



ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE

Indirizzo: ITET - Elettrotecnica ed Elettronica
Articolazione "Elettrotecnica"
Tema di: Elettrotecnica ed Elettronica
e Sistemi Automatici
Sessione ordinaria 2019

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

PRIMA PARTE

In un cementificio si vuole automatizzare il processo dell'impasto del calcestruzzo ottenuto dalla miscela di diversi composti opportunamente pesati e combinati con acqua, che vengono amalgamati all'interno di un mixer. Il cementificio produce due diverse tipologie di miscele:

	Sabbia (kg)	Cemento (kg)	Inerte (kg)	Acqua (litri)
Calcestruzzo non armato	640	250	1200	150
Calcestruzzo armato	640	300	1200	120

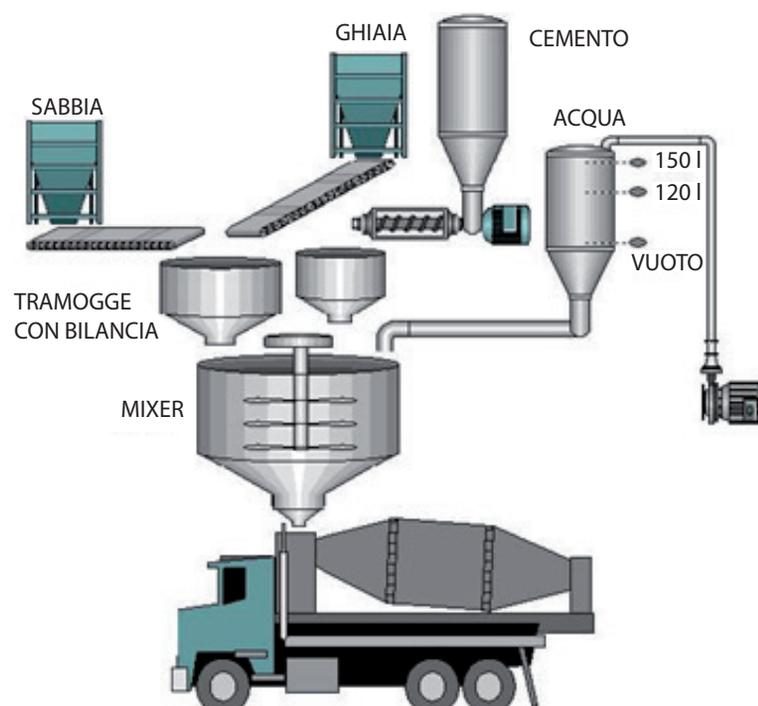
Un operatore, premendo un pulsante di START, determina l'avvio del sistema automatizzato.

Il processo ha inizio con la selezione della tipologia di miscela da realizzare in modo da determinare le quantità dei materiali da versare nelle tramogge. Il dosaggio dei materiali viene realizzato con sistema a peso.

La sabbia e l'inerte (ghiaia) confluiscono dai silos dotati di serranda pneumatica sul fondo, mediante nastri trasportatori, in una tramoggia con bilancia; quando viene rilevato il peso previsto del materiale, deve essere arrestato il nastro trasportatore e contemporaneamente chiusa la serranda pneumatica dei silos.

Nella tramoggia viene immessa prima la sabbia e poi la ghiaia e le pesate vengono realizzate con operazioni successive.

Il cemento viene, invece, immesso direttamente in un'altra tramoggia con bilancia.



Effettuate le operazioni di pesatura, i materiali vengono immessi in un miscelatore (mixer): dapprima vengono versate la sabbia e la ghiaia e successivamente il cemento.

Dopo una prima fase di pre-miscelazione a secco, che dura 20 secondi, viene immessa l'acqua e avviata la fase di miscelazione vera e propria per 100 secondi.

L'acqua viene prelevata da un serbatoio dotato di un'elettrovalvola a sfera che consente l'erogazione per una durata pari alla rilevazione effettuata da un opportuno misuratore volumetrico di flusso collocato a valle dell'elettrovalvola. Il misuratore ha tensione di esercizio $5\div 24$ Vdc e campo di misura 0,5 l/s.

Il miscelatore è azionato da un motore asincrono trifase ed è dotato di uno sportello di scarico che si apre al termine della fase di miscelazione quando un sensore rileva la presenza di una betoniera per l'operazione di scarico, che viene effettuata in un tempo pari a 30 secondi.

Lo sportello può essere aperto anche mediante una pompa idraulica manuale in caso di emergenza.

Una volta terminata l'operazione di scarico, il sistema riprende il processo dall'inizio.

Il ciclo si ripete fino a quando non viene premuto un pulsante di STOP che determina l'arresto del processo di produzione e riporta l'impianto alle condizioni iniziali ed è presente un sistema di segnalazione luminosa relativo alle diverse fasi del processo.

Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie:

1. rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione dell'impianto di produzione del calcestruzzo;
2. elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza;
3. dimensioni la potenza del motore per l'azionamento dei nastri trasportatori considerando che:
 - a. la massa totale per unità di lunghezza è pari a 1080 kg/m;
 - b. i silos distano 10 metri dalla tramoggia;
 - c. la velocità con cui avanza il nastro trasportatore è pari a 0,6 m/s;
 - d. il valore del coefficiente di attrito globale stimato che tiene conto di tutti i fenomeni presenti è uguale a 2,4;
5. descriva il funzionamento del motore asincrono che aziona il miscelatore e ne illustri le curve caratteristiche in relazione al carico meccanico collegato al motore.

SECONDA PARTE

Quesito 1

Con riferimento alla prima parte della prova, e in particolare al sistema di caricamento degli ingredienti, si supponga che i silos contenenti le materie prime siano provvisti di indicatori di livello a ultrasuoni che segnalano la quota di materiale presente durante il processo e forniscono un'uscita in corrente nell'intervallo $4\div 20$ mA corrispondenti rispettivamente al livello massimo e minimo.

Il candidato realizzi un sistema di blocco temporaneo del processo di produzione quando almeno un rilevatore a ultrasuoni segnala il livello minimo all'interno dei silos e la successiva ripartenza una volta che il serbatoio viene nuovamente riempito.

Quesito 2

Con riferimento alla prima parte della prova, il candidato descriva come è possibile effettuare la regolazione della velocità delle pale del sistema di miscelazione.

Quesito 3

Un motore asincrono trifase a 2 poli presenta i seguenti dati di targa:

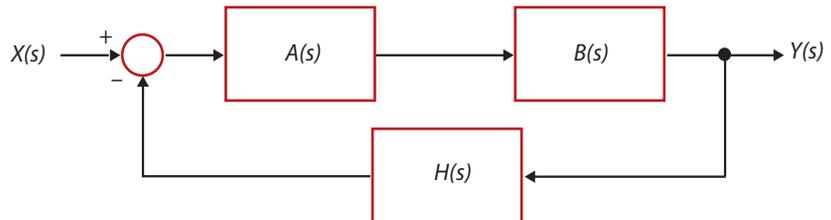
- potenza $P_n = 4$ kW; frequenza $f_n = 50$ Hz
- tensione $V_n = 400$ V; velocità $N_n = 2890$ rpm
- corrente $I_n = 8,3$ A; fattore di potenza $\cos\varphi_n = 0,81$

All'avviamento il motore produce una coppia pari a 48,1 Nm e assorbe una corrente pari a 7 volte la corrente di pieno carico.

Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, discuta come ridurre la corrente di spunto, scelga il dispositivo idoneo a realizzare tale riduzione e valuti come varia la coppia di avviamento nelle nuove condizioni.

Quesito 4

Sia dato l'impianto lineare il cui schema a blocchi è riportato in figura:



Le funzioni di trasferimento dei blocchi valgono: $A(s) = \frac{K}{s^2 + 2s}$ con K parametro reale; $B(s) = \frac{s+1}{s+3}$; $H(s) = \frac{1}{s}$

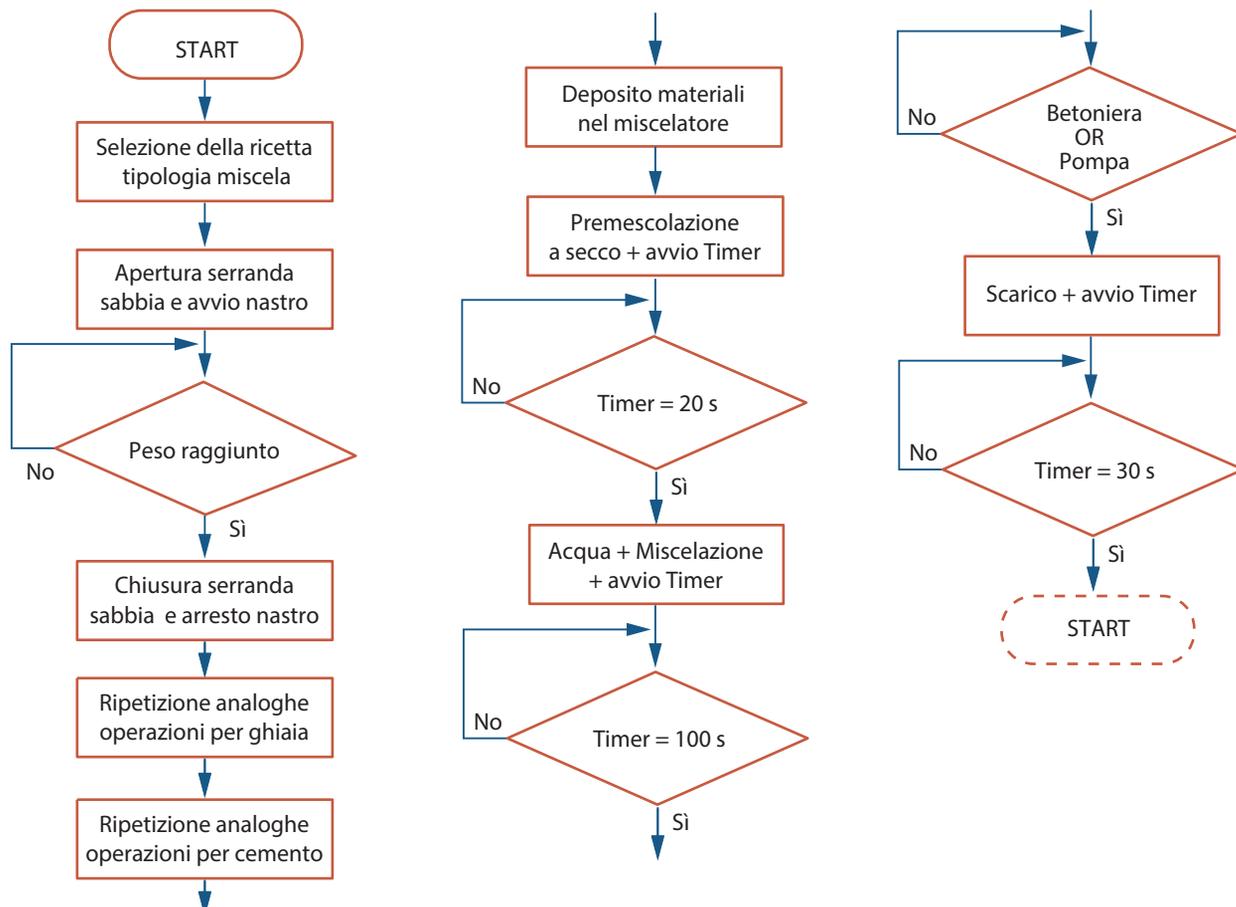
Il candidato, dopo aver calcolato la funzione di trasferimento complessiva del sistema, ne studi la stabilità al variare del parametro K .

Il candidato determini inoltre per quale valore del parametro K l'errore di velocità del sistema si mantiene inferiore allo 0,5% giustificando la risposta.

SOLUZIONE PRIMA PARTE

Quesito 1 – Il candidato rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione dell'impianto di produzione del calcestruzzo.

Sostanzialmente l'algoritmo è un flusso in sequenza temporizzato dai timer. Non ci sono particolari strutture iterative mentre ve ne sono di decisionali, per testare il peso degli elementi e l'attivazione dell'uscita Q del timer.



Quesito 2 – Il candidato elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza.

Viene proposta una soluzione con il programma Codesys, della quale viene fornito il file.

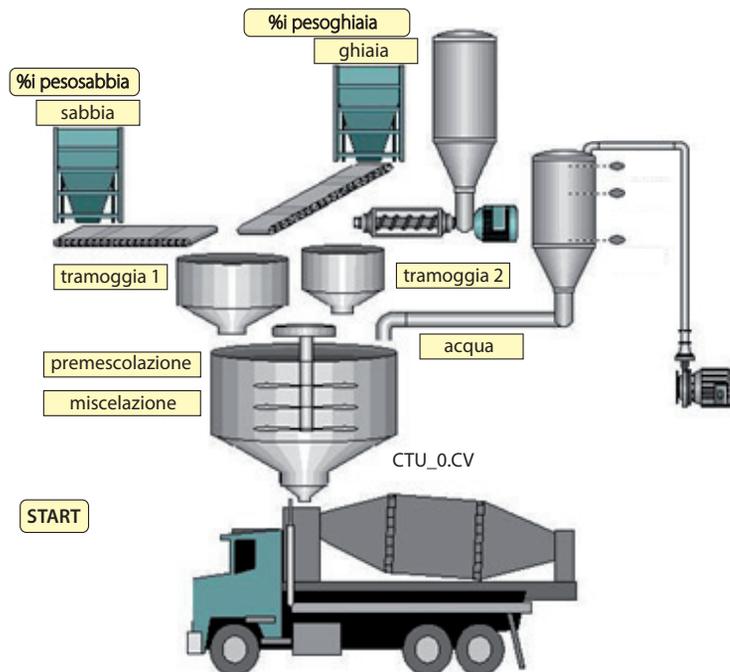
Il programma di gestione, con qualche lieve semplificazione rispetto al testo del problema, è in linguaggio ST Structured Text.

Esso si compone di tre fasi, che vengono attivate mediante le omonime variabili FASE1, FASE2 e FASE3.

Una fase disattiva se stessa al termine e attiva la fase successiva, ponendo la corrispondente variabile a TRUE.

Il quadro qui visualizzato prevede i seguenti elementi di controllo e monitoraggio, ai quali corrispondono le variabili elencate a fianco.

