

**ESAME DI STATO DI ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE**  
**Sessione ordinaria 2010 – Indirizzo Elettrotecnica e Automazione**  
**Seconda prova scritta – Tema di Elettrotecnica**

Una linea elettrica trifase, avente resistenza di  $3,2 \, \Omega$  e reattanza di  $6,0 \, \Omega$ , alimenta a  $400 \, \text{V} - 50 \, \text{Hz}$  un motore asincrono trifase a gabbia di scoiattolo da  $20 \, \text{kW}$  a 6 poli.

Il motore presenta, a pieno carico, le seguenti caratteristiche:  $\eta = 0,87$ ;  $\cos \varphi = 0,80$ ;  $s = 3\%$ .

All'avviamento, a pieno carico, la corrente di spunto è pari a 5,8 volte la corrente nominale. Per esigenze di servizio, il motore deve essere avviato con una coppia di spunto pari a  $100 \, \text{Nm}$ .

Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, calcoli la coppia fornita a pieno carico e relazioni sulle condizioni di avviamento cui è sottoposto il motore. Individui e dimensioni il dispositivo che consente di soddisfare le condizioni richieste all'avviamento, giustificando la scelta operata, e determini il rendimento totale del sistema.

Inoltre il candidato, nell'ipotesi che il motore debba fornire la stessa coppia con una riduzione di velocità del 10%, illustri il sistema di regolazione e ne effettui il dimensionamento di massima.

Infine, il candidato valuti la necessità di effettuare il rifasamento del sistema e motivi adeguatamente gli eventuali benefici che si ottengono in relazione al risparmio energetico.

### **Svolgimento della prima parte**

La coppia fornita a pieno carico (coppia nominale) è legata alla potenza nominale  $P_n = 20 \, \text{kW}$  e alla velocità a pieno carico, pari a:

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s) = \frac{60 \times 50}{3}(1-0,03) = 970 \, \text{giri/min}$$

Si ottiene:

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

La potenza attiva assorbita dal motore a pieno carico è data da:

$$P_{an} = \frac{P_n}{\eta} = \frac{20\,000}{0,87} = 22\,989 \, \text{W}$$

per cui la corrente assorbita a pieno carico (corrente nominale) è pari a:

$$I_n = \frac{P_{an}}{\sqrt{3} V_1 \cos \varphi} = \frac{22\,989}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,8} = 41,5 \, \text{A}$$

e la corrente di spunto vale:  $I_a = 5,8 I_n = 5,8 \times 41,5 = 240,7 \, \text{A}$

Dato che la coppia di spunto è pari al rapporto:  $I_a = V_1 / (\sqrt{3} Z_{1cc})$  si ottiene:

$$Z_{1cc} = \frac{V_1}{\sqrt{3} I_a} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 240,7} = 0,9595 \, \Omega$$

Ipotizzando che sia  $\cos \varphi_{cc} = 0,55$  si ricavano i parametri dell'impedenza totale di una fase, vista dallo statore:

$$R_{1cc} = Z_{1cc} \cos \varphi_{cc} = 0,9595 \times 0,55 = 0,528 \, \Omega$$

$$X_{1cc} = Z_{1cc} \sin \varphi_{cc} = 0,9595 \times 0,835 = 0,801 \, \Omega$$

La coppia di avviamento del motore è data da:

$$C_a = \frac{p R'_2 V_1^2}{2 \pi f (R_{lcc}^2 + X_{lcc}^2)} = \frac{p R'_2 V_1^2}{2 \pi f Z_{lcc}^2}$$

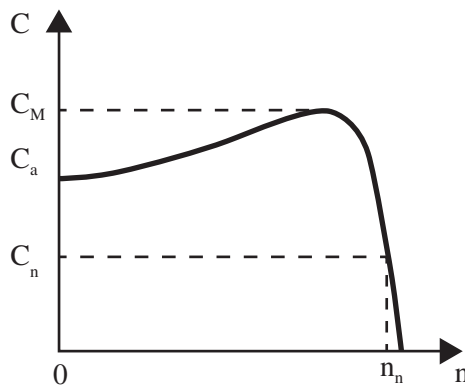
Per ipotesi si suppone che la resistenza rotorica riportata allo statore sia pari a:  $R'_2 = R_{lcc}/2,5 = 0,211 \Omega$ , per cui si ottiene:

$$C_a = \frac{3 \times 0,211 \times 400^2}{2 \pi 50 \times 0,9595^2} = 350 \text{ Nm}$$

Il rapporto  $C_a/C_n = 350/197 = 1,78$  risulta di valore accettabile, in relazione ai normali dati di targa di motori a gabbia.

Ipotizzando che sia  $C_M/C_n = 2,4$  la coppia massima è pari a:  $C_M = 2,4 \times 197 = 472,8 \text{ Nm}$ .

La caratteristica meccanica naturale del motore (senza regolazione) è riportata nella **figura 1**.



**Figura 1** Caratteristica meccanica del motore.

Per ridurre la coppia di spunto da 350 Nm a 100 Nm, come richiesto dal testo, si può effettuare l'avviamento a tensione ridotta, usando un alimentatore statico che, anche in base a quanto richiesto al punto successivo, può essere formato da un raddrizzatore lato linea e da un inverter lato macchina.

