

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte sei: CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE⁽¹⁾

A cura della Redazione

6.12 - Potenza resa e altre caratteristiche

Nel motore asincrono si manifestano delle perdite per cui la potenza meccanica resa sull'albero è minore di quella elettrica assorbita dalla rete.

La potenza meccanica resa sull'albero, quando corrisponde al funzionamento previsto per le prestazioni nominali del motore, si chiama potenza nominale (P_N)

Nelle varie parti del motore si manifestano le seguenti perdite (Figura 6.27).

- perdite per isteresi e correnti parassite nel circuito magnetico di statore, denominate globalmente perdite nel ferro (p_f);
- perdite per effetto Joule negli avvolgimenti dello statore (p_1);
- perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di rotore (p_2);
- perdite meccaniche (p_m) dovute agli attriti dei cuscinetti e alla resistenza dell'aria sulle parti in movimento;

(1) La parte precedente è stata pubblicata sul fascicolo 779 Gennaio Febbraio 2025

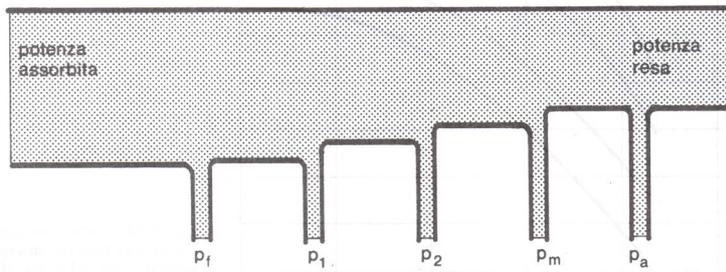


Figura 6.27 - Rappresentazione grafica della potenza assorbita e resa e delle perdite:

P_f = nel ferro

P_m = meccaniche

P_1 = circuito statorico

P_m = addizionale

P_2 = circuito rotorico

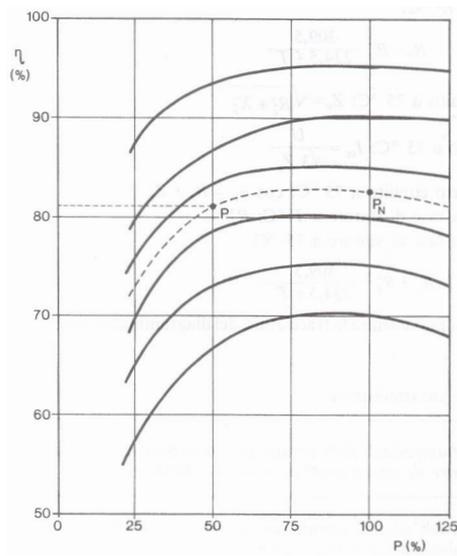


Figura 6.28 - Curve che consentono di ottenere per interpolazione il rendimento dei motori asincroni per valori di potenza diversi dal nominale, partendo dai dati della tabella 6.1 e 6.2.

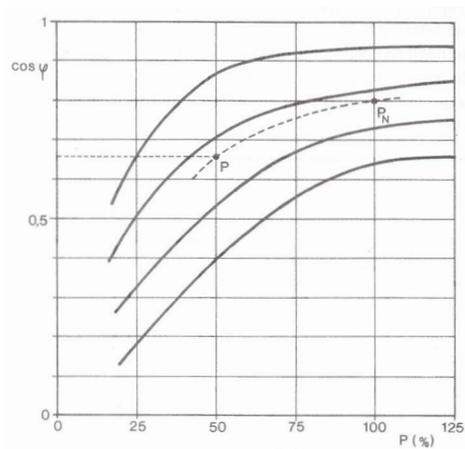


Figura 6.29 - Curve che consentono di ottenere per interpolazione il valore del fattore di potenza dei motori asincroni per valori di potenza diversi dal nominale, partendo dai dati delle tabelle 6.1 e 6.2.

