

ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE
Sessione ordinaria 2016 – seconda prova scritta

Indirizzo: ITET – ELETTRATECNICA ED ELETTRONICA
ARTICOLAZIONE ELETTRATECNICA

Tema di: ELETTRATECNICA ED ELETTRONICA

Il candidato svolga la prima parte della prova e due tra i quesiti proposti nella seconda parte.

PRIMA PARTE

Sulla targa di un motore asincrono trifase a 4 poli sono indicate le seguenti caratteristiche:

- potenza nominale 40 kW
- tensione nominale 400 V
- corrente nominale 75 A
- frequenza nominale 50 Hz
- velocità del rotore 1434 giri/min.

Sono state svolte due prove a vuoto con tensioni di alimentazione diverse.

La prima prova è stata eseguita a tensione nominale e ha fornito i seguenti risultati:

$$P_0 = 1500 \text{ W e } I_0 = 15 \text{ A}$$

La seconda prova è stata eseguita alla tensione di 300 V e ha fornito i seguenti risultati:

$$P_0 = 1160 \text{ W e } I_0 = 8 \text{ A}$$

Inoltre, la misura di resistenza tra due morsetti dello statore, eseguita alla temperatura di 15 °C, ha fornito il valore di 0,15 Ω.

Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, nel caso in cui il motore funzioni con il carico di targa, determini:

- a) il rendimento;
- b) la coppia resa.

Sapendo che nella fase di avviamento il motore assorbe a pieno carico una corrente 5,8 volte la corrente nominale e che deve vincere una coppia resistente di 100 Nm, il candidato determini la tensione necessaria al motore per un corretto avviamento e dimensioni il dispositivo adatto a tale scopo giustificando la scelta fatta.

SECONDA PARTE

Il candidato risponda a due, e solo due, dei seguenti quesiti e, fatte eventuali ipotesi aggiuntive ritenute necessarie, presenti per ognuno le linee operative e le motivazioni delle soluzioni prospettate.

1. Considerato il motore indicato nel tema proposto nella prima parte, il candidato illustri il sistema di regolazione in grado di ridurre la velocità del 10% e dimensioni il relativo dispositivo.

2. Un impianto di sollevamento deve essere dimensionato per sollevare una massa di 350 kg alla velocità di 0,6 m/s. Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, dimensiona il motoriduttore adatto.
3. In un piccolo ufficio è necessario installare un gruppo di continuità statico per l'alimentazione di riserva delle utenze informatiche. Nell'ufficio sono presenti 10 PC con monitor a colori e stampanti a getto di inchiostro e due stampanti laser.
Il candidato dimensiona e individua le caratteristiche del gruppo di continuità adatto sapendo che tutte le utenze possono lavorare contemporaneamente.
4. Il candidato spieghi come un alternatore può essere correttamente posto in parallelo ad una rete prevalente.

SVOLGIMENTO PRIMA PARTE

In base alle indicazioni del testo si deduce che la potenza resa è quella nominale in quanto il motore funziona col carico di targa, per cui si ha: $P_r = P_n = 40 \text{ kW}$.

Per il calcolo del rendimento occorre determinare le potenze perse, per risalire alla potenza assorbita. Le perdite nel ferro e meccaniche si ricavano dai risultati delle prove a vuoto, con la procedura seguente:

- 1) Si calcolano le perdite joule statoriche a vuoto, con la resistenza alla temperatura di prova:

$$P_{j01} = 1,5R_m I_{01}^2 = 1,5 \times 0,15 \times 15^2 = 50,6 \text{ W}$$

$$P_{j02} = 1,5R_m I_{02}^2 = 1,5 \times 0,15 \times 8^2 = 14,4 \text{ W}$$

- 2) Si calcola la somma delle perdite nel ferro più quelle meccaniche, sottraendo alla potenza a vuoto le perdite precedenti:

$$(P_f + P_{av})_1 = P_{01} - P_{j01} = 1500 - 50,6 = 1449,4 \text{ W}$$

$$(P_f + P_{av})_2 = P_{02} - P_{j02} = 1160 - 14,4 = 1145,6 \text{ W}$$

- 3) Sapendo che le perdite nel ferro sono proporzionali a V^2 mentre quelle meccaniche sono indipendenti dalla tensione, dalle relazioni $(P_f + P_{av})_1 = KV_1^2 + P_{av}$ e $(P_f + P_{av})_2 = KV_2^2 + P_{av}$ si ricava:
 $(P_f + P_{av})_1 - (P_f + P_{av})_2 = K(V_1^2 - V_2^2)$, da cui si ottiene il valore del fattore di proporzionalità K :

