} \end{cases} \quad (\text{EQ. A.3})$$

Ora è possibile inserire lo schema di **Fig 8** in **Fig 7** , potendo in tal modo riferire al primario , tutti i valori del secondario . In questo modo siamo in grado di eliminare il trasformatore ideale

L'equazione di tensione sul secondario è :

$$\overline{u'_R} = -R_R \overline{i'_R} - \left(L_R - \frac{L_m}{n} \right) \frac{d\overline{i'_R}}{dt} + j\omega_{me} \overline{\lambda}_R \quad (\text{EQ. A.4})$$

Moltiplicando entrambi i membri per il rapporti di trasformazione n abbiamo :

$$\begin{aligned} \overline{u'_S} &= -nR_R \overline{i'_R} - (nL_R - L_m) \frac{d\overline{i'_R}}{dt} + jn\omega_{me} \overline{\lambda}_R \\ &= n^2 R_R \overline{i'_S} + n^2 \left(L_R - \frac{L_m}{n} \right) \frac{d\overline{i'_S}}{dt} + jn\omega_{me} \overline{\lambda}_R \end{aligned} \quad (\text{EQ. A.5})$$

Dove :

$$\overline{i'_R} = -n\overline{i'_S} \quad (\text{EQ. A.6})$$

Il circuito elettrico equivalente con tutte le grandezze riferite al primario risulta :

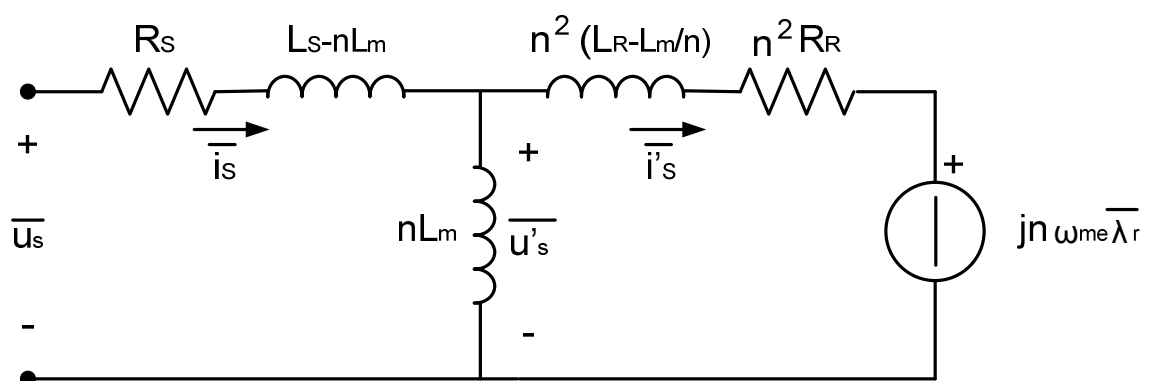


Figure 9 – Secondo schema elettrico equivalente del motore ad induzione

Naturalmente, differenti scelte del rapporto spire n comporta differenti circuiti equivalenti. Si discuterà di due particolari casi, il primo con $n=1$ ed il secondo per $n=L_m/L_R$.

- **Con $n=1$**

In questo caso tutti i valori del circuito equivalente sono riferiti all'avvolgimento primario ed il trasformatore può essere trascurato. Un vantaggio di questa scelta è che tutti i valori, sia quelli di statore che quelli di rotore, appaiono senza fattore di scala.

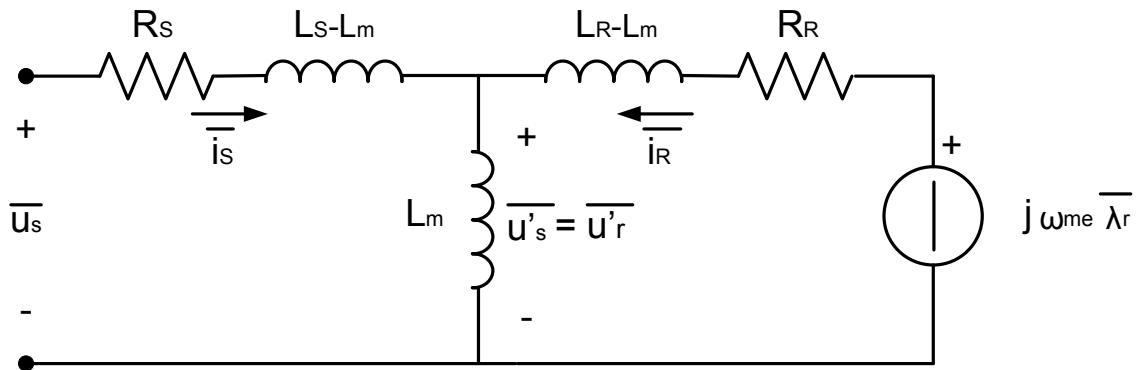


Figure 10 – schema elettrico equivalente di un motore ad induzione con $n=1$

L'induttanza $L_s - L_m (=L_{ls})$ è l'induttanza di dispersione di statore e $L_r - L_m (=L_{lr})$ è l'induttanza di dispersione di rotore.

- **Con $n=L_m/L_R$**

Con questo valore di rapporto spire l'induttanza al secondario si azzerava

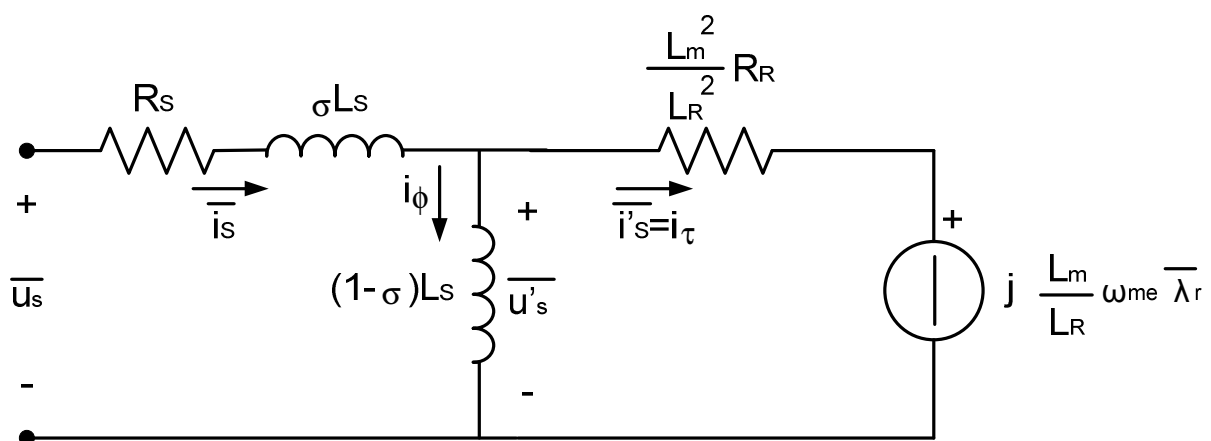


Figure 11 – Schema elettrico equivalente con $n=L_m/L_R$

σ è il fattore di dispersione totale , definito come:

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_R L_S} \right) \quad (\text{EQ. A.7})$$

L'espressione del generatore presente in Figura 10 e Figura 11 può essere riscritta definendo lo scorrimento come :

$$s = \frac{\omega_s - \omega_{me}}{\omega_s} \quad (\text{EQ. A.8})$$

Partendo dalla EQ. A.2, in condizioni sinusoidali alla pulsazione angolare costante Ω_s , risulta:

$$0 = R_R \dot{I}_R + j\Omega_s \dot{\Lambda}_R - j\Omega_{me} \dot{\Lambda}_R \quad (\text{EQ. A.9})$$

Quindi :

$$\dot{\Lambda}_R = \frac{R_R \dot{I}_R}{j(\Omega_{me} - \Omega_s)} \quad (\text{EQ. A.10})$$

Inserendo EQ. A.10 nella espressione del vettore generatore si ha:

$$jn\Omega_{me} \dot{\Lambda}_R = \frac{jn\Omega_{me} R_R \dot{I}_R}{j(\Omega_{me} - \Omega_s)} = -\frac{I_R}{n} n^2 R_R \frac{1-s}{s} = R'_R \frac{1-s}{s} \dot{I}'_S \quad (\text{EQ. A.11})$$

L'espressione EQ. A.11 permette, in condizioni sinusoidali , di vedere il generatore come una resistenza variabile in funzione della differenza tra la frequenza statorica e la velocità rotorica (scorrimento).

Sostituendo EQ. A.11 nel circuito 10 e 11 ed inserendo una resistenza in parallelo alla induttanza magnetizzante , che rappresenta le perdite nel ferro , si ritorna al circuito classico del motore ad induzione .

per $n=1$:

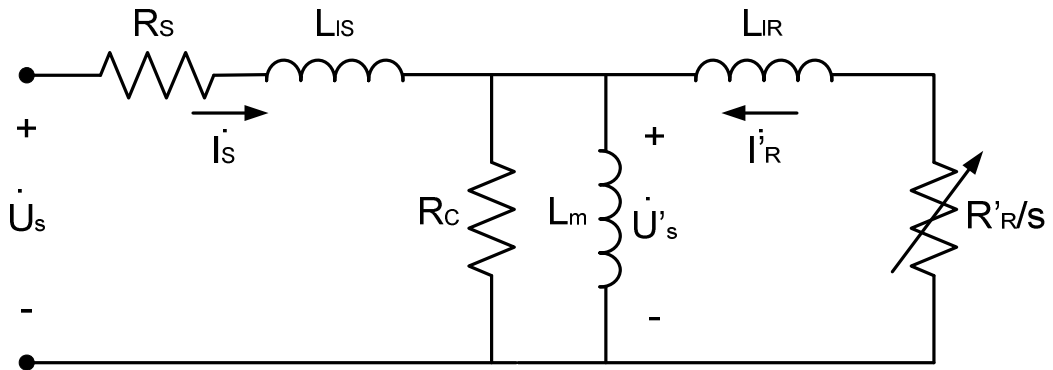


Figure 12 – schema elettrico equivalente con $n=1$

per $n=L_m/L_R$:

