

# Guida alle soluzioni di automazione

## 2010-2011



■ 1 Guida alla scelta .....	pagina 8
■ 2 Alimentazione elettrica .....	pagina 28
■ 3 Motori e carichi .....	pagina 36
■ 4 Avviamento e protezione dei motori .....	pagina 64
■ 5 Partenze motore .....	pagina 96
■ 6 Acquisizione dati: rilevamento .....	pagina 134
■ 7 Sicurezza delle persone e dei beni .....	pagina 164
■ 8 Dialogo uomo/macchina .....	pagina 188
■ 9 Reti industriali .....	pagina 202
■ 10 Elaborazione dei dati e software .....	pagina 236
■ 11 Realizzazione .....	pagina 260
■ 12 Eco-progettazione .....	pagina 282
■ N Note .....	pagina 296

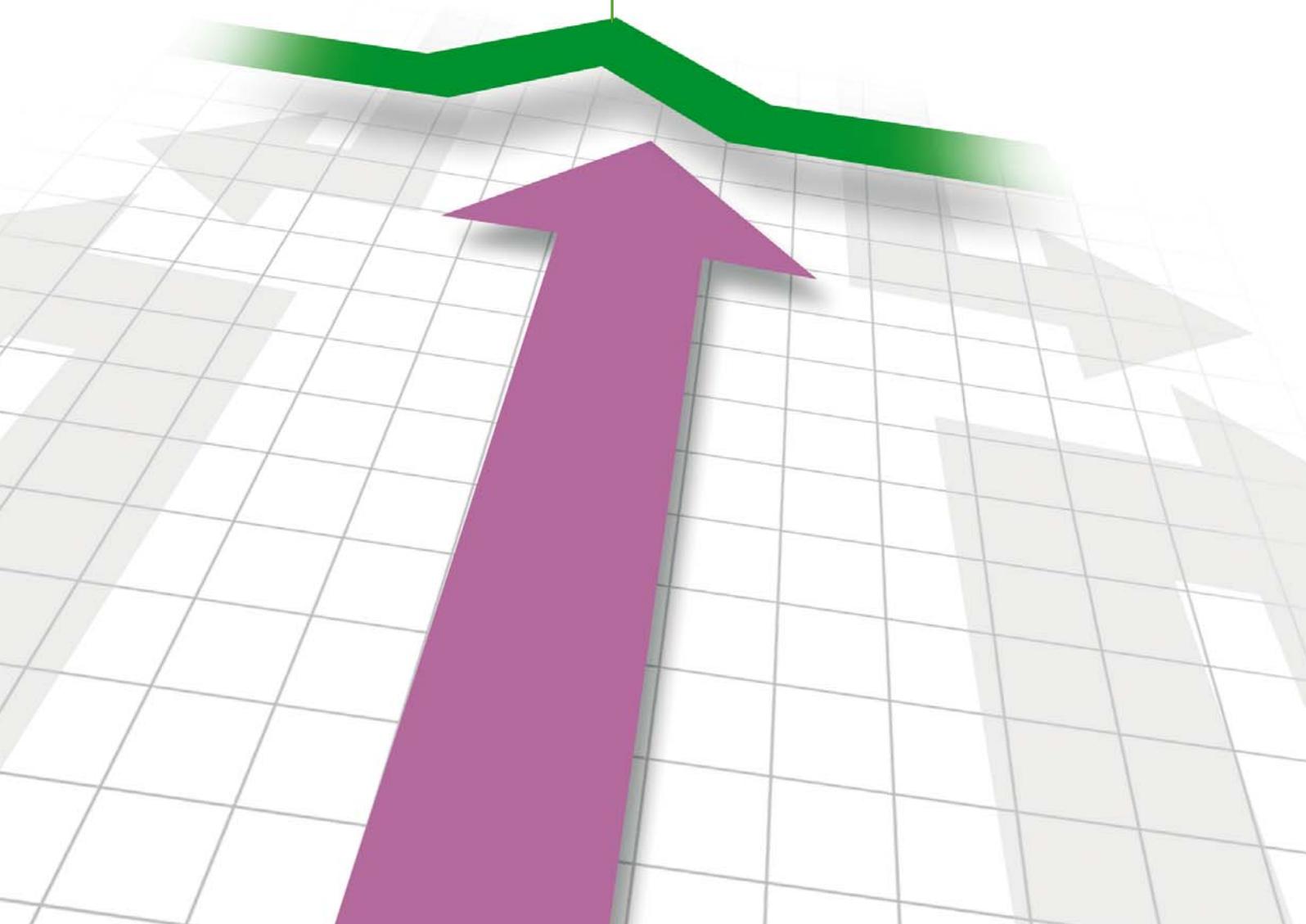
■ 1	<b>Guida alla scelta</b> .....	pagina 8
1.1	Introduzione .....	pagina 10
1.2	Le apparecchiature di automazione .....	pagina 10
1.3	Le architetture di automazione .....	pagina 12
1.4	Definizione delle architetture .....	pagina 14
1.5	Le scelte delle apparecchiature di automazione.....	pagina 17
■ 2	<b>Alimentazione elettrica</b> .....	pagina 28
2.1	Introduzione .....	pagina 30
2.2	L'alimentazione elettrica delle macchine.....	pagina 30
2.3	Le norme e le abitudini .....	pagina 30
2.4	Le funzioni dell'alimentazione elettrica .....	pagina 32
2.5	L'alimentazione del circuito di controllo .....	pagina 32
■ 3	<b>Motori e carichi</b> .....	pagina 36
3.1	I motori asincroni trifase .....	pagina 38
3.2	I motori monofase .....	pagina 42
3.3	I motori sincroni .....	pagina 43
3.4	I motori a corrente continua .....	pagina 46
3.5	L'utilizzo dei motori asincroni trifase .....	pagina 48
3.6	Confronto dei diversi tipi di motori .....	pagina 52
3.7	I diversi tipi di carichi .....	pagina 52
3.8	Le valvole e i cilindri .....	pagina 59
■ 4	<b>Avviamento e protezione dei motori</b> .....	pagina 64
4.1	Avviamento dei motori a induzione .....	pagina 66
4.2	Frenatura elettrica dei motori asincroni trifase .....	pagina 73
4.3	Gli avviatori multifunzione .....	pagina 78
4.4	La protezione dei motori .....	pagina 80
4.5	Perdite e riscaldamenti nei motori.....	pagina 81
4.6	Le principali cause di guasto e le relative conseguenze.....	pagina 81
4.7	Le funzioni e i prodotti di protezione.....	pagina 87
■ 5	<b>Partenze-motore</b> .....	pagina 96
5.1	Generalità .....	pagina 98
5.2	Le funzioni base delle partenze-motore .....	pagina 98
5.3	Una funzione complementare: la comunicazione.....	pagina 101
5.4	Partenze-motore e coordinamento .....	pagina 102
5.5	I variatori di velocità .....	pagina 105
5.6	Composizione, componenti degli avviatori e variatori elettronici .....	pagina 110
5.7	Variatore-regolatore per motore a corrente continua .....	pagina 114
5.8	Convertitore di frequenza per motore asincrono .....	pagina 116
5.9	Variatore di tensione per motore asincrono .....	pagina 123
5.10	Moto-variatori sincroni .....	pagina 125
5.11	Moto-variatori passo-passo .....	pagina 126
5.12	Le funzioni complementari dei variatori di velocità .....	pagina 127
5.13	I variatori di velocità e il bilancio energetico.....	pagina 129
5.14	I variatori di velocità e il risparmio energetico e di manutenzione.....	pagina 131
5.15	Griglia di scelta delle partenze-motore.....	pagina 132
■ 6	<b>Acquisizione dati: rilevamento</b> .....	pagina 134
6.1	Introduzione .....	pagina 136
6.2	Finecorsa elettromeccanici .....	pagina 137
6.3	Interruttori di prossimità induttivi .....	pagina 138
6.4	Interruttori di prossimità capacitivi .....	pagina 140
6.5	Interruttori fotoelettrici .....	pagina 142
6.6	Interruttori ad ultrasuoni .....	pagina 144
6.7	Rilevamento RFID - Radio Frequency IDentification .....	pagina 146
6.8	La visione .....	pagina 149
6.9	Encoder ottici .....	pagina 153
6.10	Pressostati e vacuostati .....	pagina 158
6.11	Conclusione .....	pagina 161
6.12	Guida alla scelta delle diverse tecnologie .....	pagina 162