$$K = \frac{(P_f + P_{av})_1 - (P_f + P_{av})_2}{(V_1^2 - V_2^2)} = \frac{1449,4 - 1145,6}{400^2 - 300^2} = 4,34 \cdot 10^{-3}$$

- 4) Si calcolano le perdite meccaniche e quelle nel ferro alla tensione nominale con le relazioni:

$$P_{av} = (P_f + P_{av})_1 - KV_1^2 = 1449,4 - 4,34 \cdot 10^{-3} \times 400^2 = 755 \text{ W}$$

$$P_f = KV_n^2 = 4,34 \cdot 10^{-3} \times 400^2 = 694,4 \text{ W}$$

Le perdite joule statoriche relative alla corrente di funzionamento $I_1 = I_n = 75 \text{ A}$ si calcolano alla temperatura convenzionale di regime del motore. Supponendo che essa sia pari a 75°C e che l'avvolgimento sia in rame, la resistenza da considerare è uguale a:

$$R_m = 0,15 \frac{234,5 + 75}{234,5 + 15} = 0,186 \Omega$$

Si ottiene quindi: $P_{j1} = 1,5 R_m I_1^2 = 1,5 \times 0,186 \times 75^2 = 1569 \text{ W}$.

Per il calcolo delle perdite joule rotoriche si usa la formula $P_{j2} = s P_t$, dove lo scorrimento è quello relativo al funzionamento alla velocità nominale $n_n = 1434 \text{ giri/min}$.

Essendo $n_0 = 60 f / p = 60 \times 50 / 2 = 1500 \text{ giri/min}$, si ottiene:

$$s = s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1500 - 1434}{1500} = 0,044 \text{ (4,4\%)}$$

La potenza trasmessa è data da: $P_t = P_r + P_{av} + P_{j2} = P_r + P_{av} + s P_t$, da cui si ricava:

$$P_t = \frac{P_r + P_{av}}{1 - s} = \frac{40\,000 + 755}{1 - 0,044} = 42\,631 \text{ W}$$

Si ricava quindi: $P_{j2} = s P_t = 0,044 \times 42\,631 = 1876 \text{ W}$.

Le perdite addizionali si possono ritenere convenzionalmente pari allo 0,5% della potenza resa, uguali a: $P_{add} = 0,5 \times 40\,000 / 100 = 200 \text{ W}$.

La potenza assorbita dal motore nel funzionamento col carico nominale, il rendimento e la coppia resa nominale sono dati da:

$$P_a = P_t + P_f + P_{j1} + P_{add} = 42\,631 + 694,4 + 1569 + 200 = 45\,094 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{40\,000}{45\,094} = 0,887$$

$$C_r = \frac{60 P_r}{2 \pi n_n} = \frac{60 \times 40\,000}{2 \times \pi \times 1434} = 266,4 \text{ Nm}$$

Per rispondere alla terza domanda della prima parte, occorre anzitutto calcolare la coppia di spunto alla piena tensione, per valutare di quanto deve essere ridotta tale coppia.

La corrente di spunto alla tensione nominale è uguale a: $I_a = 5,8 I_n = 5,8 \times 75 = 435 \text{ A}$.

Dato che tale corrente è data dal rapporto: $I_a = V_1 / (\sqrt{3} Z_{1cc})$ si ottiene:

$$Z_{1cc} = \frac{V_1}{\sqrt{3} I_a} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 435} = 0,531 \Omega$$