- perdite addizionali (p_{add}) ossia perdite non facilmente valutabili, dovute a correnti parassite nei conduttori e nelle masse metalliche investite dal flusso, a distorsioni del flusso, ecc..

Nel nucleo del rotore le perdite nel ferro sono trascurabili essendo assai bassa la frequenza rotorica durante il funzionamento normale del motore.

La potenza assorbita del motore P_a è data quindi dalla seguente relazione:

$$P_a = P_r + p_f + p_1 + p_2 + p_m + p_{add}$$

Il rendimento percentuale del motore è dato dal rapporto tra potenza resa e potenza assorbita:

$$\eta \% = 100 \frac{P_r}{P_a}$$

In analogia con quanto fatto per i trasformatori si può anche scrivere:

$$\eta \% = 100 \left(1 - \frac{p_f + p_1 + p_2 + p_m + p_{add}}{P_a} \right)$$

di più facile utilizzazione quando sono note le perdite.

È superfluo rammentare che nella applicazione delle formule tutti i termini debbano essere espressi nella medesima unità di misura.

La potenza assorbita è anche data dalla relazione:

$$P_a = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \quad (\text{watt})$$

avendo indicato con U , I , $\cos\phi$, rispettivamente la tensione applicata, la corrente assorbita dalla linea, il fattore di potenza del motore.

A sua volta la potenza resa (P_r) può essere espressa dalla seguente formula:

$$P_r = P_a \frac{\eta}{100} \quad (\text{watt})$$

Le tabelle 6.1 e 6.2 forniscono i valori del rendimento e del fattore di potenza per motori asincroni tipici di varia potenza e diverso numero di poli. Le stesse tabelle indicano il rapporto tra la corrente di spunto I_s e quella nominale I_N nonché la velocità asincrona delle macchine.

Tabella 5.1 - Anomalie di funzionamento dei trasformatori: cause e azioni correttive.

Evento	Possibili cause	Azioni correttive
Temperatura dell'olio elevata	Sovraccarico	Sostituire il trasformatore con altro di potenza adeguata e prevedere il controllo dei carichi
	Temperatura ambiente elevata per insufficiente ricambio dell'aria	Attivare la circolazione dell'aria nella cabina
	Trasformatore non correttamente dimensionato	Contestare la macchina al fornitore
	Aumento delle perdite	Misurare le perdite a vuoto e dovute al carico per eventuale sostituzione
	Circolazione di corrente tra macchine in parallelo	Rivedere le caratteristiche dei trasformatori e posizione dei commutatori
	Errata indicazione del termometro	Verificare l'indicazione del termometro con altro strumento
Rumorosità	Induzione magnetica di progetto troppo elevata	Contestare il fatto al costruttore
	Tensione di alimentazione troppo elevata	Cambiare la posizione del commutatore di prese
	Insufficiente serraggio del nucleo	Contestare il fatto al costruttore
	Risonanze con pareti o pavimento	Coibentare le pareti e isolare il trasformatore con supporti elastici
Intervento del relè Buchholz	Scariche nell'isolamento con eventuale corto circuito tra spire o tra avvolgimenti	Riparazione
	Riscaldamento con eventuale corto circuito tra spire o tra avvolgimenti	Riparazione
	Entrata di aria all'interno della cassa per difetto di installazione	Ritirare l'olio e riempire la macchina sotto vuoto
	Presenza di umidità nell'olio e avvolgimenti	Ritirare avvolgimenti