■ 7	<b>Sicurezza delle persone e dei beni</b> .....	pagina 164
7.1	Introduzione. ....	pagina 166
7.2	Gli incidenti sul lavoro. ....	pagina 167
7.3	La legislazione europea e le norme .....	pagina 169
7.4	Il concetto di funzionamento sicuro (safe operation) .....	pagina 176
7.5	La certificazione e il marchio CE .....	pagina 177
7.6	I principi per gli organi della sicurezza .....	pagina 179
7.7	Le funzioni di sicurezza. ....	pagina 180
7.8	La sicurezza delle reti .....	pagina 182
7.9	Esempio applicativo .....	pagina 183
7.10	Le funzioni e i prodotti di sicurezza .....	pagina 185
7.11	Conclusione .....	pagina 186
■ 8	<b>Dialogo uomo/macchina</b> .....	pagina 188
8.1	Informazioni di dialogo uomo/macchina. ....	pagina 190
8.2	Interfacce di dialogo .....	pagina 192
8.3	Comando e segnalazione ON/OFF .....	pagina 192
8.4	L'offerta Schneider Electric Comando e segnalazione ON/OFF .....	pagina 195
8.5	Le interfacce di dialogo evolute .....	pagina 195
8.6	Modi di scambio .....	pagina 199
8.7	Software di sviluppo .....	pagina 200
8.8	Conclusione .....	pagina 201
■ 9	<b>Reti industriali</b> .....	pagina 202
9.1	Introduzione .....	pagina 204
9.2	Storia .....	pagina 204
9.3	Le esigenze e le risposte del mercato .....	pagina 205
9.4	Tecnologie delle reti .....	pagina 207
9.5	Le reti consigliate da Schneider Electric. ....	pagina 209
9.6	Ethernet TCP/IP .....	pagina 210
9.7	Servizi Web e Transparent Ready .....	pagina 213
9.8	Bus Can Open .....	pagina 220
9.9	Sinergia Ethernet e Can Open .....	pagina 228
9.10	Bus AS-Interface (AS-I) .....	pagina 228
9.11	Conclusione .....	pagina 235
■ 10	<b>Elaborazione dei dati e software</b> .....	pagina 236
10.1	Definizione .....	pagina 238
10.2	Introduzione. ....	pagina 238
10.3	Programmazione, configurazione e linguaggi. ....	pagina 239
10.4	Categorie di applicazione .....	pagina 240
10.5	Generatori di applicazioni .....	pagina 254
10.6	Definizione delle principali abbreviazioni utilizzate .....	pagina 258
■ 11	<b>Realizzazione</b> .....	pagina 260
11.1	Progettazione di un'apparecchiatura .....	pagina 262
11.2	Scelta di un fornitore. ....	pagina 263
11.3	Stesura degli schemi e dei programmi .....	pagina 264
11.4	Metodologia di programmazione .....	pagina 266
11.5	Scelta di una tecnologia .....	pagina 267
11.6	Progettazione dell'apparecchiatura .....	pagina 268
11.7	Costruzione dell'apparecchiatura .....	pagina 269
11.8	Il montaggio .....	pagina 272
11.9	Aiuto all'installazione degli apparecchi. ....	pagina 273
11.10	Prove su piattaforma. ....	pagina 274
11.11	Messa in servizio di un'apparecchiatura. ....	pagina 277
11.12	Manutenzione dell'apparecchiatura .....	pagina 279
■ 12	<b>Eco-progettazione</b> .....	pagina 260
12.1	Prefazione .....	pagina 262
12.2	I concetti e le principali direttive .....	pagina 263
12.3	Le norme .....	pagina 264
12.4	L'eco-progettazione .....	pagina 266
12.5	La durata .....	pagina 267
12.6	Regole principali dell'eco-progettazione .....	pagina 268
12.7	Conclusione .....	pagina 269
12.8	Applicazioni .....	pagina 272
■ N	<b>Note</b> .....	pagina 260
N.1	Grandezze e unità di misura .....	pagina 262
N.2	Corrente a carico nominale dei motori asincroni .....	pagina 263
N.3	Formule elettriche .....	pagina 264
N.4	Calcolo delle resistenze di avviamento. ....	pagina 266
N.5	Formule meccaniche. ....	pagina 267
N.6	Formule fondamentali .....	pagina 268
N.7	Regimi del neutro .....	pagina 269
N.8	Azionamento delle macchine .....	pagina 272
N.9	Tabelle di conversione delle unità più utilizzate .....	pagina 273

# 1 capitolo

## Guida alla scelta

*Partire dalle esigenze effettive,  
scegliere un'architettura  
e una tecnologia  
per ottenere un prodotto*



---

- 1.1 Introduzione ..... pagina 10
- 1.2 Le apparecchiature di automazione ..... pagina 10
- 1.3 Le architetture di automazione ..... pagina 12
- 1.4 Definizione delle architetture ..... pagina 14
- 1.5 La scelta delle apparecchiature di automazione ..... pagina 17



**1.1 Introduzione**

*I progressi dei sistemi di automazione e controllo hanno assicurato al settore industriale un notevole aumento della produttività e una diminuzione dei costi. La generalizzazione dell'elettronica, la potenza e la flessibilità dei software consentono la progettazione di soluzioni più modulari, una miglior gestione ed offrono nuovi strumenti di manutenzione.*

*Le esigenze dei Clienti si sono inoltre notevolmente evolute e, insieme alla concorrenza, ai vincoli di produttività e qualità, impongono un metodo di approccio sistematico, a partire dal processo di creazione del valore.*

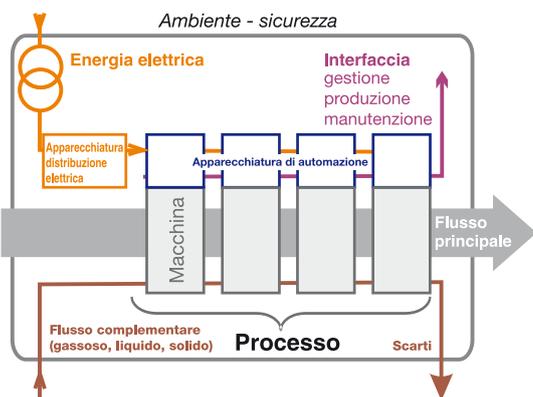
■ **Il processo di creazione del valore del Cliente**

Il processo di creazione del valore del Cliente si articola intorno ad un flusso principale corrispondente alla sua prestazione base (↔ Fig. 1), quale ad esempio la produzione di un prodotto, il trasporto delle persone, lo spostamento di un carico.

Questo processo richiede mezzi materiali costituiti da macchine e apparecchiature di automazione. Questi mezzi possono essere raggruppati in un unico luogo quale uno stabilimento manifatturiero, o ripartiti in aree molto estese come nel caso di un sistema di trattamento e distribuzione dell'acqua.

Per garantirne il funzionamento, il processo richiede flussi complementari quali elettricità, aria, acqua, gas, imballaggi, ecc.

Il processo produce dei rifiuti che sarà necessario raccogliere, trasportare, trattare ed eliminare.



↑ Fig. 1 Processo di creazione di valore

**1.2 Le apparecchiature di automazione**

Un'apparecchiatura di automazione è caratterizzata da cinque funzioni base associate e connesse da collegamenti di potenza e di controllo (↔ Fig. 2).

■ **Le 5 funzioni base**

□ **L'alimentazione elettrica**

Garantisce la distribuzione dell'energia elettrica verso gli organi di potenza e di controllo. Deve poter essere interrotta e protetta conformemente alle norme d'installazione elettrica e alle norme di sicurezza macchine. Questa funzione viene generalmente garantita da un interruttore automatico o da un interruttore porta-fusibili.

□ **Il comando di potenza**

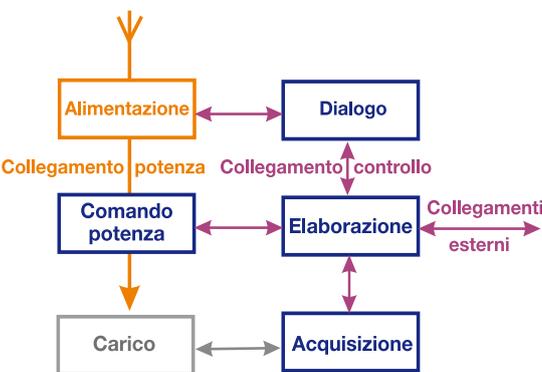
Consente di comandare i carichi elettrici (azionatori) con ordini emessi dal sistema di automazione. Un contattore garantisce il comando di un carico in ON/OFF, mentre un variatore elettronico consentirà il comando progressivo di un motore o di una resistenza di riscaldamento.

□ **Il dialogo**

È l'interfaccia tra l'uomo e la macchina. Consente di fornire gli ordini e di visualizzare lo stato del processo. Il comando della strumentazione è garantito da pulsanti, tastiere e schermi tattili. La visualizzazione viene realizzata tramite spie di segnalazione, colonne luminose e schermi.