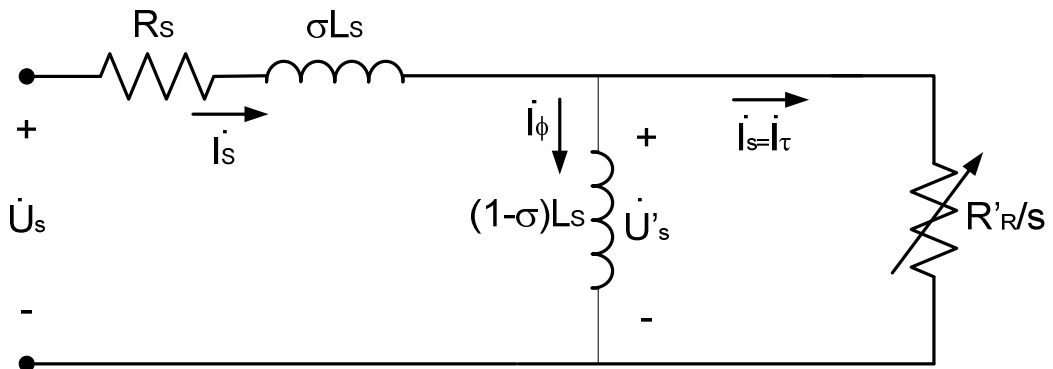


Figura 13 – schema elettrico equivalente con $n=L_m/L_R$

Capitolo 2

Il motore

Il motore si compone di una parte fissa (statore) e di una parte mobile (rotore). Lo **statore** è formato da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare. Le scanalature interne al pacco di lamierini statorici accolgono i conduttori (filo di rame smaltato) dell'avvolgimento trifase statorico. Il **rotore** è interno allo statore ed è costituito da un pacco di lamierini, a forma di corona circolare, con un foro interno per il passaggio dell'albero di rotazione e scanalature esterne (cave rotoriche) per accogliere l'avvolgimento rotorico. Per quanto riguarda la struttura dei circuiti indotti, il tipo adottato nel nostro caso è indicato con il nome di rotore a gabbia di scoiattolo: più semplice e robusto di quello avvolto, è realizzato infilando nei canali, mediante pressofusione, sbarre di rame o di alluminio, ciascuna delle quali riempie completamente un canale. Le testate delle sbarre che sporgono dal pacco lamellare vengono direttamente collegate fra loro, da una parte e dall'altra, mediante un grosso anello di rame o di alluminio. Il rotore così costruito è indicato anche con il termine di rotore in corto circuito. Il materiale adottato per la gabbia nel motore in questione è l'alluminio: tale scelta risulta più vantaggiosa dal lato economico, ma meno in fatto di performance rispetto all'opzione rame. Tra *statore* e *rotore* è presente il *traferro*, un anello d'aria con spessore di qualche decimo di millimetro per consentire la libera rotazione del rotore.

2.1 Dati di targa ed ingombri

Il motore in esame per la nostra prova è l'MA125-8148 .

Le immagini di seguito riportate, mostrano la vista frontale(**Fig 14**) e laterale (**Fig 15**)

del motore. Lo statore è alloggiato all'interno di un estruso di alluminio alettato avente la funzione di migliorare la dissipazione termica e la rigidità strutturale del motore.

Sulle due parti frontali vengono fissate le cuffie che accolgono i cuscinetti rotorici e la battuta su cui andrà alloggiato il sensore di velocità .

Sulla parte posteriore sporgono i tre morsetti di fase.