Segue tabella 5.1

Segue tabella 5.1

Evento	Possibili cause	Azioni correttive
Intervento della protezione di massima corrente sul primario	Corto circuito esterno e difettoso coordinamento con protezioni di bassa tensione	Rivedere coordinamento delle protezioni
	Corto circuito interno sugli avvolgimenti	Riparazione
	Parallelo non corretto	Rivedere le caratteristiche del trasformatore la posizione dei commutatori
	Intervento intempestivo delle protezioni	Controllare la taratura delle protezioni
Tensioni secondarie di linea o di fase, non simmetriche	Errore nei collegamenti	Rivedere i collegamenti
	Mancanza di una fase di alimentazione	Verificare l'impianto di alimentazione
	Carico squilibrato (solo per trasformatori Δ/Δ^0)	Riequilibrare i carichi o sostituire il trasformatore con altro collegato. Δ/Δ^0
	Difetto nel commutatore	Verificare i rapporti di trasformazione e il funzionamento meccanico
Perdite di olio	Guarnizioni difettose	Sostituire guarnizioni
	Perdite nella cassa (saldature, corrosione, ecc.)	Saldare dopo svuotamento della cassa
Livello dell'olio basso	Perdite di olio	Eliminare le perdite
	Temperatura bassa	Rabboccare il conservatore
Commutatore bloccato	Ossidazione o deformazione comandi -Contatti saldati per sovracorrenti	Effettuare la manutenzione ed eventualmente sostituire il commutatore
Scarica esterna sugli isolatori	Sovratensioni atmosferiche	Assicurarsi dell'efficienza degli scaricatori
	Isolatori sporchi	Effettuare la pulizia
Rigonfiamento della cassa	Arco interno di potenza	Riparazione
Tracce di corrosione su cassa, radiatori e conservatori	Rivestimento protettivo inadeguato, danneggiamenti meccanici	Provvedere al ripristino del rivestimento protettivo

I valori di rendimento e di fattore di potenza a potenza resa diversa da quella nominale possono essere dedotti dai grafici delle figure 6.28 e 6.29. Le curve riportate facilitano l'operazione di interpolazione per i valori intermedi. Ad esempio, se un motore ha un rendimento a pieno carico dell'82,5% si individua questo punto in base alle coordinate di potenza e rendimento come indicato nel punto P_N nella figura 6.28. Il rendimento al 50% del carico si determina tracciando idealmente una curva interpolatrice (come quella tracciata in figura) sino a definire il punto P e quindi l'ordinata corrispondente (81,5% circa).

Analogamente si può fare per il fattore di potenza, come indicato nella figura 6.29, in cui, come esempio, si è scelto il valore a pieno carico di $\cos \phi = 0,80$, a cui corrisponde al 50% un $\cos \phi = 0,67$.

ESERCIZI SVOLTI

Esercizio 1 - Determinare la velocità di rotazione del campo magnetico prodotto da un induttore a 6 poli quando viene eccitato con corrente a 50 Hz. Calcolare la velocità che assumerebbe lo stesso se la frequenza fosse di 60 Hz.

Soluzione

Per il calcolo della velocità meccanica del campo rotante si devono utilizzare le formule indicate al paragrafo 6.3. Se si esprime la velocità di rotazione in giri al secondo (n_s) si ha:

$$n_s = \frac{2 \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 50}{6} = 16,67 \text{ giri/s}$$

Esprimendo invece la velocità in giri al minuto si ottiene:

$$n_m = \frac{60 \cdot 2 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 50}{6} = 1000 \text{ giri/min.}$$

che è esattamente 60 volte la precedente.

Se la frequenza passasse da 50 Hz a 60 Hz la velocità di rotazione aumenterebbe proporzionalmente, essendo le due grandezze direttamente proporzionali:

$$n'_s = n_s \frac{f_1}{f_0} = 16,67 \frac{60}{50} = 20 \text{ giri/s} \quad n'_m = n_m \frac{f_1}{f_0} = 1000 \frac{60}{50} = 1200 \text{ giri/min}$$

Esercizio 2 - Un motore a 4 poli funziona a 50 Hz e presenta uno scorrimento del 2,2%. A quale velocità gira il motore?