□ **L'elaborazione**

Si tratta della parte logica dell'automazione che consente, a partire dagli ordini emessi dall'operatore e dalle rilevazioni sullo stato del processo, di comandare i preazionatori e di fornire le informazioni necessarie. Il tecnico dell'automazione ha a disposizione più soluzioni: dalla più semplice (un pulsante che comanda direttamente un contattore), passando per i sistemi a logica programmabile, fino all'associazione tra controllori programmabili e computer. La disponibilità di controllori programmabili semplici e a basso prezzo ha praticamente provocato la scomparsa degli schemi a relè.



↑ Fig. 2 Le funzioni base

#### □ **L'acquisizione**

Consente di rilevare una soglia o di misurare il valore di una grandezza fisica. Oggi quasi tutte queste grandezze possono essere rilevate o misurate. Il progresso tecnologico permette di offrire una vasta gamma di rilevatori.

#### ■ **Il sistema deve rispondere alle sollecitazioni esterne**

- garantire la sicurezza delle persone e dei mezzi di produzione,
- rispettare i requisiti ambientali quali la temperatura, la protezione contro gli urti, le polveri e gli ambienti aggressivi.

#### ■ **I collegamenti di potenza**

Garantiscono la connessione tra i diversi organi e comprendono cavi, barre, connettori e protezioni meccaniche quali guaine e schermi. Le gamme di corrente vanno da qualche Ampere e diverse migliaia di Ampere.

Il calcolo delle linee di potenza deve tener conto delle sollecitazioni termiche, elettrodinamiche e meccaniche.

#### ■ **I collegamenti di controllo**

Consentono il comando e il controllo del sistema di automazione. Il cablaggio tradizionale mediante cavi separati viene progressivamente sostituito da collegamenti prefabbricati con connettori e bus di comunicazione.

#### ■ **Il ciclo di vita delle apparecchiature di automazione**

Un'apparecchiatura viene progettata, utilizzata e mantenuta per l'intera durata del suo ciclo di vita. Quest'ultimo è definito dagli operatori, dalle loro esigenze, dai vincoli interni del Cliente e dai vincoli esterni (legali, normativi, ecc...). Le fasi sono le seguenti:

- definizione da parte del Cliente della macchina o del processo,
- scelta delle apparecchiature di automazione,
- approvvigionamento dei componenti,
- messa in opera, test,
- utilizzo,
- manutenzione,
- smantellamento, riciclaggio, distruzione.

#### ■ **Il costo delle apparecchiature**

La riduzione dei costi rappresenta una preoccupazione a qualsiasi livello di scelta e decisionale, ed è molto legata al contesto specifico del Cliente. Questa guida, pur affrontando in modo particolare gli aspetti tecnici, è stata realizzata con un'attenzione costante all'ottimizzazione dei costi.

#### ■ **L'evoluzione del mercato e delle relative esigenze**

Negli ultimi anni il mercato del controllo dei sistemi di automazione è stato sottoposto a forti sollecitazioni economiche e tecnologiche.

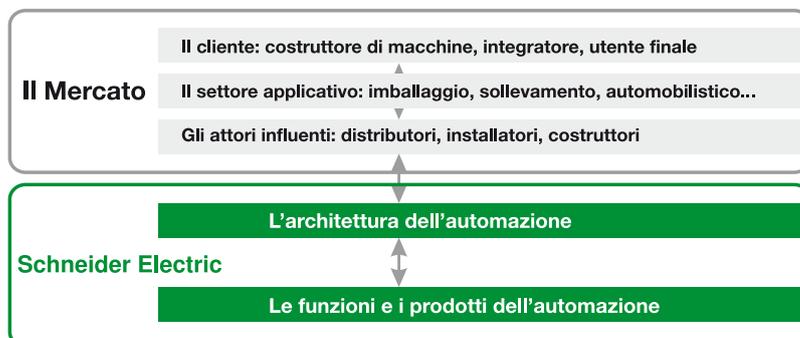
Le principali priorità dei Clienti sono diventate:

- la riduzione dei tempi di lancio sul mercato dei nuovi prodotti (time to market),
- la proliferazione dei prodotti offerti dovuta alla progettazione incrementale o iterativa (progettazione modulare che consente di commercializzare nuovi prodotti senza rivedere l'intera offerta) e alla personalizzazione,
- la pressione dei costi.

Questo fenomeno genera nuove esigenze:

- ridurre i tempi di sviluppo e la complessità della progettazione,
- aumentare la flessibilità, soprattutto in caso di modifiche di serie dei prodotti per le industrie manifatturiere,
- fornire informazioni per la gestione della produzione e la manutenzione (riduzione dei costi, dei tempi di arresto, ecc...).

Per rispondere a queste esigenze la fornitura di prodotti affidabili e performanti deve essere completata da un'offerta di architetture e soluzioni "pronte all'impiego" utilizzabili da operatori intermedi quali OEM o integratori di sistemi per identificare e realizzare la soluzione più adatta all'utente finale. La Fig. 3 illustra il collegamento tra i diversi operatori del mercato e l'offerta che noi proponiamo loro.



↑ Fig. 3 I diversi operatori del mercato dei sistemi di automazione

La fornitura di architetture e soluzioni valorizza gli operatori intermedi, dal distributore o grossista, al quadrista, all'installatore o al produttore di macchine. Questo tipo di approccio permette di rispondere in modo più sicuro, più esatto e più rapido ai Clienti finali nei diversi settori applicativi, quali ad esempio l'industria agroalimentare, le infrastrutture o l'edilizia.

## 1.3 Le architetture di automazione

L'approccio gerarchico tradizionale tradotto concettualmente nei processi manifatturieri (CIM: Computer Integrated Manufacturing) oltre che nei processi continui (PWS: Plant Wide Systems) è stato sostituito, alla fine degli anni 90, da un processo di decentralizzazione. Le funzioni di automazione sono state implementate il più vicino possibile al processo.

Il grande sviluppo di Internet, grazie ai protocolli Ethernet e TCP/IP, ha interessato prima di tutto i controllori programmabili complessi che progressivamente sono stati sostituiti dagli "smart devices".

Questa architettura ha permesso un'interconnessione trasparente tra i sistemi di controllo e gli strumenti informatici (MES, ERP).

Contemporaneamente anche i componenti (azionatori, variatori di velocità, rilevatori, ingressi/uscite, ecc...) hanno subito un'evoluzione progressiva verso il concetto di "componente intelligente" (smart device) integrando funzioni di programmazione e di comunicazione.

### ■ Il componente intelligente o smart device

Con il termine "smart device" si identificano i nano-controllori programmabili, le piccole isole di automazione (Power Logic, Sepam, Dialpact, ecc...) oltre ai componenti che integrano la funzione di controllo, quali i variatori di velocità.

Questi prodotti sono sufficientemente intelligenti per gestire localmente le funzioni del processo ed interagire tra di loro.

Garantire una comunicazione trasparente consente di riconfigurare le task e di effettuare operazioni di diagnostica, funzioni queste presenti nella filosofia Web (indirizzamento individuale, formattazione delle informazioni pronte all'impiego, gestione dei fornitori di informazioni).

Gli smart devices (componenti intelligenti) offrono tutti di base la funzionalità Plug and Play di connessione e disconnessione a caldo per potenza, bus di controllo e rilevatori. In caso di guasto la funzione Plug and Play permette la sostituzione dell'apparecchiatura in modo semplice e rapido.

L'integrazione nelle tastiere e nei visualizzatori di navigatori, di comandi radio ed altre interfacce di dialogo uomo/macchina ha accelerato la diffusione delle tecnologie Web, fino a livello dei componenti ([↔ Capitolo 10 Elaborazione dati e Software](#)).

L'integrazione delle funzioni di controllo negli smart devices ha permesso di ridurre il flusso dei dati scambiati in rete, riducendo quindi i costi e la potenza dei controllori programmabili ed accelerando i tempi di risposta. La necessità di sincronizzazione è quindi limitata grazie alle elaborazioni locali realizzate dagli "smart devices".

### ■ Le reti

Parallelamente si assiste ad un sempre maggiore utilizzo delle reti con un generale processo di convergenza su alcuni standard che coprono l'80 % delle applicazioni. Ai progettisti vengono offerte diverse possibilità (Can Open, AS-Interface, Profibus, DeviceNet, ecc...), anche se si tende alla standardizzazione di una rete unica. In questo contesto Ethernet, che ha già conquistato il campo dell'informatica industriale, tende ad indirizzare le esigenze dei bus di campo.