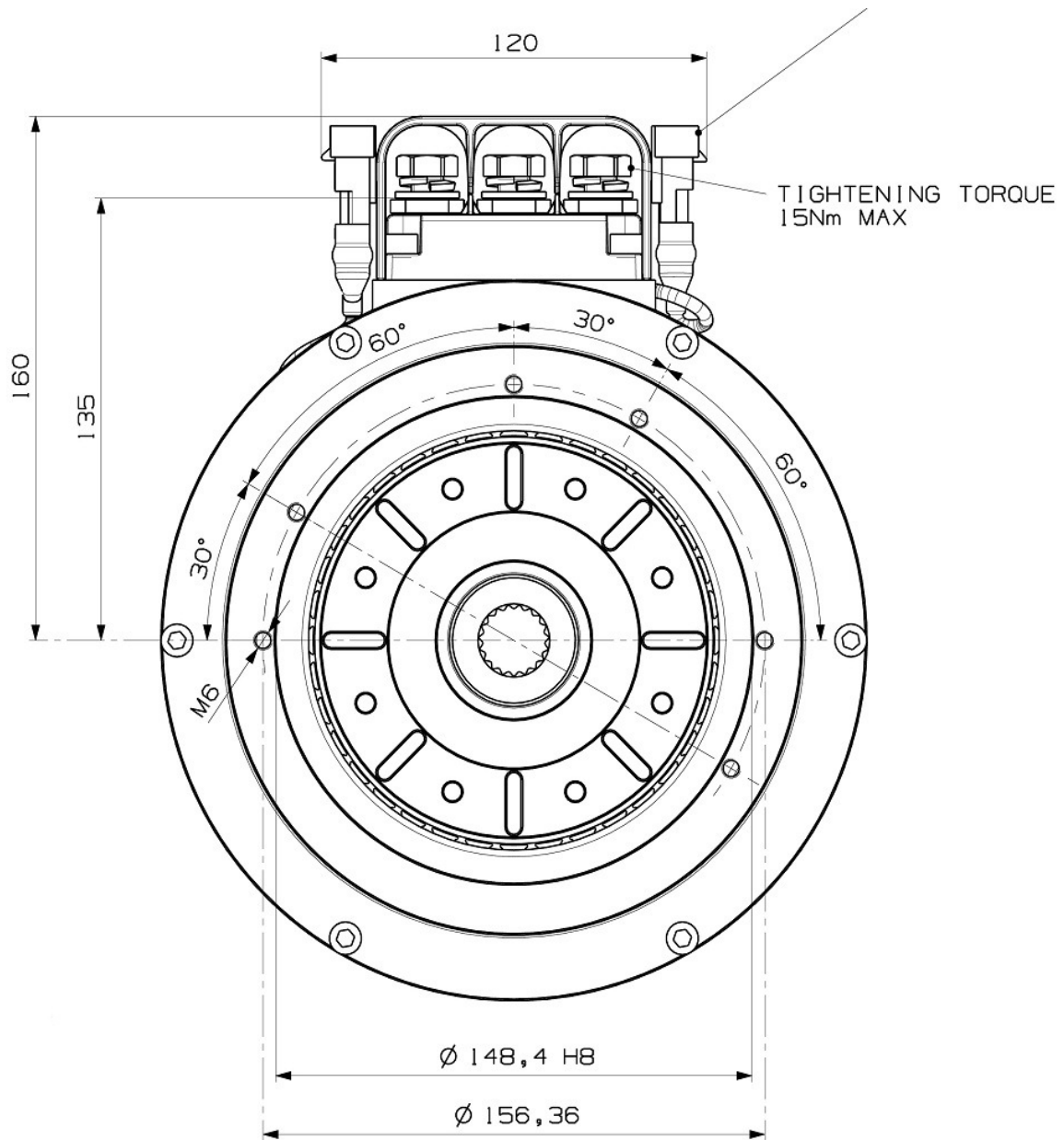


Figura 14 – vista frontale del motore

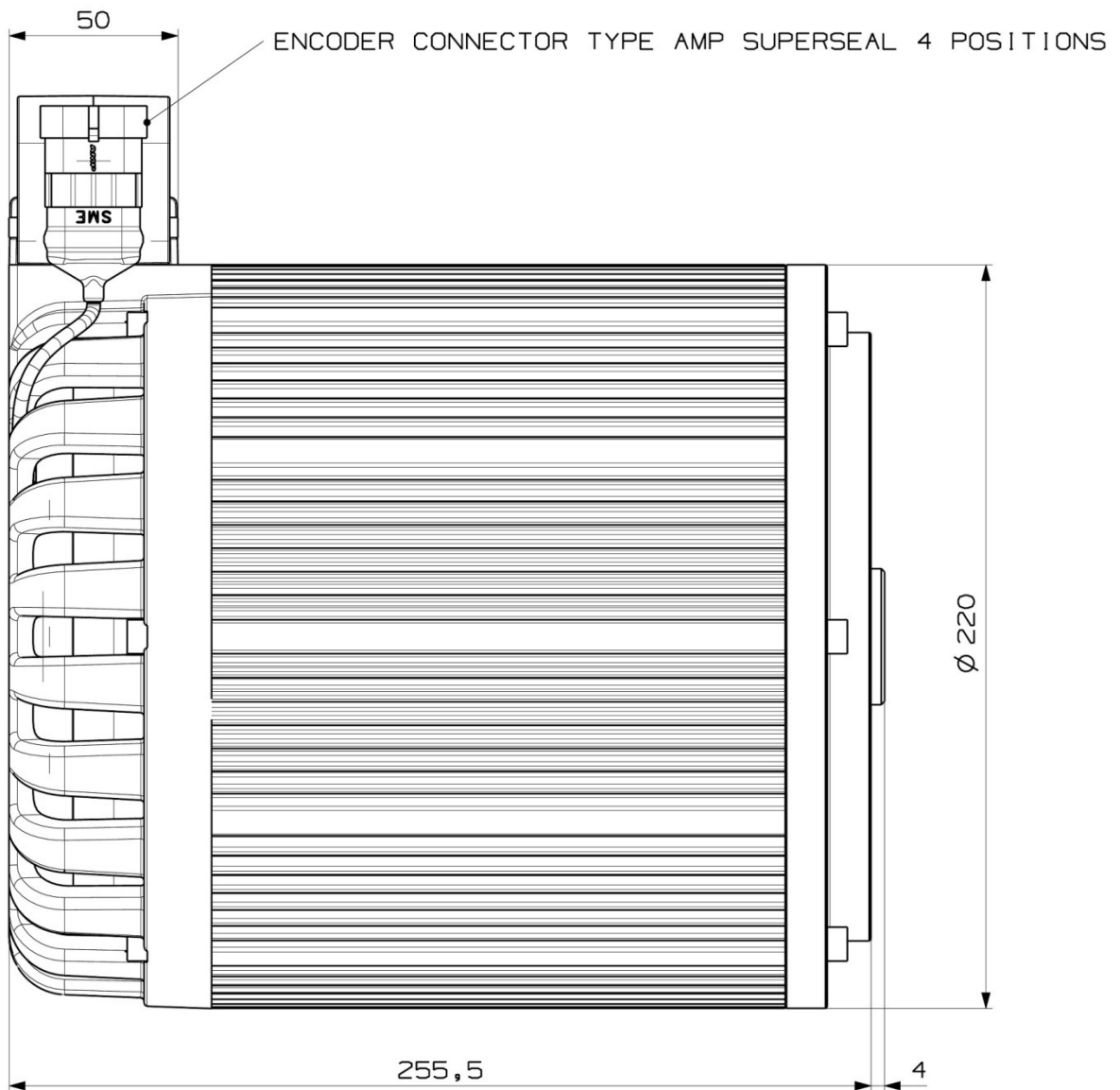


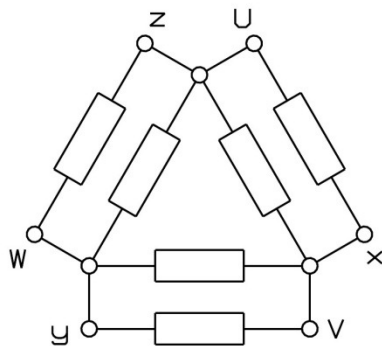
Figura 15 – vista laterale del motore

Nel seguente riquadro sono elencati i dati di targa del motore in esame

RATING DATA ACCORDING TO EN 1175-1 APPENDIX B	
POWER	6.5 KW
VOLTAGE	34 V
CURRENT	177 A
RATED SPEED	1500 RPM
MAXIMUM SPEED	4500 RPM
FREQUENCY	50 Hz
Cos φ	0,74
SERVICE	S2 60°
INSULATION CLASS	F
PROTECTION DEGREE	IP 00
BEARINGS	6206 2RS
WEIGHT	34 Kg

Figura 16- dati di targa del motore

Entrando nello specifico , dallo schema semplificato riportato in figura 17 , si può vedere come il motore sia caratterizzato da uno statore caratterizzato da 36 cave con 2 coppie polari con gli avvolgimenti disposti a triangolo . Per ogni fase abbiamo 2 gruppi di matasse in parallelo , ed ogni gruppo di matasse è caratterizzato da 3 matasse in serie , ognuna composta da 6 spire per un totale di 18 in serie. Le spire vengono generate con il parallelo di 10 fili in rame smaltati . I singoli fili in rame sono di diametro 0.95mm



N° CAVE	36
N° POLI	4
N° GRUPPI DI MATASSE	6
N° MATASSE PER GRUPPO	3
N° SPIRE PER MATASSA	6
N° FILI IN PARALLELO	10
N° SPIRE IN SERIE PER FASE	18

DIAMETRO FILO NUDO E ISOL.	10x0,95 DOPPIO SMALTO CLASSE H (200°)
PASSO CAVA	1-8-10-12 AVVOLGIMENTO CONCENTRICO
COLLEGAMENTO MATASSE	N° 2 GRUPPI DI MATASSE PER FASE IN PARALLELO
PESO LORDO RAME	4.5 Kg
RESISTENZA OHMICA FASE	8,7 mΩ ±4% DISSIMETRIA MAX FASI ±1%
COLLEGAMENTO FASI IN TESTATA	TRIANGOLO INTERNO 3 PERNI USCITA
TIPO DI GIUNZIONE COLLEGAMENTI	PUNTATURA ELETTRICA
SENSORE DI TEMPERATURA	MT386A

Figura 17- dati relativi all'avvolgimento

Nella seguente immagine si vede lo schema di massima dell'avvolgimento di statore e di come vengano alloggiati nelle cave .

L'avvolgimento è di tipo concentrico , questo per facilitare la fase di inserimento delle matasse nelle cave . I motori vengono prodotti in linea e scorrono tra una fase e l'altra su dei carrellini spinti dall'operatore . Gran parte delle operazioni di assemblaggio sono automatizzate. Al termine della linea viene eseguito un test funzionale per escludere ogni anomalia del motore . Vengono prodotti una media di 5 motori ogni ora .

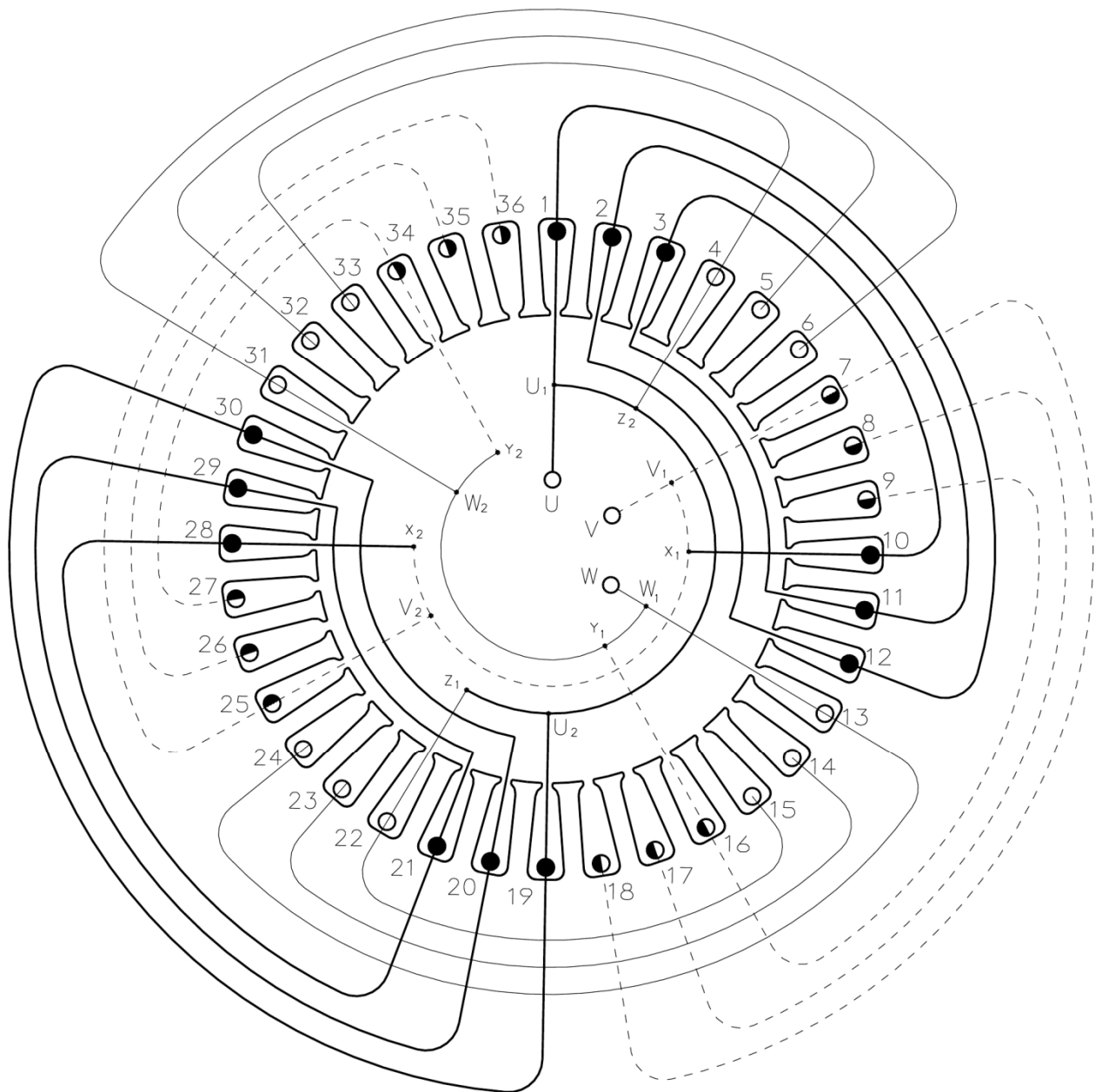


Figura 18 : avvolgimenti di statore

2.2 Lamierini Magnetici

Il diametro esterno dei lamierini magnetici di statore è di 200 mm .

Il diametro esterno del rotore è di 125 mm mentre il diametro interno è di 42mm

Il traferro viene portato dopo rettifica del rotore a 0.3 mm

Lo statore è caratterizzato da 36 cave con sezione utile di 132.9 mm^2

Il rotore è caratterizzato da 48 cave con sezione utile di 42.4 mm^2

Il diametro **A** (**fig 19**) del foro interno al rotore per il passaggio dell'albero è di 42 mm