Soluzione

La velocità sincrona del campo è data dalla relazione già usata nell'esercizio precedente:

$$n_s = \frac{2 \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 50}{4} = 25 \text{ giri/s}$$

Si sa che la formula che esprime lo scorrimento è la seguente:

$$s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

nella quale sono noti $s\%$ e n_s mentre si deve trovare n .

Si possono fare i seguenti passaggi algebrici:

$$\frac{s\% \cdot n_s}{100} = n_s - n \quad \text{da cui:} \quad n = n_s - \frac{s\% \cdot n_s}{100}$$

La velocità di rotazione effettiva risulta pertanto:

$$n = n_s - \frac{s\% \cdot n_s}{100} = 25 - \frac{2,2 \cdot 25}{100} = 24,45 \text{ giri/s}$$

Volendo esprimere la velocità in giri al minuto basta moltiplicare per 60 il valore sopra riportato ottenendo:

$$24,45 \cdot 60 = 1467 \text{ giri/min}$$

Esercizio 3 - Calcolare i valori della coppia nominale C_N massima C_M e di spunto C_s di un motore asincrono trifase da 15 kW, 50 Hz, 4 poli, assumendo che $C_M/C_N = 2,8$ e $C_s/C_N = 2,1$. Ripetere poi lo stesso calcolo per il caso di una macchina di uguali caratteristiche che funziona a 60 Hz.

Soluzione

Come indicato al paragrafo 6.9, la coppia nominale C_N di un motore asincrono si determina convenzionalmente assumendo come potenza la nominale della macchina P_N e come velocità quella sincrona n_s . Questo modo di procedere è giustificato dal fatto che la vera coppia elettromagnetica dovrebbe essere riferita alla potenza nominale aumentata dalle perdite meccaniche (attrito e ventilazione) e alla velocità reale, grandezze però difficilmente calcolabili con precisione. D'altra parte, per dei calcoli ingegneristici effettuati partendo dalla tabella delle caratteristiche fornite dai costruttori questo modo semplificato di procedere non comporta errori sensibili. Si deve perciò calcolare la velocità di rotazione espressa in radianti al secondo usando una delle due formule seguenti:

$$\omega_N = 2 \cdot \pi \cdot n_s \quad \text{oppure:} \quad \omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60}$$

Per la macchina considerata il valore della velocità sincrona risulta:

$$n_m = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ giri/min}$$

per cui si può calcolare ω_N :

$$\omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157,1 \text{ rad/s}$$

La coppia nominale è allora:

$$C_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{15000}{157,1} = 95,5 \text{ J}$$

Si può passare al calcolo del valore assoluto delle coppie massime e di spunto che risulta:

$$C_M = C_N \cdot 2,8 = 95,5 \cdot 2,8 = 267,4 \text{ J}$$

$$C_S = C_N \cdot 2,1 = 95,5 \cdot 2,1 = 200,5 \text{ J}$$

Le considerazioni possono essere ora facilmente estese al caso del motore di uguale potenza ma funzionante a 60 Hz:

$$n_m = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{4} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ giri/min}$$

$$\omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1800}{60} = 188,5 \text{ rad/s}$$

$$C_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{15000}{188,5} = 79,5$$

E quindi:

$$C_M = C_N \cdot 2,8 = 79,6 \cdot 2,8 = 222,8 \text{ J}$$

$$C_S = C_N \cdot 2,1 = 79,6 \cdot 2,1 = 167,1 \text{ J}$$

Si noti che questi valori sono inferiori ai precedenti in quanto la coppia risulta inversamente proporzionale alla frequenza (e alla velocità angolare).

Esercizio 4 - Un motore asincrono trifase da 30 kW, 380 V che funziona a pieno carico, ha un rendimento del 91,0% e un f.d.p. uguale a 0,76. Si determini il valore della potenza assorbita attiva e apparente, la corrente assorbita e le perdite.

