

ESAME DI STATO DI ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE
Sessione ordinaria 2014 – Indirizzo Elettrotecnica e Automazione
Seconda prova scritta – Tema di Elettrotecnica

Un motore asincrono trifase a 6 poli, collegato a stella, è alimentato alla tensione di 400 V con frequenza 50 Hz.

Durante il funzionamento a pieno carico sono state misurate le seguenti grandezze:

- corrente assorbita dalla linea $I_1 = 35$ A;
- fattore di potenza $\cos \varphi_1 = 0,9$;
- velocità di rotazione dell'albero motore $n = 970$ giri/min.

Dalla prova a vuoto, effettuata a tensione e frequenza nominali, si sono ottenuti i seguenti dati:

- corrente assorbita dalla linea $I_0 = 10$ A;
- fattore di potenza $\cos \varphi_0 = 0,15$.

Inoltre si sa che:

- a. le perdite meccaniche sono $P_{av} = 300$ W;
- b. la resistenza di una fase statorica, alla temperatura di regime, è $R_1 = 0,15$ Ω ;
- c. il rapporto tra la corrente di spunto, a pieno carico, e la corrente nominale è 5,8.

Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie;

1. determini il rendimento del motore e la coppia sviluppata nel funzionamento normale a pieno carico;
2. descriva, nell'ipotesi che il motore debba ridurre la velocità a pieno carico del 10%, il sistema di regolazione e ne effettui il dimensionamento.

Infine, nell'ipotesi che il motore si debba avviare con una coppia resistente di 78,5 Nm, il candidato indichi le condizioni per avere un corretto avviamento del motore, limitando la corrente allo spunto, e individui e dimensioni il dispositivo in grado di consentire tale corretto avviamento.

Svolgimento domanda 1

Con i dati a disposizione si possono calcolare subito la potenza assorbita P_a , le perdite nel rame statoriche P_{j1} e le perdite addizionali P_{add} considerate convenzionalmente uguali allo 0,5% della potenza assorbita.

$$P_a = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 400 \times 35 \times 0,9 = 21\,824 \text{ W}$$

$$P_{j1} = 3 R_1 I_1^2 = 3 \times 0,15 \times 35^2 = 551 \text{ W}$$

$$P_{add} = 0,5\% P_a = \frac{0,5 \times 21\,824}{100} = 109 \text{ W}$$

Le perdite nel ferro si determinano a partire dalla potenza assorbita a vuoto, detraendo le perdite meccaniche e quelle nel rame statoriche a vuoto. Trascurando per semplicità la variazione di R_1 dalla temperatura di regime a quella a vuoto, si ottiene:

$$P_0 = \sqrt{3} V_1 I_0 \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \times 400 \times 10 \times 0,15 = 1039 \text{ W}$$

$$P_{j10} = 3 R_1 I_0^2 = 3 \times 0,15 \times 10^2 = 45 \text{ W}$$

$$P_f = P_0 - P_{av} - P_{j10} = 1039 - 300 - 45 = 694 \text{ W}$$

Le perdite nel rame rotoriche si calcolano con la formula $P_{j2} = s P_t$, dove la potenza trasmessa e lo scorrimento valgono:

$$P_t = P_a - P_f - P_{j1} - P_{add} = 21\,824 - 694 - 551 - 109 = 20\,470 \text{ W}$$

$$n_0 = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ giri/min}$$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0,03$$

$$P_{j2} = s P_t = 0,03 \times 20\,470 = 614 \text{ W}$$

La potenza persa totale è data da:

$$P_p = P_f + P_{j1} + P_{add} + P_{j2} + P_{av} = 694 + 551 + 109 + 614 + 300 = 2268 \text{ W}$$

A questo punto risulta immediato il calcolo della potenza resa e del rendimento:

$$P_r = P_a - P_p = 21\,824 - 2268 = 19\,556 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{19\,556}{21\,824} = 0,896$$

La coppia sviluppata dal motore può essere intesa come coppia trasmessa C_t dallo statore al rotore, legata alla potenza trasmessa e alla velocità di sincronismo, o come coppia resa C_r al carico meccanico, dipendente dalla potenza resa e dalla velocità di rotazione dell'asse meccanico. Calcolandole entrambe si ottiene:

$$C_t = \frac{60P_t}{2\pi n_0} = \frac{60 \times 20\,470}{2\pi \times 1000} = 195,5 \text{ Nm}$$

$$C_r = \frac{60P_r}{2\pi n} = \frac{60 \times 19\,556}{2\pi \times 970} = 192,5 \text{ Nm}$$

Com'era logico aspettarsi, la coppia resa è leggermente inferiore a quella trasmessa.

Svolgimento domanda 2

Si suppone che il motore sia del tipo con rotore a gabbia, senza reostato di avviamento rotorico. Si sceglie il sistema di regolazione della velocità mediante la variazione della frequenza e della tensione (**figura 1**), con la seguente modalità:

- per frequenze da 0 a f_n si effettua la regolazione a flusso costante e tensione variabile linearmente con la frequenza, in modo che rimanga costante il rapporto V_1/f , di conseguenza, la coppia massima;
- per frequenze oltre f_n fino alla frequenza massima si effettua la regolazione a tensione costante, con il flusso magnetico che diminuisce in ragione di $1/f$ e la coppia massima che si riduce in ragione di $1/f^2$.

