

# Esame di Stato di Istituto tecnico Industriale

## A.S. 2009/2010

**Indirizzo:** Elettrotecnica e automazione

**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.

### Soluzione

Si ipotizza di utilizzare un autotrasformatore a due prese, sia per l'avviamento, sia per la riduzione di velocità del 10% del motore a coppia costante, disinserendo l'autotrasformatore, dopo la fase d'avviamento. Lo schema completo è del circuito è rappresentato nella FIGURA 1 alla fine della soluzione.

#### Calcolo della corrente assorbita a pieno carico

La potenza elettrica assorbita dal motore è data dalla potenza nominale divisa per il rendimento:

$$P_{\text{amot}} = \frac{P_m}{\eta} = \frac{20000}{0,87} = 23,0 \text{ kW}$$

La corrente assorbita a pieno carico vale quindi:

$$I_{\text{amot}} = \frac{P_{\text{amot}}}{1,73 \cdot V_n \cdot \cos\varphi} = \frac{23 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 400 \cdot 0,80} = 41,5 \text{ A}$$

### Calcolo della coppia fornita a pieno carico

La velocità del motore a pieno carico  $n_2$  vale, trattandosi di un motore a 6 poli, con  $p = 3$  coppie polari:

$$n_1 = 60 \cdot f_n / p = 60 \cdot 50 / 3 = 1000 \text{ rpm}$$

$$n_2 = n_1 (1 - s) = 1000 (1 - 0,03) = 970 \text{ rpm}$$

Quindi la coppia erogata a pieno carico vale:

$$C_m = \frac{P_m}{\omega_2} = \frac{P_m \cdot 60}{2\pi n_2} = \frac{20000 \cdot 60}{2\pi \cdot 970} = 197 \text{ Nm}$$

### Calcolo della tensione di alimentazione all'avviamento

Poiché la coppia del motore dipende dal quadrato della tensione applicata, si ha:

$$C'_{avv} / C_{avvn} = V'^2 / V_n^2$$

da cui ricavando  $V'$  e sostituendo i valori si ottiene:

$$V' = V_n \sqrt{\frac{C'_{avv}}{C_{avvn}}} = 400 \sqrt{\frac{100}{197}} = 285 \text{ V}$$

### Calcolo della corrente assorbita all'avviamento con l'autotrasformatore inserito

In base ai dati forniti, la corrente di spunto all'avviamento, quando si applica la tensione nominale, vale:

$$I_{avvn} = 5,8 \cdot I_{amot} = 5,8 \cdot 41,5 = 241 \text{ A}$$

La corrente all'avviamento si può ipotizzare direttamente proporzionale alla tensione applicata (supponendo costante l'impedenza del motore); quindi si ha:

$$I'_{avv} / I_{avvn} = V' / V_n$$

da cui, ricavando  $I'_{avv}$  e sostituendo i valori, si ottiene:

$$I'_{avv} = I_{avv} \frac{V'}{V_n} = 241 \cdot \frac{285}{400} = 172 \text{ A}$$

L'autotrasformatore assorbirà dalla rete di alimentazione a 400 V una corrente  $I_{aaut}$ , che si può calcolare tenendo conto del rapporto di trasformazione  $k$ , ipotizzando ideale l'autotrasformatore:

$$k = V_1 / V_2 = 400 / 285 = 1,4$$

Si ricava quindi  $I_{aaut} = I'_{avv} / k = 172 / 1,4 = 123 \text{ A}$ .

### Calcolo della potenza dell'autotrasformatore

Per scegliere la potenza nominale dell'autotrasformatore si tiene conto che il servizio viene fornito per un tempo limitato, per cui si applica un coefficiente riduttivo pari a 0,3 rispetto alla potenza richiesta all'avviamento del motore, da cui risulta:

$$S_{aut} = 0,3 \cdot 1,73 \cdot V' \cdot I'_{avv} = 0,3 \cdot 1,73 \cdot 285 \cdot 172 = 25,4 \text{ kVA}$$

### Calcolo del rendimento totale del sistema

In questo caso si tiene conto del prodotto dei rendimenti del motore e dell'autotrasformatore, trascurando quello della linea, in quanto dai dati forniti sull'impedenza della linea di alimentazione (resistenza di  $3,2 \Omega$  e reattanza di  $6,0 \Omega$ ) si deduce che tale linea è quella del fornitore di energia elettrica:

- rendimento motore: 0,87
- rendimento dell'autotrasformatore: supponiamo pari a 0,9
- rendimento totale:  $0,87 \cdot 0,9 = 0,78$

### Calcolo della tensione con riduzione della velocità del 10%

La velocità ridotta del 10 % è pari a:

$$n_{2r} = 970 \cdot 0,9 = 873 \text{ rpm}$$

a cui corrisponde lo scorrimento  $s_r = (n_1 - n_{2r}) / n_1 = (1000 - 873) / 1000 = 0,127$ .

