

MOTORE ASINCRONO TRIFASE (MAT)

Il motore asincrono trifase (MAT) fu inventato nel 1885 da Galileo Ferraris. Esso rappresenta il motore elettrico più semplice, economico, robusto ed affidabile che la tecnica conosca. È ad elevato rendimento, non richiede lubrificazione, né manutenzione, non presenta alcuna difficoltà o particolarità per l'avviamento e, pertanto, è il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come "forza motrice". Può inoltre essere semplicemente collegato direttamente alla rete di distribuzione con tensione e frequenza costanti se non si desidera una precisa velocità di utilizzo.

Se facciamo un confronto tra MAT ed altri tipi di motori elettrici riscontriamo i seguenti vantaggi:

- a. peso ed ingombro ridotti a parità di potenza
- b. mancanza di particolari dispositivi di eccitazione prelevando, direttamente dalla rete, la potenza magnetizzante necessaria per creare il flusso induttore della macchina
- c. è auto avviante
- d. sviluppa, spontaneamente ed automaticamente, variando la propria velocità, una coppia motrice atta a controbilanciare la coppia resistente applicata all'albero motore, determinando un funzionamento stabile (all'aumentare del carico rallenta)
- e. sovraccaricabilità, anche il 100% della sua potenza nominale; esigenze di manutenzione molto ridotte,
- f. semplicità di esercizio ed alto rendimento

ed i seguenti svantaggi:

- a. all'avviamento, con inserzione diretta sulla rete, la corrente di spunto può risultare anche 4 - 10 volte maggiore della corrente assorbita a pieno carico, con problemi alla rete di distribuzione (cadute di tensione) ed agli interruttori
- b. questa corrente risulta, inoltre, essere tanto sfasata rispetto alla tensione (come nei trasformatori in corto circuito) che la coppia motrice sviluppata dal motore all'avviamento, detta coppia di spunto, è piccola nonostante l'elevato valore della corrente assorbita
- c. la velocità di rotazione del MAT, nel campo di funzionamento normale, praticamente costante, perché strettamente legata alla frequenza della corrente di alimentazione
- d. la coppia massima (proporzionale al quadrato del rapporto tra il valor efficace della tensione di alimentazione e la frequenza) costante ed ad una ben precisa velocità.

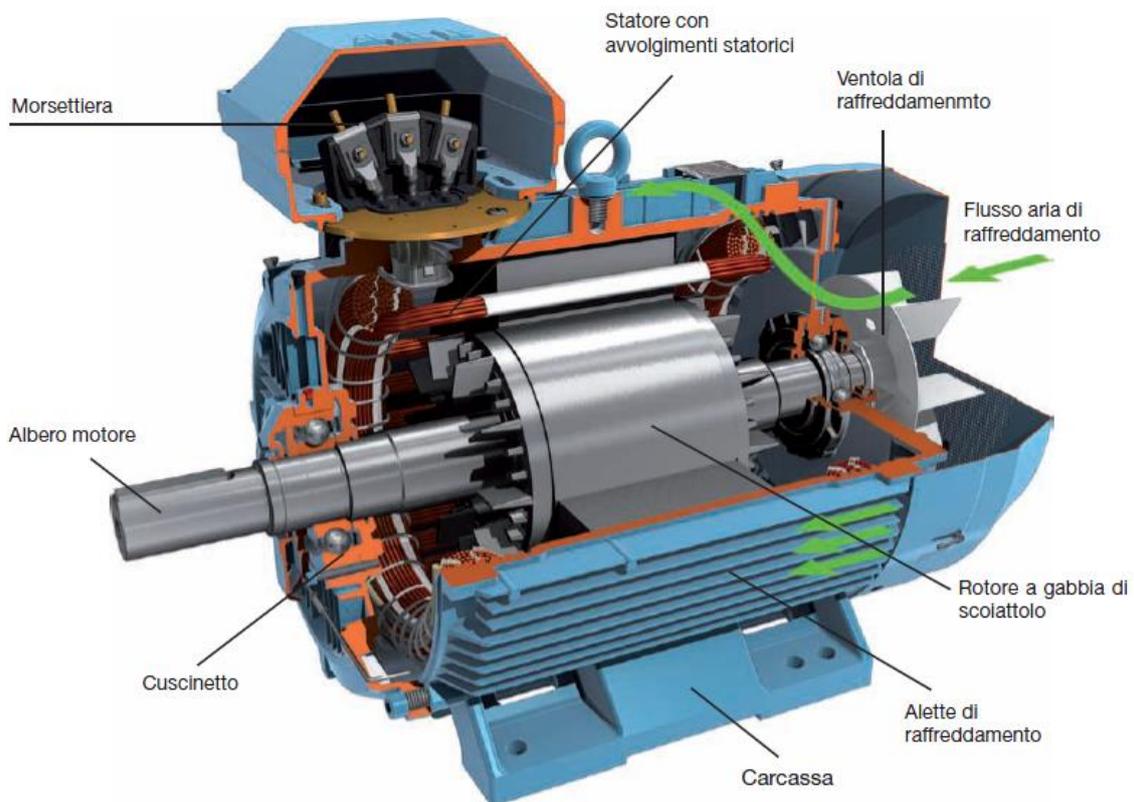
Si intuisce quindi facilmente che qualora avessimo bisogno di determinate e precise velocità o coppie, il MAT non è l'ideale. Nel caso in cui, invece, non siamo interessati ad una determinata velocità dell'albero motore, ivi è il regno incontrastato di applicazione del MAT: montacarichi, gru, ascensori, macchine utensili tradizionali, pompe, ventilatori sono da decenni azionati in maniera soddisfacente da questo tipo di motore. Caratteristica importante del MAT è la sua capacità di "auto-regolarsi" qualora cambiasse il carico che muove il motore, riuscendo quindi a mantenere una velocità pressoché costante (entro certi limiti di variazione del carico).