Il motore verrà alimentato (**figura 2**) mediante un raddrizzatore e un inverter in cascata, in modo da avere in uscita un'alimentazione alternata sinusoidale trifase con tensione e frequenza regolabili.

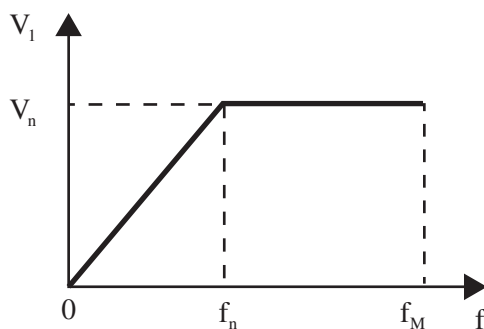


Figura 1 Curva di regolazione tensione-frequenza.

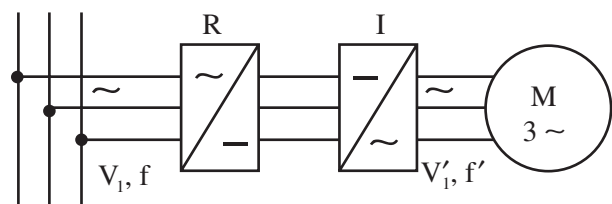


Figura 2 Alimentazione del motore tramite raddrizzatore e inverter.

La nuova velocità di rotazione sarà pari a: $n' = 0,9 \times n = 0,9 \times 970 = 873 \text{ giri/min}$. Nell'ipotesi che lo scorrimento si mantenga costante, in modo da non variare la coppia a pieno carico, la nuova velocità di sincronismo sarà data da:

$$n'_0 = \frac{n'}{1-s} = \frac{873}{1-0,03} = 900 \text{ giri/min}$$

a cui corrisponde la frequenza:

$$f' = \frac{n'_0}{60} \frac{p}{60} = \frac{900 \times 3}{60} = 45 \text{ Hz}$$

Dalla relazione generale $V = Kf\Phi$, confrontando tra loro i valori $V_1 = V_n = 400 \text{ V}$ a cui corrisponde la frequenza $f = 50 \text{ Hz}$ e V'_1 relativo a $f' = 45 \text{ Hz}$, si ottiene:

$$\frac{V'_1}{V_1} = \frac{f'}{f} = \frac{45}{50} = 0,9$$

per cui la nuova tensione di alimentazione del motore sarà: $V'_1 = 0,9 \times V_1 = 0,9 \times 400 = 360 \text{ V}$.

Si può notare che la riduzione di tensione è del 10%, esattamente pari a quella della velocità.

Parte aggiuntiva

Si considera come potenza nominale del motore il valore $P_n = 20 \text{ kW}$, ottenuto approssimando il valore della potenza resa a pieno carico. Assumendo come velocità nominale il valore $n_n = 970 \text{ giri/min}$ calcolato a pieno carico, con tensione e frequenza nominale, si ricava il valore della coppia nominale:

$$C_n = \frac{60 P_n}{2\pi n_n} = \frac{60 \times 20\,000}{2\pi \times 970} = 197 \text{ Nm}$$

circa uguale al valore della coppia resa a pieno carico.

Si suppone che la coppia di avviamento sviluppata dal motore, nel funzionamento a tensione e frequenza nominali, sia pari al 150% della coppia nominale, ossia uguale a $C_a = 1,5 C_n = 295,5 \text{ Nm}$.

Dato che il motore deve avviarsi con una coppia resistente di $78,5 \text{ Nm}$, notevolmente minore di quella di avviamento, può essere fatto l'avviamento a tensione ridotta, senza variare la frequenza che rimarrà al valore 50 Hz .

La nuova coppia di avviamento C'_a dovrà essere maggiore del valore indicato, in modo che si crei la coppia accelerante per vincere l'inerzia del motore. Si fissa al 30% la differenza tra le coppie di avviamento del motore e del carico, ottenendo: $C'_a = 1,3 \times 78,5 = 102 \text{ Nm}$.

Poiché a frequenza costante la coppia di spunto è proporzionale a V^2 , vale la proporzione

$$C_a : C'_a = V_1^2 : V'^2_1$$

da cui si ricava il valore della tensione all'avviamento:

$$V'_1 = \sqrt{\frac{C'_a V_1^2}{C_a}} = V_1 \sqrt{\frac{C'_a}{C_a}} = 400 \sqrt{\frac{102}{295,5}} = 235 \text{ V}$$

La riduzione della tensione comporta anche quella della corrente di spunto, proporzionale a V . Alla tensione nominale essa vale: $I_a = 5,8 \text{ A}$ $I_1 = 5,8 \times 35 = 203 \text{ A}$ (dato del problema). Alla nuova tensione di avviamento si ottiene:

$$I'_a = I_a \frac{V'_1}{V_1} = 203 \frac{235}{400} = 119 \text{ A}$$

corrispondente a $3,4 I_n$.