Oggi la maggior parte dei componenti è direttamente collegabile alle reti. Questo risultato è l'effetto della combinazione di più fattori, quali la diffusione delle tecnologie Web, la razionalizzazione degli standard di comunicazione, la rapida diminuzione dei prezzi delle tecnologie informatiche e infine l'integrazione dell'elettronica nei componenti elettromeccanici.

Questi sviluppi hanno condotto alla definizione di bus di campo adatti alla comunicazione tra componenti e controllori programmabili quali Modbus, Can Open, AS-Interface, Device Net, Interbus S, Profibus, Fip, ecc...

Il peso crescente delle esigenze di scambio spinge gli utenti a privilegiare la scelta delle reti rispetto a quella dei sistemi di automazione.

### ■ I software e gli strumenti di sviluppo

Gli strumenti di programmazione hanno subito una notevole evoluzione, dai software integrati alle piattaforme hardware fino ai software puramente funzionali e telecaricabili su diverse configurazioni hardware.

La configurazione delle funzioni di comunicazioni tra i diversi componenti viene generata automaticamente.

Le informazioni prodotte dai diversi programmi sono accessibili con uno strumento disponibile per più utenti con condivisione di un database comune distribuito, riducendo considerevolmente il tempo di acquisizione delle informazioni (parametri, variabili, ecc...).

Fino ad oggi i concetti base dei linguaggi di programmazione dei PLC industriali sono rimasti stabili. Praticamente tutti i fornitori offrono prodotti basati sullo standard di programmazione IEC 61131-3, talvolta migliorati da strumenti che supportano funzioni supplementari.

A breve verranno presentati prodotti che permetteranno:

- di generare automaticamente la configurazione del PLC e l'assegnazione degli ingressi/uscite,
- d'importare ed esportare le funzioni tra il software del controllore programmabile e quello dei componenti,
- d'integrare gli schemi elettrici negli strumenti di diagnostica,
- di gestire un database comune, per una configurazione più semplice,
- di offrire una trasparenza completa,
- di proporre un'ergonomia adatta a diversi utilizzi.

Oltre alla programmazione, i software vengono sempre più utilizzati per la configurazione dei parametri e la diagnostica dei componenti. Tutte queste funzioni sono talvolta riunite in un unico software.

1.4 Definizione delle architetture

Un'architettura consente l'integrazione e il coordinamento delle funzioni di automazione necessarie alla macchina o al processo che ha come obiettivi principali la produttività e la sicurezza dell'ambiente.

La maggior parte delle esigenze di automazione può essere coperta da un numero limitato di architetture. In un'ottica che privilegia la semplicità, Schneider Electric propone la classificazione delle architetture secondo due livelli di struttura: (↔ Fig. 4)

- l'integrazione funzionale in numero di quadri o cassette di controllo,
- il numero di funzioni di controllo del sistema di automazione, ossia il numero di unità di controllo dei PLC, ad esempio.

Architettura dell'automazione	Numero di quadri	Numero di unità di controllo
<b>All in one device</b> Tutte le funzioni in un unico prodotto	0	1
<b>All in one panel</b> Tutte le funzioni in un unico quadro	1	1
<b>Distributed peripheral</b> Funzioni distribuite in diversi quadri	Diversi	1
<b>Collaborative control</b> Diverse funzioni di controllo collaborative	Diversi	Diversi

↑ Fig. 4 I tipi di architettura

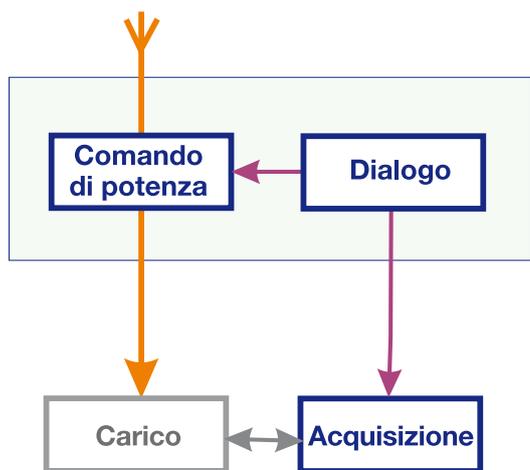
Nei paragrafi seguenti descriveremo ed illustreremo ciascun tipo di architettura.

■ All in one device: tutte le funzioni in un unico prodotto

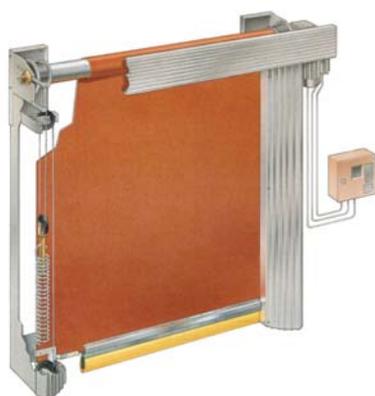
Questa tipologia di struttura è la più compatta: tutte le funzioni sono raggruppate nello stesso prodotto. Come illustrato dai due esempi che seguono, questa architettura può andare da un sistema più semplice ad uno più complesso.

□ La tenda telecomandata (↔ Fig. 6)

Comprende soltanto alcune funzioni (↔ Fig. 5). Il controllo è limitato al comando diretto del preazionatore tramite il rilevatore, mentre il dialogo è limitato a due pulsanti. Il preazionatore svolge anche le funzioni di alimentazione elettrica e di protezione del circuito di potenza.



↑ Fig. 5 Architettura semplice "All in one device"



↑ Fig. 6 Tenda telecomandata

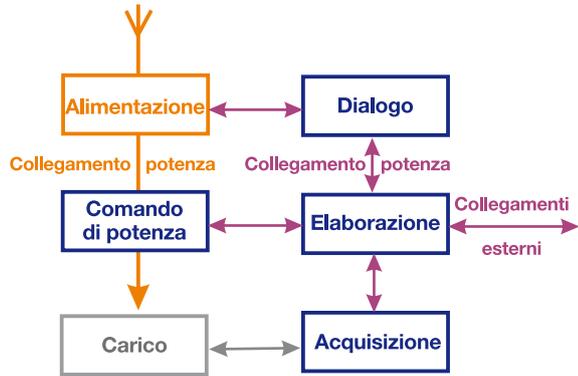


↑ Fig. 8 Sezione di nastro trasportatore comandato da un ATV71 con scheda controllore integrata



□ Sezione di nastro trasportatore (⇔ Fig. 8)

L'insieme delle funzioni di potenza e controllo è integrato nel variatore (⇔ Fig. 7). Il collegamento con le altre parti del sistema di automazione viene realizzato tramite bus di comunicazione. L'alimentazione della parte potenza richiede un quadro di distribuzione elettrica comune all'insieme delle apparecchiature di automazione del processo.



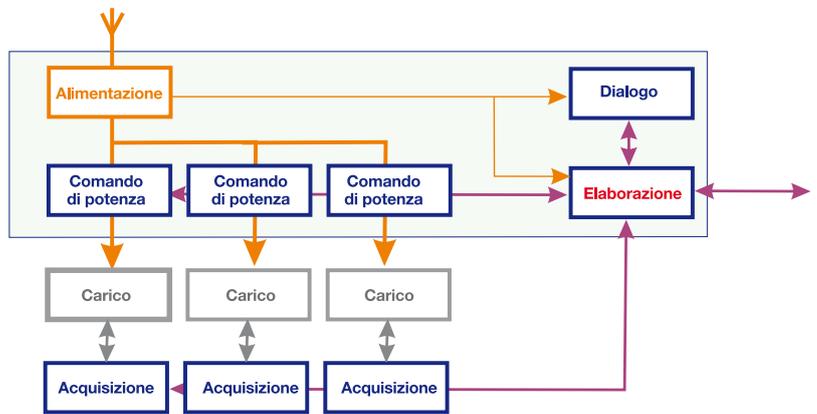
↑ Fig. 7 Architettura complessa "All in one device"

■ All in one panel: tutte le funzioni in un unico quadro

Questa architettura è la più frequente (⇔ Fig. 9).

Le funzioni di automazione sono centralizzate in un unico involucro che, a seconda dei casi, potrà essere un quadro o la struttura della macchina, ed integrerà un'unica funzione di controllo (⇔ Fig. 7).

Troverete alcuni esempi applicativi nelle figure 10, 11 e 12.