- sabbia, ghiaia, tramoggia1, tramoggia2: spie che si illuminano quando le serrande e i silos vengono aperti.
- acqua: spia che segnala l'immissione dell'acqua.
- premescolazione, miscelazione: spie che segnalano le rispettive fasi.
- pesosabbia, pesoghiaia: caselle di testo nelle quali è possibile scrivere il peso, per simulare il raggiungimento del peso previsto.



```
PROGRAM PLC_PRG
```

```
VAR
```

```
START: BOOL;
FASE1: BOOL;
FASE2: BOOL;
FASE3: BOOL;
sabbia: BOOL;
ghiaia: BOOL;
tramoggia1: BOOL;
tramoggia2: BOOL;
pesosabbia: INT;
pesoghiaia: INT;
premescolazione: BOOL;
acqua: BOOL;
miscelazione: BOOL;
TON_0: TON;
TON_1: TON;
TON_2: TON;
```

```
END_VAR
```

- Se viene premuto il pulsante di START vengono innanzitutto inizializzate le variabili.
- Successivamente se viene raggiunto il *pesosabbia* (impresso dall'utente in simulazione tramite la casella di testo) in *tramoggia1* la spia *sabbia* si spegne (ovvero si chiude la serranda del silos). Lo stesso accade con *pesoghiaia* e *ghiaia*.

```
IF START=TRUE THEN
  pesosabbia:=0;
  sabbia:=FALSE;
  pesoghiaia:=0;
  ghiaia:=FALSE;
  tramoggia1:=TRUE;
  tramoggia2:=FALSE;
  TON_0.IN:=FALSE;
  FASE1:=FALSE;
  FASE2:=FALSE;
  FASE3:=FALSE;
```

```
END_IF
```

inizializzazione

```
sabbia:=TRUE;
IF pesosabbia=640 THEN
  sabbia:=FALSE;
  ghiaia:=TRUE;
END_IF
IF pesoghiaia=1200 THEN
  ghiaia:=FALSE;
  FASE1:=TRUE;
END_IF
```

sabbia + ghiaia



- c. Nella FASE1 avviene l'implementazione della immissione del cemento. Per dare l'illusione che il cemento venga versato dopo viene impostato un ritardo di 5 s con il timer TON_0.
- d. Nella FASE2 avviene la premescolazione per 20 secondi.
- e. Nella FASE3 avviene la mescolazione con acqua per 100 secondi. Al termine le spie *mescolazione* e *acqua* si spengono.

```
IF FASE1=TRUE THEN
tramoggia1:=FALSE;
TON_0 (IN:=TRUE,
PT:=T#5S);
tramoggia2:=TON_0.Q;
FASE1:=FALSE;
FASE2:=TON_0.Q;
END_IF
```

FASE1

```
IF FASE2=TRUE THEN
TON_1 (IN:=FASE2,
PT:=T#20S);
premescolazione:=TRUE;
FASE2:=FALSE;
FASE3:=TON_1.Q;
END_IF
```

FASE2

```
IF FASE3=TRUE THEN
acqua:=TRUE;
premescolazione:=FALSE;
TON_2 (IN:=FASE3,
PT:=T#100S);
miselazione:=NOT TON_2.Q;
acqua:=NOT TON_2.Q;
END_IF
```

FASE3

Quesito 3 – Il candidato dimensiona la potenza del motore per l'azionamento dei nastri trasportatori.

La potenza è il lavoro espresso dal motore nell'unità di tempo. Per completezza di esposizione vengono scritte le grandezze per esteso e con le rispettive unità di misura.

La potenza è funzione del lavoro e del tempo:

$$\text{Potenza [Watt]} = \text{Lavoro [Joule]} / \text{Tempo [secondi]}$$

Il tempo impiegato per trasferire la massa, che immaginiamo per semplicità concentrata in un unico punto vale:

$$\text{Tempo [secondi]} = \text{Spazio [metri]} / \text{Velocità [metri/secondo]} = 10/0,6 = 16,7 \text{ s}$$

Si tratta ora pertanto di calcolare il lavoro della forza, che come noto è il prodotto della forza per lo spostamento.

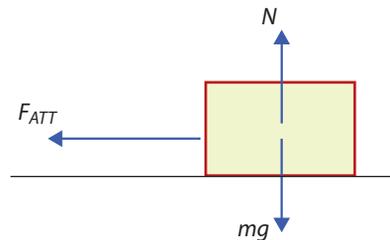
$$\text{Lavoro [Joule]} = \text{Forza [Newton]} \cdot \text{Spostamento [metri]}$$

La forza da vincere è dovuta all'attrito dinamico $\mu_D = 2,4$.

Questa forza è proporzionale alla reazione vincolare $N = mg$.

La massa per unità di lunghezza va moltiplicata per 10.

$$F_{ATT} = \mu_D \cdot mg = 2,4 \cdot 1080 \cdot 10 \cdot 9,81 = 254275 \text{ N}$$



Il lavoro per vincere la forza di attrito (a regime la forza d'inerzia è nulla in quanto la velocità è costante, quindi l'accelerazione $a = 0$) vale quindi:

$$\text{Lavoro [Joule]} = F_{ATT} \cdot \text{Spostamento [m]} = 254275 \cdot 10 = 2542750 \text{ [Joule]}$$

Risulta infine per la potenza:

$$P \text{ [Watt]} = \text{Lavoro [Joule]} / \text{Tempo [s]} = 2542750 / 16,7 = 152260 \cong 152 \text{ kW}$$

Considerando anche il rendimento medio di 0,9 si ha:

$$P \text{ [Watt]} = P \text{ [Watt]} / 0,9 \cong 169 \text{ kW}$$

Sarebbe stato possibile ricavare la potenza direttamente con la formula Potenza = Forza · Velocità, senza passare attraverso il calcolo del tempo.

Quesito 4 – Il candidato descriva il funzionamento del motore asincrono che aziona il miscelatore e ne illustri le curve caratteristiche in relazione al carico meccanico collegato al motore.

La caratteristica meccanica $C_M(n)$ di un MAT mette in relazione la coppia espressa dal motore in funzione della velocità n [giri/min].

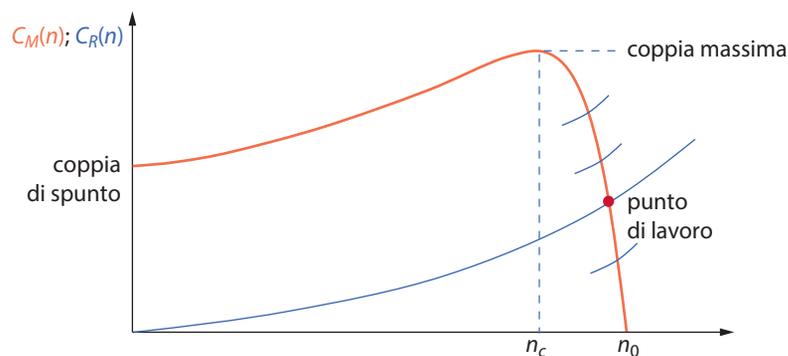
Il punto di lavoro del motore si colloca all'intersezione tra la curva meccanica del MAT e la caratteristica $C_R(n)$ della coppia resistente.

Si osserva inoltre nel grafico:

- coppia di spunto – espressa all'avviamento, a motore fermo, ovvero a $n = 0$.
- coppia massima – alla velocità n_C cosiddetta critica.
- velocità a vuoto n_0 – massima velocità per coppia $C = 0$.

Il grafico è suddiviso in due regioni, discendente a destra di n_C e ascendente a sinistra.

- Tratto stabile a destra di n_C – se al motore viene applicata una coppia resistente sempre maggiore (tratti di curva di colore blu), il punto di lavoro si sposta verso il punto a coppia massima; la velocità si riduce ma il motore non si ferma, in quanto in grado di esprimere una coppia tale da contrastare la coppia resistente.
- Tratto instabile a sinistra di n_C – se la coppia resistente cresce il punto di lavoro slitta verso sinistra, a valori di velocità minori ma anche con coppia inferiore. Il motore non è pertanto in grado di assecondare la maggiore richiesta di coppia e rallenta progressivamente fino ad arrestarsi.



SOLUZIONE SECONDA PARTE

Quesito 1 – Il candidato realizzi un sistema di blocco temporaneo del processo di produzione quando almeno un rilevatore ad ultrasuoni segnala il livello minimo all'interno dei silos e la successiva ripartenza una volta che il serbatoio viene nuovamente riempito.

La corrente di $4 \div 20$ mA può essere convertita in una tensione da fornire al PLC che controlla il sistema, tramite un circuito convertitore corrente-tensione con operazionale.

La sua tensione d'uscita risulta infatti data dal prodotto della corrente I del trasduttore per la resistenza R di reazione sul terminale negativo dell'operazionale.

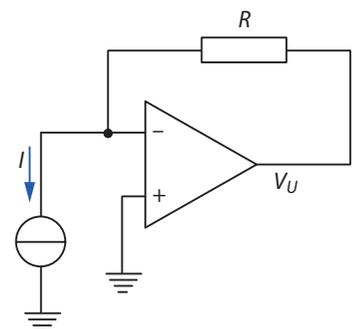
Scegliendo $R = 100 \Omega$ si ricava:

$$V_U = I \cdot R \quad V_{UMIN} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,4 \text{ V} \quad V_{UMAX} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 2 \text{ V}$$

Si ipotizza che queste tensioni vengano convertite nei valori digitali 40 e 200.

Si fornisce una soluzione verificabile con il simulatore Codesys.

1. Se il livello della SABBIA eguaglia la soglia minima 40 viene settato il MERKER_MINIMO.
2. Questo sulla linea di avvio, essendo normalmente chiuso, interrompe il segnale dato dal pulsante AVVIO impedendo che giunga al MERKER_AVVIO.
3. Quando il livello della SABBIA torna al valore massimo 200, il MERKER_MINIMO viene resettato e ripristina la possibilità di avviare il sistema mediante il pulsante di AVVIO e il MERKER_AVVIO.





```
PROGRAM PLC_PRG
```

```
VAR
```

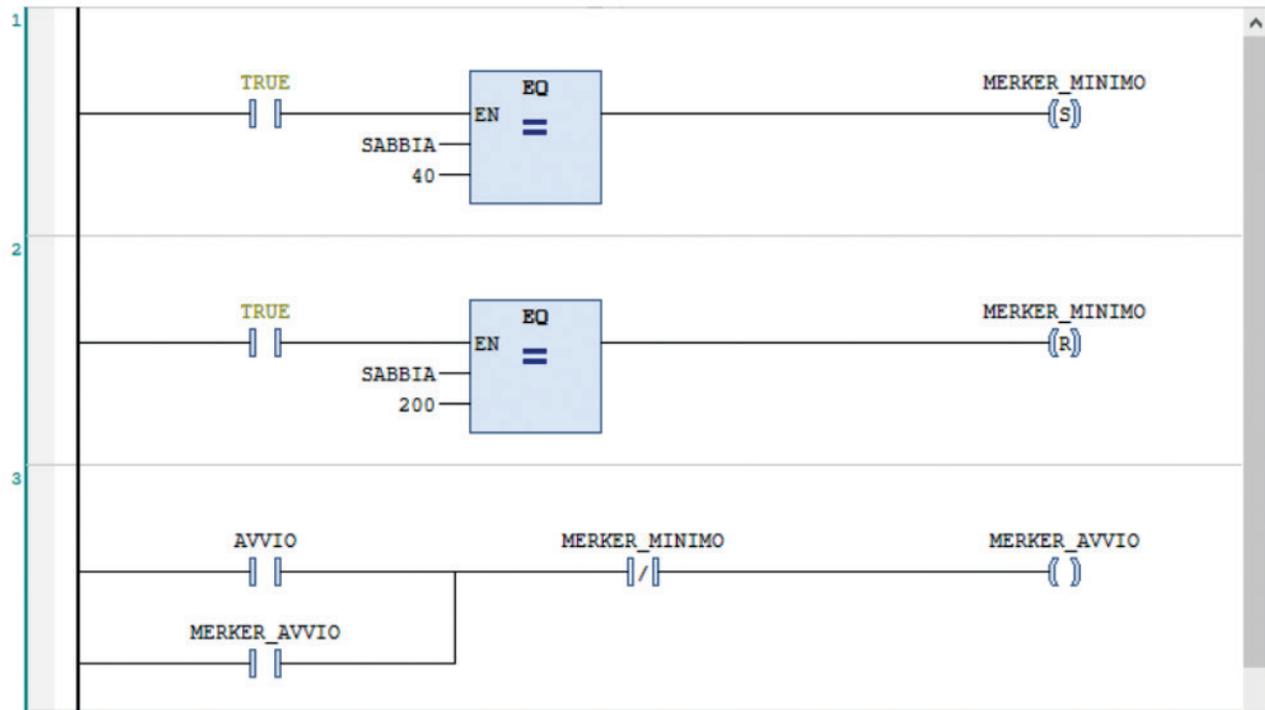
```
    MERKER_MINIMO: BOOL;
```

```
    SABBIA: INT;
```

```
    AVVIO: BOOL;
```

```
    MERKER_AVVIO: BOOL;
```

```
END_VAR
```



Quesito 2 – Con riferimento alla prima parte della prova, il candidato descriva come è possibile effettuare la regolazione della velocità delle pale del sistema di miscelazione.

Per effettuare la regolazione di velocità si ricorre a un convertitore frequenza-frequenza.

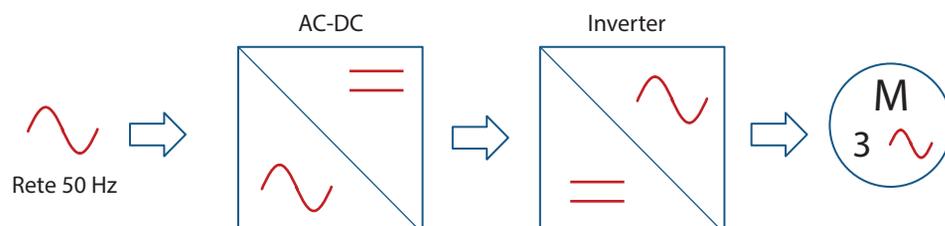
La velocità a vuoto del motore è infatti legata alla frequenza dell'alimentazione trifase dalla seguente relazione:

$n_0 = f \cdot 60$ nella quale: n = giri/min; f = frequenza di alimentazione [cicli/secondo] (Hz)

(nell'ipotesi di una coppia polare)

Il movimento rotazionale del motore è dovuto infatti al campo magnetico rotante generato dallo statore, che compie appunto un giro per ogni ciclo del segnale sinusoidale di alimentazione.

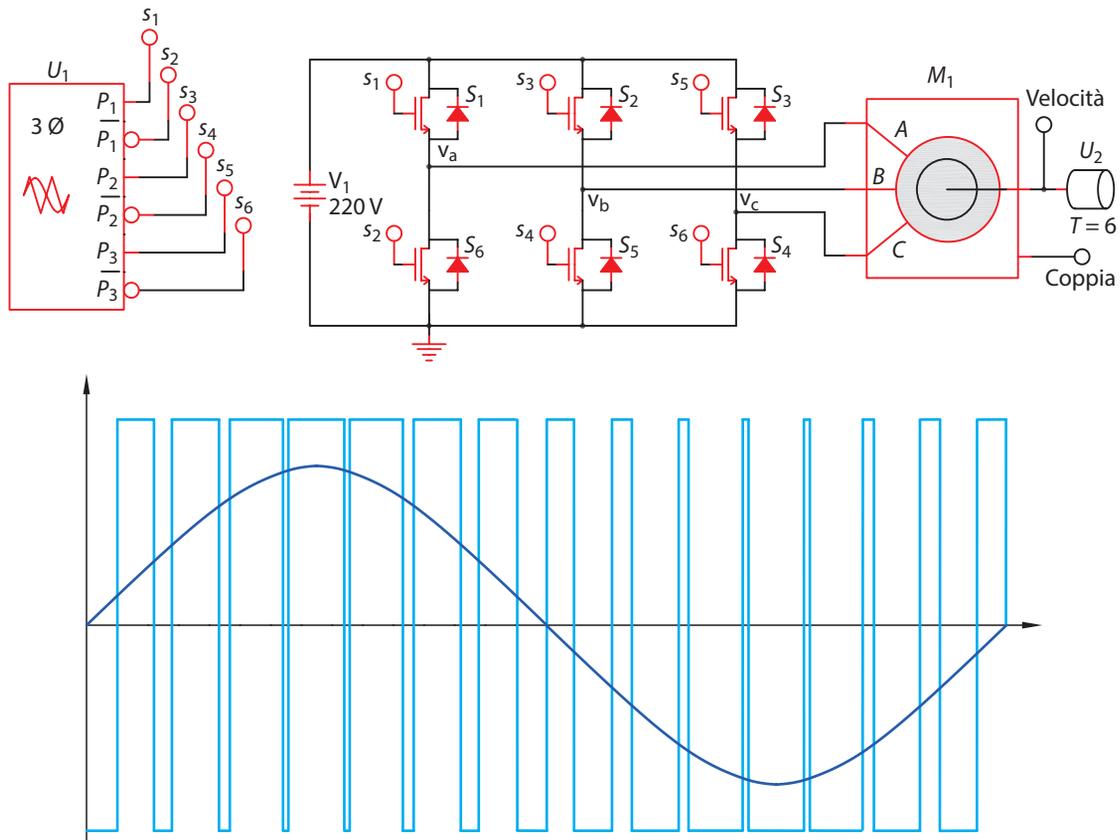
La conversione AC-AC viene implementata ponendo in cascata a un convertitore AC-DC un convertitore DC-AC. Quest'ultimo è noto come *Inverter*.



