



*Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca*

**M334 – ESAME DI STATO DI ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE**

**CORSO DI ORDINAMENTO**

**Indirizzo: Elettrotecnica e Automazione**

**Tema di: Elettrotecnica**

**(Testo valevole per i corsi di ordinamento e per i corsi sperimentali del progetto “SIRIO”)**

Un sistema di sbarre alimenta, alla tensione  $V_1 = 6 \text{ kV}$  e frequenza  $f = 50 \text{ Hz}$ , 2 motori asincroni trifase.

Il primo motore presenta i seguenti valori nominali:

potenza 160 kW      tensione 6 kV      rendimento 0,94       $\cos\phi = 0,82$

Il secondo motore, con 4 poli e  $\cos\phi = 0,81$ , viene alimentato tramite un trasformatore trifase di potenza nominale 45 kVA e rapporto di trasformazione a vuoto 6000V/400V che eroga una corrente  $I = 50 \text{ A}$ .

Le prove eseguite, nelle condizioni di funzionamento, sul gruppo trasformatore-motore hanno dato i seguenti esiti:

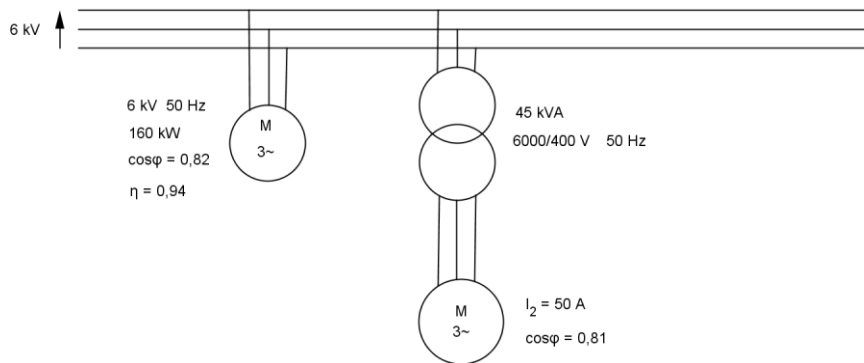
|               |                         |                                              |                        |
|---------------|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| Trasformatore | Prova a vuoto           | $P_0 \% = 1,6 \%$                            | $\cos\phi_0 = 0,32$    |
|               | Prova in corto circuito | $V_{CC} \% = 5 \%$                           | $\cos\phi_{CC} = 0,48$ |
| Motore        | Prova a vuoto           | $P_0 = 1200 \text{ W}$ e $\cos\phi_0 = 0,21$ |                        |
|               | Perdite meccaniche      | $P_m = 400 \text{ W}$ .                      |                        |

Il candidato, fatte eventuali ipotesi aggiuntive,

1. calcoli la potenza assorbita, il rendimento e la resistenza tra 2 morsetti statorici del motore alimentato dal trasformatore sapendo che la coppia resa vale 145 Nm e lo scorrimento è pari al 3%;
2. calcoli il rendimento totale del gruppo trasformatore-motore;
3. determini il fattore di potenza complessivo dell'impianto.

Inoltre, il candidato fatte le considerazioni che ritiene più opportune, descriva gli effetti prodotti da una riduzione del 10% della tensione di alimentazione dell'impianto.

Soluzione



### 1. 1 Potenza assorbita dal motore alimentato dal trasformatore (motore 2)

Del motore è nota la corrente assorbita  $I_2 = 50 A$  il fattore di potenza  $\cos \varphi_2 = 0,81$ , ma non la tensione di alimentazione. Si deve quindi calcolare la tensione secondaria del trasformatore  $V_2$

#### 1.1.1 Calcolo dei parametri equivalenti del trasformatore

Corrente nominale:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_{20}} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 64,95 \approx 65 A$$

Potenza di corto circuito percentuale:

$$P_{cc}\% = V_{cc}\% \cos \varphi_{cc} = 5 \cdot 0,48 = 2,4 \%$$

Potenza di corto circuito:

$$P_{cc} = P_{cc}\% S_n = 0,024 \cdot 45000 = 1080 W$$

Calcolo parametri di corto circuito:

$$R''_{eq} = \frac{P_{cc}}{3 I_{2n}^2} = \frac{1080}{3 \cdot 65^2} = 0,0852 \Omega$$

$$X''_{eq} = R''_{eq} \tan \varphi_{cc} = 0,0852 \cdot 1,828 = 0,156 \Omega$$

### 1.1.2 Calcolo tensione secondaria del trasformatore e tensione di alimentazione motore 2

Si può applicare la formula della cdt industriale:

$$V_2 = V_{20} - \sqrt{3}I_2(R''_{eq} \cdot \cos \varphi_2 + X''_{eq} \cdot \sin \varphi_2)$$

$$V_2 = 400 - \sqrt{3} \cdot 50 \cdot (0,0852 \cdot 0,81 + 0,156 \cdot 0,586) = 400 - 13,89 = 386 \text{ V}$$

### 1.1.3 Potenza assorbita dal motore 2

$$P_2 = \sqrt{3}V_2I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 386 \cdot 50 \cdot 0,81 = 27076 \text{ W}$$

### 1.2 Rendimento motore 2

$$\eta = \frac{P_{R2}}{P_2}$$

Per il calcolo del rendimento serve la potenza resa dal motore 2. Il motore è a 4 poli quindi:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ rad/s}$$