Soluzione

La potenza assorbita viene determinata con la formula:

$$P_a = \frac{100}{\eta\%} P_r = \frac{100}{91,0} 30 = 32,97 \text{ kW}$$

Le perdite p sono la differenza tra potenza assorbita e resa:

$$p = P_a - P_r = 32,97 - 30 = 2,97 \text{ kW}$$

La potenza apparente assorbita è data da:

$$A_a = \frac{P_a}{\cos\phi} = \frac{32,97}{0,76} = 43,38 \text{ kVA}$$

La corrente assorbita dal motore è infine:

$$I_a = \frac{A_a}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{43,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 65,9 \text{ A}$$

Esercizio 5 - Un motore asincrono trifase da 15 kW, 380 V, 8 poli, ha le caratteristiche indicate nella tabella 6.2.

Si chiede di determinare i valori della corrente assorbita in corrispondenza delle potenze rese pari al 100, 75, 50% della nominale.

Si determini anche il valore delle correnti di spunto.

Soluzione

Dalla tabella 6.2 si ricava che il motore in oggetto funzionante a pieno carico ha un rendimento dell'88% e $\cos\phi = 0,75$.

Per il pieno carico la potenza attiva assorbita P_a dal motore è data da:

$$P_a = \frac{100}{\eta\%} P_N = \frac{100}{88} 15 = 17,05 \text{ kW}$$

La corrente assorbita risulta allora:

$$I_N = \frac{P_a}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi} = \frac{17,05 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,75} = 34,5 \text{ A}$$

Per calcolare la corrente alle altre condizioni di carico è necessario determinare preliminarmente i valori del rendimento e del $\cos\phi$ usando le curve delle figure 6.28 e 6.29.

Interpolando i valori si ottengono i seguenti dati:

Potenza resa (%)	100	75	50
η	88	87	85
$\cos\phi$	0,75	0,71	0,58

I valori della corrente si calcolano con la seguente formula ricavata dalle precedenti:

$$I_{75} = \frac{P_a}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi} = \frac{100 \cdot 0,75 \cdot P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi \cdot \eta\%} = \frac{100 \cdot 0,75 \cdot 15\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,71 \cdot 87} = 27,7 \text{ A}$$

$$I_{50} = \frac{100 \cdot 0,5 \cdot P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi \cdot \eta\%} = \frac{100 \cdot 0,5 \cdot 15\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,58 \cdot 85} = 23,1 \text{ A}$$

Il valore della corrente di spunto si deduce dal rapporto $I_s / I_n = 5,0$ dato dalla tabella 6.2.

$$I_s = 5 \cdot I_N = 5 \cdot 34,5 = 172,5 \text{ A}$$

Esercizio 6 - Un motore da 15 kW, 380 V, 50 Hz, 6 poli deve essere utilizzato a 60 Hz, alla stessa tensione e mantenendo invariata la coppia della macchina. Quali accorgimenti possono essere adottati?

Soluzione

Il provvedimento più semplice è quello di interporre un autotrasformatore per aumentare la tensione di alimentazione. Per quanto esposto all'esercizio precedente, questa macchina dovrebbe consentire di alimentare il motore a:

$$U_2 = U_1 \frac{f_2}{f_1} = 380 \frac{60}{50} = 456 \text{ V}$$

L'autotrasformatore deve essere dimensionato per la potenza apparente assorbita a pieno carico del motore. Utilizzando i dati della tabella 6.2, si trova che il rendimento è del 88% e che il $\cos\phi = 0,82$.

Si può fare l'ipotesi che questi valori non cambino sensibilmente a 60 Hz, per cui può essere calcolata la potenza attiva assorbita:

$$P_a = \frac{P_r}{\eta\%} 100 = \frac{15}{88} 100 = 17,05 \text{ kW}$$

e quindi la potenza apparente:

$$A_a = \frac{P_a}{\cos\phi} = \frac{17,05}{0,82} = 20,8 \text{ kVA}$$

Questa è la potenza di dimensionamento dell'autotrasformatore. Le tensioni nominali primaria e secondaria devono essere 380 V e 456 V rispettivamente. Una diversa soluzione è quella di riavvolgere il motore facendo in modo che il flusso di induttore rimanga costante.

