

ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE

Indirizzo: ITET - ELETTRONICA ED ELETTROTECNICA
ARTICOLAZIONE ELETTROTECNICA

Tema di: ELETTROTECNICA ED ELETTRONICA e SISTEMI AUTOMATICI

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.

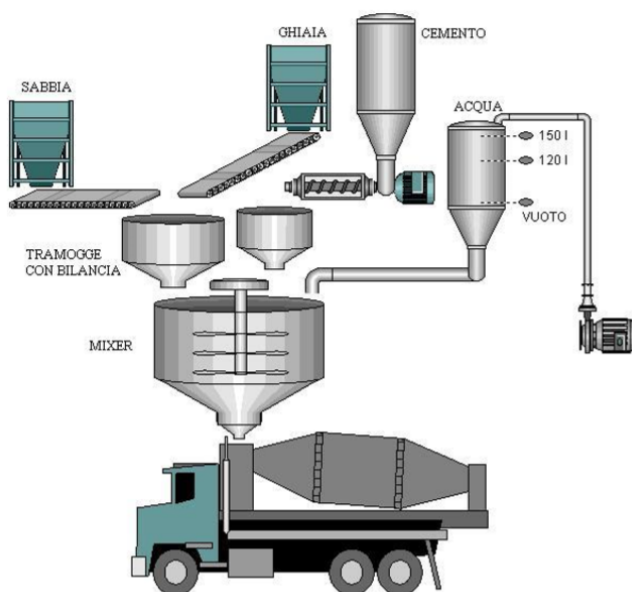
Il processo ha inizio con la selezione della tipologia di miscela da realizzare in modo da determinare le quantità dei materiali da versare nelle tramogge.

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 successivamente 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. dimensiona la potenza del motore per l'azionamento dei nastri trasportatori considerando che:

- la massa totale per unità di lunghezza è pari a 1080 kg/m;
- i silos distano 10 metri dalla tramoggia;
- la velocità con cui avanza il nastro trasportatore è pari a 0,6 m/s;
- il valore del coefficiente di attrito globale stimato che tiene conto di tutti i fenomeni presenti è uguale a 2,4.

4. 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 ad 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:

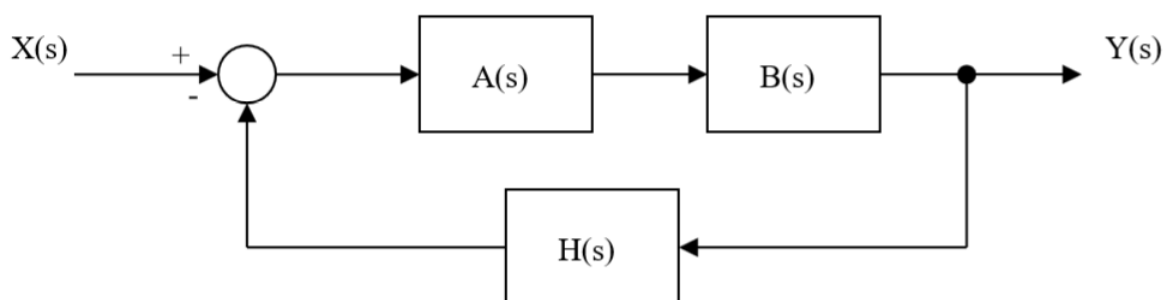
potenza $P_n = 4 \text{ kW}$	frequenza $f_n = 50 \text{ Hz}$
tensione $V_n = 400 \text{ V}$	velocità $N_n = 2890 \text{ rpm}$
corrente $I_n = 8,3 \text{ A}$	fattore di potenza $\cos\phi_n = 0,81$

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:

$$A(s) = \frac{K}{s^2 + 2s} \text{ con } K \text{ parametro reale}$$
$$B(s) = \frac{s+1}{s+3}$$
$$H(s) = \frac{1}{s}$$

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.