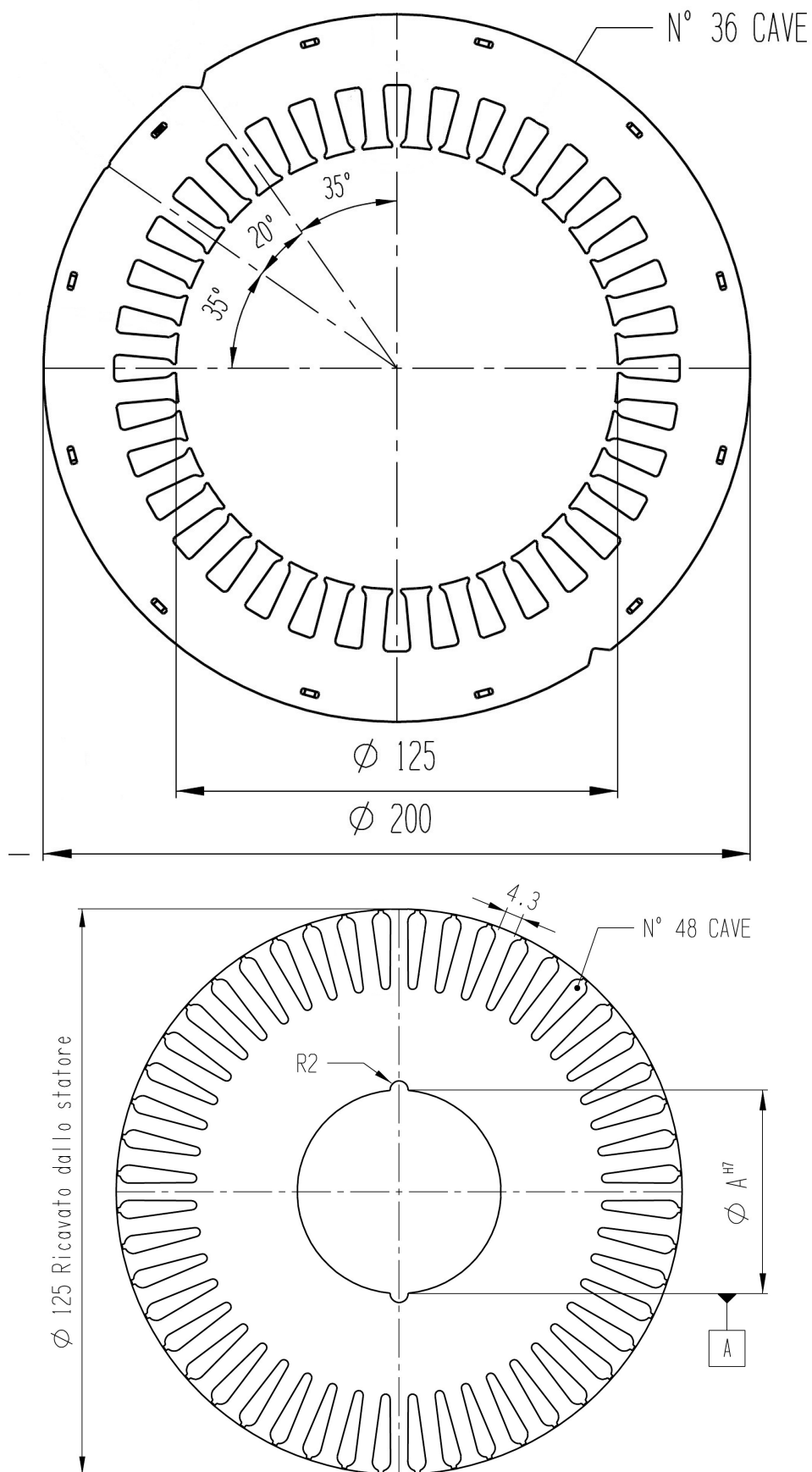


Figura 19: lamierini di statore e rotore

Il pacco di lamierini ha una profondità di 125mm

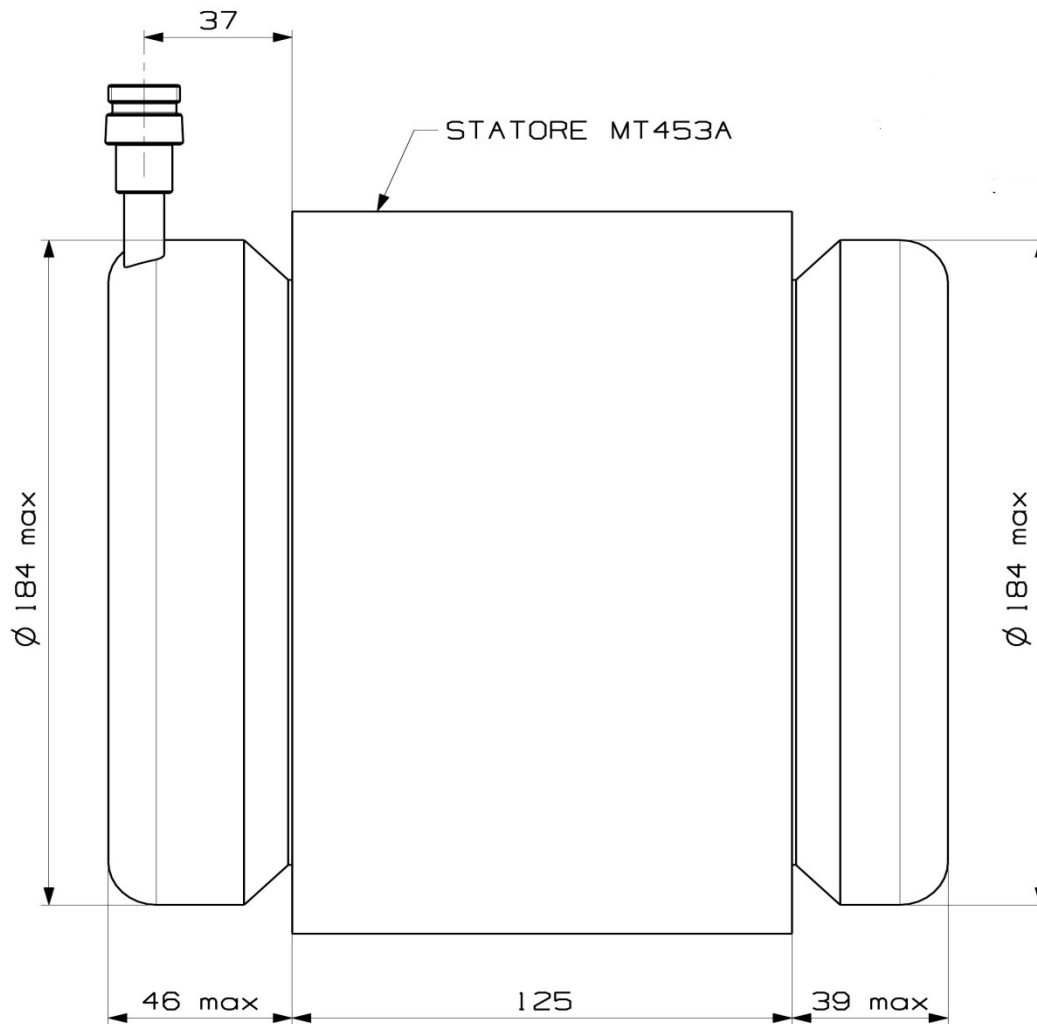


Figura 20 : profondità del pacco motore

2.3 Encoder

L' **encoder**, è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in segnali elettrici numerici digitali.

Si può distinguere in due parti :

- il *corpo*, che costituisce la parte fissa, con all'interno la componentistica elettrica/elettronica (sensori, circuiti ecc.);
- la *ruota fonica*, costituita da un anello d'acciaio sinterizzato dotato di 64 denti . La ruota fonica è solidale al rotore.

Il sensore di velocità utilizzato è un **encoder di tipo incrementale** che fornisce i parametri quali velocità e verso di rotazione . Negli encoder incrementali (detti anche relativi) i segnali elettrici d'uscita sono proporzionali allo spostamento del rotore rispetto al corpo; in questo modo si possono leggere e visualizzare la velocità e l'accelerazione dell'asse in esame, ma non la posizione istantanea .

Il principio di trasduzione adottato è di tipo magnetico e si basa sull'effetto di Hall: due sensori rilevano i denti della ruota fonica creando due onde quadre sfasate di 45° con un frequenza proporzionale alla velocità di rotazione del rotore. L'inverter collegato al motore rileva le due onde quadre con i seguenti fini:

- Calcolare velocità e verso di rotazione.
- Verificare tramite la ridondanza dei due segnali che il dispositivo encoder funzioni correttamente.

Il corpo viene alloggiato in una battuta nella cuffia esterna del motore mentre la ruota fonica viene posizionata in una apposita battuta sul rotore . Le temperature a cui è sottoposto il sensore di velocità , essendo esterno , sono sensibilmente inferiori a quelle del motore , assicurando un'aspettativa di vita ben oltre i due anni garantiti . Inoltre , nel caso di rottura,la sostituzione è estremamente semplice ed immediata .

Di seguito gli ingombri e le caratteristiche dell'encoder

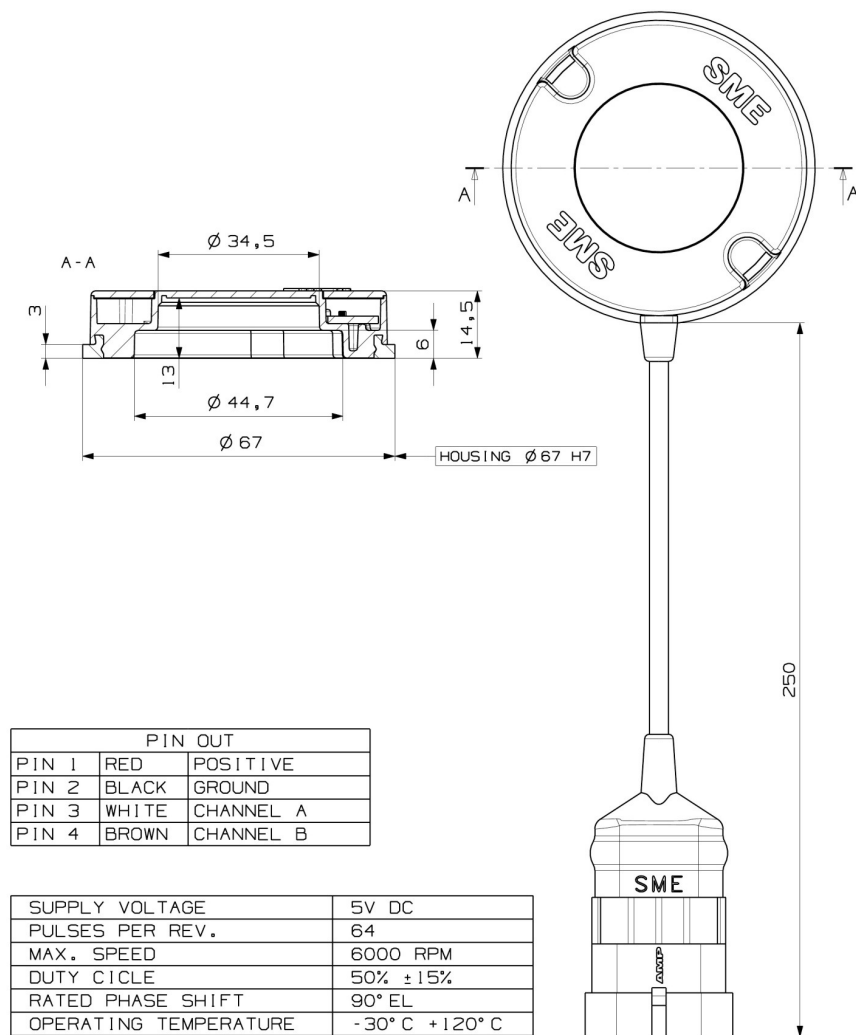


Figura 21 : dati di targa encoder

Capitolo 3

L'inverter

L'azionamento scelto per la prova è definito con il nome di AC-M1.

Il controller AC-M1 è progettato per pilotare motori in corrente alternata fino ai 10kW , a seconda delle taglie dell'azionamento .

Essendo basato sulla affidabile ed efficiente tecnologia su DCB , permette di ottenere potenze ai vertici della sua categoria con ingombri decisamente più contenuti .