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

$$R_{1cc} = Z_{1cc} \cos \varphi_{cc} = 0,531 \times 0,55 = 0,292 \Omega$$

$$X_{1cc} = Z_{1cc} \sin \varphi_{cc} = 0,531 \times 0,835 = 0,443 \Omega$$

Si suppone che le fasi statoriche siano collegate a stella, per cui la resistenza di fase è data da:

$$R_1 = R_m / 2 = 0,186 / 2 = 0,093 \Omega$$

Dalla relazione $R_{1cc} = R_1 + R'_2$ si ricava il valore della resistenza rotorica riportata alla statore:

$$R'_2 = R_{1cc} - R_1 = 0,292 - 0,093 = 0,199 \Omega$$

La coppia di avviamento del motore è data da:

$$C_a = \frac{p R'_2 V_1^2}{2 \pi f Z_{1cc}^2} = \frac{2 \times 0,199 \times 400^2}{2 \times \pi \times 50 \times 0,531^2} = 719 \text{ Nm}$$

pari a circa 2,7 volte la coppia nominale, che è un valore normalmente riscontrabile in pratica.

Poiché all'avviamento il motore deve vincere la coppia resistente di 100 Nm e deve avere un margine di coppia per imprimere al rotore l'accelerazione voluta, si ipotizza di ridurre la coppia di avviamento a 150 Nm, in modo da avere una coppia accelerante di 50 Nm.

Dato che la coppia sviluppata è proporzionale al quadrato della tensione, vale la proporzione:

$$\frac{719}{400^2} = \frac{150}{V_a^2}$$

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

$$V_a = 400 \sqrt{\frac{150}{719}} = 182,7 \text{ V}$$

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

$$I_a = 435 \frac{182,7}{400} = 199 \text{ A}$$

pari a 2,65 I_n .

Per realizzare l'avviamento a tensione ridotta le soluzioni sono varie:

- Usare un variatore di tensione a induzione (variac) che si comporta da autotrasformatore, dimensionato per la piena tensione del motore (400 V) e per la corrente di spunto di 199 A.
- Usare un variatore di tensione statico di tipo elettronico, con tensione di uscita regolabile, dimensionato per gli stessi valori precedenti.
- Impiegare un convertitore statico a.c.-a.c. con tensione e frequenza di uscita regolabili, formato da un raddrizzatore lato linea e da un inverter lato macchina. In questo modo si soddisfa anche l'esigenza di regolare in modo efficiente la velocità, come richiesto al primo punto della seconda parte della traccia.

SVOLGIMENTO SECONDA PARTE

Quesito 1

Supponendo 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 e, di conseguenza, la coppia massima;
- per frequenze oltre f_n fino alla frequenza massima si effettua la regolazione a tensione costante, col 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.

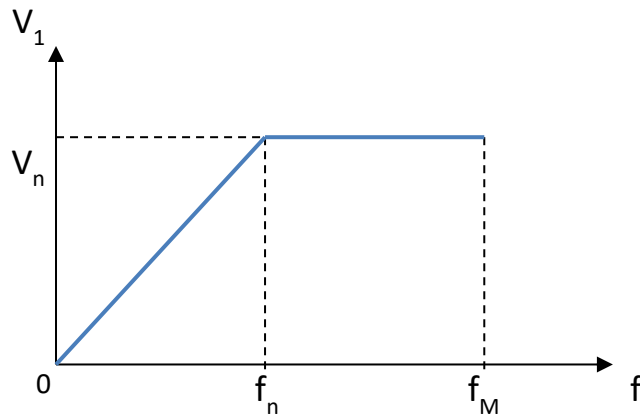


Figura 1 Curva di regolazione tensione-frequenza.

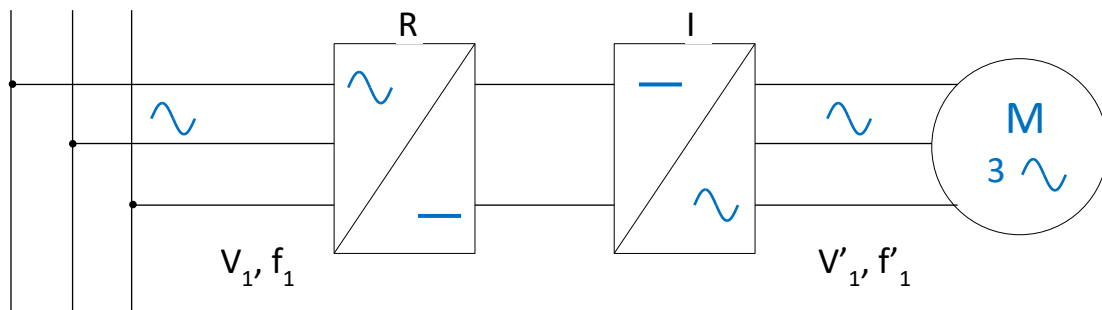


Figura 2 Alimentazione del motore tramite raddrizzatore e inverter.