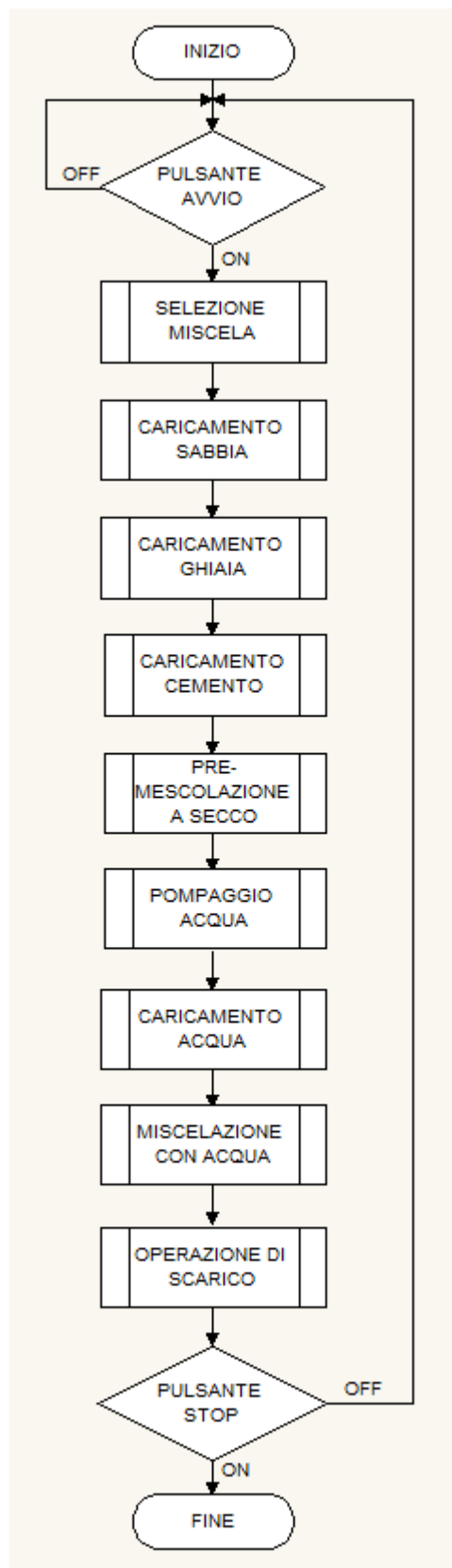
SOLUZIONE PRIMA PARTE

Punto 1

Il processo di produzione, completamente automatizzato, ha inizio con la pressione del pulsante di avvio da parte di un operatore.

La sequenza delle diverse fasi del ciclo di lavorazione viene riportata nel diagramma di flusso di seguito riprodotto.

La pressione del pulsante di stop interrompe il processo di produzione.



Punto 2

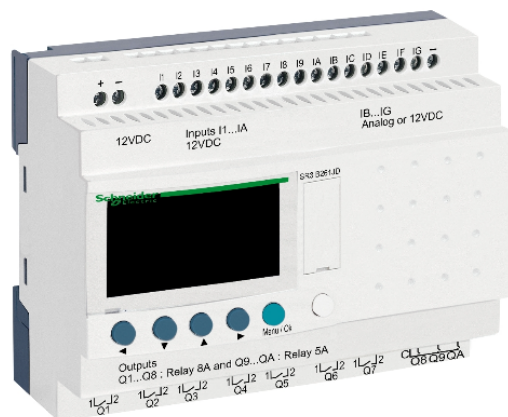
Per la realizzazione dell'impianto, considerato di dimensioni abbastanza modeste, si utilizzano dei relè programmabili Zelio prodotti da Schneider (in alternativa potrebbero essere utilizzati i moduli Logo della Siemens).

Il criterio di scelta dei moduli dipende essenzialmente dalla presenza di sensori analogici come quelli di temperatura e di luminosità che richiedono ingressi analogici.

Consultando i prodotti della serie Zelio si rivela adatto allo scopo il modello indicato in figura.

La configurazione consente infatti l'impiego di 16 ingressi (di cui 6 analogici) e 10 uscite, lasciando spazio anche ad eventuali ampliamenti.

Selezione corrente		
	Base	Estensioni non contigue
Riferimento	SR3B261JD	1 Non selezionato
Alimentazione	12VDC	
Ingressi	10 DIGITALE + 6 (0-10V)	
Uscite	10 RELÈ	Estensioni
Orologio	Si	1 Non selezionato
Lingua	Ladder	2 Non selezionato
Numero totale di ingressi/uscite		16 I / 10 O



Si distinguono i seguenti ingressi digitali:

- un pulsante di avvio;
- un pulsante di stop;
- uno switch per la scelta della tipologia di miscela;
- due trasduttori di livello;
- il sensore di presenza della betoniera
- un misuratore di flusso;
- i contatti dei tre relè termici che proteggono i motori.

Si distinguono i seguenti ingressi analogici:

- due trasduttori di peso;
- un misuratore di flusso.