AC-M1 può essere facilmente connesso ad altre periferiche per creare una rete più complessa in cui ogni nodo può dialogare attraverso la rete CAN .

AC-M1 è un prodotto adatto per un elevato numero di applicazioni : dai carrelli elevatori , a vetture elettriche , fino a sistemi più complessi come veicoli ibridi .

3.1 Caratteristiche tecniche ed ingombri

Sotto le specifiche fornite col DTSH

AC-M1 features:

- ✓ Low $R_{DS,on}$ MOSFET
- ✓ 16 bits DSP controlling 1 AC motor
- ✓ High Speed FLASH Memory
- ✓ Switching Frequency: 9kHz
- ✓ Integrated Hall Effect Current Sensors
- ✓ Communication: RS232, LIN and CAN-Bus
- ✓ Available Supply Voltages (Volts): 24,36,48,72,80
- ✓ Maximum Current, measured in a two-minute time interval.
 - 24V version: 350-450-600 A_{rms}
 - 36/48V version: 375-500 A_{rms}
 - 80V version: 350-450 A_{rms}
- ✓ Working temperature range: -30°C/+40°C
- ✓ Maximum heat sink temperature: 100°C
- ✓ Mechanical Characteristics:
 - Dimensions: 210x145x91 mm
 - Connectors: 2x23 Ampseal terminals
 - Environmental Protection: IP65
 - Available with Aluminum baseplate or finned Heatsink

- ✓ I/O specifications:
- N° 21 Digital Inputs
- N° 8 Analogue Inputs
- N° 5 Outputs



Figura 22 immagine dell'azionamento

La taglia scelta per l'azionamento corrisponde alla versione 36/48V da 500A , soluzione usualmente adottata per le prove di test interne .

L'inverter è a modulazione della larghezza degli impulsi, detto anche inverter PWM (Pulse Width Modulation) , di tipo centrato con iniezione di terza armonica .

La portante è a dente di sega con frequenza di 9kHz

La tensione di batteria è di 48V.

La tensione efficace in uscita è di 36V concatenati .

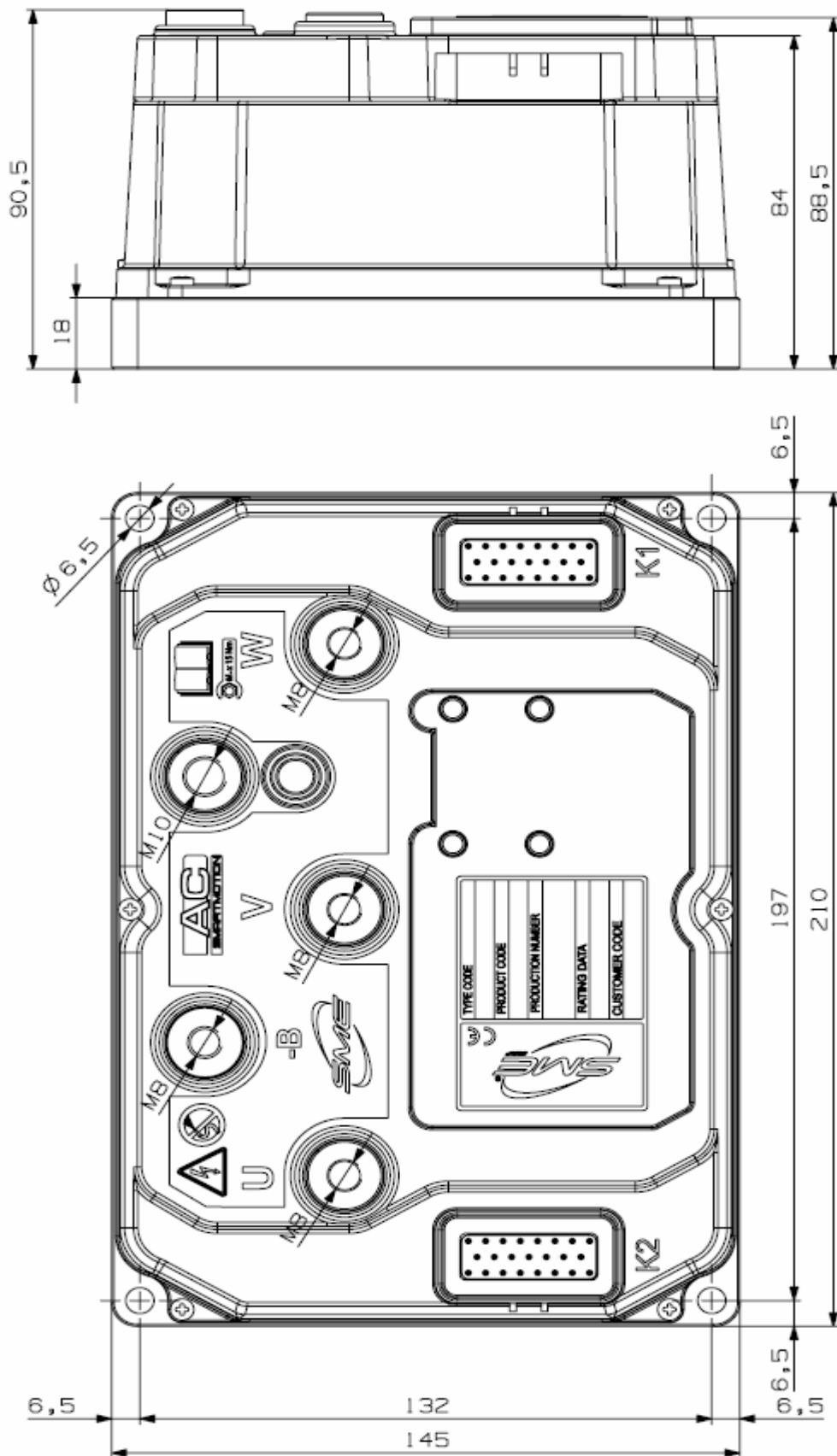


Figura 23 : immagine dell'azionamento

3.2 Modulo di potenza

Uno dei punti di forza di AC-M1 sta nella parte di potenza basata su tecnologia DCB .

La tecnologia DCB (Direct Copper Bonded) si basa sul processo nel quale il rame è la ceramica vengono fusi assieme mediante elevate temperature .

La tecnologia si basa essenzialmente su due sottili strati di rame di pochi decimi di millimetro , direttamente legati all'ossido di alluminio .

L'ossido di alluminio (o allumina) è l'ossido ceramico dell'alluminio caratterizzato da formula chimica Al_2O_3 .

E' un materiale durissimo (prossimo al diamante) e refrattario , quindi particolarmente adatto a subire i stress termici provocati dai mosfet di potenza : la durata di un componente costituito da questo materiale ceramico è superiore di circa 10-13 volte (nelle stesse condizioni di impiego) rispetto ad uno stesso componente realizzato in acciaio . Le sua scarsa conducibilità termica in verità, mal si sposa con l'esigenza di dissipare le grandi quantità di calore prodotte dei transistor di potenza , ma le sue ottime proprietà dielettriche permettono di usare substrati di allumina estremamente sottili (pari a 0.6 mm) , pur conservando una elevata tensione di isolamento in grado di resistere oltre i 2,5 KV efficaci per 1 minuto .

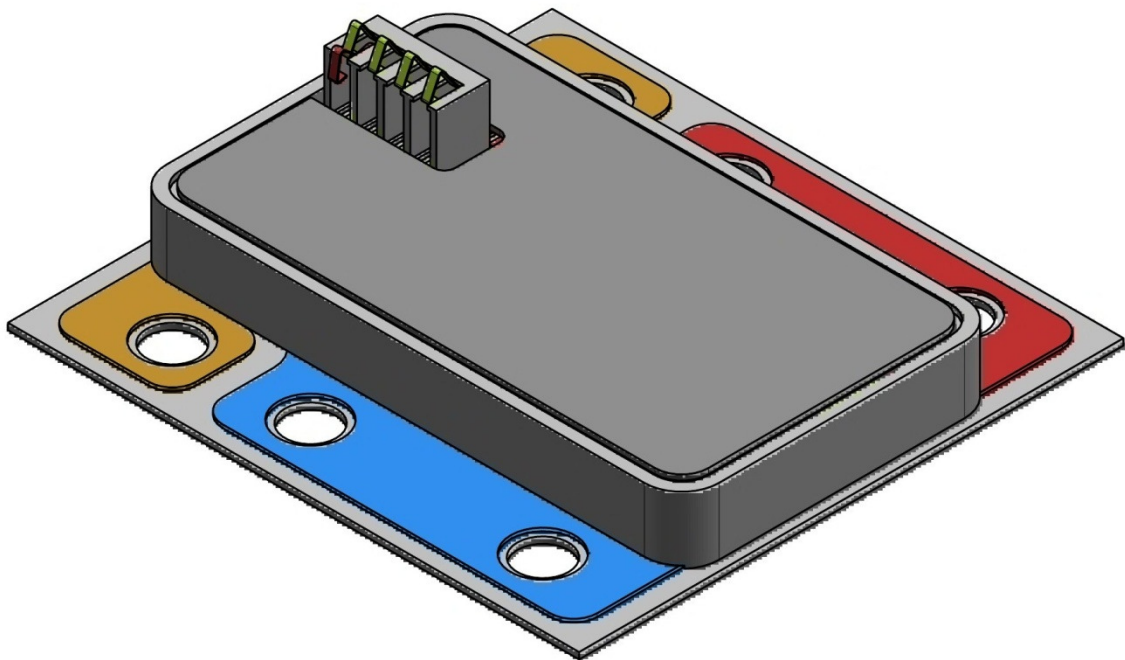


Figura 24 : vista isometrica del modulo di potenza

La soluzione adottata , basata su tecnologia DCB , risulta modulare .

Un singolo modulo coincide con una qualsiasi delle tre coppie di interruttori alto/basso del circuito equivalente dell'inverter trifase .

Con tre moduli si ottiene il sistema trifase di **Fig 25**.