Si calcola quindi la tensione a velocità ridotta:

$$V_r = V_n \sqrt{\frac{s_n}{s_r}} = 400 \sqrt{\frac{0,03}{0,127}} = 194,4 \text{ V}$$

La tensione ridotta così calcolata sarà prelevata sull'autotrasformatore mediante una seconda presa.

L'autotrasformatore calcolato per la fase d'avviamento può essere utilizzato anche per il funzionamento a velocità ridotta, perché in questo caso la potenza apparente del motore è inferiore a quella nominale dell'autotrasformatore.

### Calcolo del rifasamento

Si calcolano le potenze delle due macchine:

- potenza attiva del motore:  $P_{amot} = 23,0 \text{ kW}$
- potenza reattiva del motore:  $Q_{mot} = P_{amot} \cdot \text{tg}\varphi_{mot} = 23,0 \cdot 10^3 \cdot 0,75 = 17,2 \text{ kVAR}$
- potenza attiva dell'autotrasformatore:  $P_{aaut} = S_{aut} \cdot \cos\varphi_{aut} = 25,4 \cdot 10^3 \cdot 0,85 = 21,6 \text{ kW}$
- potenza reattiva autotrasformatore:  $Q_{aut} = S_{aut} \cdot \text{sen}\varphi_{aut} = 25,4 \cdot 10^3 \cdot 0,52 = 13,2 \text{ kVAR}$

e applicando il teorema di Boucherot si ottiene:

- potenza attiva assorbita totale:  $P_{atot} = P_{amot} + P_{aaut} = 23,0 \cdot 10^3 + 21,6 \cdot 10^3 = 44,6 \text{ kW}$
- potenza reattiva totale:  $Q_{tot} = Q_{mot} + Q_{aut} = 17,2 \cdot 10^3 + 13,2 \cdot 10^3 = 30,4 \text{ kVAR}$

Quindi:

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q_{tot}}{P_{atot}} = \frac{30,4 \cdot 10^3}{44,6 \cdot 10^3} = 0,682 \text{ da cui } \cos\varphi = 0,826.$$

Il rifasatore deve portare il  $\cos\varphi$  dal valore  $\cos\varphi_0 = 0,826$  al valore  $\cos\varphi_r = 0,9$ , a cui corrispondono  $\operatorname{tg}\varphi_0 = 0,682$  e  $\operatorname{tg}\varphi_r = 0,484$ , quindi deve introdurre una potenza reattiva pari a:

$$Q_c = P_{\text{atot}} (\operatorname{tg}\varphi_0 - \operatorname{tg}\varphi_r) = 44,6 \cdot 10^3 \cdot (0,682 - 0,484) = 8,83 \text{ kVAR}$$

che si può ottenere con tre condensatori collegati a triangolo, da inserire in parallelo alla linea di alimentazione del motore, di capacità:

$$C = \frac{Q_c}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2} = \frac{8,83 \cdot 10^3}{3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 400^2} = 58,6 \text{ } \mu\text{F}$$

Il gruppo motore e autotrasformatore, con il rifasamento inserito, assorbe una corrente:

$$I_{\text{atot}} = \frac{P_{\text{atot}}}{1,73 \cdot V_n \cdot \cos\varphi_r} = \frac{44,6 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 400 \cdot 0,9} = 71,5 \text{ A}$$

mentre senza rifasamento sarebbe stata:

$$I_{\text{atot}} = \frac{P_{\text{atot}}}{1,73 \cdot V_n \cdot \cos\varphi_0} = \frac{44,6 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 400 \cdot 0,826} = 77,9 \text{ A}$$

Il rifasamento permette quindi una minore perdita di potenza attiva e minore caduta di tensione di linea evitando anche il sovrapprezzo imposto dal gestore sull'energia reattiva (basso  $\cos\varphi$ ).

Il circuito dovrebbe comprendere sia la possibilità di un avviamento a piena tensione sia a tensione ridotta, potendo svolgere questa funzione anche durante il moto, nelle due condizioni possibili di funzionamento, passando da piena tensione a quella ridotta e viceversa senza arresto del moto.