Si distinguono le seguenti uscite che azionano:

- le serrande pneumatiche dei silos contenenti sabbia e ghiaia;
- i motori dei nastri che trasportano sabbia e ghiaia;
- il motore del silos che contiene il cemento;
- il motori della pompa di caricamento dell'acqua e del mixer;
- le serrande delle tramogge e del mixer;
- l'elettrovalvola del serbatoio dell'acqua.

Il programma viene realizzato in linguaggio ladder.

Di seguito viene fatto riferimento alle prime cinque fasi.

Per le fasi che seguono si può utilizzare un procedimento identico.

Dal punto di vista strettamente pratico la betoniera dovrebbe essere già presente all'inizio del ciclo; il ciclo si dovrebbe interrompere quando questa si allontana.

Pertanto il contatto del sensore che rileva la presenza della betoniera stessa viene inserito sulla linea di comando.

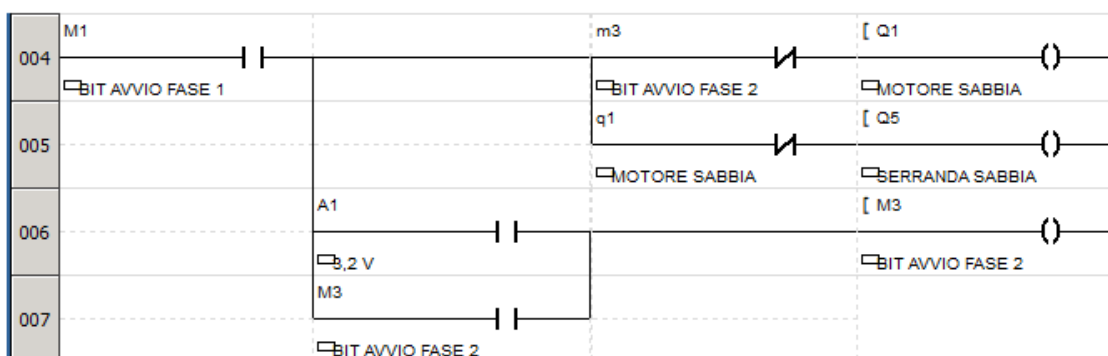
In figura vengono riportati i rung del programma da 001 a 003 che fanno riferimento alle fasi di avvio/stop dell'impianto e alla scelta della tipologia di impasto.

Movimentando lo switch che seleziona la tipologia si sceglie il cemento armato.

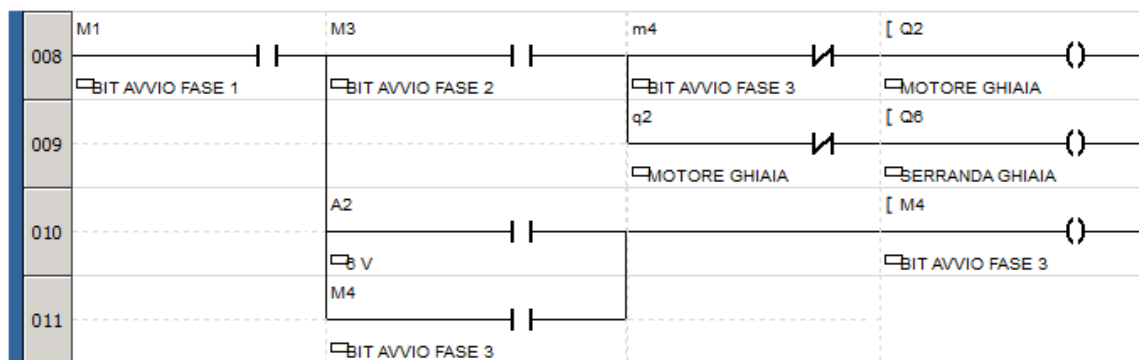
Vengono omessi i contatti dei relè termici che proteggono i motori dal sovraccarico.