Per mantenere costante la coppia nominale si deve mantenere fisso il rapporto V/f tra la tensione che alimenta il motore e la frequenza.

L'inverter è implementato parzializzando in modalità PWM un'onda continua, al fine di produrre le tre tensioni concatenate sinusoidali.

Il seguente schema visualizza sia il circuito di potenza, sia il blocco digitale U_1 che genera gli impulsi di comando. Si noti inoltre come la forma d'onda PWM, con la larghezza degli impulsi variabile e opportunamente modulata, riproduce mediamente il profilo di un'onda sinusoidale.



Quesito 3 – Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, discuta come ridurre la corrente di spunto, scelga il dispositivo idoneo a realizzare tale riduzione e valuti come varia la coppia di avviamento nelle nuove condizioni.

Al fine di ridurre la corrente di spunto, ovvero consentire un avviamento dolce al motore, si possono adottare diverse tecniche di seguito brevemente richiamate.

Avviamento stella-triangolo

In questa modalità il motore viene avviato con la tensione di alimentazione di fase, che come è noto è ridotta rispetto a quella concatenata del fattore $\sqrt{3}$.

Risulta infatti:

$$V_{FASE} = \frac{V_{LINEA}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{LINEA}}{1,73} = \frac{400}{1,73} = 230 \text{ V} \quad I_F = I_L = \frac{V_F}{Z}$$

- V_{FASE} – Alimentazione a stella (tensione di fase).
- V_{LINEA} – Alimentazione a triangolo (tensione di linea).



La velocità angolare nominale vale: $\omega_N = \frac{(N_n \cdot 2\pi)}{60} = \frac{(2890 \cdot 6,28)}{60} = 302 \text{ rad/s}$

La coppia nominale è data da: $C_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{4000}{302} = 13 \text{ Nm}$

In merito alla coppia di spunto è necessario considerare che essa è legata al quadrato della tensione:

$$\frac{C_{SPUNTO\Delta}}{C_{SPUNTO*}} = \frac{V_{LINEA}^2}{V_{FASE}^2}$$

da cui: $C_{SPUNTO*} = C_{SPUNTO\Delta} \cdot \frac{1}{3} = \frac{13}{3} = 4,3 \text{ Nm} < 48,1$

La coppia di spunto è inferiore a quella richiesta, quindi lo schema di avviamento stella-triangolo in questo caso non è adeguato, perché la riduzione di tensione da triangolo a stella comporta una notevole riduzione della coppia di spunto.

Avviamento mediante reattanze statoriche/autotrasformatore

In queste modalità si agisce sulla tensione effettivamente applicata al motore, innestando allo spunto un insieme di reattanze tali da provocare una caduta di tensione. Se la riduzione della tensione è fissata a un fattore K , per la relazione quadratica tra coppia e tensione la coppia si riduce a un fattore K^2 .

Anche questo sistema è pertanto inadatto a produrre la coppia di spunto richiesta.

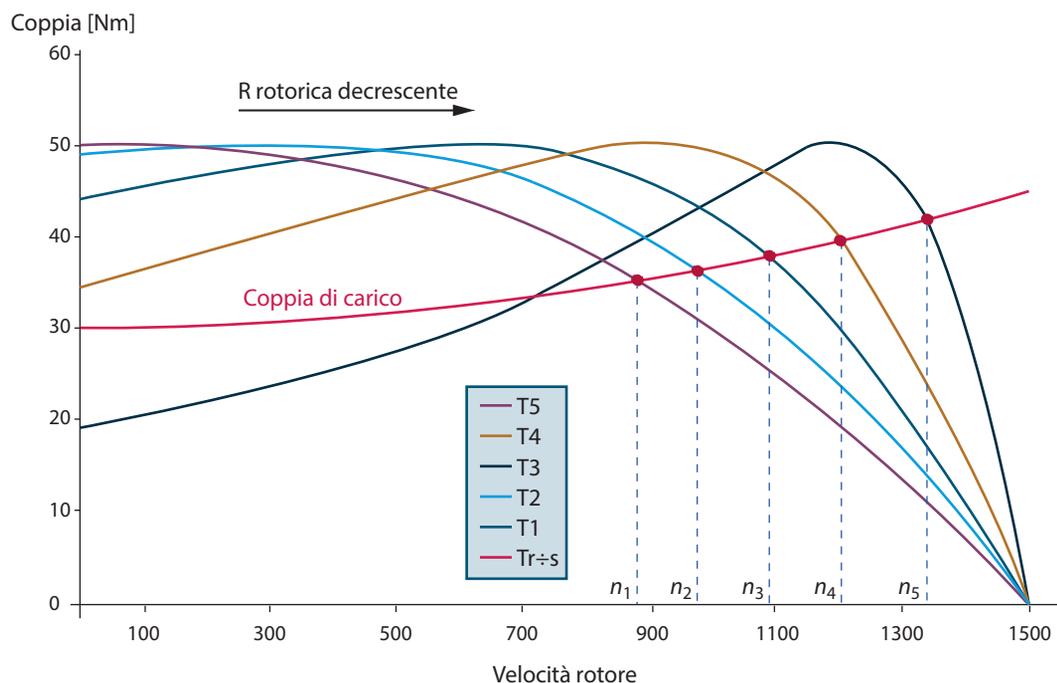
Motore con rotore avvolto

In questo tipo di motore il rotore è costituito da un indotto ad anelli con reostato di avviamento.

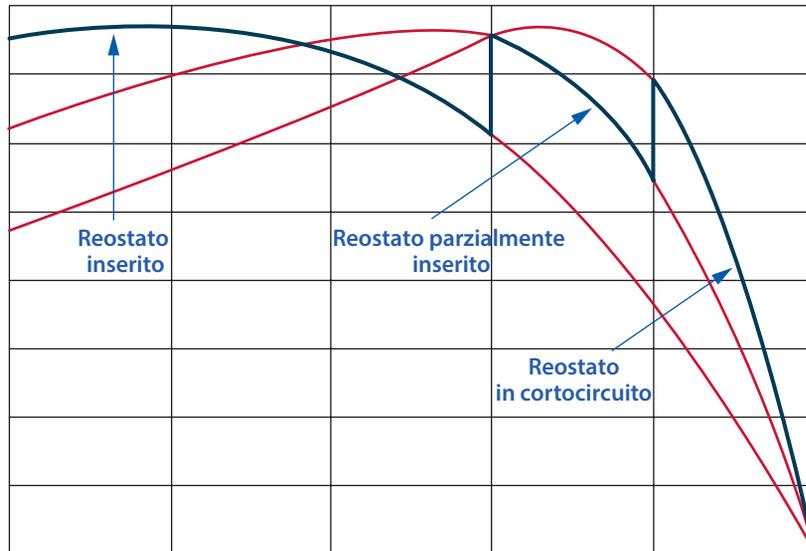
Allo spunto le reattanze inserite sono massime e vengono ridotte gradualmente.

Le caratteristiche meccaniche si modificano come illustrato nella figura ovvero:

- alta resistenza rotorica – forte coppia di spunto con una ridotta corrente di spunto.
- resistenza rotorica decrescente – bassa coppia di spunto ma velocità di lavoro decrescente.



1. Il reostato pertanto è completamente inserito all'avviamento, stabilendo una alta coppia di spunto.
2. Successivamente viene gradualmente disinserito comportando un aumento della velocità.
3. A regime, con reostato escluso, il motore raggiunge la sua velocità nominale.



Il guadagno in termini di coppia si paga con un aumento dello scorrimento ovvero diminuzione della velocità allo spunto.

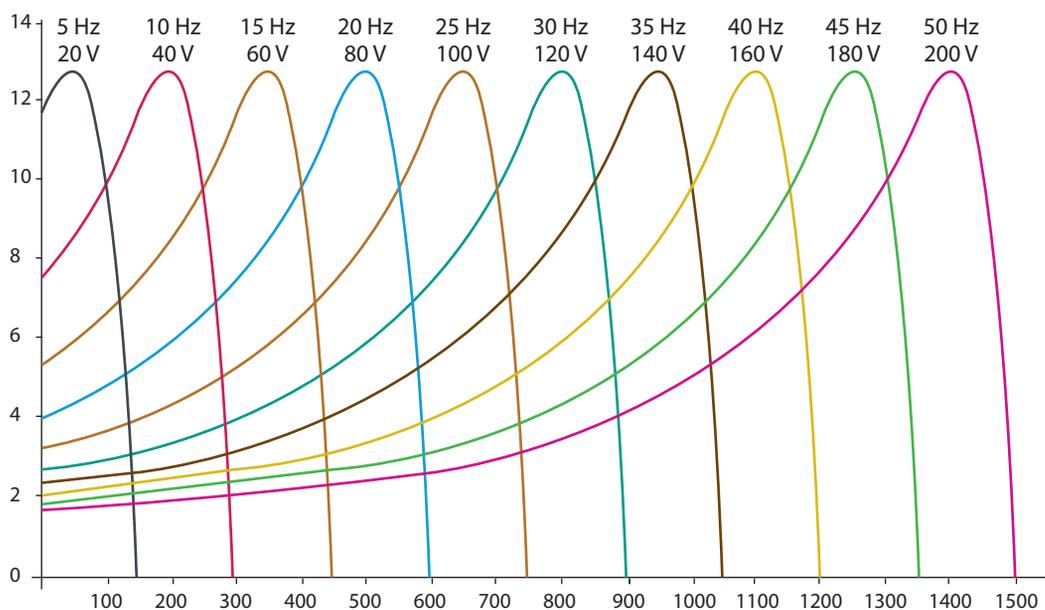
L'aumento della coppia è dovuto al fatto che aumentando la componente resistiva rispetto a quella reattiva si determina una diminuzione dello sfasamento delle correnti rotoriche che sono appunto causa del movimento.

Variazione della frequenza e della tensione

Variando la frequenza a partire da valori bassi e la tensione in modo che: $V/f = \text{cost}$ si ricavano le seguenti caratteristiche.

Anche in questo caso a una minore velocità di spunto si accompagna una maggiore coppia.

Successivamente la frequenza viene incrementata e con essa la velocità di regime.





Quesito 4 – Il candidato, dopo aver calcolato la funzione di trasferimento complessiva del sistema, ne studi la stabilità al variare del parametro K .

Il candidato determini inoltre per quale valore del parametro K l'errore di velocità del sistema si mantiene inferiore allo 0,5% giustificando la risposta.

$$A(s) = \frac{K}{s^2 + 2s} \quad B(s) = \frac{s+1}{s+3} \quad H(s) = \frac{1}{s}$$

La f.d.t complessiva vale:

$$G_R(s) = \frac{A(s)B(s)}{1 + A(s)B(s)H(s)} = \frac{\frac{K(s+1)}{s(s+2)(s+3)}}{1 + \frac{K(s+1)}{s^2(s+2)(s+3)}} = \frac{Ks(s+1)}{s^2(s+2)(s+3) + K(s+1)}$$

$$G_R(s) = \frac{Ks(s+1)}{s^4 + 5s^3 + 6s^2 + Ks + K}$$

Si applica il criterio di Routh, per il quale si deve accertare la permanenza dei segni della prima colonna della tabella di Routh. Il numero di poli positivi è infatti uguale al numero di cambiamenti di segno della prima colonna.

1	6	K	
5	K	0	
$-K+30$	$5K$	0	(moltiplicato tutto per 5)
$\frac{(5K - K^2)}{(-K + 30)}$	0	0	
$5K$	0		
0			

Il terzo coefficiente deve essere positivo

$$(-K+30) > 0 \quad \rightarrow \quad K < 30$$

Il quinto coefficiente deve essere positivo quindi $K > 0$

Il quarto coefficiente deve essere positivo; poiché il denominatore lo è con la condizione $k < 30$ e al numeratore deve essere $K > 0$ si ha per il numeratore:

$$5 - K > 0 \quad \rightarrow \quad K < 5$$

Le tre condizioni $K < 30$ e $K < 5$ e $K > 0$ impongono la condizione finale $0 < K < 5$.

Con Scilab si può verificare che, per esempio con $K = 1$, i poli sono tutti negativi e il sistema è stabile.

```
--> esempio=s^4+5*s^3+6*s^2+1*s+1
```

```
esempio =
```

$$1 \quad +s \quad +6s \quad +5s \quad +s$$

```
--> radici=roots(esempio)
```

```
radici =
```

```

-3.1822709
-1.7951977
-0.0112657 + 0.4182325i
-0.0112657 - 0.4182325i

```

Ponendo invece un K maggiore di 5 si verifica che sono presenti due poli positivi.

```

--> esempio=s^4+5*s^3+6*s^2+20*s+20
esempio =

```

```

      2   3   4
20 +20s +6s +5s +s

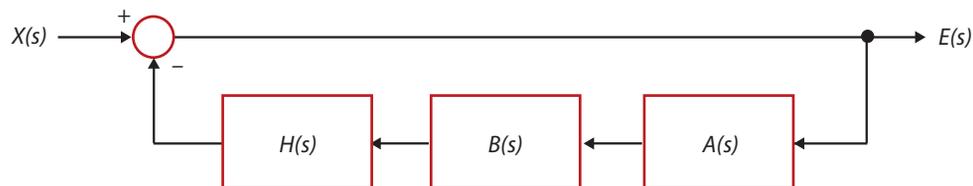
```

```

--> radici=roots(esempio)
radici =
-4.4346705
 0.2690946 + 2.0036068i
 0.2690946 - 2.0036068i
-1.1035188

```

Per quanto concerne l'errore occorre innanzitutto calcolare la f.d.t tra l'ingresso $X(s)$ e l'errore $E(s)$. L'errore $E(s)$ è posto sull'uscita nel seguente circuito equivalente.



$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + H(s)B(s)A(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{s} \cdot \frac{s+1}{s+3} \cdot \frac{K}{s^2+2s}} = \frac{s^2(s+2)(s+3)}{s^2(s+2)(s+3) + K(s+1)}$$

Si calcola l'errore a regime per un ingresso a rampa $X(s) = \frac{1}{s^2}$ (errore di velocità)

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s^2} G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{s^2(s+2)(s+3)}{s^2(s+2)(s+3) + K(s+1)}$$

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(s+2)(s+3)}{s^2(s+2)(s+3) + K(s+1)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{6s}{Ks + K} = \frac{0}{K} = 0$$

L'errore di velocità è sempre nullo.

ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE

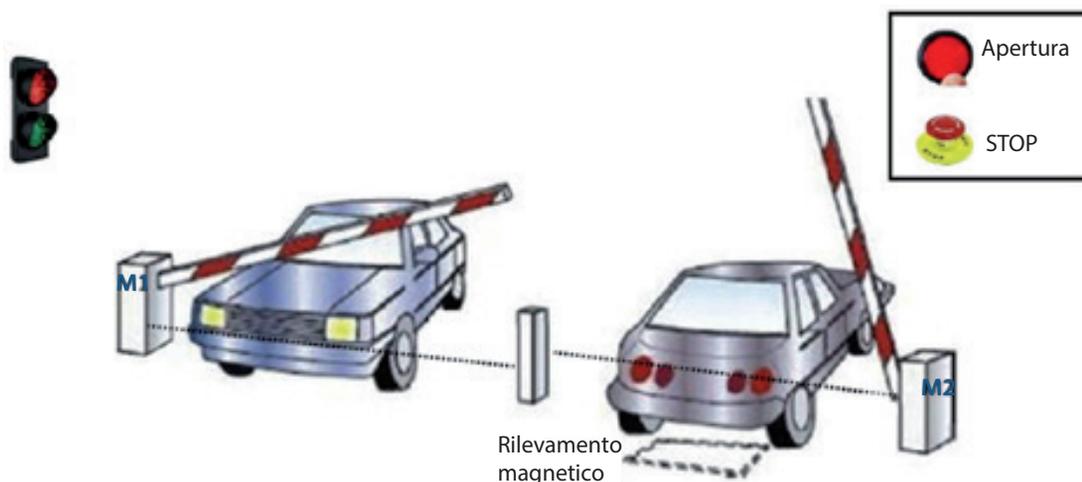
Indirizzo: ITET - Elettrotecnica ed Elettronica
 Articolazione Elettrotecnica
 Tema di: Elettrotecnica ed Elettronica
 e Sistemi Automatici 2019
 (sessione straordinaria)

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

PRIMA PARTE

Un centro commerciale è costituito da un edificio e un garage sotterraneo; all'interno del centro commerciale sono installati tappeti mobili e ascensori per il collegamento tra i piani.

L'ingresso e l'uscita dal garage sono regolati da due sbarre, che vengono attivate tramite motori elettrici (M1 e M2). L'accesso al garage è consentito tutti i giorni dalle ore 7:30 alle ore 21:00, mentre l'uscita non ha limiti d'orario. In prossimità della sbarra di entrata è installata una fotocellula mentre per la sbarra di uscita sono previsti, dalla parte interna, un rilevatore magnetico e, in prossimità della sbarra, una ulteriore fotocellula, come in figura.



Per abilitare la sbarra d'ingresso, deve essere premuto un pulsante di apertura posto su una apposita colonnina; la sbarra si alza solo se ci sono posti disponibili all'interno del garage.

Quando l'auto sta transitando in prossimità della sbarra, la fotocellula mantiene la sbarra in posizione verticale.

Un semaforo, posto all'ingresso del garage, segnala con la luce rossa all'auto di arrestarsi, mentre con la verde di procedere verso l'interno.

Se la fotocellula non rileva la presenza di autovetture, dopo tre secondi la sbarra ritorna nella posizione di riposo, altrimenti rimane ferma per altri due secondi fino a che non sia transitata tutta l'auto sulla linea del fascio luminoso. Le posizioni orizzontali e verticali della sbarra vengono rilevate da due opportuni finecorsa. La presenza di un'auto in uscita è rilevata dal sensore magnetico che abilita il funzionamento della sbarra il cui comportamento è identico a quello della sbarra di entrata.

Un contatore 'avanti-indietro', attivato dalle fotocellule, verifica il numero delle auto presenti nel garage:

- se il conteggio è pari al massimo consentito, la sbarra di entrata viene bloccata e il semaforo diventa rosso;
- se non è raggiunta la capienza massima, il semaforo diventa verde.

Il sistema automatico di gestione del garage è inoltre provvisto di un pulsante di STOP che arresta i motori delle sbarre e spegne il semaforo.

Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie:

1. rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione del garage;
2. elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza;
3. dimensiona la potenza del motore per la movimentazione di uno degli ascensori, considerando che l'ascensore è omologato per 6 persone (e quindi per una massa di 450 kg) con una corsa di 25 metri alla velocità di 0,63 m/s;
4. descriva come poter garantire la continuità elettrica nel garage nel caso di interruzione dell'alimentazione di rete e scelga un dispositivo idoneo allo scopo.

SECONDA PARTE

Quesito 1

Con riferimento alla prima parte della prova, i tappeti mobili installati sono del tipo a risparmio energetico, ossia la velocità del motore che li movimenta aumenta quando viene rilevata la presenza di passeggeri sul tappeto.

I tappeti mobili hanno un funzionamento continuo a marcia lenta, con velocità di circa 0,1 m/s in assenza di passeggeri, mentre in presenza di passeggeri la velocità nominale è di 0,5 m/s.

Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, descriva come poter effettuare la variazione di velocità richiesta e dimensiona il dispositivo idoneo.

Quesito 2

Con riferimento alla prima parte della prova, il candidato, facendo le ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, descriva un algoritmo che fornisca la statistica relativa alla occupazione media giornaliera dei posti disponibili e codifichi, nel linguaggio di programmazione coerente con il dispositivo programmabile scelto, l'algoritmo suddetto.

Quesito 3

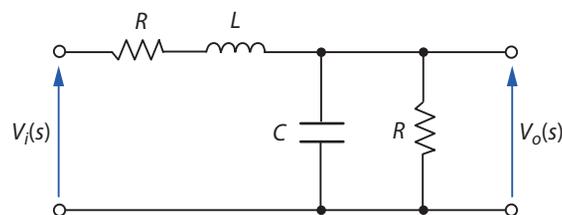
Un carico che assorbe una corrente pari a 600 A è alimentato da due dinamo a eccitazione separata collegate in parallelo. Le due dinamo hanno tensione nominale pari a 230 V e sono caratterizzate dai seguenti dati caratteristici:

	Dinamo A	Dinamo B
Potenza nominale	80 kW	100 kW
Variazione di tensione da vuoto a carico	6 %	4 %

Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, determini la potenza assorbita dal carico e la corrente erogata da ciascuna dinamo.

Quesito 4

Si consideri il sistema elettrico riportato nella figura seguente:



Il candidato, dopo aver ricavato la funzione di trasferimento del sistema $V_o(s)/V_i(s)$ e calcolato i valori degli zeri e dei poli, ne fornisca l'andamento della risposta in frequenza nell'ipotesi che i componenti della rete elettrica abbiano tutti valore unitario

SOLUZIONE PRIMA PARTE

Quesito 1 – Il candidato rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione del garage.

Sono presenti due algoritmi: uno per la gestione delle auto in entrata e l'altro per quelle in uscita.

I dati e i comandi sono rappresentati nell'algoritmo dalle seguenti variabili.

APERTURA – pulsante di apertura per abilitare la sbarra di ingresso.

F_IN, F_OUT – fotocellule per la rilevazione di auto in transito in ingresso e in uscita.

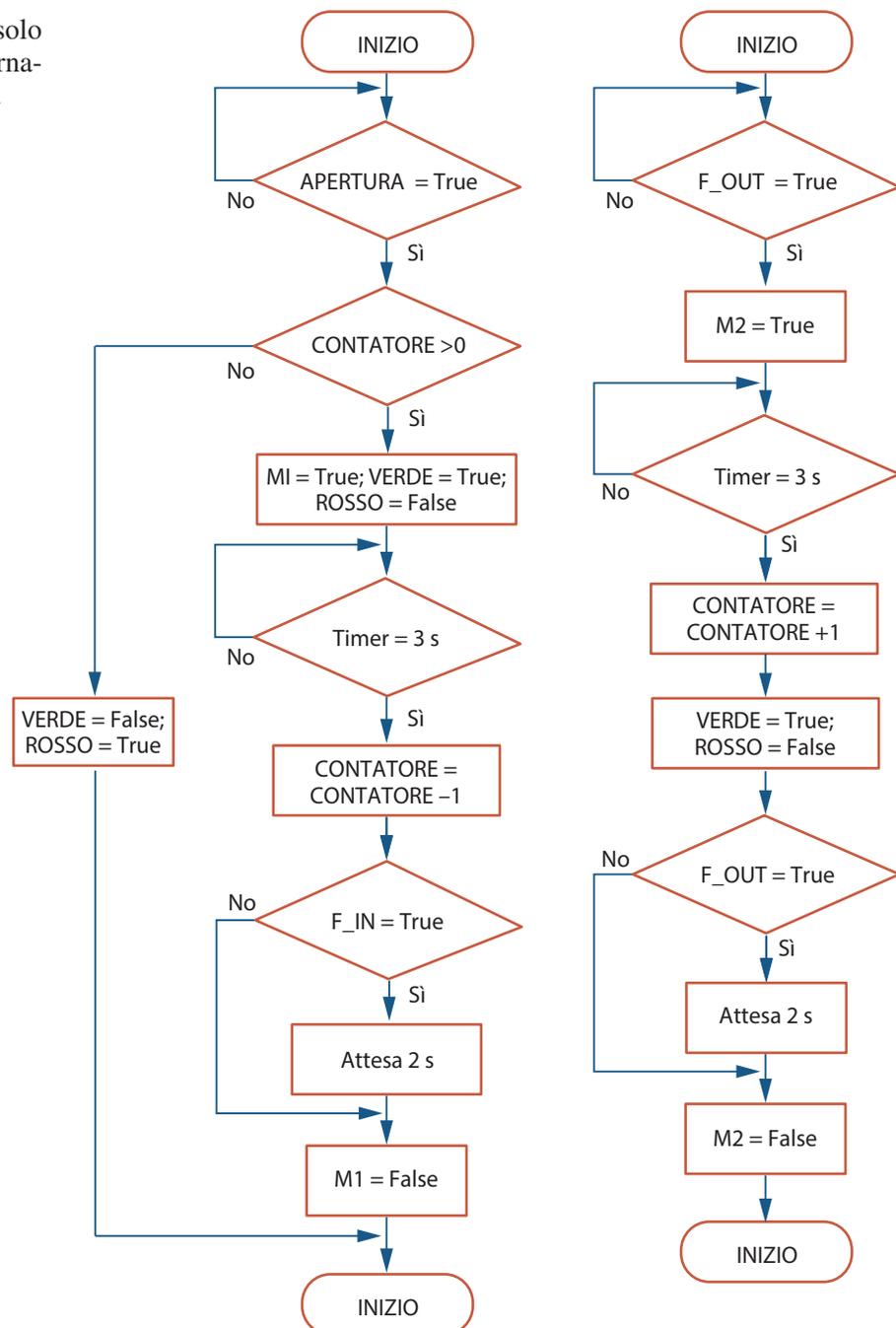
M1, M2 – comandi agli attuatori per l'apertura delle sbarre di ingresso e uscita.

VERDE, ROSSO comandi alle lampade di segnalazione all'ingresso.

CONTATORE – dato analogico per il conteggio delle auto presenti nel parcheggio.

Il diagramma di flusso dell'algoritmo di entrata gestisce il comando di apertura, i semafori e i ritardi di chiusura della sbarra, in funzione del dato di finecorsa. Provvede inoltre a aggiornare il conteggio delle auto parcheggiate.

L'algoritmo di uscita gestisce solo il finecorsa di uscita e l'aggiornamento delle auto parcheggiate.



Quesito 2 – Il candidato elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza.

L'applicazione, il cui file è allegato al presente testo, ripercorre il flusso dei due algoritmi entro due sottoprogrammi (PLC_PRG e POU) richiamati dal programma principale.

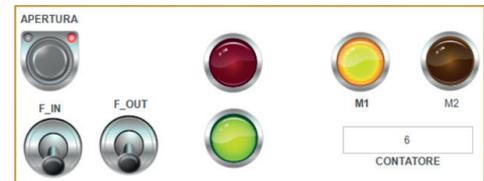
I programmi sono sviluppati in modalità SFC Structured Functional Chart.

Le variabili dichiarate sono le seguenti. Esse corrispondono agli elementi del pannello, ovvero interruttori, spie e casella di testo del conteggio delle auto, rappresentati nella successiva figura.

Per alleggerire l'implementazione i semafori in questa release sono gestiti solo da PLC_PRG; si lascia al lettore l'espansione.

```
PROGRAM PLC_PRG
VAR
    APERTURA: BOOL;
    F_IN: BOOL := TRUE;
    ROSSO: BOOL;
    VERDE: BOOL;
    M1: BOOL;
END_VAR
```

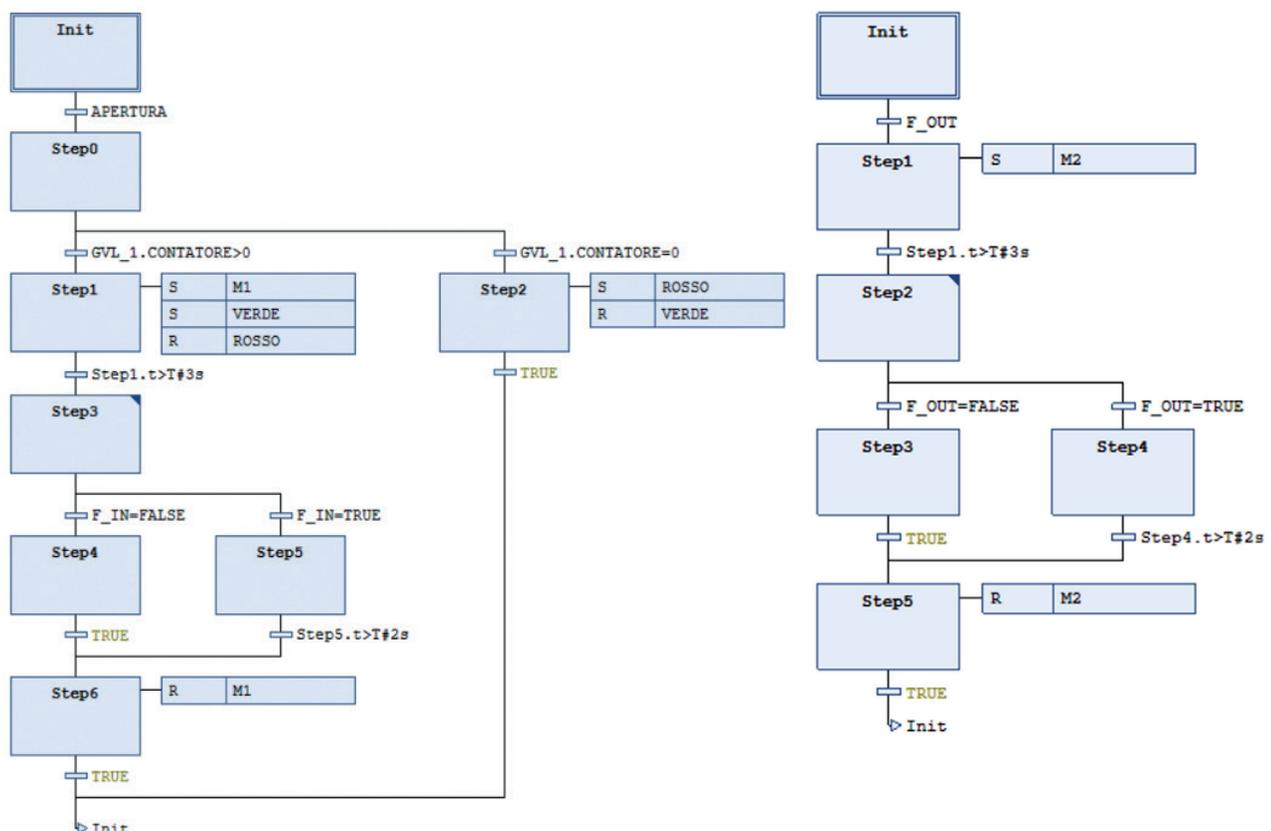
```
PROGRAM POU
VAR
    F_OUT: BOOL;
    M2: BOOL;
END_VAR
```



Si sottolinea che la variabile CONTATORE è dichiarata di tipo globale, in quanto deve essere condivisa da due applicazioni, di fatto separate, di gestione dell'ingresso e dell'uscita delle auto. La dicitura GLV_1.CONTATORE si riferisce appunto allo spazio GLV_1 delle variabili globali.