La nuova velocità di rotazione sarà pari a: $n' = 0,9 \times n = 0,9 \times 1434 = 1290,6$ 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:

$$n'_0 = \frac{n'}{1-s} = \frac{1290,6}{1-0,044} = 1350 \text{ giri/min}$$

a cui corrisponde la frequenza:

$$f' = \frac{n'_0 p}{60} = \frac{1350 \times 2}{60} = 45 \text{ Hz}$$

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.

Quesito 2

Per effettuare il dimensionamento di massima del motoriduttore occorre determinarne la potenza e il rapporto di trasmissione.

Nella **figura 3** è rappresentato schematicamente il tamburo su cui si avvolge la fune di sollevamento del peso. In essa sono indicati con P il peso da sollevare, con F_m la forza motrice da applicare, con v la velocità di sollevamento, con ω_2 la velocità angolare corrispondente.

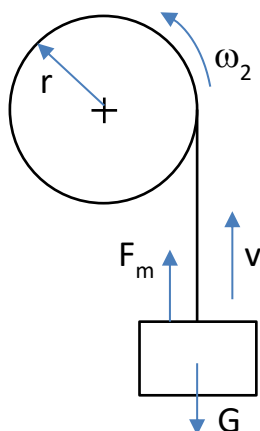


Figura 3 Rappresentazione schematica del sistema di sollevamento.

Il peso da sollevare è dato da: $G = mg = 350 \times 9,81 = 3433,5 \text{ N}$.

La forza motrice da applicare per sollevare il peso, tenendo anche conto della forza occorrente per imprimere una certa accelerazione a è data da: $F_m = G + ma$.

Supponendo che all'avvio l'aumento di velocità da 0 a 0,6 m/s avvenga nel tempo di 1 s, l'accelerazione sarà pari a $0,6 \text{ m/s}^2$, per cui si ottiene: $F_m = G + ma = 3433,5 + 350 \times 0,6 = 3644 \text{ N}$.

La potenza necessaria per sviluppare questa forza è data da:

$$P = F_m v = 3644 \times 0,6 = 2186,4 \text{ W}$$

Per il motoriduttore si potrà scegliere un motore elettrico di potenza nominale (resa) pari a $P_n = 2,5 \text{ kW}$, per tener anche conto della potenza persa nel sistema di ingranaggi.

Supponendo che il raggio del tamburo sia $r = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$, alla velocità periferica $v = 0,6 \text{ m/s}$ corrisponderà una velocità angolare $\omega_2 = v/r = 0,6/0,15 = 4 \text{ rad/s}$ che, espressa in giri/min dà la velocità di rotazione d'uscita del motoriduttore:

$$n_2 = \frac{60 \omega_2}{2 \pi} = \frac{60 \times 4}{2 \pi} = 38,2 \text{ giri/min}$$

valore che può essere approssimato a 40 giri/min.

Supponendo che il motore elettrico sia del tipo con $2p = 8$ poli e che funzioni con scorrimento $s\% = 4\%$, la velocità di rotazione d'ingresso del motoriduttore sarà uguale a:

$$n_1 = n_0(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) = \frac{60 \times 50}{4}(1 - 0,04) = 720 \text{ giri/min}$$

Verrà quindi scelto un motoriduttore di potenza 2,5 kW e rapporto di trasmissione $720/40 = 18$.

Quesito 3

Per determinare la potenza del gruppo di continuità (UPS), si fissano le potenze unitarie dei componenti, assumendo i seguenti valori:

- PC (tipo desktop): 150 W;
- monitor a colori: 150 W;
- stampante a getto d'inchiostro: 100 W;
- stampante laser: 800 W.