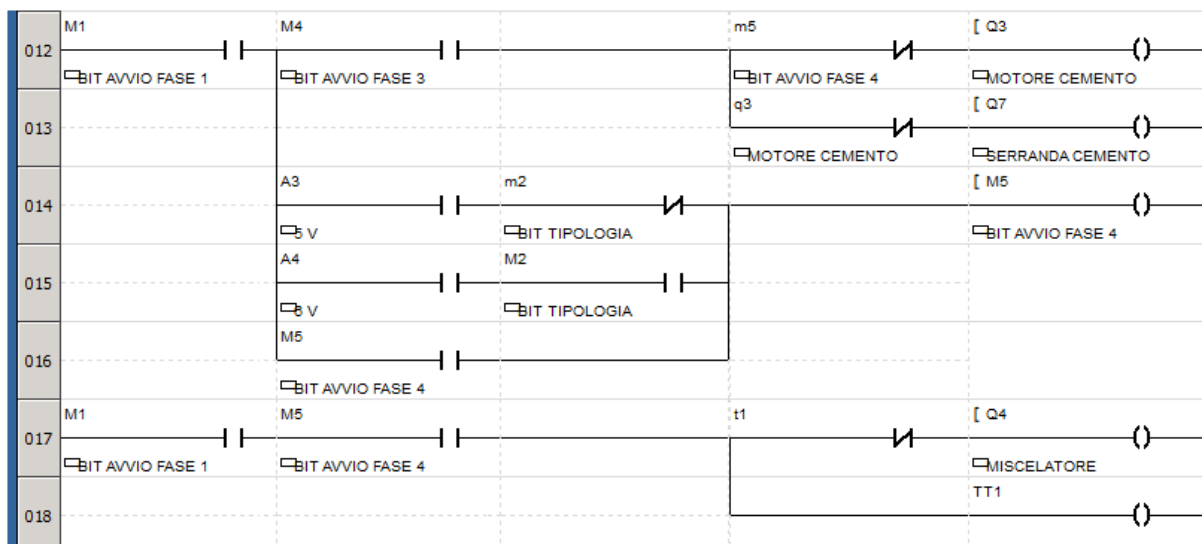
In figura viene riportati i rung da 004 a 007 che fanno riferimento alla fase di caricamento della sabbia.



In figura vengono riportati i rung da 008 a 011 che fanno riferimento alla fase di caricamento della ghiaia.



In figura vengono riportati i rung da 012 a 018 che fanno riferimento alla fase di caricamento del cemento e alla fase di miscelazione a secco.



Punto 3

Per la scelta del motore adatto per questo tipo di applicazione si può fare riferimento alla formula seguente che calcola la potenza resa dal motore stesso:

$$P_r = p_l \cdot l \cdot g \cdot \mu \cdot v = 1080 \cdot 10 \cdot 9,81 \cdot 2,4 \cdot 0,6 \cong 153000 \text{ W} = 153 \text{ kW}$$

Punto 4

Il motore asincrono trifase è costituito da due parti fondamentali di forma cilindrica tra loro coassiali; la parte esterna fissa è lo statore; la parte interna, ad essa coassiale e munita di albero, è il rotore.

La tensione trifase della rete elettrica (400 V/50 Hz) alimenta gli avvolgimenti di statore.

Come conseguenza la corrente trifase circolante negli avvolgimenti dà origine ad un campo magnetico rotante nello spazio.

La velocità del campo rotante n_0 risulta dalla relazione

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

in cui f è la frequenza di alimentazione e p il numero delle coppie polari.

La velocità dell'albero motore n è inferiore alla velocità del campo rotante; il parametro che rende conto di questa differenza è lo scorrimento s .

La relazione che lega la velocità dell'albero motore con la velocità del campo rotante è la seguente:

$$n = n_0 \cdot (1 - s)$$

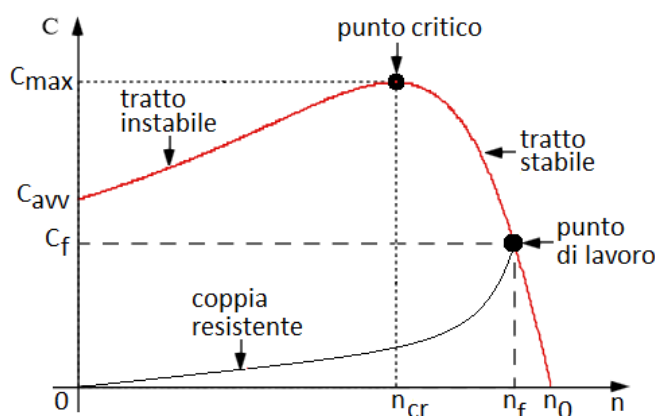
All'avviamento si ha la massima differenza tra la velocità del campo rotante statorico e la velocità del rotore.

In queste condizioni si sviluppa una coppia motrice che è funzione della corrente indotta nel rotore; pertanto la coppia motrice iniziale (coppia di spunto) dipende dalla resistenza elettrica del rotore.