Si precisa inoltre che la sezione di aggiornamento del conteggio delle auto è inserita come routine interna ai passi Step3 (entrata) e Step2 (uscita) e implementata in questo modo in linguaggio ST:

- `GVL_1.CONTATORE:=GVL_1.CONTATORE - 1; //decremento auto nel parcheggio perché entrata auto;`
- `GVL_1.CONTATORE:=GVL_1.CONTATORE + 1; //incremento auto nel parcheggio perché uscita auto.`
-



Quesito 3 – Il candidato dimensiona la potenza del motore per la movimentazione di uno degli ascensori

La potenza è il lavoro espresso dal motore nell'unità di tempo. Per completezza di esposizione vengono scritte le grandezze per esteso e con le rispettive unità di misura.

$$\text{Potenza [Watt]} = \frac{\text{Lavoro [Joule]}}{\text{Tempo [secondi]}}$$

$$\text{Tempo [secondi]} = \frac{\text{Spazio [metri]}}{\text{Velocità [metri/secondo]}} = \frac{25}{0,63} = 39,68 \text{ s}$$

$$\text{Forza } F = mg = 450 \cdot 9,81 = 4414 \text{ N}$$

$$\text{Lavoro [Joule]} = \text{Forza [Newton]} \cdot \text{Spostamento [metri]} = 4414 \cdot 25 = 110350 \text{ [Joule]}$$

$$\text{Potenza } P [\text{Watt}] = \frac{\text{Lavoro [Joule]}}{\text{Tempo [s]}} = \frac{110350}{39,68} \cong 2781 \text{ W}$$

Considerando anche il rendimento medio di 0,9 si ha:

$$P [\text{Watt}] = \frac{P [\text{Watt}]}{0,9} \cong 3 \text{ kW}$$

Sarebbe stato possibile ricavare la potenza direttamente con la formula Potenza = Forza × Velocità, senza passare attraverso il calcolo del tempo.

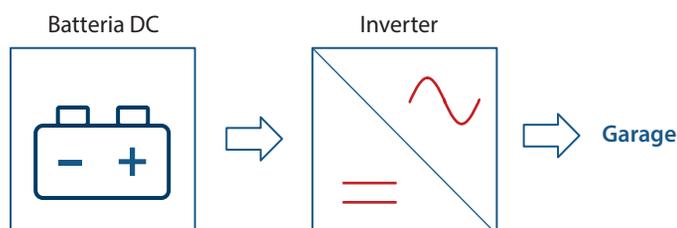
$$P [\text{Watt}] = F [\text{Newton}] \cdot \text{Velocità [m/s]} = 4414 \cdot 0,63 = 2781 \text{ W}$$

Quesito 4 – Il candidato descriva come poter garantire la continuità elettrica nel garage nel caso di interruzione dell'alimentazione di rete e scelga un dispositivo idoneo allo scopo.

Un gruppo di continuità, noto anche con la dicitura UPS (Uninterruptible Power Supply) assicura una alimentazione di backup quando la normale fonte di alimentazione si interrompe.

Un UPS ricorre all'alimentazione di riserva della batteria in caso di problemi di alimentazione comuni come blackout, abbassamento di tensione o sovratensione.

Il sistema in linea di principio si compone di un convertitore DC – AC da tensione continua a tensione alternata (inverter), preceduto da un insieme di batterie esterne opportunamente dimensionate in funzione dell'autonomia desiderata.



SOLUZIONE SECONDA PARTE

Quesito 1 – Il candidato, fatte le eventuali ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, descriva come poter effettuare la variazione di velocità richiesta e dimensiona il dispositivo idoneo.

Il funzionamento Stop & Go è la modalità consigliata quando alle fasi di grande affluenza di passeggeri si alternano flussi intermittenti o sporadici, come ad esempio nei cinema e teatri, in aeroporti, stazioni ferroviarie

e metropolitane. In assenza di passeggeri la scala/tappeto mobile si ferma.

Il sistema descritto nel testo del problema è invece il funzionamento continuo a marcia lenta. In questa modalità la scala/tappeto mobile è dotata di un convertitore di frequenza e la velocità è ridotta da 0,5 m/s in presenza di passeggeri a circa 0,1 m/s in assenza di passeggeri. Il vantaggio è una minore usura meccanica rispetto a quella del funzionamento in modalità Stop & Go.

Si modella il sistema come nella figura, con una puleggia motrice e una condotta, con le seguenti ipotesi dimensionali.

diametro puleggia condotta $d_2 = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$

diametro puleggia motrice $d_1 = 8 \text{ cm}$ calettata sull'albero motore

Per dimensionare il motore si parte dalla conoscenza della velocità di scorrimento della catena di trazione, che coincide con la velocità di traslazione del tappeto mobile.

Velocità perimetro condotta = velocità tappeto mobile = $0,1 \text{ m/s} = \omega_2 \cdot r_2$

Da qui si ricava la velocità angolare ω_2 .

$$\omega_2 = \frac{0,1}{0,2} = 0,5 \text{ rad/s}$$

Le velocità periferiche delle due pulegge sono uguali ovvero: $\omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2$

$$\text{Pertanto } \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{20}{4} = 5$$

Da qui si ricava la velocità angolare del motore.

$$\omega_1 = 5 \cdot 0,5 \text{ rad/s} = 2,5 \text{ rad/s}$$

Nell'ipotesi di un motore a 4 poli (due coppie) alimentato alla frequenza di 50 Hz si ha per la sua velocità:

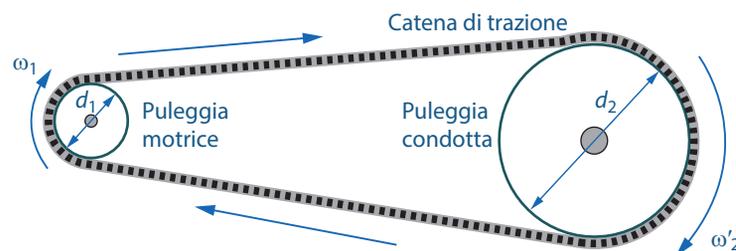
$$\omega_M = 60 \cdot \frac{f}{p} = 1500 \text{ giri/min} = 25 \text{ giri/sec} = 157 \text{ rad/sec}$$

La frequenza di 50 Hz non è adatta in quanto dà luogo a una velocità angolare troppo elevata.

Anche ipotizzando un riduttore di velocità di 1/10 si avrebbe infatti:

$$\omega_M = \omega_1 \cdot 10 = 25 \text{ rad/sec} \text{ che non corrisponde ai } 157 \text{ rad/sec} \text{ effettivi.}$$

$$\text{La frequenza richiesta è invece: } \frac{25}{2\pi} = 3,98 \text{ giri/s} = 238 \text{ giri/min} \quad f = \frac{238 \cdot p}{60} = 7,93 \text{ Hz}$$



Per la velocità superiore di 0,5 m/s la frequenza deve essere quintuplicata.

La soluzione per variare la velocità del motore è pertanto l'adozione di un convertitore frequenza-frequenza, ovvero, in altri termini, da segnale alternato AC a segnale alternato AC di diversa frequenza.

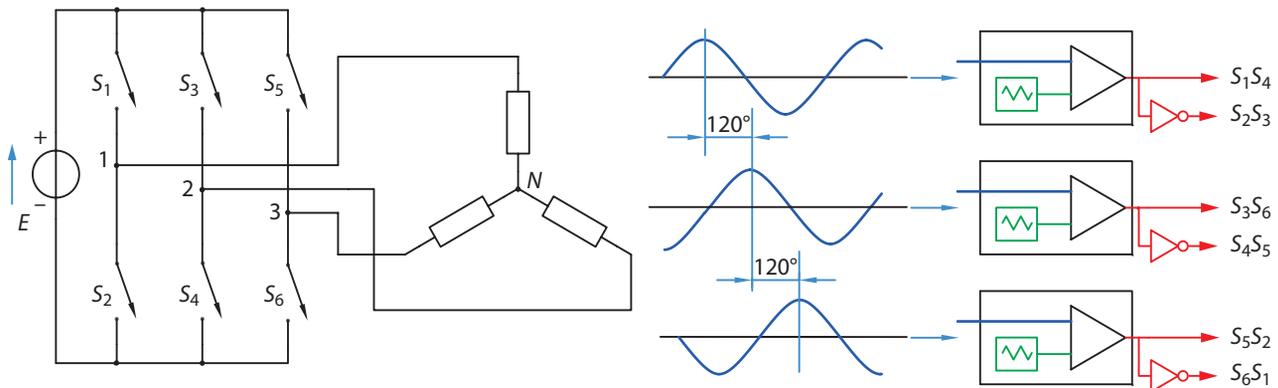
L'implementazione del convertitore AC-AC avviene convertendo la tensione sinusoidale in tensione continua

e da questa estraendo una tensione sinusoidale di diversa frequenza, mediante un inverter trifase a ponte.

Le f.d.o sinusoidali di potenza vengono ricavate modulando a larghezza di impulsi PWM la tensione continua E della figura- La parzializzazione PWM avviene grazie a tiristori o transistori di potenza opportunamente innescati mediante i segnali $S_1 \div S_6$.

I segnali di innesco provengono dal blocco logico visualizzato nella figura di destra, nel quale tre segnali sinusoidali di bassa potenza sfasati di 120° vengono confrontati con onde triangolari.

Per un approfondimento di questi blocchi si rinvia al testo di Elettrotecnica ed Elettronica.



Quesito 2 – Il candidato descriva un algoritmo che fornisca la statistica relativa alla occupazione media giornaliera dei posti disponibili e codifichi, nel linguaggio di programmazione coerente con il dispositivo programmabile scelto, l'algoritmo suddetto.

L'algoritmo campiona lo stato di occupazione del parcheggio a intervalli di un'ora, mediante acquisizione del numero dei posti occupati all'inizio di ogni ora.

Ipotizzando l'apertura per 24 ore un ciclo for ricava il totale dei posti occupati nella giornata che divisa per 24 fornisce l'occupazione media.

```
#include <iostream>
int main()
{
    int POSTI, TOTALE=0, ORE=24, i;
    float MEDIA;
    for(i=0;i<ORE;i=i+1)
    {
        printf("inserire il numero di posti occupati...");
        scanf("%d", &POSTI);
        TOTALE=TOTALE+POSTI;
        //attendere un'ora
    }
    printf("Totale: %d \n", TOTALE);
    MEDIA=TOTALE/ORE;
    printf("Media: %3.1f \n", MEDIA);
}
```

Si tratta di un metodo chiaramente approssimativo, perché la valutazione viene fatta solo nell'istante iniziale di ogni ciclo orario, ma nel corso dell'ora possono verificarsi nuovi movimenti di auto nel parcheggio. Per migliorare l'affidabilità del metodo è possibile rendere più fitto il campionamento, prevedendo per esempio un campionamento ogni 5 minuti.

In questo caso la formula per il calcolo della media diventerebbe $MEDIA = TOTALE/(ORE*12)$ essendo 12 il numero di spazi orari di 5 minuti.

Quesito 3 – Il candidato, fatte le eventuali ulteriori ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie, determini la potenza assorbita dal carico e la corrente erogata da ciascuna dinamo.

Trattandosi di due dinamo a eccitazione separata il circuito equivalente si riduce al parallelo di due generatori E_1, E_2 con in serie le resistenze degli avvolgimenti di indotto R_1 e R_2 .

Si ipotizza che il valore della corrente di eccitazione, per le due macchine, rimanga invariato nel passaggio da funzionamento a vuoto a carico.

Dal dato di variazione percentuale di tensione da vuoto a carico si possono dedurre le resistenze.

Le correnti nominali delle due dinamo risultano:

$$I_{N1} = \frac{P_{N1}}{V_N} = 80 \cdot \frac{10^3}{230} = 347,83 \text{ A}$$

$$I_{N2} = \frac{P_{N2}}{V_N} = 100 \cdot \frac{10^3}{230} = 434,78 \text{ A}$$

La tensione nominale delle dinamo (ai morsetti di uscita) è ovviamente la stessa per le due macchine, pertanto, conoscendo il valore della caduta di tensione percentuale nel passaggio da vuoto a carico (riferita alla corrente nominale), è possibile calcolare per ciascuna il valore della resistenza di indotto.

$$\Delta E_1 = E_{01} - V_n = R_1 \cdot I_{N1}$$

$$\Delta E_1 = 0,06 \cdot E_{01}$$

$$E_{01} - V_n = 0,06 \cdot E_{01}$$

$$V_n = 0,94 \cdot E_{01}$$

$$230 = 0,94 \cdot E_{01}$$

$$E_{01} = 244,68 \text{ V}$$

quindi

$$R_1 = \frac{(E_{01} - V_n)}{I_{N1}} = \frac{(244,68 - 230)}{347,83} = 0,0422 \Omega$$

$$\Delta E_2 = E_{02} - V_n = R_2 \cdot I_{N2}$$

$$\Delta E_2 = 0,04 \cdot E_{02}$$

$$E_{02} - V_n = 0,04 \cdot E_{02}$$

$$V_n = 0,96 \cdot E_{02}$$

$$230 = 0,96 \cdot E_{02}$$

$$E_{02} = 239,58 \text{ V}$$

quindi

$$R_2 = \frac{(E_{02} - V_n)}{I_{N2}} = \frac{(239,58 - 230)}{434,78} = 0,022 \Omega$$

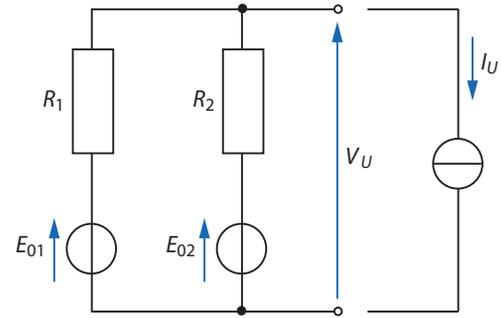
Risolvendo questo circuito equivalente con $E_{01} = 244,68 \text{ V}$ ed $E_{02} = 239,58 \text{ V}$ e con la corrente in uscita $I_U = 600 \text{ A}$, richiesta da una resistenza di carico (facilmente calcolabile come $R_c = 230/600 = 0,383 \Omega$), si possono ricavare:

1. la tensione sul carico; [232,651 V]
2. la potenza richiesta dal carico; [139591 W]
3. le correnti I_{R1} e I_{R2} [285,05 A; 314,95 A]

Non stupisca il fatto che la tensione di uscita sia maggiore della tensione nominale di 230 V.

Sarebbe stato pericoloso se le correnti fossero risultate maggiori delle correnti nominali.

Si lasciano i calcoli al lettore, che può anche avvalersi del circuito equivalente rappresentato qui a lato, con un generatore di corrente posto all'uscita che impone la corrente nominale.