↑ Fig. 9 Architettura "All in one panel"



↑ Fig. 10 Pompa GPL



↑ Fig. 11 Macchina tessile



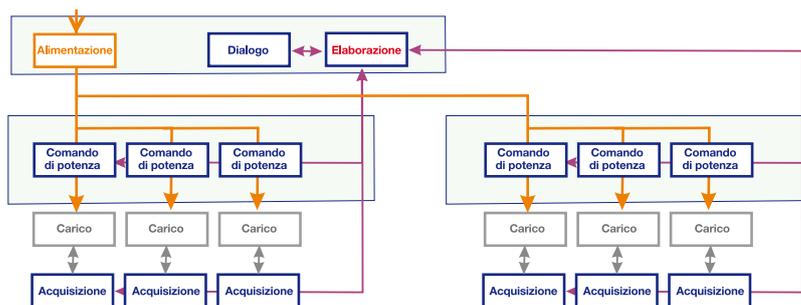
↑ Fig. 12 Macchina per l'imballaggio



↑ Fig. 14 Linea di produzione pasticceria industriale

■ **Distributed peripheral: funzioni distribuite in più quadri**

Questa architettura comprende un unico PLC centrale che comanda più quadri di automazione distribuiti intorno all'installazione (⇔ Fig. 13). È adatta alle macchine e ai processi estesi oltre che alle macchine modulari (⇔ Fig. 14). Il collegamento controllo si effettua tramite bus di campo. L'alimentazione elettrica è centralizzata e integra spesso gli elementi di controllo e di comando della sicurezza.



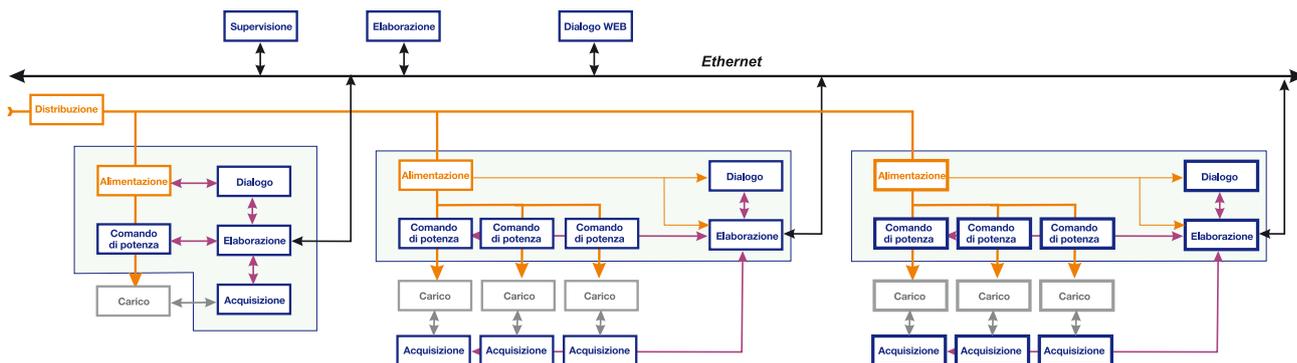
↑ Fig. 13 Architettura "Distributed peripheral"

■ **Collaborative control: più funzioni di controllo collaborative**

Più macchine o parti di processo comprendono i propri PLC (⇔ Fig. 15). Questi sono collegati tra loro e collaborano all'esecuzione del processo. Questo tipo di architettura è adatta ai grandi processi, quali ad esempio quelli dell'industria petrolchimica e siderurgica, o alle infrastrutture (aeroporti o impianti di trattamento acque) (⇔ Fig. 16).



↑ Fig. 16 Impianto di trattamento acque



↑ Fig. 15 Architettura "Collaborative control"

## 1.5 La scelta delle apparecchiature di automazione

### 1.5 La scelta dei sistemi di automazione

1

#### ■ La messa in opera delle architetture

La nostra proposta è quella di partire dalla problematica del Cliente, accompagnandolo e guidandolo nella scelta di una soluzione ottimizzata e dei prodotti e servizi ad essa integrati. Questo percorso parte con l'ascolto attento delle esigenze del Cliente e da un'intervista strutturata che descriveremo dettagliatamente.

Per facilitare le scelte, Schneider ha ottimizzato più varianti delle due architetture più utilizzate.

La prima, orientata verso le applicazioni compatte, raggruppa i prodotti di automazione in un unico quadro di distribuzione, "tutto in un quadro".

La seconda corrisponde alle applicazioni distribuite sul processo. I prodotti di automazione sono suddivisi in più quadri e costituiscono un sistema a "periferia distribuita".

Le altre due tipologie (All in One Device e Collaborative Control) vengono naturalmente mantenute, ma sono presentate in modo differente.

La struttura "tutto in un unico prodotto" è assimilata ad un prodotto e verrà elaborata in quanto tale. La struttura "collaborative control" riguarda essenzialmente gli scambi di dati tra PLC e viene presentata nei capitoli che trattano di collegamenti e scambi. Verrà descritta dettagliatamente nelle pagine che riguardano sia i controllori programmabili che i software.

#### ■ Le scelte proposte da Schneider Electric

I due concetti di architettura sopra indicati possono originare soluzioni diverse. Per facilitare il Cliente nella scelta proponendo associazioni ottimizzate, Schneider Electric prende in considerazione un totale di 10 possibili soluzioni.

Per evitare confusione tra i concetti di architettura presentati sopra e le soluzioni pratiche proposte da Schneider Electric, ci riferiremo a queste ultime con il termine di **soluzioni consigliate**.

Nella *figura 17* viene riassunto questo procedimento.

Architettura dell'automazione	Orientamenti Schneider Electric	Implementazioni proposte
<b>All in one device</b> Tutte le funzioni in un unico prodotto	<b>Assimilato ad un prodotto</b>	Prodotti quali Tesys U ATV71 Controller inside
<b>All in one panel</b> Tutte le funzioni in un unico pannello	<b>Architettura compatta</b>	6 implementazioni
<b>Distributed peripheral</b> Funzioni distribuite in più quadri	<b>Architettura distribuita</b>	4 implementazioni
<b>Collaborative control</b> Diverse funzioni di controllo collaborative	Assimilato agli scambi di dati tra controllori	Combinazione delle implementazioni sopra

↑ Fig. 17 Scelta delle implementazioni Schneider Electric

■ Le soluzioni consigliate

Nella figura 18 viene presentata una sintesi delle soluzioni consigliate che saranno poi descritte in dettaglio nella documentazione fornita da Schneider Electric.

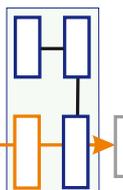
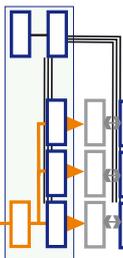
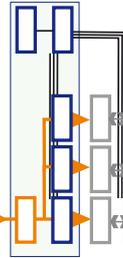
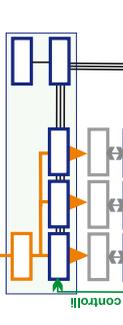
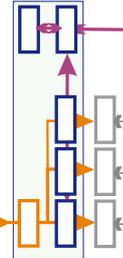
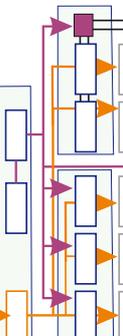
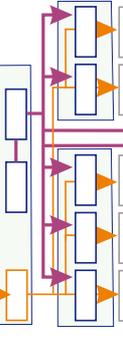
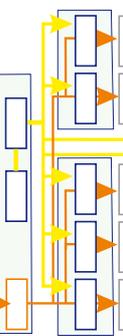
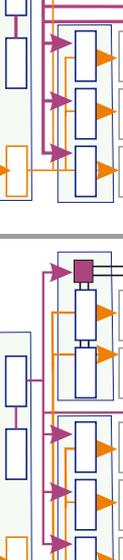
Prestazione Architettura	Semplice	Ottimizzata	Prestazioni	Prestazioni elevate
Predefinita	<p><b>Compact semplice</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF</li> <li>- automazione limitata</li> <li>- cablaggio filo a filo</li> </ul>	<p><b>Compact ottimizzato</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o Variazione Velocità</li> <li>- automazione media</li> <li>- cablaggio filo a filo</li> </ul>	<p><b>Compact prestazioni</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o Variazione Velocità</li> <li>- automazione complessa</li> <li>- cablaggio filo a filo</li> </ul>	<p><b>Compact prestazioni elevate</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in VV o servo</li> <li>- automazione complessa</li> <li>- cablaggio filo a filo e bus specializzato</li> </ul>
Compact	<p><b>Compact evolutivo ottimizzato</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o VV</li> <li>- automazione media</li> <li>- cablaggio bus di campo</li> </ul>	<p><b>Distribuito Canopen ottimizzato</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o VV</li> <li>- automazione complessa</li> <li>- cablaggio bus di campo</li> </ul>	<p><b>Distribuito Canopen</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o VV</li> <li>- automazione complessa</li> <li>- cablaggio bus di campo</li> </ul>	<p>Le prestazioni richieste impongono una soluzione predefinita</p>
Evolutiva	<p><b>Distribuito Asi</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o VV</li> <li>- automazione semplice</li> <li>- cablaggio bus di campo Asi</li> </ul>	<p><b>Distribuito Ethernet</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- comando in ON/OFF o VV</li> <li>- automazione complessa</li> <li>- cablaggio bus di campo</li> </ul>	<p>Le prestazioni richieste impongono dei bus specializzati altissima velocità</p>	<p>Collegamento Ethernet possibile tra apparecchiature</p>
Distribuita	<p><b>Distribuito Ethernet</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trasparenza per i livelli superiori (MES, ERP...)</li> <li>- Collegamento Ethernet tra parti dell'installazione</li> <li>- Ethernet o Canopen all'interno</li> </ul>	<p><b>Distribuito Ethernet</b></p> 	<p>Le prestazioni richieste impongono dei bus specializzati altissima velocità</p>	<p>Collegamento Ethernet possibile tra apparecchiature</p>

Fig. 18 Principali caratteristiche delle "implementazioni consigliate". I disegni da 5 a 11 mostrano i dettagli delle diverse soluzioni.