STRUTTURA

Il motore asincrono trifase si compone di una parte fissa detta statore e una parte mobile detta rotore. E' un motore elettrico in corrente alternata la velocità angolare del cui rotore è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti di statore, da cui **l'asincronismo** (al contrario del motore sincrono, la velocità del cui rotore è diretta funzione della frequenza di generazione del campo statore). Il motore asincrono è detto anche motore a induzione in virtù del suo principio di funzionamento descritto di seguito.

STATORE

Lo statore è formato da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare. Le scanalature interne al pacco di lamierini statorici accolgono i conduttori (filo di rame smaltato) dell'avvolgimento trifase statorico. Il rotore è situato all'interno dello statore ed è costituito da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare, con un foro interno per il passaggio dell'albero di rotazione, e scanalature esterne (cave rotoriche) per accogliere l'avvolgimento rotorico. Tra *statore* e *rotore* è presente uno spessore d'aria o dielettrico detto *traferro* di qualche decimo di millimetro per consentire la libera rotazione del rotore.



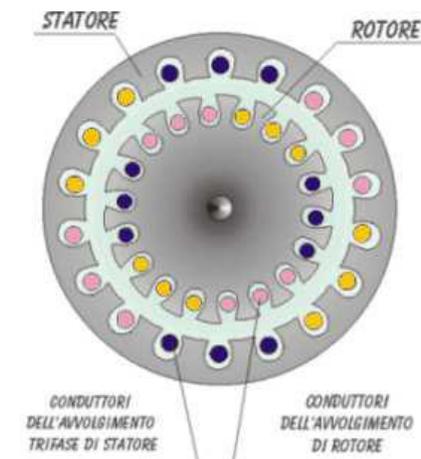
ROTORE:

Il rotore può essere di due tipi

- 1) **Avvolto o bobinato**
- 2) **A gabbia di scoiattolo**

Rotore avvolto

E' costituito anch'esso da un pacco di lamierini di ferro arricchiti di silicio, all'interno del quale passa l'albero di rotazione e nella cui parte esterna sono disposte un certo numero di cave in cui sono allocati i conduttori che costituiscono l'avvolgimento di rotore.



In questo tipo di configurazione del rotore, nelle cave rotoriche presenti sul rotore vi è un normale avvolgimento, simile a quello presente nello statore, di tipo trifase e collegato a stella.