Quando il motore non è collegato a nessuna utenza (il motore gira a vuoto) esso risulta frenato soltanto dall'attrito interno dovuto ai cuscinetti e dalla ventilazione interna. In queste condizioni lo scorrimento è molto basso e la velocità effettiva del motore è circa uguale a quella del campo rotante.

La caratteristica meccanica di un motore asincrono trifase è un grafico cartesiano che mette in relazione la coppia meccanica (coppia utile che il motore fornisce al carico) con la velocità angolare del rotore.

La caratteristica meccanica e la caratteristica della coppia resistente vengono riportate nella figura seguente.



La caratteristica si compone di due rami; il primo tratto è quello ascendente, cui corrisponde un funzionamento instabile; il secondo tratto è discendente, cui corrisponde un funzionamento stabile; il punto di C_{max} rappresenta il valore critico ovvero il confine tra queste due zone.

Nel primo tratto ad ogni aumento della coppia resistente il motore rallenta con conseguente diminuzione della coppia motrice; questo meccanismo porta ad un progressivo rallentamento; smaltita l'energia cinetica delle masse rotanti il motore alla fine si ferma.

Nel secondo tratto ad ogni aumento della coppia resistente il motore rallenta con conseguente aumento della coppia motrice; in questo modo il motore raggiunge un nuovo punto di funzionamento a cui corrisponde una coppia motrice maggiore di valore pari al nuovo valore della coppia resistente richiesta.

La nuova condizione di equilibrio si raggiunge dopo una serie di oscillazioni intorno al punto di equilibrio, oscillazioni dipendenti dalla rapidità della variazione del carico, dall'inerzia delle masse ruotanti e dalla presenza di attriti e smorzamenti del moto.

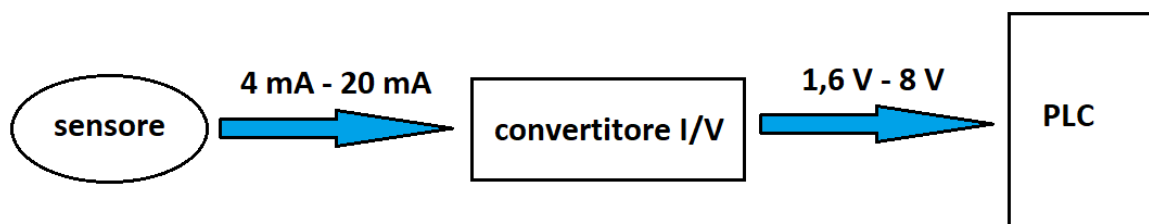
Il punto di lavoro si trova nel tratto stabile; poiché questo tratto di caratteristica è molto ripido, a regime la velocità rimane quasi costante al variare del carico.

Il punto di lavoro è stato ricavato dall'intersezione tra caratteristica meccanica e coppia una coppia resistente per ipotesi proporzionale con il quadrato della velocità (la curva è una parabola).

SOLUZIONE SECONDA PARTE

Quesito 1

Il segnale proveniente dai sensori con uscita in corrente deve essere adattato all'ingresso del PLC (vedere figura).



L'uscita del sensore viene convertita in tensione tramite un convertitore I/V non invertente che nell'esempio effettua una moltiplicazione per 400 portando gli estremi in tensione a 1,6 V 8 (livello massimo e 8 V (livello minimo); tali valori sono compresi tra 0 V e 10 V corrispondente al range di ingresso del PLC.

I segnali provenienti dagli indicatori di livello dei silos contenenti sabbia, ghiaia e cemento vengono inviati a tre ingressi analogici del PLC.

Per comprenderne l'utilizzo si consideri il segmento di programma di seguito riportato.

Per rilevare le soglie minime e massime nei silos si utilizzano sei operatori di confronto analogico, tre per segnalare il livello minimo e altrettanti per segnalare quello massimo.

Un bit indicatore del livello minimo viene portato a livello alto se almeno uno dei tre sensori segnala un livello insufficiente (configurazione OR).

Tre bit vengono utilizzati per segnalare il livello massimo per ciascun silos.

Il bit indicatore del livello minimo viene utilizzato per interrompere il processo e pertanto deve rimanere a livello alto fino al raggiungimento del livello massimo; per questo motivo viene utilizzato come autoritenuta per i blocchi di confronto.