Quesito 4 – Il candidato, dopo aver ricavato la funzione di trasferimento del sistema $V_o(s)/V_i(s)$ e calcolato i valori degli zeri e dei poli, ne fornisca l'andamento della risposta in frequenza nell'ipotesi che i componenti della rete elettrica abbiano tutti valore unitario.

Si ricava innanzitutto la funzione di trasferimento tra ingresso e uscita.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R // \frac{1}{sC}}{R + sL + R // \frac{1}{sC}} = \frac{\frac{R}{1 + sRC}}{R + sL + \frac{R}{1 + sRC}} = \frac{R}{R + sR^2C + sL + s^2RLC + R}$$

Ponendo $R = 1 \Omega$, $C = 1 \text{ F}$, $L = 1 \text{ H}$ si ha:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 2}$$

Trattasi di un sistema di secondo ordine oscillatorio con:

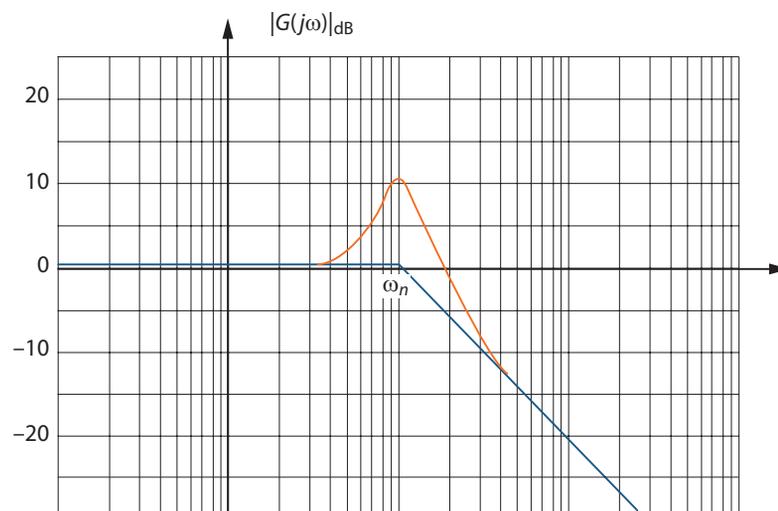
$$\text{pulsazione naturale } \omega_N = \sqrt{2}; \text{ smorzamento } \xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Per determinare la risposta in frequenza si fa riferimento al caso con $\xi = 1$ aggiungendo l'effetto di risonanza alla frequenza di taglio ω_N . La f.d.t con $\xi = 1$ si può porre nella seguente forma:

$$G(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_N} + 1\right) \cdot \left(\frac{s}{\omega_N} + 1\right)}$$

Essa presenta guadagno iniziale unitario (0 dB) e due poli coincidenti di valore assoluto: $|p_1| = |p_2| = \omega_n$.

Il diagramma di Bode dei moduli è il seguente (nell'ipotesi $\omega_n = 1$). In colore l'effetto di risonanza.



ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE

Indirizzo: ITET - Elettrotecnica ed Elettronica
 Articolazione Elettrotecnica
 Tema di: Elettrotecnica ed Elettronica
 e Sistemi Automatici 2019
 (sessione suppletiva)

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

PRIMA PARTE

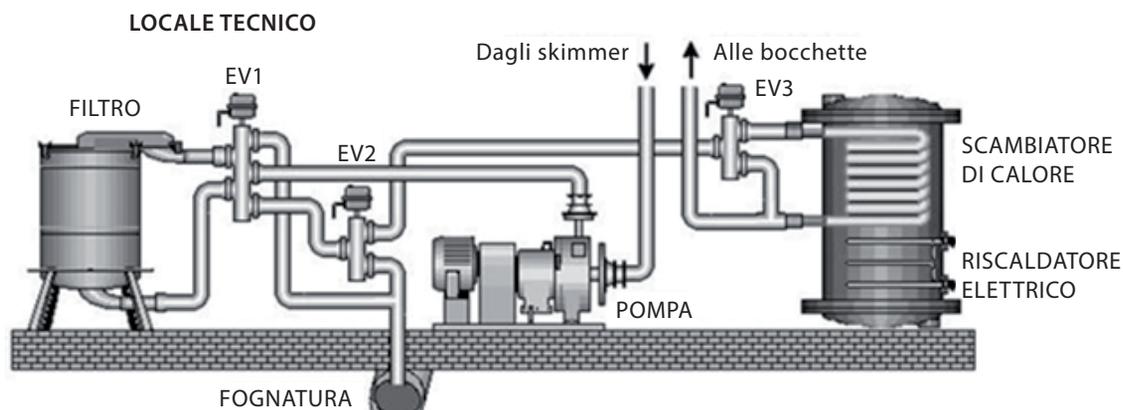
Si vuole dotare un agriturismo di un impianto automatico che gestisca il filtraggio, la pulizia del filtro a sabbia e la temperatura dell'acqua della piscina.

Il sistema di filtraggio viene attivato mediante un pulsante di START alla pressione del quale si avvia il motore sincrono a magneti permanenti a commutazione elettronica (motore brushless) che aziona la pompa di ricircolo dell'acqua. Il sistema viene arrestato mediante un pulsante di STOP.

L'acqua viene aspirata dall'elettropompa attraverso gli skimmer (aperture posizionate a circa 15 cm dal bordo della piscina), filtrata in modo grossolano dai loro cestelli, fatta passare nel pre-filtro della pompa e quindi inviata al filtro a sabbia.

Nella fase di filtraggio le valvole elettropneumatiche monostabili EV1 e EV2 sono disalimentate.

In questa fase l'acqua attraversa il filtro a sabbia dall'alto verso il basso e, dopo essere stata filtrata, viene immessa direttamente in piscina oppure, se occorre, prima di essere inviata alle bocchette di mandata, fatta passare in uno scambiatore di calore per essere riscaldata.



Con il passare del tempo le impurità che si depositano nel filtro a sabbia ostacolano il passaggio dell'acqua causando un aumento della pressione e una riduzione della capacità di filtraggio.

Quando la pressione, rilevata con un apposito trasduttore, raggiunge il valore di 1,2 bar si deve attivare il ciclo automatico di pulizia del filtro.

Tale ciclo, gestito mediante le valvole elettropneumatiche EV1 ed EV2, consiste nel controlavaggio e nel risciacquo.

Nella fase di controlavaggio il flusso dell'acqua entra nel filtro dal basso verso l'alto e defluisce con le impurità attraverso lo scarico in fognatura.

L'inversione del flusso avviene mediante l'attivazione dell'elettrovalvola EV1 e termina dopo 4 minuti con la sua disattivazione.



Successivamente inizia la fase di risciacquo mediante l'attivazione dell'elettrovalvola EV2 per 40 secondi. In questa fase l'acqua entra nel filtro dall'alto verso il basso, ricompatta la sabbia e defluisce con i residui di impurità attraverso lo scarico in fognatura. Dopo la disattivazione di EV2 il sistema ritorna nella fase di filtraggio.

Per riscaldare l'acqua della piscina viene utilizzato il calore residuo che si genera quando una pompa di calore geotermica reversibile, in esercizio di raffrescamento, regola la temperatura degli ambienti dell'agriturismo nel periodo estivo.

Il sistema di riscaldamento dell'acqua della piscina si deve attivare solo se l'impianto di filtraggio è in funzione.

Per assicurare un buon comfort ai bagnanti se l'acqua è a temperatura inferiore a 26 °C viene convogliata nello scambiatore di calore, mediante l'attivazione dell'elettrovalvola EV3 fino a quando non raggiunge la temperatura di 28 °C. Se entro 2 ore dall'attivazione di EV3 la temperatura dell'acqua della piscina non raggiunge i 28 °C a supporto dello scambiatore di calore viene attivato un riscaldatore elettrico alimentato mediante pannelli fotovoltaici posizionati sul tetto dell'agriturismo. Al raggiungimento della temperatura di 28 °C l'elettrovalvola EV3 viene disattivata così come il riscaldatore elettrico, nel caso fosse stato precedentemente attivato, e l'acqua in uscita dal filtro a sabbia viene immessa direttamente in piscina.

Il candidato, fatte le opportune ipotesi aggiuntive:

1. rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione dell'impianto di filtraggio, della pulizia del filtro a sabbia e della temperatura dell'acqua della piscina;
2. elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza;
3. descriva il funzionamento dell'inverter dell'impianto fotovoltaico che alimenta l'agriturismo;
4. descriva il funzionamento del motore sincrono a magneti permanenti a commutazione elettronica che aziona l'elettropompa.

SECONDA PARTE

Quesito 1

Con riferimento alla prima parte della prova, per garantire una perfetta funzionalità dell'impianto di filtrazione, si vuole dotare la piscina di un controllo automatico del livello dell'acqua.

Una sonda, inserita nello skimmer, rileva due livelli d'acqua problematici: il livello basso e il livello alto.

Quando a causa del lavaggio del filtro e dell'evaporazione il livello dell'acqua della piscina scende sotto il livello minimo deve intervenire un sistema di reintegro automatico mediante l'attivazione di un'elettrovalvola che permette l'immissione di acqua dall'acquedotto. Per evitare che possa aspirare aria al posto dell'acqua la pompa si deve arrestare automaticamente e non deve riavviarsi anche se viene premuto il pulsante di START.

Quando il livello dell'acqua raggiunge il livello massimo il riempimento automatico si deve arrestare mediante la disattivazione dell'elettrovalvola e la pompa di filtrazione si deve riavviare automaticamente.

Il candidato a integrazione della prima parte della prova elabori un programma in grado di gestire il controllo automatico del livello dell'acqua, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza.

Quesito 2

Con riferimento alla prima parte della prova, l'azionamento utilizza interruttori statici IGBT come riportato nel catalogo tecnico dell'elettropompa. Il candidato descriva tali componenti e li confronti con altri di sua conoscenza.

Quesito 3

Una macchina utensile richiede un motore con una capacità di sovraccarico (rapporto tra la coppia massima e la coppia nominale) superiore a 3.

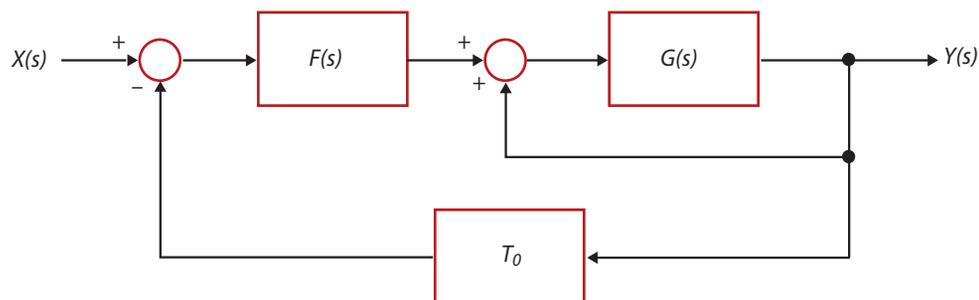
Il candidato verifichi se il motore asincrono trifase avente gli avvolgimenti collegati a stella, le cui caratteri-

stiche sono riportate in tabella, può essere utilizzato per l'azionamento. Si considerino trascurabili i parametri a vuoto del circuito equivalente.

P_n [kW]	V_n [V]	I_n [A]	f_n [Hz]	N_n [giri/min]	P_{cc} [W]	R_s [Ω]	$\cos\varphi_{cc}$	p
Potenza nominale	Tensione nominale	Corrente nominale	Frequenza nominale	Velocità nominale	Potenza persa nel rame	Resistenza degli avvolgimenti statorici	Fattore di potenza di corto circuito	Numero di coppie polari
11	400	22,0	50	1470	800	0,30	0,32	2

Quesito 4

L'impianto lineare rappresentato in figura



è caratterizzato dalle seguenti funzioni di trasferimento

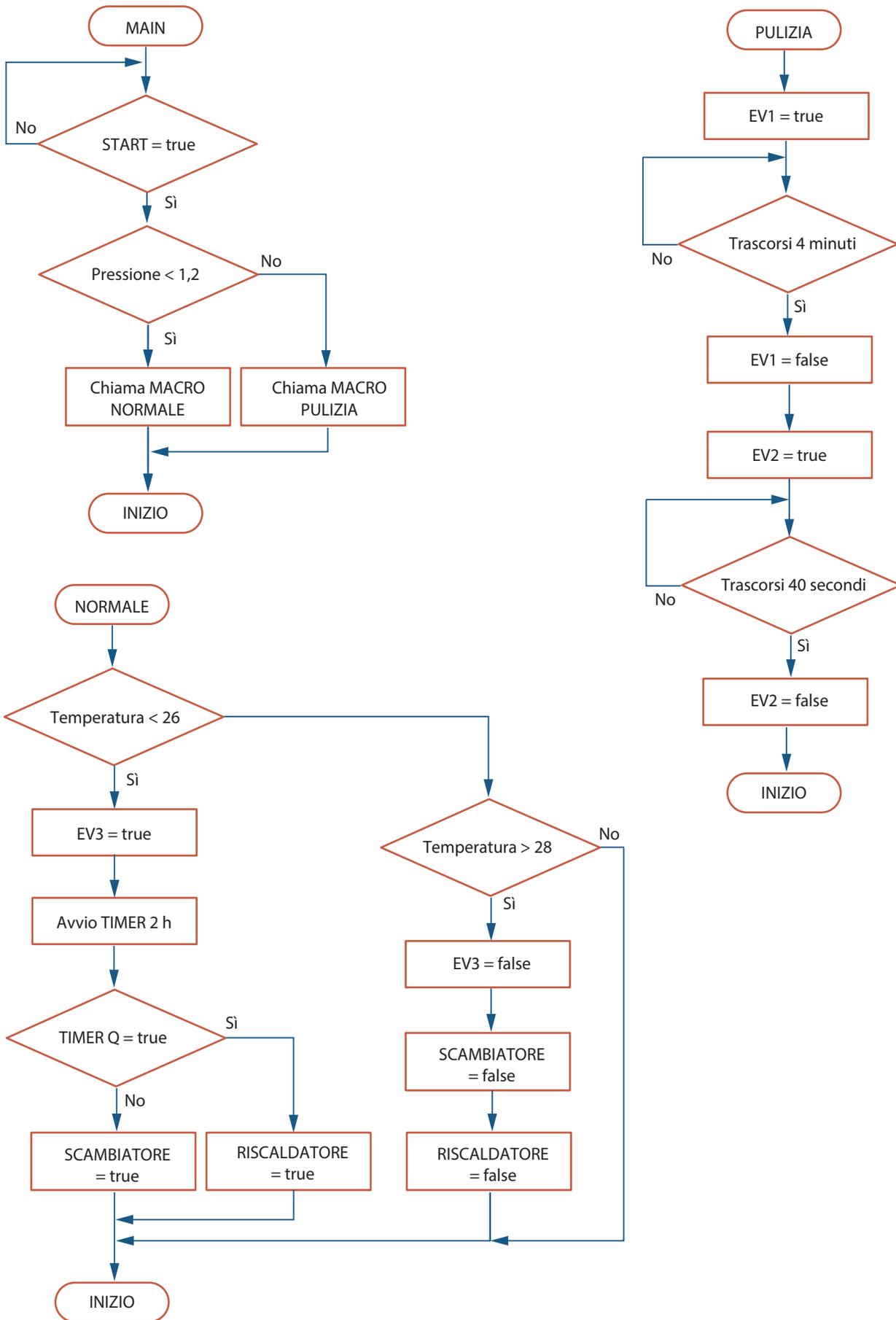
$$F(s) = \frac{10}{s+3} \quad G(s) = \frac{2}{s+2} \quad T_0 = \frac{1}{10}$$

Utilizzando l'algebra degli schemi a blocchi, il candidato calcoli la funzione di trasferimento ad anello chiuso, successivamente determini il valore dell'uscita a regime quando in ingresso è applicato un segnale a gradino di ampiezza 3.