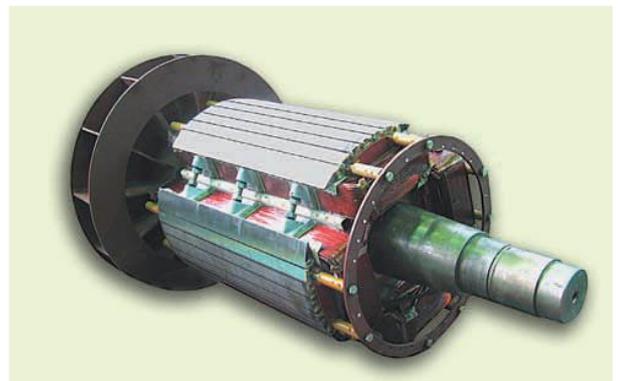
Rotore a gabbia di scoiattolo

E' il tipo più semplice e robusto di rotore, che si realizza infilando nei canali altrettante sbarre di rame o di alluminio pressofuso, ciascuna delle quali riempie completamente un canale. Le testate delle sbarre che sporgono dal pacco lamellare vengono direttamente collegate fra loro, da una parte e dall'altra, mediante un grosso anello di rame. Il rotore così costruito prende la forma e viene indicato coi nomi di rotore a gabbia di scoiattolo o rotore in corto circuito.

Questi motori devono il loro nome alla somiglianza del rotore alle gabbie usate generalmente da scoiattoli (ma anche criceti) per correre.

Questi motori sono largamente utilizzati nell'industria in quanto affidabili ed economici.

Per le sue caratteristiche si avrà una resistenza di rotore molto bassa e le tensioni che si andranno a generare sul rotore non saranno elevate; nonostante non siano elevate si avranno comunque elevati valori di corrente, dato il basso valore della resistenza.



In più non presenta un numero di poli proprio, ma si adegua naturalmente al numero di poli dello statore. Queste caratteristiche portano ad un inconveniente all'avviamento del motore: in queste condizioni si può paragonare il MAT ad un trasformatore, dove il circuito secondario è il rotore, fermo, chiuso in corto circuito. In queste condizioni le correnti statoriche possono assumere anche 4-10 volte (a seconda dei canoni di costruzione del rotore) il valore della corrente nominale. Nonostante l'elevato valore di corrente assorbita, la coppia motrice generata allo spunto è particolarmente bassa. Pare ovvio che in applicazioni di elevata potenza questa caratteristica non sia affatto trascurabile. Bisogna quindi cercare di limitare queste elevate correnti e lo sfasamento tra tensioni e correnti

FUNZIONAMENTO



Il funzionamento del MAT si basa sull'impiego del campo magnetico rotante, generato da tre avvolgimenti statorici, disposti nella carcassa statorica sfasati di un angolo di 120° e alimentati da una tensione trifase (ciascuna tensione sfasata di 120° elettrici rispetto all'altra).

Le spire poste in cortocircuito (di materiale conduttore) che si avvolgono sul rotore sono immerse nel campo magnetico rotante statorico.

La velocità del campo magnetico rotante (di sincronismo) è data da

$$n_0 = 60 * f / p \quad [\text{rpm}]$$

dove le variabili sono:

f : frequenza delle correnti statoriche

p: numero delle coppie di poli della macchina (presenti nello statore)

Per coppia di poli si intende un campo magnetico rotante generato da una terna di avvolgimenti sopra descritti.

Nel circuito rotorico si genera un flusso magnetico variabile, poiché il campo magnetico B ruota. A causa di questa variazione del flusso, nel circuito rotorico viene indotta una terna di correnti indotte (legge di Faraday – Neumann - Lenz), sfasate di 120° elettrici e geometrici. Il risultato di questa terna di correnti rotoriche indotte è un campo magnetico rotorico, anch'esso rotante, che è attratto dal campo rotante statorico e lo "insegue", con una velocità angolare inferiore a quella di sincronismo.

NOTA: Altro modo di interpretare il fenomeno è il seguente: la corrente indotta, immersa nel campo magnetico rotante, subisce una forza di Lorentz, che provoca, per la configurazione simmetrica del sistema, una coppia motrice. Questa coppia mette in moto il

rotore, fino a raggiungere una velocità angolare in corrispondenza della quale si ha il bilancio la coppia motrice e coppia resistente.

Il rotore girerà ad una velocità inferiore a quella di sincronismo, poiché se fosse uguale si annullerebbe la variazione di flusso e quindi le correnti indotte e la coppia motrice.