Il bit ritorna a livello basso fino a quando il bit che segnala il livello massimo (in serie con l'autoritenuta) si porta a livello alto eliminando gli effetti prodotti dal contatto di autoritenuta; con il bit indicatore portato a livello basso il processo può riprendere.

No	Contatto 1	Contatto 2	Contatto 3	Bobina
001	A1			[M1
				)
	☐ LIV MIN SABBIA 8 V			☐ BIT LIVELLO MINIMO
002	M1	m2		
				
	☐ BIT LIVELLO MINIMO	☐ BIT LIV MAX SABBIA		
003	A2			
				
	☐ LIV MIN GHIAIA			
004	M1	m3		
				
	☐ BIT LIVELLO MINIMO	☐ BIT LIV MAX GHIAIA		
005	A3			
				
	☐ LIV MIN CEMENTO			
006	M1	m4		
				
	☐ BIT LIVELLO MINIMO	☐ BIT LIV MAX CEMENTO		
007	A4			[M2
				 (
	☐ LIV MAX SABBIA 1,6 V			☐ BIT LIV MAX SABBIA
008	A5			[M3
				 (
	☐ LIV MAX GHIAIA			☐ BIT LIV MAX GHIAIA
009	A6			[M4
				 (
	☐ LIV MAX CEMENTO			☐ BIT LIV MAX CEMENTO

Quesito 2

In molte applicazioni pratiche si evidenzia la necessità di variare la velocità del motore in un ampio campo con un determinato valore di coppia (regolazione a coppia costante) o con una coppia inversamente proporzionale alla velocità (regolazione a potenza costante).

Per poter ottenere una variazione di velocità in un motore asincrono trifase si può procedere modificando uno dei seguenti parametri:

- scorrimento;
- numero delle coppie polari;
- frequenza della linea di alimentazione.

Una variazione dello scorrimento può essere ottenuta aggiungendo dei resistori in serie al rotore nel caso di rotore ad anelli; si ha in questo una diminuzione della velocità del motore.

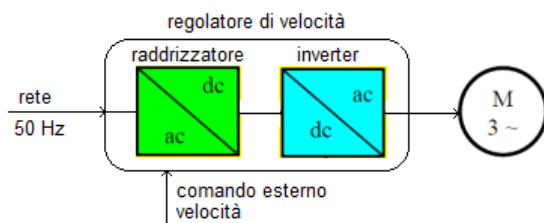
Una variazione del numero delle coppie di poli può essere realizzata costruendo l'avvolgimento statorico (avvolgimento Dalhandler) in modo da poter ottenere un numero di poli differente con il

semplice scambio di poche connessioni sulla morsettiera delle bobine di uno stesso avvolgimento; questo metodo consente di ottenere avere soltanto poche velocità.

Una variazione della frequenza si può ottenere utilizzando un convertitore di frequenza ed è questo il metodo attualmente più utilizzato.

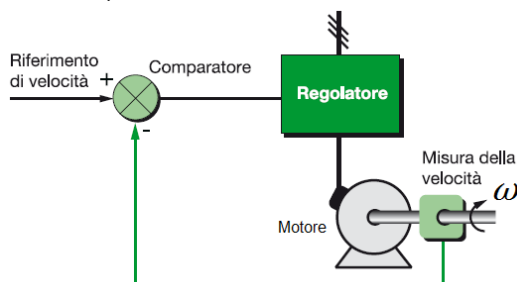
Nel gergo industriale un dispositivo atto alla regolazione della velocità dei motori asincroni trifase viene denominato inverter o convertitore statico di frequenza; in realtà l'inverter è soltanto il dispositivo elettronico atto a trasformare una corrente continua in corrente alternata di forma sinusoidale o pseudo sinusoidale; nel regolatore è anche compreso un blocco raddrizzatore che trasforma l'alternata di rete in una continua a tensione variabile.

In figura viene rappresentato lo schema a blocchi di un regolatore.



Il valore della frequenza in uscita può quindi essere scelto dall'operatore in relazione alla velocità di funzionamento che si vuole far raggiungere al motore.

In un controllo di velocità ad anello chiuso, come mostrato in figura, il valore di frequenza viene scelto automaticamente in relazione alle informazioni fornite da un trasduttore di velocità confrontato con un valore di riferimento (quello che il motore dovrebbe mantenere durante il suo normale funzionamento).