Dato che tutte le utenze possono lavorare contemporaneamente, la potenza convenzionale totale da fornire ai carichi, corrispondente alla potenza massima di utilizzazione del gruppo di continuità, è data da:

$$P_t = 10 \times (150 + 150 + 100) + 2 \times 800 = 5600 \text{ W}$$

Ipotizzando un fattore di potenza medio uguale a 0,8, la potenza apparente corrispondente è pari a:

$$S_t = P_t / 0,8 = 5600 / 0,8 = 7000 \text{ VA} = 7 \text{ kVA}$$

Il gruppo di continuità da scegliere dovrà avere le seguenti caratteristiche, da confrontare con quelle offerte dai prodotti presenti sul mercato:

- UPS monofase con configurazione on line;
- potenza apparente nominale 8 kVA per avere un margine di potenza per eventuali futuri ampliamenti;
- potenza attiva nominale con f.d.p. 0,8 pari a 6,4 kW;
- tensione d'ingresso 230 V efficaci in c.a. monofase;
- frequenza 50 Hz;
- autonomia almeno sufficiente al salvataggio automatico dei dati in condizioni di emergenza mediante apposito software;
- tensione d'uscita 230 V efficaci in c.a. monofase.

Quesito 4

Per rete di potenza prevalente (in teoria infinita) si intende una rete già alimentata da altri alternatori aventi potenza tale da poter considerare non influente, sulle condizioni di funzionamento della rete, la potenza erogata o assorbita dalla macchina da collegare. Ciò significa ritenere costanti i valori della tensione e della frequenza di rete prima e dopo il collegamento.

Per poter effettuare correttamente il parallelo occorre avviare la macchina sincrona a vuoto, ossia con l'interruttore di macchina aperto, e regolarne il funzionamento in modo che le tensioni concatenate ai morsetti della macchina coincidano in valore efficace, fase e frequenza con quelle della rete. Se si dovesse chiudere l'interruttore di macchina senza rispettare le condizioni precedenti, circolerebbero nello statore della macchina correnti di valore elevato, dovute alla differenza tra le tensioni di rete e quelle indotte nelle fasi statoriche, che potrebbero danneggiare la macchina stessa.

Per effettuare l'operazione di parallelo la sequenza delle operazioni da fare è la seguente.

1. Mediante il motore primo si avvia la macchina sincrona a vuoto e smagnetizzata (corrente di eccitazione nulla) e si aumenta la velocità di rotazione, fino ad arrivare alla velocità di sincronismo $n_0 = 60f/p$ imposta dalla frequenza di rete, misurata con un contagiri. In questa condizione il motore primo deve fornire solo la coppia e la potenza necessarie a vincere gli attriti interni della macchina, essendo nulle sia la corrente di eccitazione che quella statorica e, pertanto, anche la coppia elettromagnetica.
2. Si alimenta l'avvolgimento di eccitazione, facendo circolare una corrente tale da ottenere ai morsetti della macchina un sistema di tensioni concatenate aventi frequenza e valore efficace uguali a quelli della rete. L'uguaglianza delle tensioni può essere verificata installando due voltmetri tra le stesse coppie di fasi, uno sulla linea e l'altro sulla macchina. In modo analogo, con una coppia di frequenzimetri, si controlla l'uguaglianza delle frequenze. La macchina funziona a vuoto ma in presenza del campo magnetico creato dalla corrente di eccitazione, per cui il motore primo deve fornire la coppia e la potenza necessarie a sopprimere alle perdite a vuoto (somma di quelle meccaniche e nel ferro).

3. Effettuando una regolazione fine dell'eccitazione e controllando costantemente il contagiri, i voltmetri e i frequenzimetri si ricerca la condizione di sincronismo tra la rete e la macchina, condizione in cui le due terne di tensione, di rete e di macchina, coincidono perfettamente non solo in valore efficace e frequenza, ma anche in fase. Tale condizione viene rilevata con un *sincronoscopio*, che può essere del tipo a lampade, a indice o digitale.
4. Si esegue il collegamento della macchina sincrona con la rete chiudendo l'interruttore di macchina.
5. Al termine delle operazioni di parallelo la macchina sincrona funziona ancora a vuoto, in quanto le tensioni indotte statoriche sono uguali a quelle della rete, per cui nelle fasi statoriche non circola corrente. Agendo sulla corrente di eccitazione si porta la macchina a funzionare nel modo voluto, come generatore, come motore oppure come compensatore sincrono.