Detta n_2 la velocità di rotazione (sempre in RPM) del rotore, si definisce lo scorrimento s

$$s = (n_0 - n_2)/n_0 \text{ [rpm]}$$

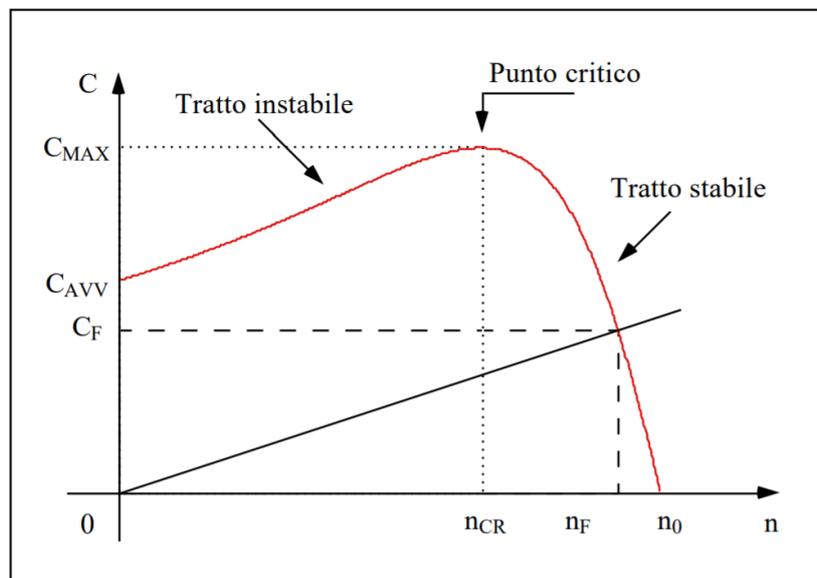
Si può quindi dire che lo scorrimento rappresenta la frazione di giri persi dal rotore rispetto al campo magnetico rotante, per ogni suo giro. In particolare si avrà

$s = 0$ quando il rotore va alla stessa velocità del campo magnetico (velocità di sincronismo) ed $s = 1$ quando il rotore è fermo (sfasamento massimo).

CURVA CARATTERISTICA

La curva caratteristica di un motore è il grafico che mette in relazione la Coppia motrice C_M (oppure la Potenza) erogata dal motore, con la velocità di rotazione del rotore (espressa come numero di giri in RPM).

In alternativa al numero di giri, si può parlare di scorrimento, ricordando che per $s = 0$ la velocità del rotore è pari a quella di sincronismo (valore teorico), mentre per $s = 1$ il rotore è fermo.



Dall'analisi della caratteristica meccanica si evince che il MAT presenta, all'avviamento, cioè per $s = 1$, una non elevata coppia di spunto compresa nell'intervallo $0.2 C_{MAX} \leq C_{AVV} \leq 0.5 C_{MAX}$. Inoltre, in queste condizioni, presenta il tipico funzionamento del trasformatore in corto circuito.

Il tratto decrescente della curva è il cosiddetto tratto stabile. Il punto di lavoro è dato dall'intersezione con la curva della coppia resistente C_R . Nel tratto stabile, se sopraggiunge un fattore perturbatore che aumenta la C_R , per effetto di questo eccesso di resistenza, la velocità di rotazione tende a diminuire, ma questo rallentamento fa aumentare la coppia motrice C_M (come si evince dal grafico). Questo aumento di coppia motrice C_M ripristina le condizioni di funzionamento nel punto di lavoro precedente, non appena la causa perturbatrice cessa.

Come si può vedere, il punto di lavoro dispone ancora di un buon margine di coppia perché di solito $C_{MAX}/3 \leq C_R \leq C_{MAX}/2$. Inoltre, poiché il secondo tratto della caratteristica è molto ripido, a regime la velocità è pressoché costante al variare del carico ($0.03 \leq s \leq 0.1$).

AVVIAMENTO

Nella fase di avviamento, il rotore è fermo e di conseguenza la variazione di flusso magnetico è massima. Perciò, si verifica un aumento delle correnti indotte rotoriche e, di conseguenza, di quelle statoriche.