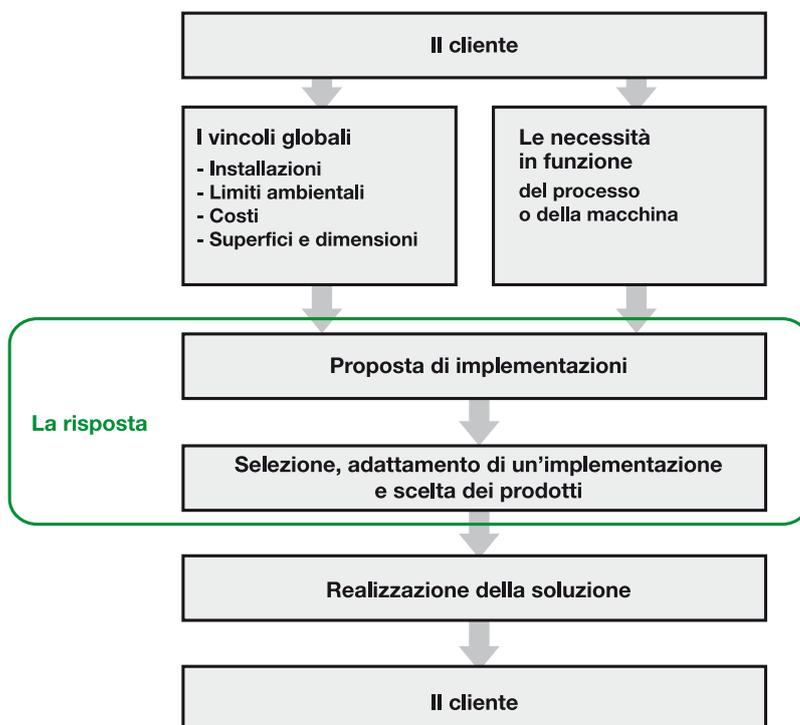
## ■ La descrizione delle soluzioni consigliate

### □ Scegliere una delle soluzioni consigliate

L'approccio "soluzione" delle implementazioni consigliate da Schneider Electric si basa sulle esigenze del Cliente e presenta diversi vantaggi:

- semplifica la scelta delle soluzioni di automazione,
- assicura tranquillità all'utente, garantendo l'interoperabilità dei prodotti ed elevati livelli in termini di prestazioni,
- identificata la soluzione migliore, il Cliente avrà un quadro preciso che gli consentirà di scegliere, con l'aiuto del catalogo e delle guide tecniche specializzate, le funzioni di automazione e i prodotti necessari,
- messa in opera facilitata dal lavoro realizzato a monte.

Nella *fig. 19* viene riassunto il metodo proposto:



↑ *Fig. 19* Procedimento di scelta di un sistema di automazione

Per aiutare il Cliente nella scelta Schneider Electric ha elaborato una guida completa di domande raggruppate in quattro temi: Prestazioni, Installazione, Vincoli, Costi, Superficie e dimensioni.

Le *fig. 20 e 21* mostrano uno schema esemplificativo.

Per conoscere tutte le implementazioni proposte consigliamo di consultare i cataloghi dei prodotti.

Qui di seguito illustreremo il procedimento con l'ausilio di esempi.

Tipo di implementazione <i>Intitolazione dell'implementazione</i>		Compact					
		Semplice	Ottimizzata	Evolutiva Ottimizzata	Prestazioni	Prestazioni elevate	Evolutiva prestazioni
<b>Limiti globali</b>							
Prestazioni	- Potenza installata	bassa	da bassa a forte	da bassa a media	da bassa a media	da bassa a media	da bassa a media
	- Precisione, cadenza	senza	media	media	media	forte	media
	- Numero di motori	da 1 a 4	da 1 a 10	da 1 a 50	da 1 a 10	da 1 a 10	da 1 a 50
	- Tipo di motori	Asincrono diretto	Asincrono variazione di velocità	Asincrono variazione di velocità	Asincrono CVF / asservimento	Sincrono asservimento	Asincrono CVF sincrono asservimento
	- Scambio di dati	no	no	si	no	possibile	si
	- Numero di ingressi/uscite	< 20	< 100	< 100	< 100	> 100	> 100
	- Tipo e funzioni di dialogo	pulsanti	pulsanti display	pulsanti tastiera display	pulsanti tastiera display	pulsanti tastiera display	pulsanti tastiera display
	- Logica di elaborazione	Cablata o configurabile	Configurabile	Programmabile funzioni di base	Software funzioni avanzate	Software funzioni avanzate + applicativo	Software funzioni avanzate
	- Servizi a distanza (diagnostica, aggiornamento)	no	no	possibile	no	no	possibile
Installazione	- Numero di quadri	1	1	1	1	1	1
	- Evolutivo	no	no	si	no	no	no
Limiti ambientali	- Ambiente (temperatura, polvere...)	limitato	si	si	si	si	si
	- Sicurezza (persone, materiale)	Arresto emergenza	Arresto emergenza	Funzioni automazione	Funzioni semplici	Funzioni automazione	Funzioni automazione
Costo	- Costo di progettazione	no	no	si	no	si	si
	- Costo di utilizzo	no	si	si	no	si	si
Superficie e dimensione	- Dimensione installazione	piccola	media	media	media	media	media
	- Rete interna	senza	senza	si	senza	senza o bus specializzati	si
	- Lunghezza della rete esterna						

1 Fig. 20 Guida per le architetture compatte

Tipo di implementazione <i>Intitolazione dell'implementazione</i>		Distribuita			
		<i>As-Interface</i>	<i>Canopen ottimizzata</i>	<i>Canopen</i>	<i>Ethernet</i>
<b>Vincoli globali</b>					<b>Tranparent factory</b>
Prestazioni	- Potenza installata	da bassa a media	da bassa a forte	da bassa a forte	da bassa a forte
	- Precisione, cadenza	da bassa a media	media	media	legata al bus
	- Numero di motori	da 1 a 10	da 1 a 10	< 20	> 20
	- Tipo di motori	Asincrono diretto	Asincrono variazione di velocità	Asincrono variazione di velocità	Tutti i tipi Limiti sui bus di campo
	- Scambio di dati	no	possibile	possibile	si
	- Numero di ingressi/uscite	< 100	< 100	< 100	< 100
	- Tipo e funzioni di dialogo	tastiera display	tastiera display	tastiera display	tastiera display PC
	- Logica di elaborazione	Programmabile funzioni di base	Software funzioni avanzate	Software funzioni avanzate	Software + collaborazione altri sistemi
	- Servizi a distanza (diagnostica, aggiornamento)	no	possibile	possibile	si
Installazione	- Numero di quadri	< 5	< 10	< 10	n
	- Evolutivo	si	si	si	si
Limiti ambientali	- Ambiente (temperatura, polvere...)	si	si	si	si
	- Sicurezza (persone, materiale)	Funzioni automazione	Funzioni automazione	Funzioni automazione	Funzioni automazione
Costo	- Costo di progettazione	si	si	si	si
	- Costo di utilizzo	si	si	si	si
Superficie e dimensione	- Dimensione installazione	media	media	media	grande
	- Rete interna	ASI	Canopen	Canopen	rete
	- Lunghezza della rete esterna	100m	250m	250m	> 250m

† Fig. 21 Guida per le architetture distribuite

## 1.5 La scelta delle apparecchiature di automazione

Prenderemo a titolo di esempio tre diverse applicazioni e per ciascuna andremo a stabilire la o le architetture più adatte:

### □ Gru da cantiere

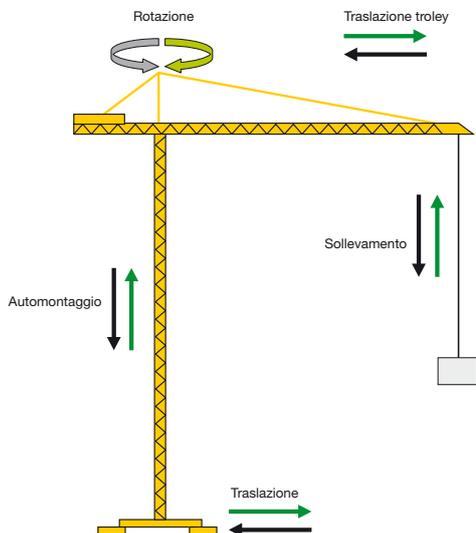
Questa macchina (⇔ Fig. 22), malgrado la sua apparente semplicità, deve soddisfare importanti requisiti ambientali e di sicurezza. Il mercato concorrenziale impone al produttore vincoli di costo su tutti gli elementi.