SOLUZIONE PRIMA PARTE

Quesito 1 – Il candidato rappresenti, usando un linguaggio a sua scelta, l'algoritmo di gestione dell'impianto di filtraggio, della pulizia del filtro a sabbia e della temperatura dell'acqua della piscina.

L'algoritmo viene convenientemente suddiviso in due distinte procedure NORMALE e PULIZIA richiamate da un programma principale MAIN.



Quesito 2 – Il candidato elabori il programma in grado di gestire l'automatismo, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza.

L'applicazione è implementata con il programma Codesys e il relativo file è incluso nelle risorse del presente testo.

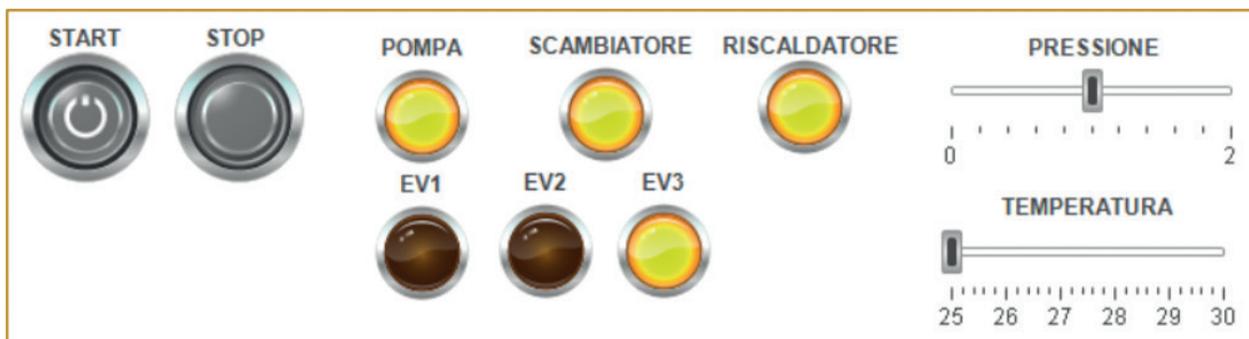
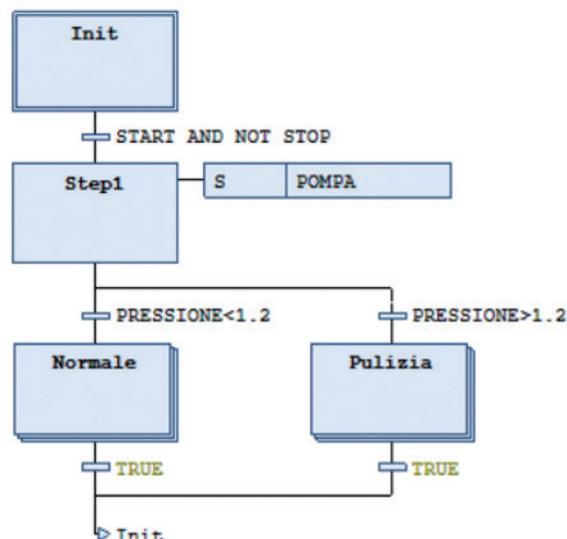
Programma principale

Data la netta distinzione tra fase di filtraggio e fase di lavaggio, si struttura l'applicazione mediante un programma principale che richiama due macro, rispettivamente di nome *Normale* e *Pulizia*.

- *Normale* viene richiamata se $PRESSIONE < 1,2$.
- *Pulizia* viene richiamata se $PRESSIONE > 1,2$.

La pressione, come la temperatura, può essere imposta grazie a un cursore.

Come si può osservare il ciclo principale ha inizio se $START = TRUE$ e $STOP = FALSE$. Inoltre allo *Step1* viene avviata la pompa e subito dopo viene testata la pressione entro una struttura alternativa.



Macro Pulizia

Descriviamo prima questa macro perché più semplice.

Nello *Step2* risulta azionata la valvola EV1.

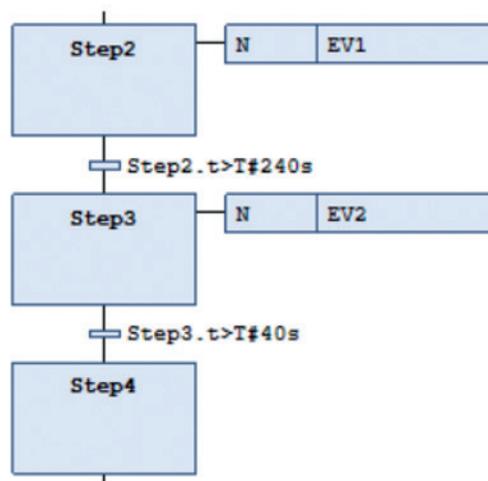
Il passo termina dopo 240 secondi, pari a 4 minuti.

Nello *Step3* viene attivata EV2 per 4 secondi.

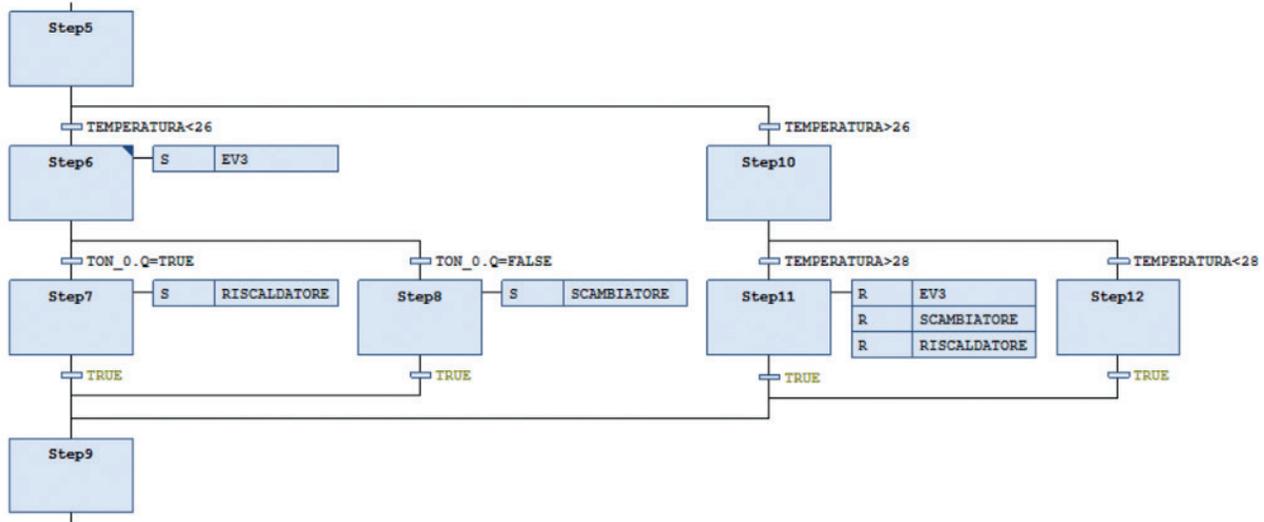
Macro Normale

In questa macro il sistema svolge il compito normale di filtraggio, ma gestisce anche lo scambiatore di calore, convogliando il flusso mediante l'elettrovalvola EV3 e il riscaldatore elettrico.

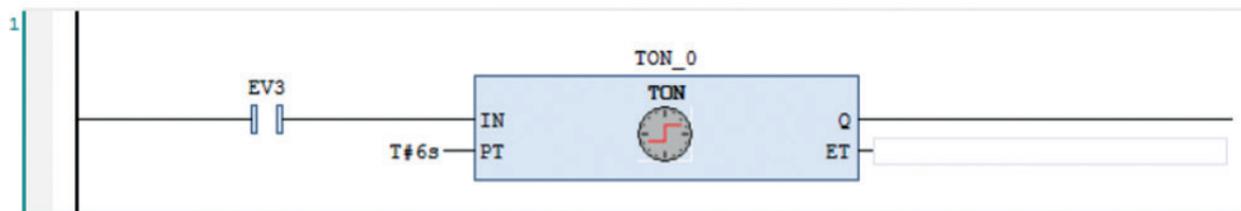
- Se $TEMPERATURA > 26$ ma ancora < 28 viene ripetuto lo *Step12* vuoto in attesa che la temperatura salga.
- Quando $TEMPERATURA > 28$ vengono resettati EV3, lo scambiatore e il riscaldatore.
- Se invece $TEMPERATURA < 26$ allo *Step6* vie innescato un timer.



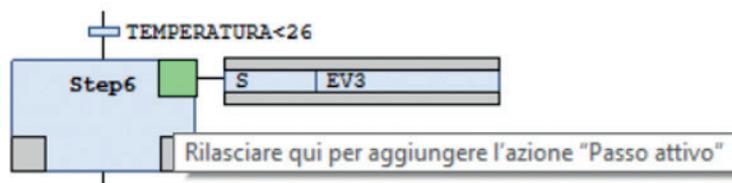
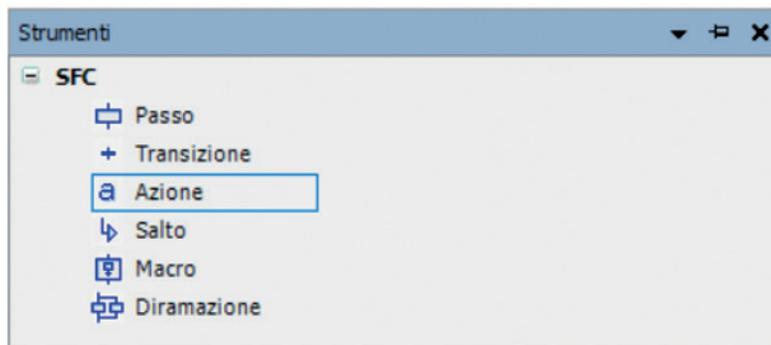
Quando il timer non ha ancora raggiunto l'intervallo di 2 ore viene attivato solo lo SCAMBIATORE, altrimenti viene attivato anche il RISCALDATORE.



- L'innesco del timer ha luogo alla prima entrata nello Step6 mediante la chiamata a una sottoprocedura. Questa si compone di un ramo che innesca un timer che viene impostato all'intervallo di preset di due ore (nella simulazione è stato ridotto a sei secondi). Trascorso questo intervallo diventa TON_0.Q=TRUE e di conseguenza si attiva il riscaldatore.



Nel programma Codesys per inserire una sottoprocedura entro il passo si deve prelevare l'azione dagli *Strumenti* e trascinarla entro il *Passo attivo*.



Quesito 3 – Il candidato descriva il funzionamento dell'inverter dell'impianto fotovoltaico che alimenta l'agriturismo.

L'inverter viene alimentato da batterie DC poste costantemente sotto carica dalla tensione fornita dall'impianto fotovoltaico.

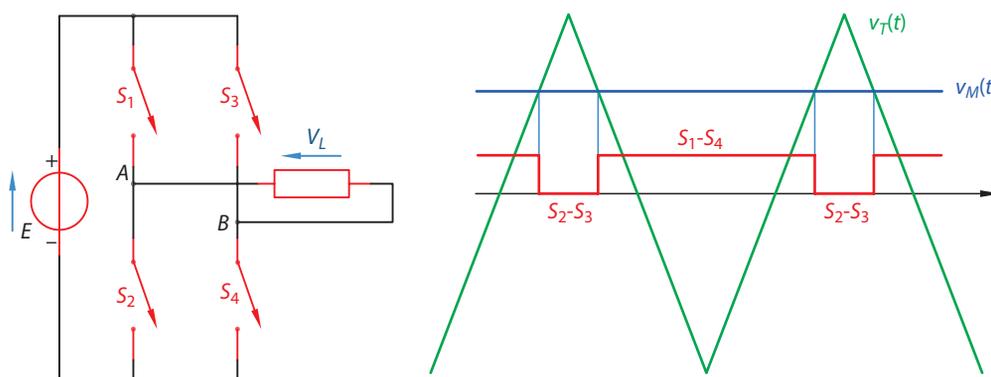


Allo scopo di alimentare il motore trifase sincrono con una terna di tensioni sinusoidali, la tensione continua viene convertita in alternata trifase con una struttura a ponte.

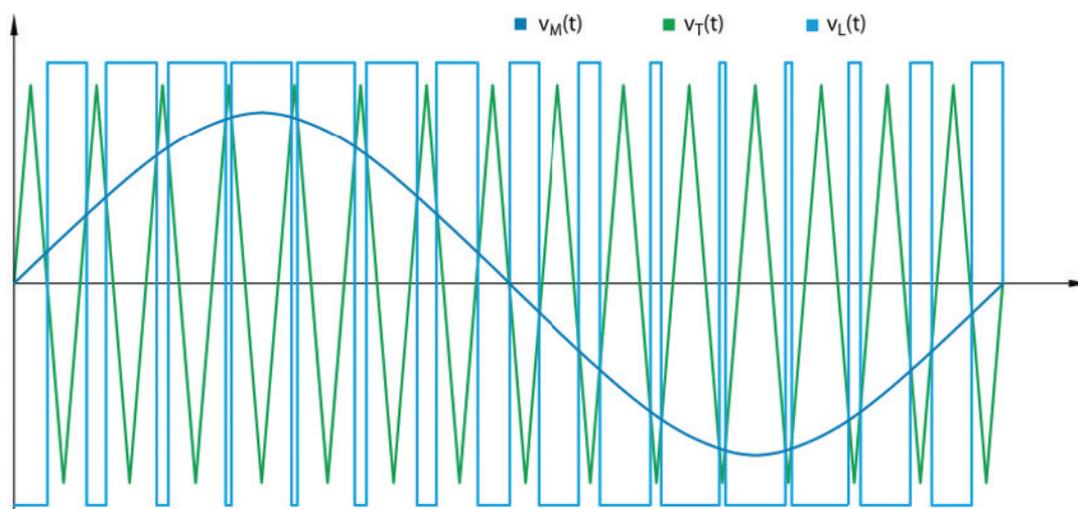
Per semplicità si descrive il principio di funzionamento relativo a una sola fase.

In questo schema la tensione continua E viene parzializzata in modalità PWM a modulazione di impulsi, in funzione del livello di una tensione di comando $v_M(t)$ che viene confrontata con un'onda triangolare.

In funzione di questo confronto cambia l'intervallo di attivazione delle coppie S_2 - S_3 e S_1 - S_4 e il risultato è un'onda parzializzata (in rosso).



Se come nella seguente figura la $v_M(t)$ (di bassa potenza) viene prodotta in forma sinusoidale, il confronto con la triangolare $v_T(t)$ dà luogo a un'onda di alta potenza $v_L(t)$ modulata PWM che ha i valori medi di un'onda sinusoidale, che è quanto richiesto per l'alimentazione monofase.



Quesito 4 – Il candidato descriva il funzionamento del motore sincrono a magneti permanenti a commutazione elettronica che aziona l'elettropompa.

Allo scopo di mettere in risalto le peculiarità del motore sincrono risulta efficace un confronto con la macchina asincrona.

A differenza del motore asincrono, che può avere il rotore non alimentato, ovvero costituito da avvolgimenti in cortocircuito, nel motore sincrono il rotore è costituito da un insieme di poli magnetici.