Presentiamo due tecniche per la riduzione di queste correnti:

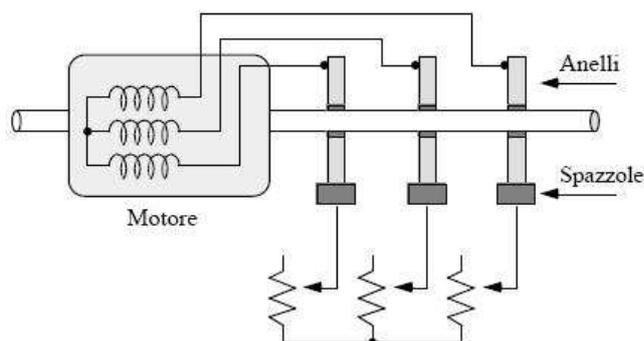
Avviamento con reostato (rotore avvolto)

Un metodo applicabile al motore con rotore avvolto è l'uso di un reostato, ovvero di un dispositivo molto simile ad un potenziometro, che si inserisce in serie nei circuiti rotorici aumentandone la resistenza in modo variabile da zero a un valore massimo.

I capi di questi circuiti rotorici vengono collegati a degli anelli conduttori, calettati sull'albero del motore ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole collegate ad un reostato esterno di avviamento, completamente inserito all'atto di chiusura dell'interruttore sulla linea, ma che va disinserito, gradualmente, all'aumento della velocità di rotazione e completamente escluso, cortocircuitato, in condizioni di normale funzionamento.

Questo reostato ha il compito di variare il valore della resistenza rotorica, riuscendo ad avere un'elevata resistenza rotorica all'avviamento e via via minore all'aumentare della velocità dell'albero motore, fino ad escluderlo lasciando unicamente la resistenza degli avvolgimenti. In questo modo si limitano le correnti indotte nel rotore all'avviamento, e quindi nello statore.

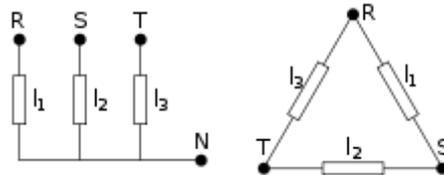
Variando la resistenza elettrica del reostato si può aumentare la resistenza dei circuiti rotorici spostando la coppia massima verso lo scorrimento unitario ($s = 1 \Rightarrow$ rotore fermo), in modo da disporre in fase di avvio del motore della coppia di spunto massima disponibile. Questo metodo serve ad avviare motori di medie dimensioni (10-300 kW). Dopo la partenza del motore le resistenze reostatiche vanno staccate dopo aver opportunamente cortocircuitato i circuiti rotorici. In particolare, se le resistenze reostatiche vengono collegate ai circuiti rotorici la curva di coppia si modifica perché la coppia massima si sposta verso lo scorrimento unitario e quindi si ottiene un punto di lavoro a velocità inferiore (uso delle resistenze reostatiche per regolare la velocità).



Avviamento a stella – triangolo

Nella fase di avviamento, il rotore è fermo e di conseguenza la variazione di flusso magnetico è massima. Perciò, si verifica un aumento delle correnti indotte rotoriche e, di conseguenza, di quelle statoriche. Per ridurle, si può ridurre la tensione di alimentazione dei circuiti dello statore, collegando i suoi morsetti a stella, per un tempo transitorio, anziché a triangolo.

Schema di collegamento a stella e a triangolo dei circuiti statorici:



L'avviamento stella triangolo è il più conosciuto e forse il più utilizzato tra i metodi di avviamento a tensione ridotta

e serve ad avviare il motore riducendo le sollecitazioni meccaniche e limitando le correnti durante l'avviamento;