Se si varia la frequenza con cui si alimenta il motore al fine di modificare la velocità si ha come conseguenza un aumento del flusso magnetico (per valori inferiori a 50 Hz) o una diminuzione del flusso magnetico (per valori superiori a 50 Hz).

Per conservare inalterate le caratteristiche meccaniche nominali del motore come la coppia è però necessario garantire un flusso magnetico il più possibile costante e vicino al valore stabilito dal costruttore.

Questa condizione si ottiene mantenendo il più costante possibile il rapporto V/f tra la tensione che alimenta il motore (che influisce sulla coppia) e la frequenza stessa.

Ad esempio per ottenere da un motore standard da 5,5 kW a 2 poli velocità di campo rotante differenti dal valore nominale senza interferire sul comportamento della coppia lo si dovrà alimentare con i valori di frequenza e tensione riportati nella tabella.

Frequenza (Hz)	Tensione (V)	Giri / minuto	Coppia (Nm)
50	400	3000	17
40	320	2400	17
30	240	1800	17
25	200	1500	17
20	160	1200	17
10	80	600	17
5	40	300	17

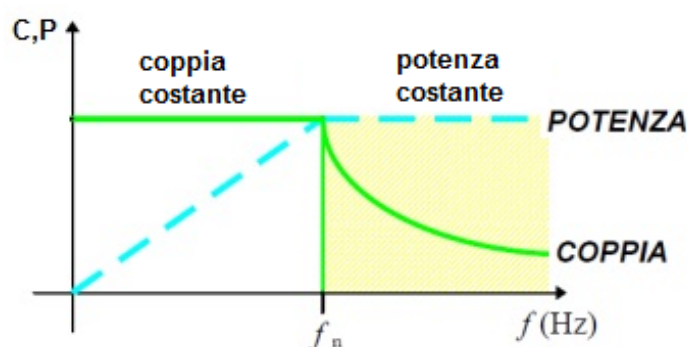
L'inverter regola in modo proporzionale frequenza e tensione sulla base del comando esterno impartito dall'utilizzatore del sistema che in pratica è il comando della velocità richiesta.

In realtà l'inverter non aumenta la tensione sempre in modo proporzionale alla frequenza, ma alle basse frequenze tiene la tensione a valori leggermente superiori per garantire un maggiore flusso magnetico necessario per sopperire alle perdite nel ferro.

Con l'inverter è possibile ottenere velocità maggiori rispetto a quella di targa generando frequenze maggiori di 50 Hz.

Dopo tale punto è ancora possibile aumentare la frequenza per ottenere velocità maggiori ma non è più possibile aumentare la tensione; come conseguenza si ha un progressivo calo della coppia motrice; la zona oltre la frequenza nominale viene denominata zona a potenza costante per distinguerla dalla zona a coppia costante prima della frequenza nominale.

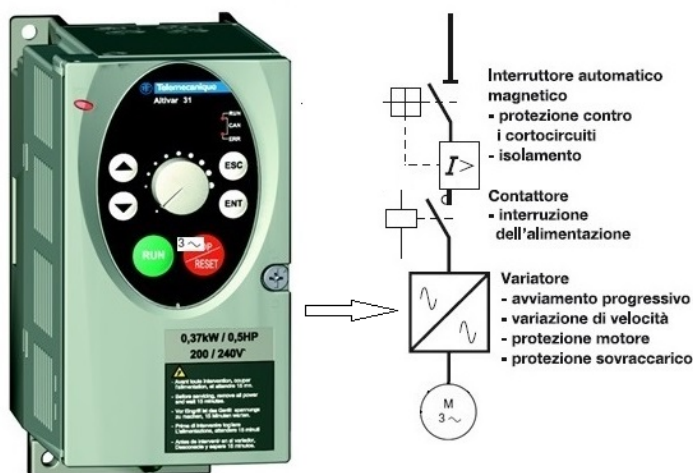
I grafici riportati in figura mostrano l'andamento della coppia e della potenza in funzione della frequenza di alimentazione di un motore asincrono trifase accoppiato con un carico meccanico che, a 50 Hz, assorbe la potenza nominale.



I regolatori di velocità Altivar prodotti da Schneider Electric sono degli esempi di componenti commerciali.

Si citano ad esempio gli Altivar 31 (ATV31), 71 (ATV71) e 312 (ATV312).

I variatori, come evidenzia lo schema riportato in figura, vengono disposti a valle dell'interruttore automatico magnetico e del contattore; la protezione dal sovraccarico viene assolta dal variatore.