Per generare i poli è necessaria la presenza di una fonte DC e quindi di spazzole, oppure possono essere impiegati magneti permanenti.

In entrambi i motori invece lo statore è costituito di avvolgimenti che nel complesso producono un campo magnetico rotante.

A causa del campo magnetico rotante dello statore, nella gabbia del motore asincrono si inducono per la legge di Lenz delle forze controelettromotrici che si oppongono al campo che le ha generate.

L'antagonismo si traduce in pratica in una rotazione del rotore che asseconda quella del campo magnetico rotante; in altri termini il complesso di forze magnetiche e controelettromagnetiche ingenera una coppia che spinge il rotore in rotazione.

Il fenomeno si sostiene a condizione che il rotore non ruoti alla stessa velocità dello statore, pertanto nel MAT è sempre presente uno scorrimento, ovvero una velocità relativa tra campo magnetico rotante e rotore.

Ciò non accade nel motore sincrono, nel quale rotore e campo magnetico rotante possiedono la stessa velocità.

Allo spunto tuttavia il rotore parte da velocità nulla, pertanto il sincronismo tra le due velocità non esiste ancora e deve essere forzato per esempio con l'adozione di un motore asincrono accoppiato che dia lo spunto iniziale. Successivamente, raggiunta la velocità di sincronismo, i poli del rotore si accoppiano magneticamente con i poli dello statore rotante, e quindi il rotore continua a ruotare alla velocità sincrona.

Riassumiamo ora le differenze funzionali e costruttive tra motore sincrono e asincrono.

- Il motore sincrono ruota a una velocità precisa e controllabile.
- Il motore sincrono richiede un meccanismo di avviamento aggiuntivo per condurre inizialmente il rotore vicino alla velocità sincrona. Non è richiesto un analogo meccanismo di avviamento nel motore asincrono.
- Il motore sincrono è generalmente più efficiente del motore a induzione.
- Il motore sincrono richiede una fonte di alimentazione in corrente continua aggiuntiva per alimentare l'avvolgimento del rotore e la presenza di spazzole, che non sono necessarie nel motore asincrono, tranne nel caso in cui vengano utilizzati anelli di contatto per la regolazione rotorica della velocità tramite reostato. Anche per questa ragione i motori sincroni sono più costosi.

In generale il motore asincrono viene impiegato quando sono richieste grandi potenze, mentre il sincrono si distingue per la velocità costante proporzionale alla velocità del campo rotante e abbastanza indipendente dal carico applicato, quindi è impiegato quando è richiesta una precisione e stabilità o in ambiti industriali dove più motori partecipano al processo in perfetto sincronismo.

SOLUZIONE SECONDA PARTE

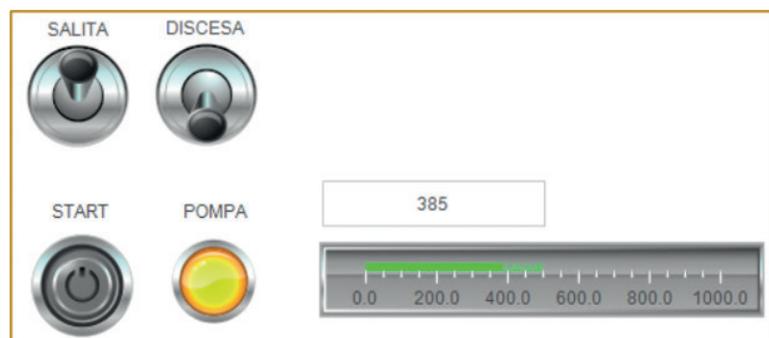
Quesito 1 – Il candidato ad integrazione della prima parte della prova elabori un programma in grado di gestire il controllo automatico del livello dell'acqua, utilizzando un sistema programmabile di sua conoscenza.

L'applicazione qui descritta, sviluppata con il programma Codesys, simula il funzionamento del sistema.

Il livello del serbatoio è rappresentato da una barra di avanzamento orizzontale.

I due blocchi ADD simulano l'incremento e il decremento del livello del serbatoio.

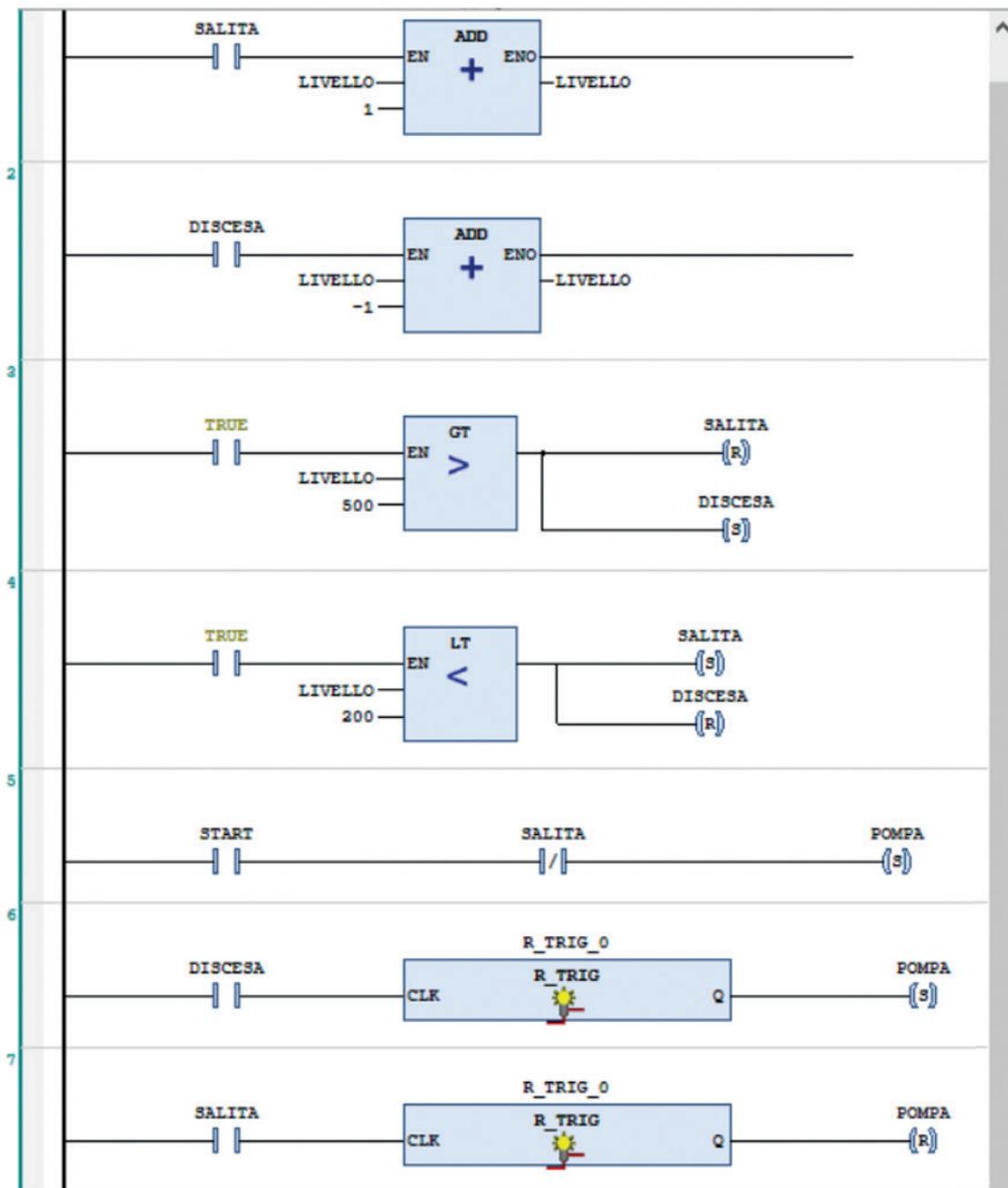
Il blocco GT (Greater Than) simula il raggiungimento del livello superiore e il



conseguente set del merker DISCESA e reset del merker SALITA. In modo opposto opera il blocco LT (Less Then).

I due blocchi R_TRIG_0 intercettano i fronti di salita dei merker SALITA e DISCESA per settare o resettare la pompa.

Il contatto SALITA normalmente chiuso nel terzultimo ramo impedisce che la pompa venga accesa quando si preme START ma il livello è in risalita.



Quesito 2 – Con riferimento alla prima parte della prova, l'azionamento utilizza interruttori statici IGBT come riportato nel catalogo tecnico dell'elettropompa. Il candidato descriva tali componenti e li confronti con altri di sua conoscenza.

I dispositivi IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistors*, come evidenziato nel nome stesso, sono degli speciali transistori con uno strato isolato che risulta equivalente a un condensatore posto sul gate d'ingresso.



Quando questo condensatore risulta carico il transistor va in conduzione, pertanto l'IGBT viene controllato dalla tensione posta sul Gate.

Questo comportamento in tensione avvicina l'IGBT al MOS, mentre le caratteristiche di uscita lineari lo avvicinano al comportamento del transistor.

Entrambi i dispositivi IGBT e MOS vengono impiegati in applicazioni di switching di potenza.

Se la resistenza del gate di un IGBT non è più che bassa il circuito RC equivalente all'ingresso limita la sua velocità di commutazione. Per questo fattore gli IGBT sono meno adatti dei MOS in applicazioni ad alta velocità.

Di contro essi sono impiegati in un range di potenze più elevate dei MOS.

Quesito 3 – Il candidato verifichi se il motore asincrono trifase avente gli avvolgimenti collegati a stella, le cui caratteristiche sono riportate in tabella, può essere utilizzato per l'azionamento. Si considerino trascurabili i parametri a vuoto del circuito equivalente.

Per verificare se il motore può essere utilizzato per l'azionamento occorre calcolare la sua coppia nominale C_n e la sua coppia massima C_M e verificare che risulti: $C_M > 3 \cdot C_n$

L'espressione della coppia nominale è: $C_n = \frac{P_n}{\omega_n}$

formula nella quale la velocità di rotazione del motore deve essere espressa in rad/s:

$$\omega_n = 2 \cdot \frac{\pi \cdot n_n}{60} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 1470}{60} = 153,94 \text{ rad/s}$$

Risulta quindi:

$$C_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{11000}{153,94} = 71,46 \text{ Nm}$$

La coppia massima, quindi, deve essere almeno pari al triplo della coppia nominale appena calcolata:

$$C_M > 3 \cdot C_n = 3 \cdot 71,46 = 214,4 \text{ Nm}$$

Il valore analitico della coppia massima di un motore asincrono trifase è dato dalla formula seguente:

$$C_M = \frac{pV_1^2}{4\pi f \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1d} + X'_{2d})^2} \right]}$$

in cui:

- p (numero di coppie polari) = 2
- R_1 (resistenza di una fase degli avvolgimenti statorici, qui indicata come $R_s = 0,3 \Omega$)
- f (frequenza di alimentazione) = 50 Hz
- V_1 (tensione di alimentazione primaria) = 400 V
- $(X_{1d} + X'_{2d})$ (reattanza totale di dispersione di statore e rotore, riportate al primario del circuito equivalente del motore asincrono trifase, e convenzionalmente indicata come X_{1cc} (da calcolare)).

Occorre eseguire ordinatamente i seguenti calcoli:

1. si determina il valore della resistenza R_{1cc} (resistenza totale di statore e rotore, riportate al primario del circuito equivalente del motore asincrono trifase):

$$R_{1cc} = R_1 + R'_2$$

$$R_{1cc} = \frac{P_{cc}}{(3 \cdot I_n^2)} = \frac{800}{(3 \cdot 22^2)} = 0,551 \Omega$$

2. si determina il valore della resistenza del rotore riportata a primario:

$$R'_2 = R_{1cc} - R_1 = 0,551 - 0,3 = 0,251 \Omega$$

3. si calcola il valore della reattanza di dispersione complessiva a primario $X_{1cc} = X_{1d} + X'_{2d}$:

$$\text{(se } \cos\varphi_{cc} = 0,32 \text{ allora } \tan\varphi_{cc} = 2,961)$$

$$X_{1cc} = R_{1cc} \cdot \tan\varphi_{cc} = 0,551 \cdot 2,961 = 1,632 \Omega$$

4. si calcola il valore della coppia massima del motore in esame:

$$C_M = \frac{2 \cdot 400^2}{4\pi f \left[0,3 + \sqrt{0,3^2 + 1,632^2} \right]} = 260 \text{ Nm}$$

La coppia massima appena calcolata è evidentemente maggiore di 214,4 N·m, quindi il motore può essere utilizzato per l'azionamento.

NOTA

Esiste una formula approssimata per il calcolo della coppia massima:

$$C_M \cong \frac{\rho V_1^2}{4f(X_{1d} + X'_{2d})} = \frac{\rho V_1^2}{4\pi f X_{1cc}}$$

La condizione di applicabilità della formula approssimata è legata al fatto che il valore della resistenza R_1 sia trascurabile rispetto alla reattanza X_{1cc} .

In questo caso non si può certo ritenere 0,3Ω trascurabile rispetto a 1,632Ω, ed è lecito attendersi, per la coppia massima calcolata con la formula approssimata, un risultato molto diverso da 260 N·m.

Infatti, il valore approssimato risulterebbe: $C_M = \frac{2 \cdot 400^2}{(4 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 1,632)} = 312,1 \text{ N} \cdot \text{m}$

È evidente che l'approssimazione non è accettabile.

Quesito 4 – Utilizzando l'algebra degli schemi a blocchi, il candidato calcoli la funzione di trasferimento ad anello chiuso, successivamente determini il valore dell'uscita a regime quando in ingresso è applicato un segnale a gradino di ampiezza 3.

Si applica la formula della retroazione:

$$G_R(s) = \frac{G(s)}{1 - G(s)} = \frac{\frac{2}{(s+2)}}{1 - \frac{2}{(s+2)}} = \frac{2}{s}$$

La f.d.t totale si ricava applicando la formula della cascata e nuovamente della retroazione.

$$G_{TOT}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{20}{s(s+3)}}{1 + \frac{2}{s(s+3)}} = \frac{20}{s^2 + 3s + 2}$$



Le formule trovano conferma nella seguente verifica con Scilab.

```

--> s=%s
s =
s

--> F=10/(s+3)
F =
10
-----
3 + s

--> G=2/(s+2)
G =
2
-----
2 + s

--> T0=1/10
T0 =
0.1

--> GR=G/(1-G)
GR =
2
--
s

--> GTOT=(F*GR)/(1+F*GR*T0)
GTOT =
20
-----
2 + 3s + s

```

Per determinare la risposta al gradino di ampiezza 3 si moltiplica la sua trasformata $3/s$ per la $G_{TOT}(s)$.

$$Y(s) = G_{TOT}(s) \cdot X(s) = \frac{20}{s^2 + 3s + 2} \cdot \frac{3}{s} = \frac{60}{s(s^2 + 3s + 2)}$$

Poiché interessa solo il valore a regime si può applicare il teorema del valore finale, senza dover antitrasformare.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{60}{s(s^2 + 3s + 2)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{60}{s^2 + 3s + 2} = 30$$

È possibile verificare il valore calcolato con Scilab, nonché visualizzare sul grafico l'intero andamento della risposta.

```

--> GTOT_LIN=syslin('c',GTOT)
GTOT_LIN =
20
-----
2
2 + 3s + s

--> t = [0:1e-3:10];

--> y = csim('step',t,GTOT_LIN)
y =

--> y=y*3; //gradino di ampiezza 3

--> plot(t, y)

```