Pertanto, dalla formula:

$$E = 2,22 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi$$

si deduce che volendo E e ϕ costanti, essendo passata la frequenza da 50 a 60 Hz, l'unica possibilità è quella di variare le spire in modo inversamente proporzionale alla frequenza e quindi:

$$N_2 = N_1 \frac{f_1}{f_2}$$

Deve quindi restare costante il prodotto $N_2 \cdot f_2 = N_1 \cdot f_1$

ESERCIZI DA SVOLGERE

Es. 1 - Determinare a quale frequenza deve essere alimentato un motore asincrono a 8 poli affinché la velocità di sincronismo sia di 1 900 giri/min.

(Risultato: 126,7 Hz)

Es. 2 - Determinare lo scorrimento percentuale di un motore asincrono trifase a 4 poli alimentato a 50 Hz che ruota alla velocità di 1 450 giri.

(Risultato: 3,33%)

Es. 3 - Calcolare la coppia nominale di un motore asincrono da 25 kW, 6 poli, funzionante a tensione nominale a 50 Hz. Determinare quindi il valore della coppia se la frequenza passa a 60 Hz, e se la tensione resta costante. (Risultati: $C_N = 238,7$ J; $C_N = 198,9$ J)

Es. 4 - Un motore asincrono trifase da 20 kW, 380 V, funziona al 90% del carico. In queste condizioni presenta un rendimento dell'88% e un f.d.p. uguale a 0,78; Calcolare la corrente e la potenza assorbita.

(Risultati: $I_a = 39,8$ A; $P_a = 20,45$ kW)

Es. 5 - Utilizzando i dati della tabella 6.1 e le curve delle figure 6.28 e 6.29 si determinino i valori delle correnti assorbite al 75 e 100% di carico da un motore da 15 kW, 380 V, 4 poli.

(Risultati: al 100% del carico $I_a = 32$ A; al 75% del carico $I_a = 32,7$ A)

Es. 6 - Un motore da 15 kW, 380 V, 50 Hz, deve essere utilizzato a frequenza aumentata del 20%. Si chiede quale tensione di alimentazione è necessaria per mantenere costante la coppia.

(Risultato: 456 V)

Es. 7 - Un motore asincrono da 75 kW, 380 V, 50 Hz, 4 poli, ha rendimento a pieno carico del 95%, $\cos\phi = 0,90$ e corrente di spunto pari a $4,2 I_N$. Si determini la corrente di spunto per avviamento stella/triangolo. (Risultato: 186,6 A)

Es. 8 - Un motore asincrono trifase da 25 kW, 400 V, 6 poli, 50 Hz, presenta a pieno carico il rendimento dell'89% e un $\cos\phi = 0,83$. Utilizzando le curve delle figure 6.28 e 6.29 determinare i valori di rendimento e del fattore di potenza al 70% della potenza nominale.

(Risultati: $\eta \% = 88\%$; $\cos\phi = 0,78$).

Es. 9 - Per lo stesso motore dell'esercizio precedente e per la potenza pari al 10% della nominale, determinare il valore della corrente assorbita.

(Risultato: 36,8 A)

Es. 10 - Un motore asincrono trifase da 15 kW, 400 V, 6 poli, 50 Hz, funziona al 50% della potenza nominale e ruota a 976 giri. Si determini il valore dello scorrimento e con l'aiuto della tabella 6.2 e delle curve delle figure 6.28 e 6.29, i valori di rendimento e del fattore di potenza. (Risultati: $s = 2,4\%$, $\eta \% = 85\%$; $\cos\phi = 0,7$)

Segue sul prossimo fascicolo