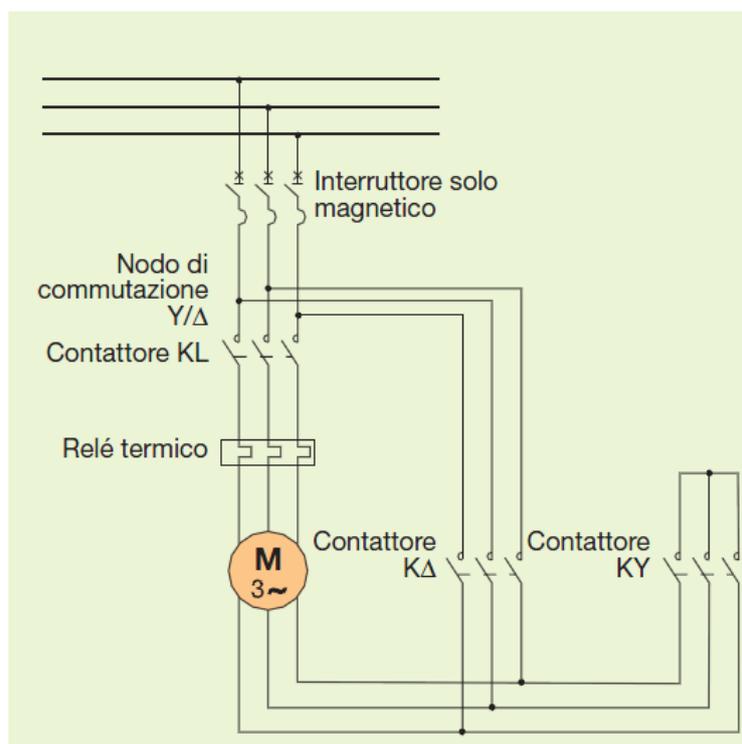
per contro rende disponibile, come già detto, una coppia di spunto ridotta.

Questo metodo, si utilizza per motori di potenza fino a 50 [kW] ed aventi l'avvolgimento statorico collegato con le fasi a triangolo nel funzionamento normale. Il rotore può essere indifferentemente del tipo avvolto od a gabbia.

Può essere impiegato per motori dotati di morsettiera con 6 morsetti ed aventi la doppia tensione di alimentazione.

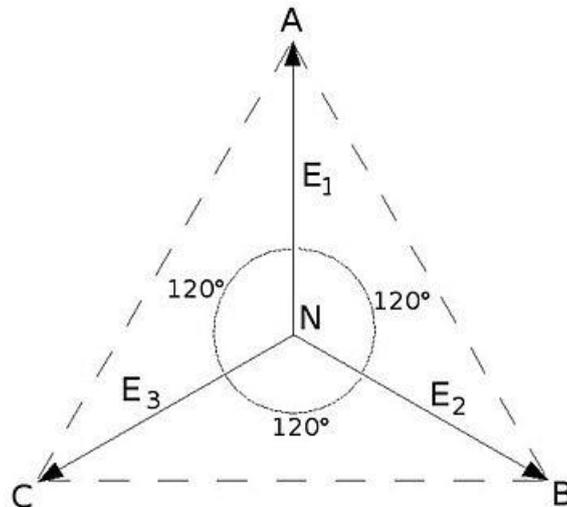
Risulta prevalentemente idoneo per partenze a vuoto o con coppia di carico bassa e costante o leggermente crescente, quali ad esempio ventilatori o pompe centrifughe di piccola potenza.

Figura 6: Schema di principio per avviamento stella/triangolo



Con riferimento allo schema elettrico di figura, la modalità di avviamento prevede la fase iniziale di avviamento con connessione degli avvolgimenti a stella che si realizza con la chiusura dell'interruttore, del contattore di linea KL e di stella KY. Dopo un periodo di tempo idoneo e opportunamente calibrato si passa alla connessione degli avvolgimenti a Δ attraverso l'apertura del contattore KY e la chiusura di $K\Delta$, che è anche la configurazione della marcia a regime. Questi apparecchi sono interessati da correnti, relative alle diverse fasi di avviamento, che risultano inferiori rispetto alla corrente nominale del motore.

Infatti, la tensione di linea, data dalla differenza delle tensioni di fase di una linea trifase, è determinabile tramite la rappresentazione vettoriale delle grandezze alternate:



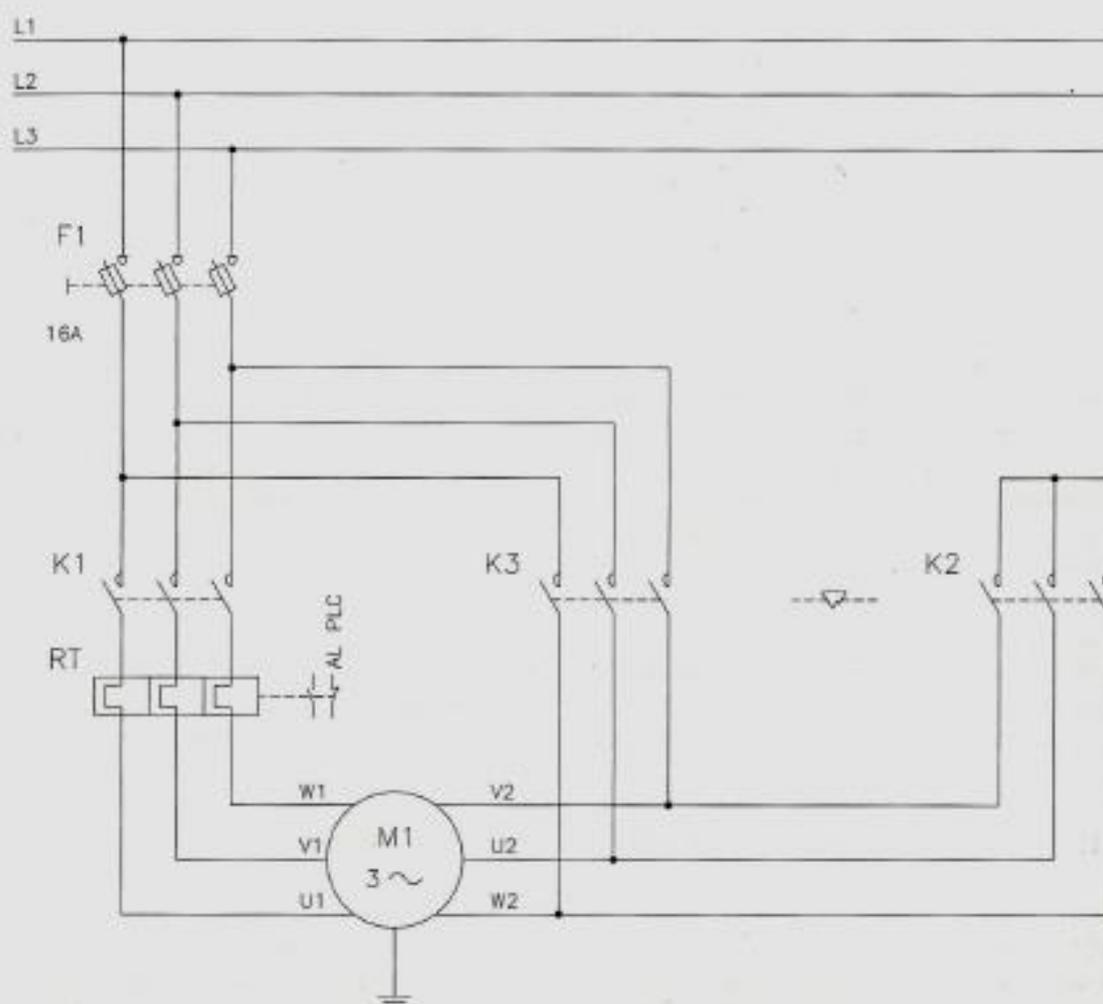
Tramite semplici osservazioni geometriche sui triangoli e sulla risoluzione dei triangoli rettangoli seno e coseno di $30^\circ / 60^\circ$, si può ricavare che la tensione di linea data dalla differenza

$$E_{12} = E_1 - E_2 = \sqrt{3} * E_1$$

7.15 Avviamento stella/triangolo per un motore trifase

Per ridurre la corrente di spunto, un motore trifase deve essere avviato, inizialmente, con un collegamento a stella e, dopo un certo tempo, viene commutato automaticamente a triangolo. Se, durante la fase di avviamento, gli avvolgimenti di un motore, dimensionati per essere collegati a triangolo su una linea con tensione di 400V, sono connessi a stella, la tensione agli avvolgimenti si riduce a 230V ($400/1,73$), la corrente di linea e la coppia di avviamento si riducono ad un terzo di quelle nominali. Per esempio, se la corrente di avviamento a piena tensione è $6 \times I_n$ e la coppia di spunto $1,5 \times C_n$, esse si riducono a $2 \times I_n$ e $0,5 \times C_n$. Questo sistema di avviamento può essere utilizzato solo quando entrambi gli estremi di ciascun avvolgimento ($U1V1W1$ e $U2V2W2$) sono accessibili e la coppia resistente all'avviamento è abbastanza bassa. In casi sfavorevoli a causa delle vibrazioni, può verificarsi un cortocircuito nella commutazione da stella a triangolo: occorre, per questo motivo, assicurare una pausa nella commutazione (in genere dell'ordine di 70 millisecondi, e comunque superiore ai 50 millisecondi). Il contattore di stella deve essere dimensionato per il 33% della potenza nominale del motore, mentre i contattori di triangolo e di linea, ciascuno, per il 58% della potenza nominale del motore. Le situazioni di stato, stella o triangolo, devono essere indicate con lampade spia di segnalazione. Un relè termico deve proteggere il motore da eventuali sovracorrenti. Nella figura 7.19 è disegnato lo schema di potenza del circuito e, per semplificarne la realizzazione con il PLC, nella figura 7.20 è riportato lo schema elettrico di comando con la logica a relè.