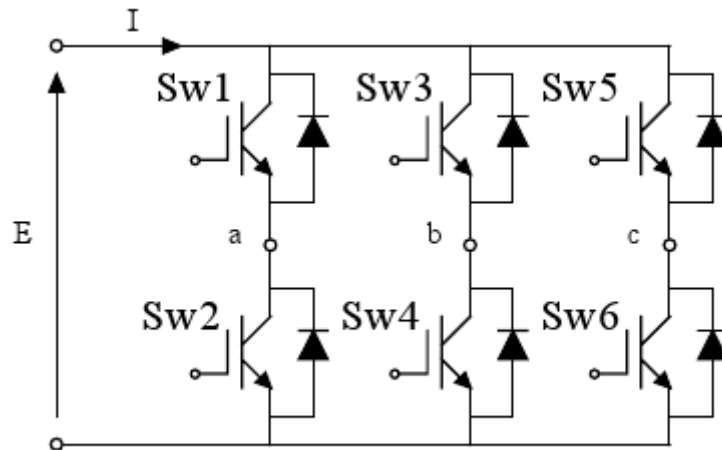


Figura 25

A seconda della necessità di fornire il più ampio ventaglio di potenze possibili si possono mettere più o meno mosfet nel singolo modulo di potenza (**Fig 26**), così come si possono creare più gruppi di moduli in parallelo.

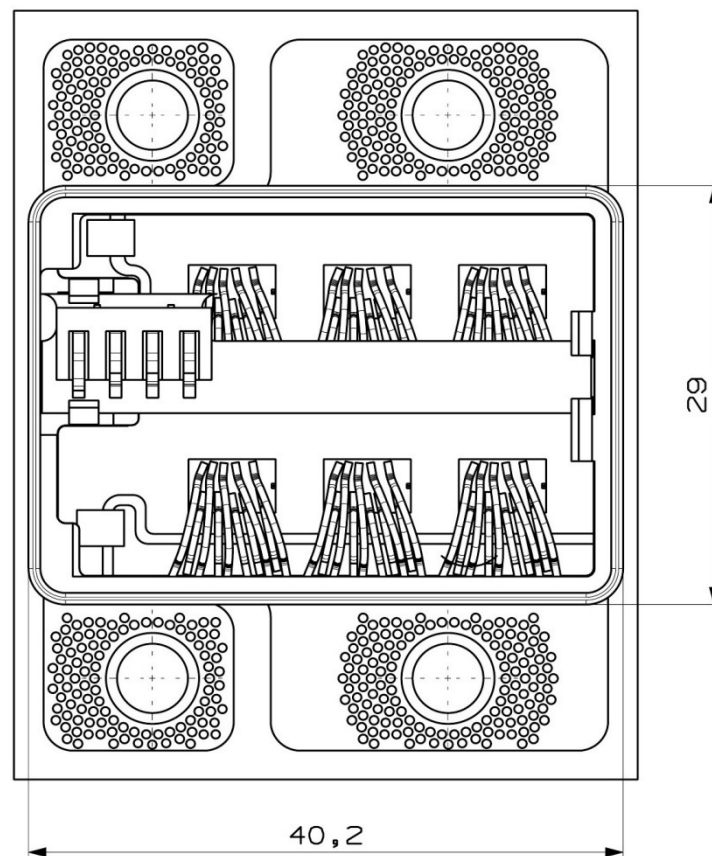


Figura 26: immagine dall'alto del modulo di potenza

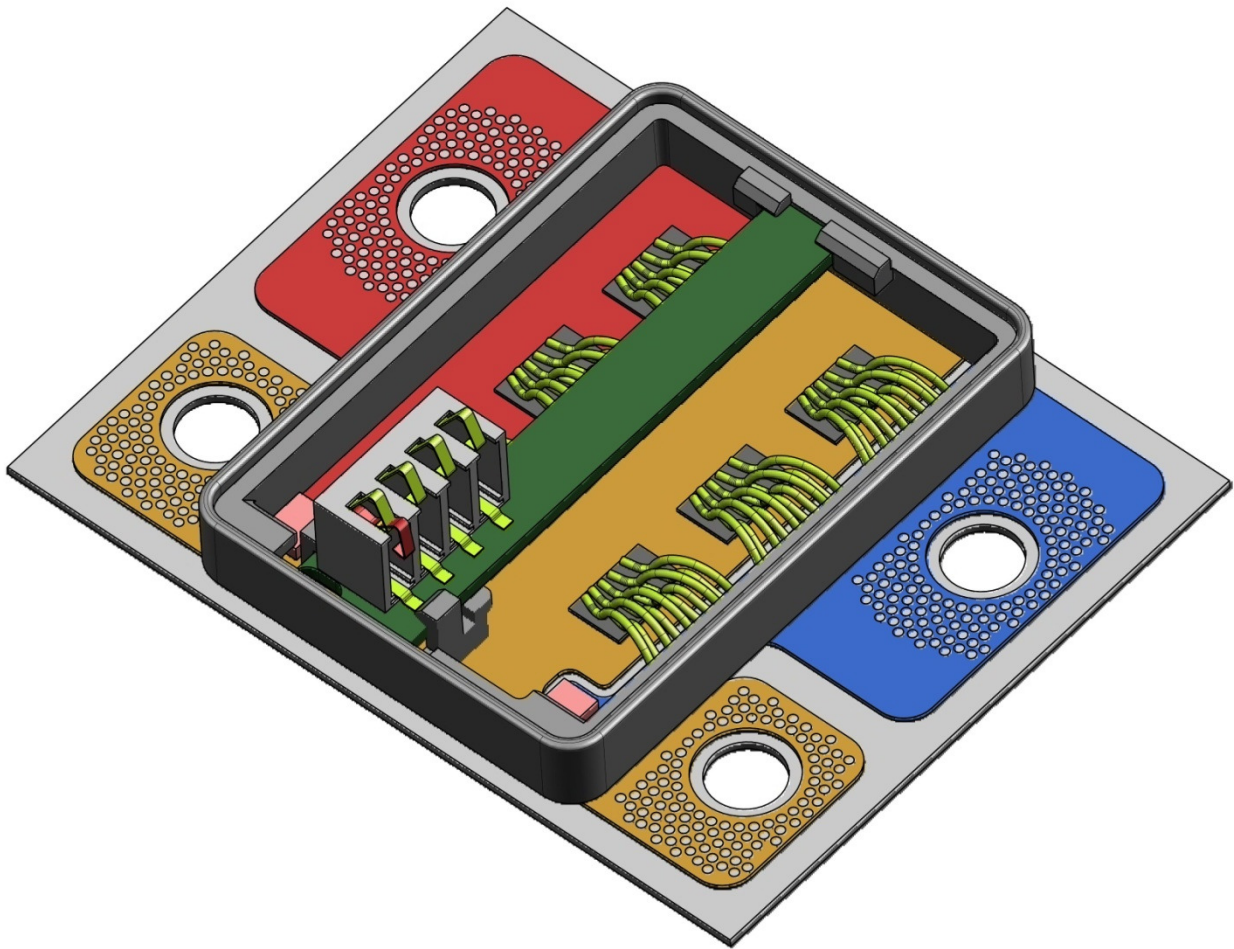


Figura 27: vista isometrica del modulo di potenza scoperto

La linea produttiva del modulo è completamente automatizzata . I mosfet vengono estratti dal wafer con una macchina pick&place per poi essere saldati dul DCB con tecnologia vapor-phase, soluzione che permette di evitare ogni forma di ossidazione del rame ed assicura la completa assenza di bolle d'aria nella saldatura ,assicurando la massima dissipazione termica. Nella fase successiva vengono applicati i bonding di potenza sul source , e viene collegata la piazzola di gate col bonding di segnale alla scheda di pilotaggio . Al termine della linea produttiva ,ad ogni modulo spetta un severo test in potenza per evidenziare eventuali difetti.

Capitolo 4

Risultati

4.1 Estrazione della resistenza statorica

La resistenza di fase misurata a temperatura ambiente è pari a 8.7 mΩ

Il valore della resistenza di statore è calcolato in riferimento alla temperatura di 20°

Il valore è riportato al circuito equivalente a stella .

4.2 Prova a vuoto : curva magnetizzante

I valori elencati nella **tabella 1** sono stati ricavati fissando la frequenza a 43 Hz e calando la tensione dal valore nominale di 32V fino al valore limite di 4V, valore oltre il quale le correnti statoriche hanno ripreso a salire. La tensione U si riferisce alla tensione concatenata, Uy alla tensione stellata , le correnti I, indicano le correnti di linea.

Sulla sinistra della tabella sono raccolti i valori rilevati con gli strumenti, sulla destra i valori estrapolati.

U [V]	I [A]	f [Hz]	Uy [V]	Xy [Ohm]	Lmy [mH]	U [V]	I [A]	f [Hz]	Uy [V]	Xy [Ohm]	Lmy [mH]
32,0	224,5	43,0	18,5	0,082	0,305	17,0	41,4	43,0	9,8	0,237	0,877
31,0	192,2	43,0	17,9	0,093	0,345	16,0	38,5	43,0	9,2	0,240	0,888
30,0	164,0	43,0	17,3	0,106	0,391	15,0	36,0	43,0	8,7	0,241	0,890
29,0	139,3	43,0	16,7	0,120	0,445	14,0	33,4	43,0	8,1	0,242	0,896
28,0	118,4	43,0	16,2	0,137	0,505	13,0	30,9	43,0	7,5	0,243	0,899
27,0	101,9	43,0	15,6	0,153	0,566	12,0	28,4	43,0	6,9	0,244	0,903
26,0	88,4	43,0	15,0	0,170	0,629	11,0	26,1	43,0	6,4	0,243	0,901
25,0	78,3	43,0	14,4	0,184	0,682	10,0	23,8	43,0	5,8	0,243	0,898
24,0	70,4	43,0	13,9	0,197	0,729	9,0	21,5	43,0	5,2	0,242	0,895
23,0	63,9	43,0	13,3	0,208	0,769	8,0	19,3	43,0	4,6	0,239	0,886
22,0	58,6	43,0	12,7	0,217	0,802	7,0	17,2	43,0	4,0	0,235	0,870
21,0	54,5	43,0	12,1	0,222	0,823	6,0	15,4	43,0	3,5	0,225	0,833
20,0	50,8	43,0	11,5	0,227	0,841	5,0	13,9	43,0	2,9	0,208	0,769
19,0	47,3	43,0	11,0	0,232	0,858	4,0	13,0	43,0	2,3	0,178	0,658
18,0	44,3	43,0	10,4	0,235	0,868						

Tabella 1

Di seguito (**grafico 1**) ho espresso in forma grafica i valori rilevati nella **tabella 1**, mettendo in relazione la corrente magnetizzante con la tensione di fase, ad una frequenza fissata di 43Hz. Analizzando il **grafico 1**, il punto di lavoro ideale è in prossimità del ginocchio della curva, e corrisponde all'incirca alla tensione stellata di 13.5V e alla corrente magnetizzante di 65A.