Le caratteristiche di questo tipo di gru sono:

- potenza da 10 a 115 kW in base al carico sollevato (da 2 a 350 tonnellate).
- movimenti di sollevamento, di rotazione, di spostamento del carrello e di traslazione effettuati da motori trifase a gabbia a due o tre velocità o associati ad un variatore elettronico.
- frenatura meccanica o elettrica.
- l'intera applicazione richiede più di una decina di rilevatori.
- interfaccia uomo/macchina situata in cabina o realizzata con un radiocomando a distanza.

La scelta della soluzione si orienta naturalmente verso un insieme **compatto ottimizzato**, raggruppato in un unico quadro, disposto alla base della gru.

Visualizziamo rapidamente le possibilità (⇔ Fig. 23) evidenziando a colori la tabella di scelta precedente.



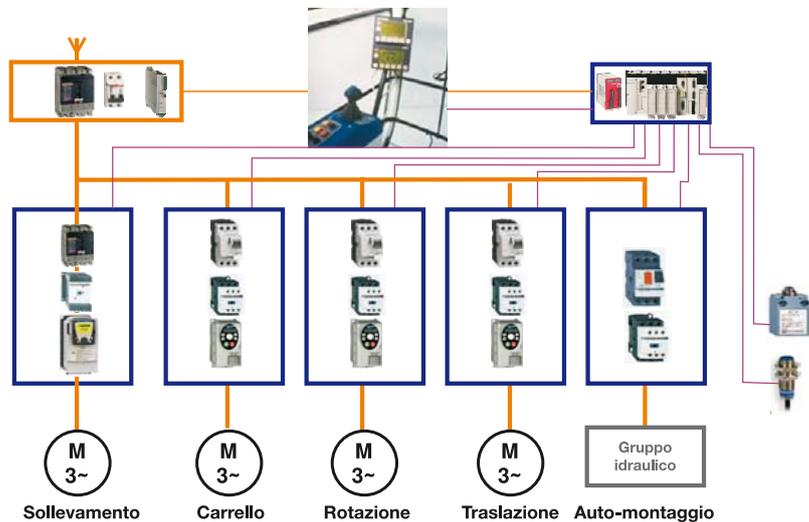
↑ Fig. 22 Gru da cantiere

La soluzione **Compatta semplice** viene scartata perchè offre possibilità troppo limitate. Le altre due soluzioni **Compatta ottimizzata** e **Compatta evolutiva ottimizzata** sono invece adatte. L'ultima è la soluzione più vantaggiosa se la macchina è modulare o se è indicata l'esigenza di telemanutenzione.

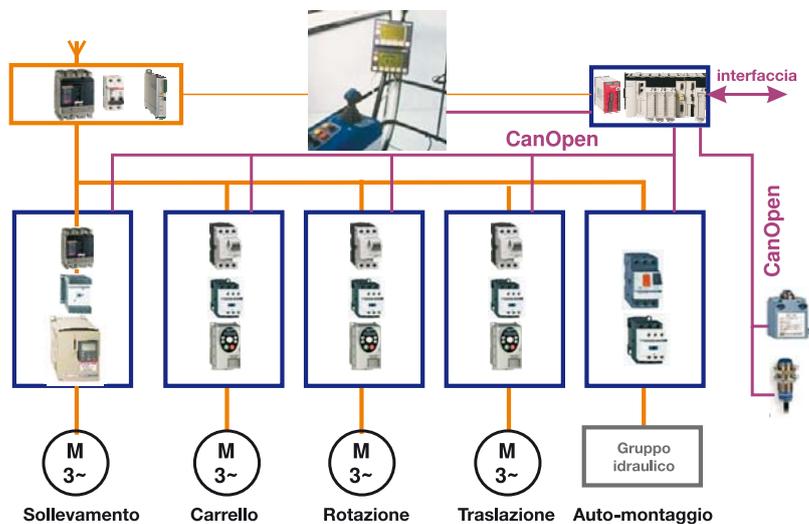
Tipo di implementazione <i>Intitolazione dell'implementazione</i>			Distribuita		
			Semplice	Ottimizzato	Evolutivo ottimizzato
Vincoli globali					
Prestazioni	- Potenza installata	70 Kw	bassa	da bassa a forte	da bassa a media
	- Precisione, cadenza	< 150 mS	senza	media	media
	- Numero di motori	5	da 1 a 4	da 1 10	da 1 a 50
	- Tipo di motori	Asincroni + variazione di velocità	Asincrono diretto	Asincrono variazione di velocità	Asincrono variazione di velocità
	- Scambio di dati	in base alla versione	no	no	si
	- Numero di ingressi/uscite	35 input 10 output	< 20	< 100	< 100
	- Tipo e funzioni di dialogo	Joystick + schermo	Pulsanti	Pulsanti display	Pulsanti tastiera display
	- Logica di elaborazione	Indifferente	cablata o configurabile	configurabile	programmabile funzioni base
	- Servizi a distanza (diagnostica, aggiornamento)	in base alla versione	no	no	possibile
	Installazione	- Numero di quadri	1	1	1
	- Evolutivo	in base alla versione	no	no	si
Limiti ambientali	- Ambiente (temperatura, polvere...)	limiti notevoli	limitato	si	si
	- Costo di progettazione		no	no	si
Costo	- Costo di utilizzo	si	no	no	si
	- Dimensione installazione		piccola	media	media
Superficie e dimensione	- Rete interna		senza	senza	si
	- Lunghezza della rete esterna				
Codici colore	adatto non adatto				

↑ Fig. 23 Scelta di architettura per una gru di cantiere

La scelta dei componenti dipende naturalmente dai vincoli e dalle esigenze del Cliente oltre che da quelli della soluzione scelta. Le *fig. 24 e 25* mostrano le possibili soluzioni:



↑ Fig. 24 Soluzione Compatta ottimizzata



↑ Fig. 25 Soluzione Compatta evolutiva

## 1.5 La scelta delle apparecchiature di automazione

Le funzioni dei componenti vengono descritte in dettaglio nei capitoli successivi.

### □ Nastri trasportatori e tavola rotante (⇔ Fig. 26 e 27)

Questo tipo di macchina viene comunemente utilizzata nelle industrie manifatturiere ed è strettamente legata al processo. La portata deve essere regolata in funzione dei prodotti lavorati. Gli ordini provengono da sistemi di automazione a monte e a valle.

Un PLC controlla più sezioni di nastro trasportatore, ogni elemento dispone di uno o più quadri.

Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- bassa potenza,
- livello medio di prestazioni,
- da 2 a 10 motori trifase a gabbia comandati da variatori di velocità per ogni sezione di nastro,
- da 10 a 50 ingressi/uscite,
- interfaccia operatore tramite tastiera display
- visualizzazione in tempo reale tipo e numero di prodotti trasportati.

La scelta andrà su una delle architetture distribuite dal momento che vi sono diversi quadri collegati tra loro.

La tabella di scelta (⇔ Fig. 28) mostra chiaramente le soluzioni da preferire. La soluzione con bus ASI è un pò limitata dalla difficoltà di controllare la velocità dei variatori. La soluzione Ethernet, tranne in casi particolari, rischia invece di essere troppo onerosa.