Quesito 3

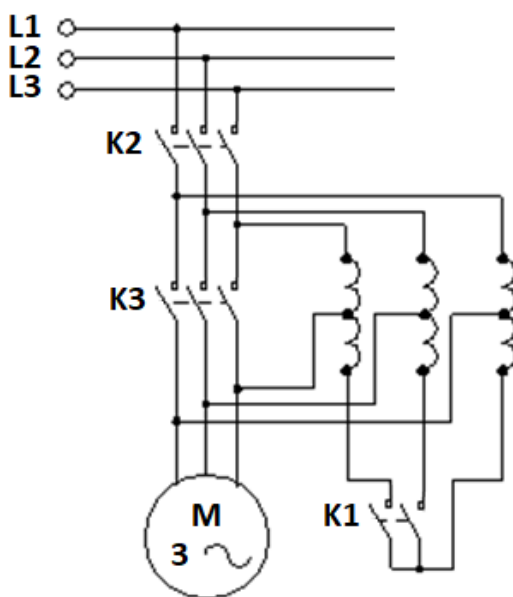
La tipologia di avviamento che consente una riduzione della corrente di spunto dipende dalla tecnologia costruttiva del motore; si possono utilizzare un autotrasformatore o di un sistema stella-triangolo (nel caso di motore a gabbia) o di un reostato di avviamento (nel caso di motore a rotore avvolto).

Si consideri il caso di un motore a gabbia e di un avviamento tramite autotrasformatore interposto tra linea a e motore.

L'avviamento tramite autotrasformatore non presenta l'inconveniente proprio di un avviamento stella-triangolo che è quello di una temporanea assenza di coppia motrice al momento della commutazione, fatto di particolare rilevanza nel caso di avviamento a carico.

In figura viene riprodotto un esempio di schema per l'avviamento di un m.a.t. tramite autotrasformatore (non vengono rappresentati i dispositivi di protezione ma solo quelli di manovra). La successione delle manovre di avviamento (vedere schema riportato in figura) risulta la seguente:

- eccitazione di K1;
- eccitazione di K2;
- diseccitazione di K1;
- eccitazione di K3.



Si suppone che all'atto dell'avviamento sia necessaria una coppia almeno pari a $\frac{1}{4}$ della coppia di avviamento alla tensione nominale.

Sapendo che la coppia varia col quadrato della tensione, il calcolo della tensione ridotta necessaria per ottenere un avviamento che rispetti questa condizione restrittiva può essere effettuato utilizzando la relazione seguente:

$$\frac{C_{avn}}{C_{avrid}} = \frac{V_n^2}{V_{rid}^2}$$

Da questa si ricava:

$$V_{rid} = V_n \cdot \sqrt{\frac{C_{avrid}}{C_{avn}}} = 400 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 200 \text{ V}$$

Poiché la corrente varia linearmente con la tensione risulta di conseguenza che la massima riduzione della corrente di spunto risulta pari al 50%.

Poiché la corrente di spunto alla tensione nominale I_{s400} vale 7 volte la corrente nominale I_n , si ottiene

$$I_{s400} = 7 \cdot I_n = 7 \cdot 8,3 = 58,1 \text{ A}$$

e di conseguenza:

$$I_{av200} = I_{avn} \cdot \frac{V_{rid}}{V_n} = 58,1 \cdot \frac{200}{400} = 29,05 \text{ A}$$

Quesito 4

Per la f.d.t. ad anello chiuso, effettuando opportuni passaggi, risulta:

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

Per la f.d.t. ad anello aperto, effettuando opportuni passaggi, risulta:

$$G_{aa}(s) = \frac{K(s + 1)}{s^2(s + 2)(s + 3)}$$

Vista la presenza di un polo doppio posto nell'origine, risulta subito evidente che il margine di fase, per qualsiasi valore di K , assume valori tali da rendere instabile il sistema; per ciascun polo nullo il contributo in termini di fase è infatti di 90° e la presenza dello zero non riesce ad alzare il margine di fase in quanto i poli successivi risultano molto ravvicinati.

Anche stabilendo un valore per K la rappresentazione grafica manuale del modulo e la conseguente determinazione della pulsazione di attraversamento a 0 dB risultano di difficile attuazione in quanto poli e zeri sono molto ravvicinati.

Per la rappresentazione dei diagrammi di Bode è meglio affidarsi a programmi come Multisim.

Risultando il sistema instabile non ha senso la domanda successiva relativa all'errore di velocità.