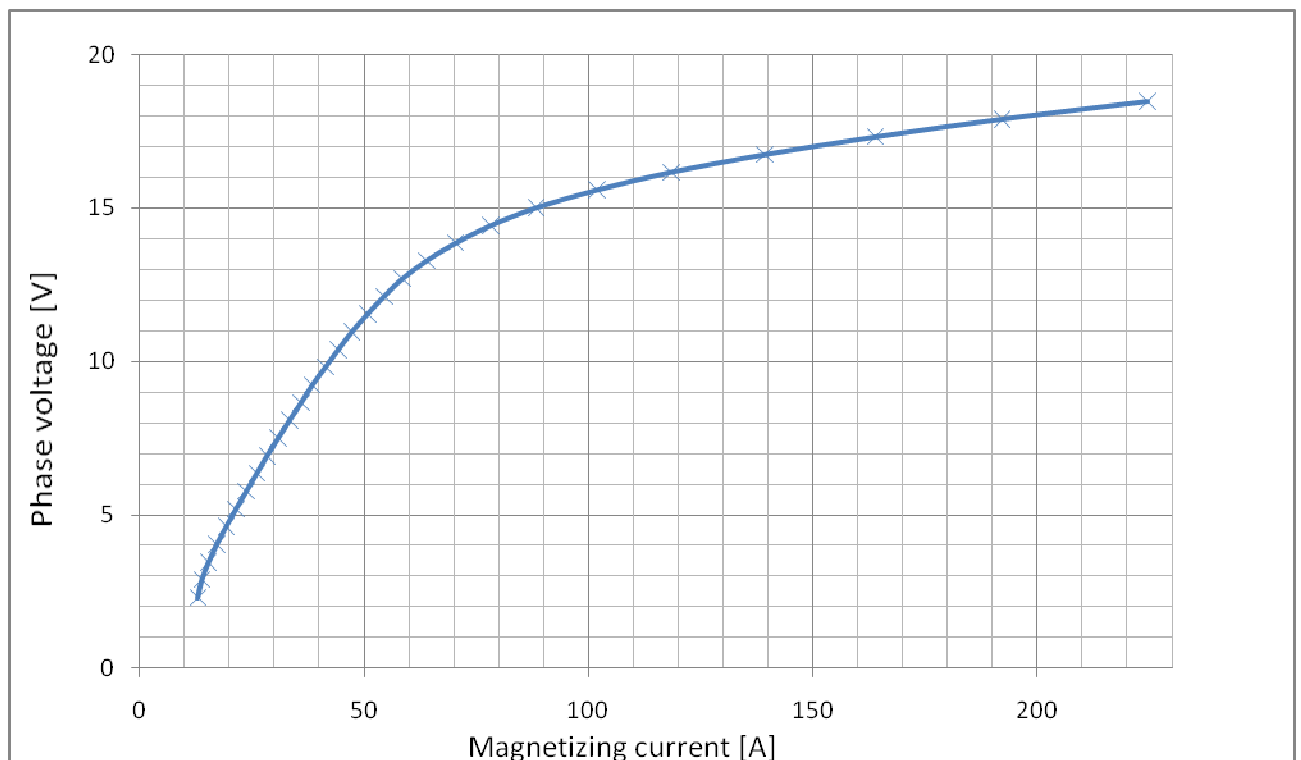


Grafico 1: curva ricavata dai valori della tabella 1

Nella **tabella 2**, sono raccolti i valori di induttanza magnetizzante, mantenendo costante la tensione nominale di 32V e variando la frequenza da un valore massimo di 180Hz fino ad un valore minimo di 42Hz (valore oltre il quale ho preferito non andare per non surriscaldare gli avvolgimenti statorici). La tensione U si riferisce alla tensione concatenata, U_y alla tensione stellata, mentre le correnti sono quelle di linea.

Sulla sinistra della tabella sono raccolti i valori rilevati con gli strumenti, sulla destra i valori estrapolati.

U [V]	I [A]	f [Hz]	U _y [V]	X _y [Ohm]	L _{my} [mH]
32,0	22,0	180,0	18,5	0,840	0,743
32,0	22,2	170,0	18,5	0,832	0,779
32,0	22,7	160,0	18,5	0,814	0,810
32,0	23,4	150,0	18,5	0,790	0,838
32,0	24,5	140,0	18,5	0,754	0,857
32,0	26,0	130,0	18,5	0,711	0,870
32,0	27,9	120,0	18,5	0,662	0,878
32,0	30,3	110,0	18,5	0,610	0,882
32,0	33,5	100,0	18,5	0,551	0,878
32,0	37,5	90,0	18,5	0,493	0,871
32,0	43,0	80,0	18,5	0,430	0,855
32,0	46,5	75,0	18,5	0,397	0,843
32,0	51,0	70,0	18,5	0,362	0,824
32,0	56,8	65,0	18,5	0,325	0,796
32,0	63,5	60,0	18,5	0,291	0,772
32,0	65,5	59,0	18,5	0,282	0,761
32,0	68,0	58,0	18,5	0,272	0,746
32,0	70,9	57,0	18,5	0,261	0,728
32,0	74,2	56,0	18,5	0,249	0,708
32,0	78,1	55,0	18,5	0,237	0,685
32,0	82,3	54,0	18,5	0,224	0,662
32,0	87,3	53,0	18,5	0,212	0,636
32,0	93,3	52,0	18,5	0,198	0,606
32,0	100,5	51,0	18,5	0,184	0,574
32,0	109,0	50,0	18,5	0,169	0,540
32,0	119,5	49,0	18,5	0,155	0,502
32,0	131,0	48,0	18,5	0,141	0,468
32,0	144,6	47,0	18,5	0,128	0,433
32,0	160,9	46,0	18,5	0,115	0,397
32,0	180,0	45,0	18,5	0,103	0,363
32,0	200,0	44,0	18,5	0,092	0,334
32,0	224,5	43,0	18,5	0,082	0,305
32,0	251,0	42,0	18,5	0,074	0,279

Tabella 2

Di seguito (**grafico 2**), ho espresso in forma grafica i valori rilevati nella tabella 2, mettendo in relazione la frequenza con la corrente di fase ad una tensione concatenata fissa di 32V.

Se si analizza la curva al calare della frequenza massima, il ginocchio inizia a presentarsi in prossimità di una frequenza di 60Hz che corrisponde ad una corrente di fase di circa 65A.

Ipotizzando di voler lavorare nel punto di massima curvatura del ginocchio, la frequenza nominale del motore da me rilevata a tensione nominale è di circa 55Hz con una corrente magnetizzante di 75A. Questi valori si discostano dai dati nominali indicati sul motore dal costruttore: con un valore di 50Hz (valore di targa) alla tensione nominale, il motore risulta avere una corrente magnetizzante di 110A, pari al 63% della corrente nominale del motore.

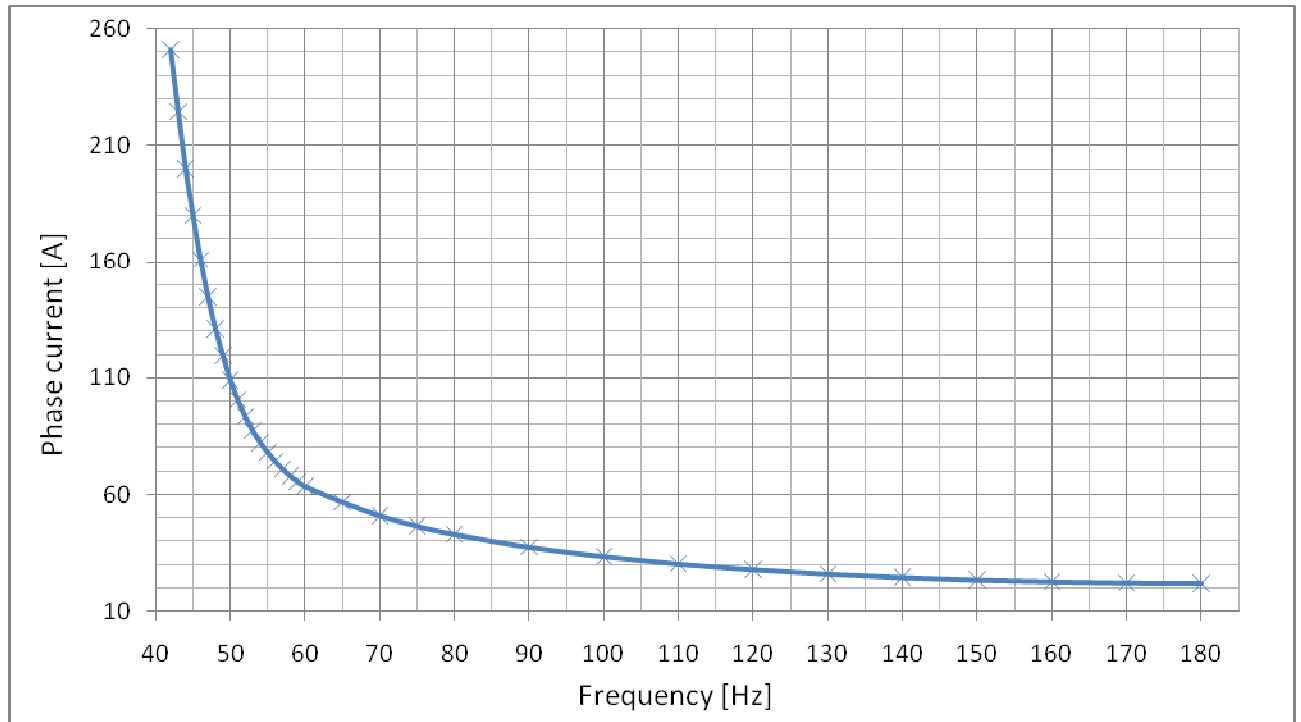


Grafico 2

4.3 Prova a rotore bloccato – Curva caratteristica rotorica

Nella **tabella 3** sono raccolti i valori rilevati durante la prova a rotore bloccato. I dati sulla sinistra della tabella sono quelli rilevati dagli strumenti. La U si riferisce alla tensione concatenata, la I alle correnti di linea, la P alla potenza assorbita dal motore e la $R1$ al valore della resistenza statorica.