Supponendo che all'avviamento non venga regolata la frequenza ma solo la tensione, la coppia risulta proporzionale al quadrato della tensione, per cui vale la proporzione:

$$\frac{350}{400^2} = \frac{100}{V_a^2}$$

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

$$V_a = 400 \sqrt{\frac{100}{350}} = 214 \text{ V}$$

La nuova corrente di spunto, essendo proporzionale alla tensione, è uguale a:

$$I_a = 240,7 \frac{214}{400} = 129 \text{ A}$$

pari a  $3,11 I_n$ .

Il rendimento totale del sistema è il prodotto dei rendimenti del motore e del convertitore, inteso come gruppo raddrizzatore + inverter. Il valore del rendimento del convertitore è, in genere, piuttosto elevato, intorno a 0,97. Ipotizzando prudenzialmente che valga 0,95 il rendimento totale è:

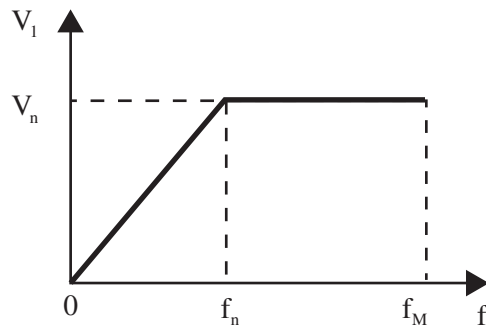
$$\eta_T = \eta_{mot} \eta_{conv} = 0,87 \times 0,95 = 0,8265$$

### Svolgimento della seconda parte

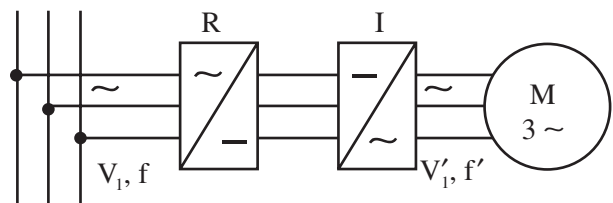
Poiché il motore è del tipo con rotore a gabbia, senza reostato di avviamento rotorico, si sceglie il sistema di regolazione della velocità mediante la variazione della frequenza e della tensione (**figura 2**), con la seguente modalità:

- 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 3**) 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 2** Curva di regolazione tensione-frequenza.



**Figura 3** Alimentazione del motore tramite raddrizzatore e inverter.

La nuova velocità di rotazione sarà pari a:  $n' = 0,9 \times n = 0,9 \times 970 = 873$  giri/min. Nell'ipotesi che lo scorrimento si mantenga costante, in modo da non variare la coppia a pieno carico (come richiesto dal testo), 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:

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

Dalla relazione generale  $V = Kf\Phi$ , confrontando tra loro i valori  $V_1 = V_n = 400$  V a cui corrisponde la frequenza  $f = 50$  Hz e  $V_1'$  relativo a  $f' = 45$  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:  $V_1' = 0,9 \times V_1 = 0,9 \times 400 = 360$  V.

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

### Svolgimento della terza parte

Dato che il fattore di potenza del motore è 0,80 è opportuno eseguirne il rifasamento, in modo da portarlo a un valore superiore a 0,9 che è il limite oltre il quale non viene addebitata l'energia reattiva. Si può usare una batteria trifase di condensatori collegati a triangolo, dimensionata in base ai seguenti valori:

- potenza attiva:  $P = P_{an} = 22\,989$  W, pari alla potenza assorbita a pieno carico dal motore;
- fattore di potenza iniziale:  $\cos \varphi_0 = 0,80$ , uguale a quello a pieno carico del motore;
- fattore di potenza dopo il rifasamento:  $\cos \varphi_r = 0,92$ , superiore al valore limite di 0,9.

La potenza reattiva capacitiva della batteria sarà uguale a:

$$Q_c = P(\tan \varphi_0 - \tan \varphi_r) = 22\,989 (0,75 - 0,426) = 7448 \text{ var}$$

In base ai valori di targa delle batterie commerciali si sceglie il valore nominale  $Q_{cn} = 7,5 \text{ kvar}$ , a cui corrisponde ancora il valore  $\cos \varphi_r = 0,92$ , com'è facile calcolare.

La corrente sulla linea si riduce al valore:

$$I' = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi_r} = \frac{22\,989}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,92} = 36,1 \text{ A}$$

La riduzione della corrente comporta un risparmio energetico dovuto alla riduzione della potenza persa sulla linea. Infatti, senza il rifasamento tale perdita ammonta:

$$P_L = 3 R_L I_n^2 = 3 \times 3,2 \times 41,5^2 = 16\,534 \text{ W}$$

In realtà questo valore è spropositato in quanto è pari al 71,9% della potenza assorbita dal motore. È possibile che il dato  $R_L = 3,2 \, \Omega$  sia stato sbagliato nel testo; in caso contrario significa che la linea non è dimensionata correttamente.

Rifasando il motore la potenza persa si riduce a:

$$P'_L = 3 R_L I'^2 = 3 \times 3,2 \times 36,1^2 = 12\,511 \text{ W}$$

che è un valore ancora elevato (54,4% della  $P_{an}$ ) ma minore di 4023 W rispetto al precedente, il che comporta un risparmio energetico di circa 4 kWh per ogni ora di funzionamento del motore.