Un possibile schema completo che tenga conto delle esigenze poste dal problema e delle possibilità operative richieste è quello di FIGURA 1 a pagina seguente: il contattore CR svolge la funzione di interruttore generale di rete e avviamento, che può avvenire in due modi:

- 1) contattore CR chiuso e contattore di scambio CT a riposo: il motore viene alimentato a piena tensione, si avvia effettuando automaticamente il passaggio stella triangolo: dopo il ciclo di avviamento funziona stabilmente a piena tensione con gli avvolgimenti collegati a triangolo;
- 2) contattore CR chiuso e contattore di scambio CT attivato: si interrompe la linea di alimentazione a piena tensione, si inserisce quella a tensione ridotta prelevata dall'autotrasformatore (i contatti di CR in condizioni di eccitazione funzionano in scambio tra quelli normalmente chiusi e quelli normalmente aperti), il motore si avvia effettuando automaticamente il passaggio stella triangolo: dopo il ciclo di avviamento funziona stabilmente a tensione ridotta con gli avvolgimenti collegati a triangolo.
- 3) La riduzione della tensione può essere effettuata anche durante il normale funzionamento, attivando il contattore CT che può effettuare direttamente il cambio di tensione anche durante il funzionamento.

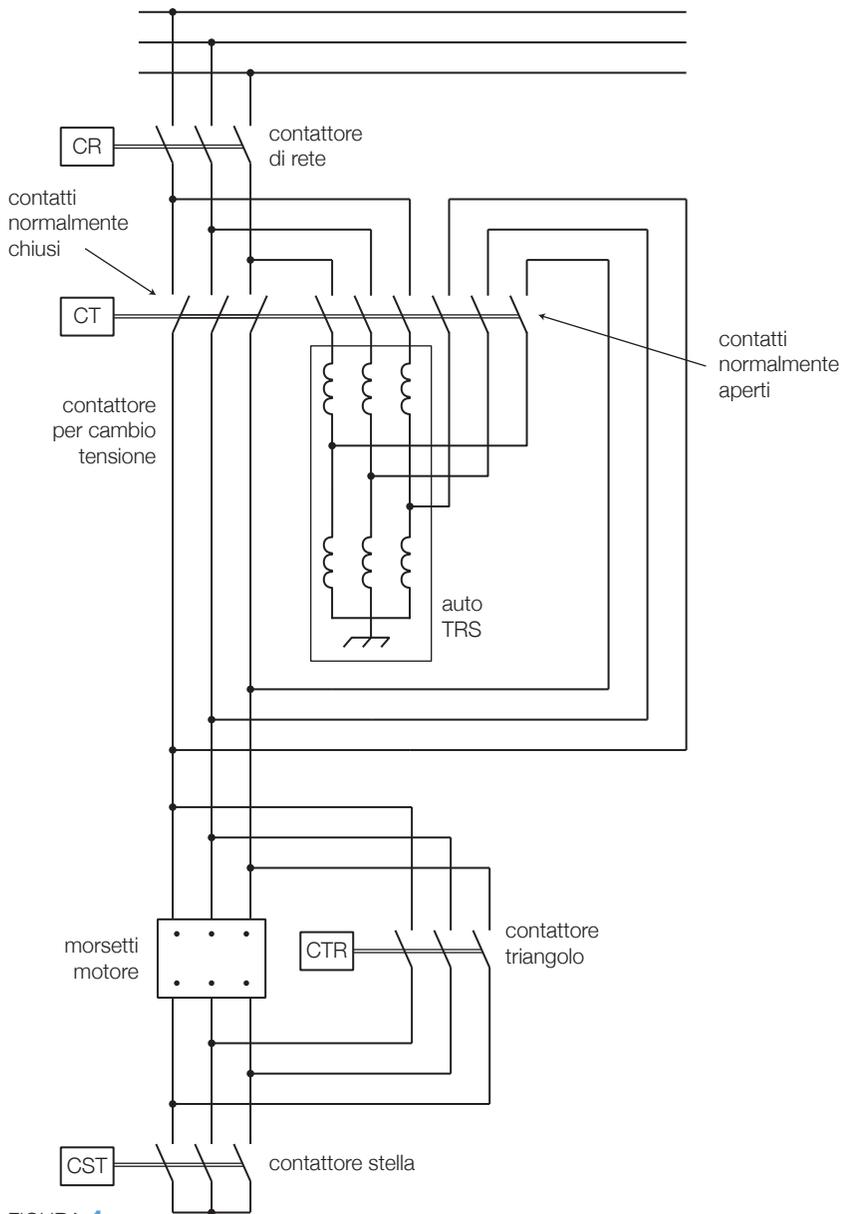


FIGURA 1