Lo scorrimento è pari al 3% quindi:

$$\omega_2 = \omega_1(1 - s) = 157(1 - 0,03) = 152,3 \text{ rad/s}$$

Poiché il motore eroga una coppia di 145 Nm, si calcola la potenza resa:

$$P_{R2} = \omega_2 T_{R2} = 152,3 \cdot 145 = 22082 \text{ W}$$

Da cui il rendimento:

$$\eta = \frac{P_{R2}}{P_2} = \frac{22082}{27076} = 0,816 \quad 81,6 \%$$

### 1.3 Resistenza tra due morsetti statorici

Per questo calcolo si determina la corrente a vuoto del motore 2, utilizzando la tensione di funzionamento come stabilito dal testo ("nelle condizioni di funzionamento"):

$$I_{02} = \frac{P_{02}}{\sqrt{3}V_{20} \cos \varphi_{02}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 386 \cdot 0,21} = 8,55 \text{ A}$$

Si scrive quindi il sistema:

$$\begin{cases} P_{02} = P_{Fe} + P_m + \frac{3}{2} R_{12} I_0^2 \\ P_2 = P_T + P_{Fe} + \frac{3}{2} R_{12} I_2^2 + P_{add} \end{cases}$$

Si determina poi la potenza trasmessa attraverso la coppia meccanica (trasmessa):

$$T_T = T_R + \frac{P_m}{\omega_2} = 145 + \frac{400}{152,3} = 145 + 2,63 = 147,6 \text{ Nm}$$

$$P_T = \omega_1 T_T = 157 \cdot 147,6 = 23177 \text{ W}$$

e le perdite addizionali:

$$P_{add} = \frac{0,5}{100} P_2 = 0,005 \cdot 27076 = 135 \text{ W}$$

Si risolve quindi il sistema nelle incognite  $R_{12}$  e  $P_{Fe}$ :

$$\begin{cases} 1200 = P_{Fe} + 400 + \frac{3}{2} R_{12} 8,55^2 \\ 27076 = 23177 + P_{Fe} + \frac{3}{2} R_{12} 50^2 + 135 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 800 = P_{Fe} + \frac{3}{2} R_{12} 8,55^2 \\ 3764 = P_{Fe} + \frac{3}{2} R_{12} 50^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 800 = P_{Fe} + 109,6 R_{12} \\ 3764 = P_{Fe} + 3750 R_{12} \end{cases}$$

sottraendo le due equazioni:

$$2964 = 3640 R_{12}$$

da cui:

$$R_{12} = 0,814 \text{ } \Omega \quad P_{Fe} = 711 \text{ W}$$

## 2.1 Potenza assorbita dal trasformatore e rendimento trasformatore-motore

$$P_1 = P_2 + P_j + P_{Fe} + P_{add}$$

Le perdite nel ferro del trasformatore si possono assumere coincidenti con la potenza a vuoto, per cui:

$$P_{Fe} = P_0 = 0,016 \cdot 45000 = 720 \text{ W}$$

$$P_1 = 27076 + 3 \cdot 0,852 \cdot 50^2 + 720 + 0,005P_1 = 28575 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{R2}}{P_1} = \frac{22082}{28575} = 0,772 \quad 77,2 \%$$

### 3 Fattore di potenza complessivo

Si determina la potenza assorbita dal motore 1:

$$P_{M1} = \frac{160000}{0,94} = 170212 \text{ W}$$

e la sua potenza reattiva:

$$Q_{M1} = 170212 \cdot 0,698 = 118808 \text{ VAR}$$

Si determina la potenza reattiva del gruppo trasformatore-motore 2:

$$Q_2 = 27076 \cdot 0,723 = 19576 \text{ VAR}$$

$$Q_1 = Q_2 + 3 \cdot X''_{eq} \cdot I_2^2 + P_0 \tan \varphi_0 = 19576 + 3 \cdot 0,156 \cdot 50^2 + 720 \cdot 2,96 = 22877 \text{ VAR}$$

$$P_{TOT} = 170212 + 28575 = 198787 \text{ W}$$

$$Q_{TOT} = 118808 + 22877 = 141685 \text{ VAR}$$

$$\tan \varphi_{TOT} = \frac{141685}{198787} = 0,712$$

$$\cos \varphi_{TOT} = 0,814$$

### 4 Riduzione della tensione

Una riduzione della tensione del 10% nell'ipotesi di mantenere costante le coppie di carico produce per il primo motore, direttamente connesso alle sbarre di alimentazione una riduzione di circa il 20% della costante di coppia che deve essere compensata da un rallentamento, a sua volta del 20% circa. Anche le perdite nel ferro risultano ridotte di un 20 % ma, dovendo la corrente aumentare anch'essa del 20% circa (nell'ipotesi di linearizzazione della caratteristica meccanica) le perdite joule aumenteranno circa del 40%.

Discorso analogo può essere fatto per il gruppo trasformatore-motore. La tensione a vuoto del trasformatore scende a 360 V. Ipotizzando un 4-5% di cdt interna si avrà una tensione di alimentazione del motore di circa 345 V: ancora un 10 % in meno. Lo scorrimento aumenterà circa del 20% e la corrente assorbita sarà di circa 60 A.