Sul lato destro della tabella ho raccolto i valori estrapolati dalle rilevazioni. La U_y si riferisce alla tensione stellata, P_{ph} alla potenza assorbita da una singola fase, la Z all'impedenza totale di fase e la $R2'$ alla resistenza rotorica riportata al primario.

Nella fase di acquisizione dei dati, si è cercato di mantenere costanti i valori di corrente, variando la tensione all'aumentare della frequenza.

U [V]	I [A]	f [Hz]	P [W]	R1 [Ω]	U_y [V]	P_{ph} [W]	Z [Ω]	R2' [m Ω]
2,27	149,4	2,0	600	0,0061	1,31	200	0,0088	2,86
2,73	173,0	4,0	810	0,0061	1,58	270	0,0091	2,92
2,82	175,8	6,0	843	0,0061	1,63	281	0,0093	2,99
2,86	175,0	8,0	838	0,0061	1,65	279	0,0094	3,02
2,97	178,5	10,0	871	0,0061	1,71	290	0,0096	3,01
3,02	177,7	12,0	865	0,0061	1,74	288	0,0098	3,03
3,08	177,6	14,0	868	0,0061	1,78	289	0,0100	3,07
3,16	177,2	16,0	871	0,0061	1,82	290	0,0103	3,15
3,23	175,7	18,0	868	0,0061	1,86	289	0,0106	3,27
3,37	178,5	20,0	900	0,0061	1,95	300	0,0109	3,31

Tabella 3

Nel seguente grafico(**Grafico 3**) ho messo in relazione il valore estrapolato della resistenza rotorica con la frequenza.

Si può notare come all'aumentare della frequenza aumenti linearmente il valore della resistenza, fenomeno probabilmente dovuto alle correnti di Foucault che si generano nella singola barra di alluminio della gabbia rotorica.

Il fenomeno, nel nostro caso, non è rilevante visti i bassi valori di scorrimento con cui dovrà operare il motore .

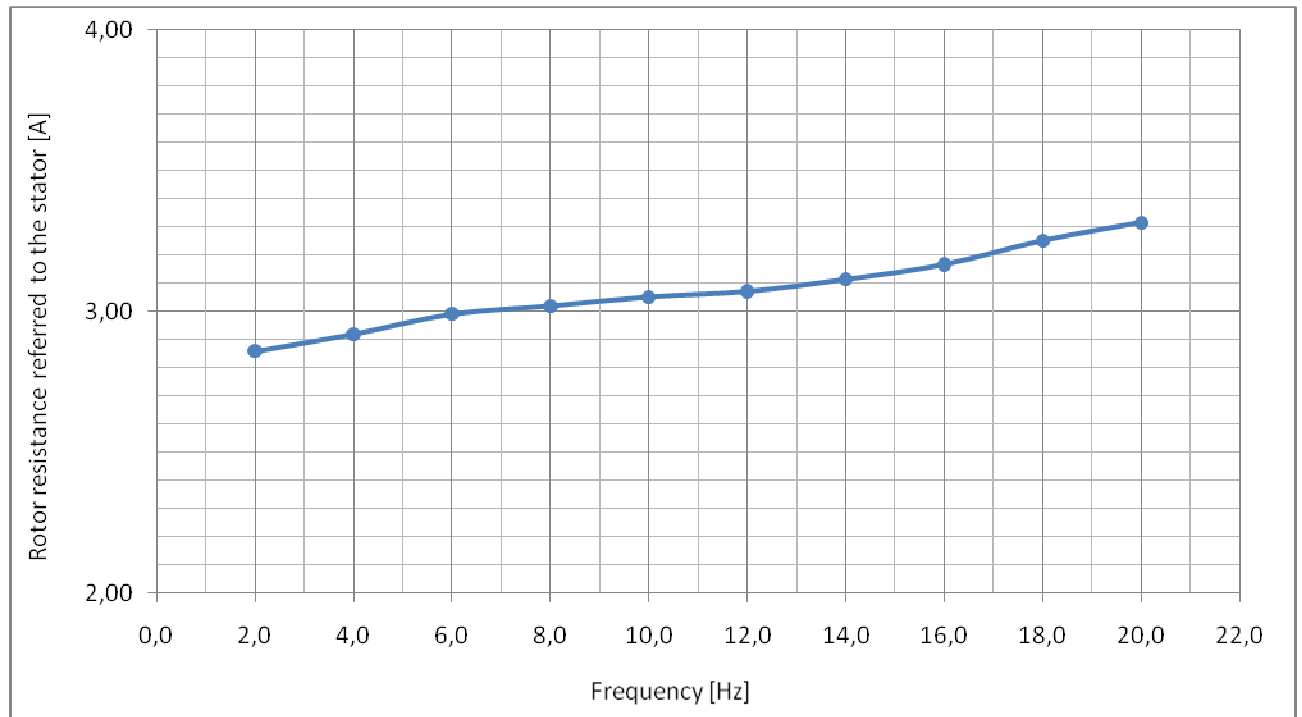


Grafico 3

4.4 Conclusioni

Lo studio condotto sul motore in esame, in seguito alla fase di estrapolazione dei parametri equivalenti e ad un'attenta analisi delle curve di coppia, mi ha permesso di giungere alla conclusione che vi è la tendenza nel "magnetizzare" eccessivamente il motore, con la conseguenza di avere bassi valori di induttanza di magnetizzazione L_m . Valori alti di I_d , necessari nel breve periodo per l'ottenimento della massima coppia e potenza, in caso di uso parzializzato del motore, situazione in cui opera per la maggior parte del tempo, portano ad un maggior surriscaldamento sia dell'azionamento che del motore stesso, oltre che ad una minore autonomia del veicolo.

Il prossimo passo sarà quindi quello di affinare il controllo del motore eseguendo nuove curve al banco di collaudo, valutando diversi profili di coppia in funzione delle varie frequenze di utilizzo, al fine di incontrare le esigenze dinamiche e prestazionali dell'utilizzatore finale e nel contempo di ottimizzare il sistema motore/azionamento dal punto di vista termico.

In caso di un riscontro positivo dei test sul campo, si valuterà in seguito l'opportunità o meno di estendere le prove all'intera gamma dei motori prodotti.

Termini e definizioni

Ai fini di una corretta comprensione del documento , vengono adottate le seguenti definizioni.

PROVA A VUOTO:

La prova a vuoto consiste nell'alimentare le fasi statoriche del motore lasciando libero l'albero meccanico, cioè senza applicare una coppia resistente al motore

PROVA A ROTORE BLOCCATO:

Test nel quale il rotore viene preventivamente bloccato per impedirne la rotazione.

PERDITE ROTAZIONALI:

Ruotando a vuoto , con tensione nominale, il motore richiederà dalla rete la potenza necessaria alle perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite. Un motore asincrono in rotazione libera però, contrariamente per quanto riguarda il trasformatore, non può essere considerato rigorosamente a vuoto. Infatti, mentre per il trasformatore la potenza trasferita al secondario è perfettamente nulla, il motore è chiamato a sviluppare una potenza tale da soddisfare le perdite meccaniche per attrito e ventilazione. Tali perdite in realtà costituiscono un carico, che non permette al motore di girare in sinscronismo. E' noto infatti che il motore asincrono a vuoto ideale dovrebbe funzionare in perfetto sincronismo, condizione che non può raggiungere spontaneamente perché si estinguerebbe la corona polare rotorica e con essa ogni azione di trascinamento.

LINE-TO-LINE VOLTAGE:

Per una macchina polifase A.C è la media aritmetica delle tensioni concatenate espresse in valore efficace (detto anche valore quadratico medio)

LINE CURRENT:

Per una macchina polifase A.C è la media aritmetica delle correnti di linea espresse in valore efficace (detto anche valore quadratico medio)

LINE-TO-LINE RESISTANCE:

Per una macchina polifase A.C. è la media aritmetica della resistenza concatenate per ogni set di terminali .

Strumentazione

Dal momento che la precisione dello strumento è generalmente espressa come percentuale del fondo scala , il range dello strumento deve essere scelto in funzione della effettiva esigenza di misura .

POWER SUPPLY

TENSIONI

La tensione dovrebbe essere compresa in un range di $\pm 2\%$ della tensione nominale durante le misurazioni

CORRENTI

La corrente dovrebbe essere compresa in un range di $\pm 2\%$ della corrente nominale durante le misurazioni

FREQUENZE

La frequenza dovrebbe essere compresa in un range di $\pm 2\%$ della frequenza nominale durante le misurazioni

STRUMENTI DI MISURA PER GRANDEZZE ELETTRICHE

Gli strumenti di misura devono avere una precisione di almeno il 2% del valore nominale .
Se non diversamente specificato in questo documento, verranno utilizzate le medie aritmetica delle tre correnti di linea e delle tre tensioni .

MISURAZIONI DI TEMPERATURA

Gli strumenti di misura della temperatura degli avvolgimenti durante le prove dovrebbero avere un'accuratezza di ± 1 °C.

Simboli e termini abbreviati

SIMBOLI

$\cos(\varphi)$	è il fattore di potenza [-]
f_s	è la frequenza di alimentazione [Hz]
I	è la corrente di linea [A]
α	è il coefficiente di temperatura [-]
P	è la potenza assorbita a vuoto [W]
L_S	è l'induttanza statorica [H]
L_R	è l'induttanza rotorica [H]
L_m	è l'induttanza magnetizzante [H]
R_S	è la resistenza degli avvolgimenti di statore [Ω]
R'_r	è la resistenza degli avvolgimenti di rotore riferita a statore [Ω]
s	è lo scorrimento
U	è la tensione media del terminale [V]
X	è la reattanza [Ω]
X_m	è la reattanza di magnetizzazione [Ω]
Z	è l'impedenza [Ω]

CONDIZIONI OPERATIVE

NL	no-load (a vuoto)
BR	a rotore bloccato

Riferimenti bibliografici

R. Krishnan, Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall 2001.

P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, Wiley 1999.

W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer 2001.

E.G. Strangas, Notes for an Introductory Course On Electrical Machine and Drive, MSU

B.K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall 1986.

P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford University Press 1993.