Fig. 7.19 Schema di potenza di un avviamento stella/triangolo.

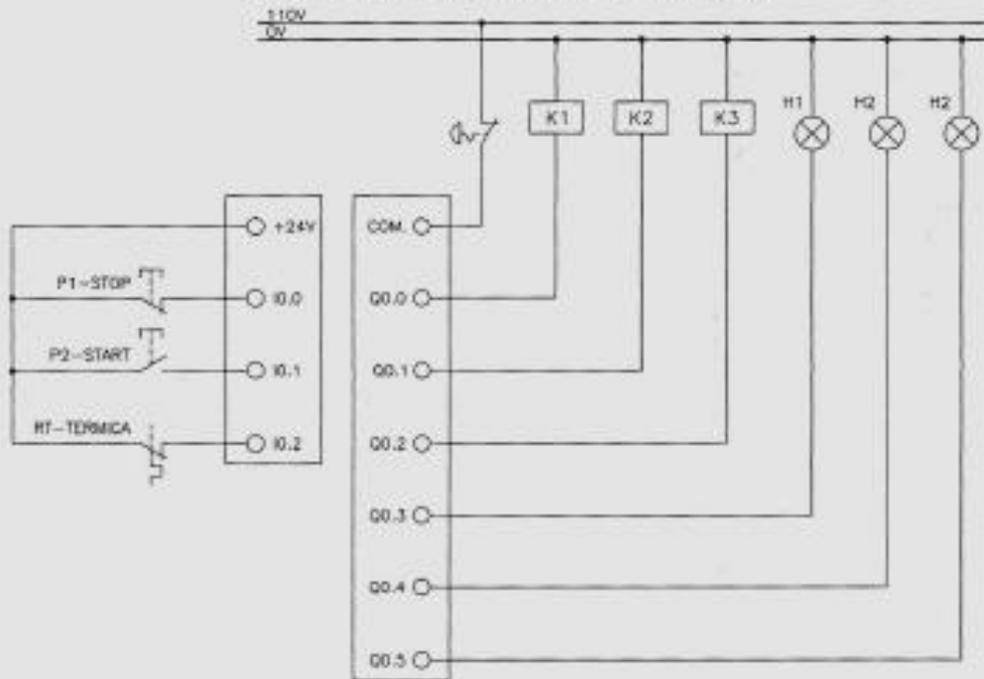


Il funzionamento dello schema logico di comando elettromeccanico della figura 7.22 può essere riassunto nel seguente modo:

- se si aziona il pulsante P2, il teleruttore di rete K1 si chiude inserendo l'autoritenuta;
- nella colonna 3 viene azionato il teleruttore della stella K2 e nella colonna 4 viene attivato il timer;
- allo scadere del tempo impostato, il timer apre il suo contatto della colonna 3 e il teleruttore della stella K2 si apre. Contemporaneamente viene azionato il teleruttore del triangolo nella colonna 5;
- i teleruttori K2 e K3 sono interbloccati tra di loro dai loro contatti (colonne 3 e 5);
- nelle colonne da 6, 7 e 8 le spie H1, H2 ed H3 vengono accese dai contatti dei teleruttori relativi.

Nella tabella 7.3 sono indicati gli assegnamenti degli input e degli output e, nella figura 7.21, lo schema elettrico di collegamento al PLC. Come è evidente dal confronto dello schema elettromeccanico di figura 7.20 e dello schema della figura 7.21, il cablaggio con il PLC è notevolmente semplificato.

Fig. 7.21 Schema elettrico di collegamento al PLC.



Il programma, con gli assegnamenti degli input e degli output indicati nella tabella 7.23 consiste in:

STEP 7-Micro
DATA: 03-08-97

STELLA/TRIANGOLO