↑ Fig. 26 Tavola rotante

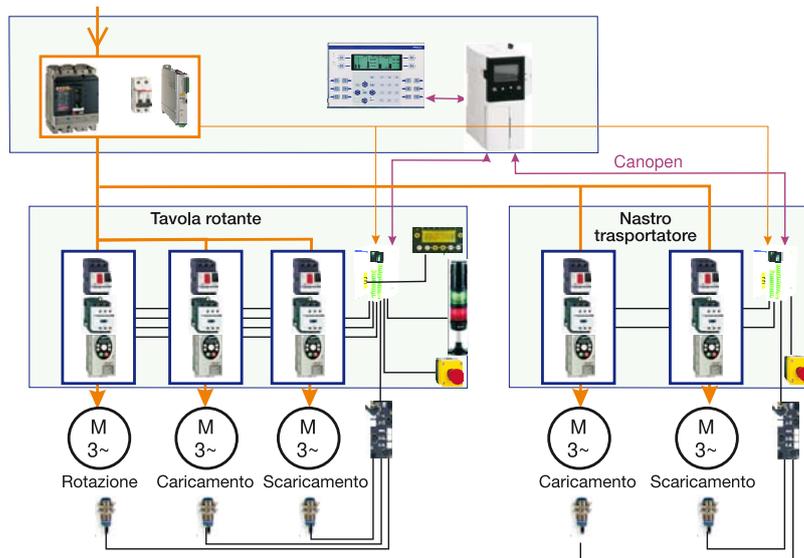


↑ Fig. 27 Nastro trasportatore

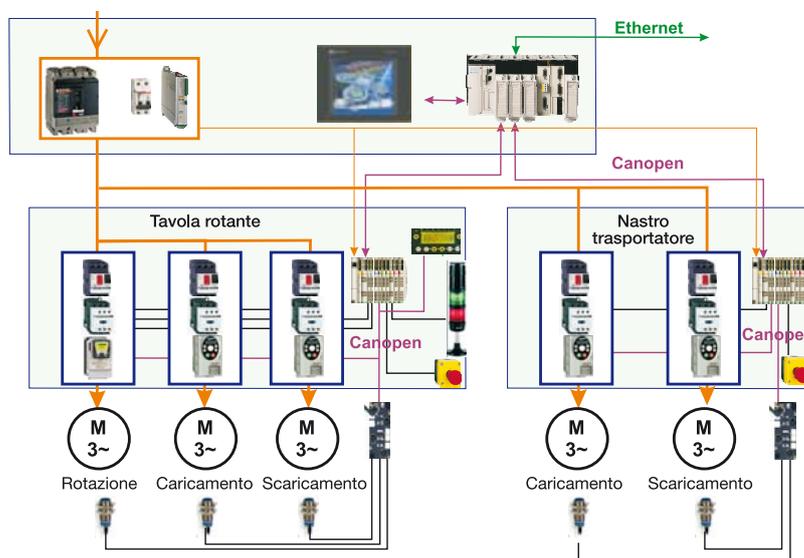
Tipo di implementazione			Distribuita			
			AS-Interface	Canopen ottimizzato	Canopen	Ethernet
Intitolazione dell'implementazione						
<b>Vincoli globali</b>		esigenze				<b>Transparent Factory</b>
Prestazioni	- Potenza installata	40 Kw	da bassa a media	da bassa a forte	da bassa a forte	da bassa a forte
	- Precisione, cadenza	nessun limite	da bassa a media	media	media	legata al bus di terra
	- Numero di motori	4	da 1 a 10	da 1 a 10	< 20	> 20
	- Tipo di motori	Asincrono e variazione di velocità in base all'opzione	Asincrono diretto	Asincrono variazione di velocità	Asincrono variazione di velocità	Tutti limiti su bus di campo
	- Scambio di dati	si	no	possibile	possibile	si
	- Numero di ingressi/uscite	10 rilevatori	< 100	< 100	< 100	< 100
	- Tipo e funzioni di dialogo	Tastiera locale SCADA Telegestione	Tastiera display	Tastiera display	Tastiera display	Tastiera display
	- Logica di elaborazione	controllore programmabile	programmabile funzioni base	software funzioni avanzate	software funzioni avanzate	software + collaborazioni con altri sistemi
	- Servizi a distanza (diagnostica, aggiornamento)	Telegestione	no	possibile	possibile	si
Installazione	- Numero di quadri	non definito	< 5	< 10	< 10	n
	- Evolutivo	si	si	si	si	si
Limiti ambientali	- Ambiente (temperatura, polvere...)	si per quadri esterni	si	si	si	si
	- Sicurezza (persone, materiali...)	intrusione e continuità di servizio	funzioni automazione	funzioni automazione	funzioni automazione	funzioni automazione
Costo	- Costo di progettazione	considerevole	si	si	si	si
	- Costo di utilizzo	considerevole	si	si	si	si
Superficie e dimensione	- Dimensione installazione	media	media	media	media	grande
	- Rete interna	senza limiti	IST	Canopen	Canopen	Rete
	- Lunghezza della rete esterna		100m	250m	250m	250m
Codici colore		adatto non adatto				

↑ Fig. 28 Scelta di una soluzione per sistema di trasporto su nastro

Restano quindi le due soluzioni con il bus Can Open. La prima, ottimale in termini di costi (⇔ Fig. 29), garantisce le funzioni base richieste. La seconda (⇔ Fig. 30) assicura trasparenza e sincronizzazione con gli altri sistemi di automazione esterni alla sezione di nastro considerata. Quest'ultima soluzione consente inoltre un'evoluzione semplice. La configurazione può essere facilmente telecaricata, in caso, ad esempio, di cambiamento di serie.



↑ Fig. 29 Soluzione Canopen ottimizzata



↑ Fig. 30 Soluzione Canopen



↑ Fig. 31 Stazione di pompaggio

#### □ Una stazione di pompaggio per l'alimentazione in acqua potabile

Questo esempio (⇔ Fig. 31) presenta una parte di un impianto di trattamento e distribuzione delle acque composta da un insieme di unità ripartite sul territorio.

Questo tipo di applicazione deve essere autonomo e deve garantire la continuità dell'alimentazione. I clienti prestano particolare attenzione alla funzione di controllo e alla manutenzione dell'impianto.

Le caratteristiche di questa stazione sono:

- 4 pompe da 7.5kW associate a variatori di velocità,
- una decina di rilevatori (pressione, portata),
- un PLC che gestisce la sequenza delle pompe e la comunicazione,
- il telecontrollo dell'impianto.

## 1.5 La scelta delle apparecchiature di automazione

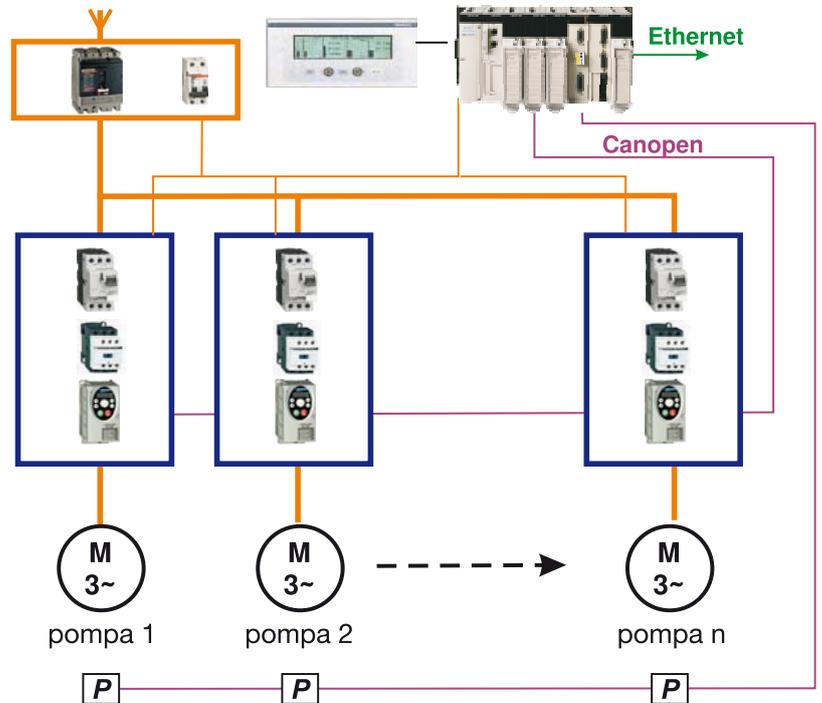
La scelta si orienta verso una delle soluzioni distribuite. La tabella di scelta della *figura 32* consente di selezionare la soluzione ottimale.

Tipo di implementazione <i>Intitolazione dell'implementazione</i>			Distribuita			
			AS-Interface	Canopen ottimizzato	Canopen	Ethernet
Vincoli globali						<i>Transparent Factory</i>
Prestazioni	- Potenza installata	40 Kw	da bassa a media	da bassa a forte	da bassa a forte	da bassa a forte
	- Precisione, cadenza	nessun limite	da bassa a media	media	media	legata al bus di terra
	- Numero di motori	4	da 1 a 10	da 1 10	< 20	> 20
	- Tipo di motori	Asincrono e variazione di velocità in base all'opzione	Asincrono diretto	Asincrono variazione di velocità	Asincrono variazione di velocità	Tutti limiti su bus di campo
	- Scambio di dati	si	no	possibile	possibile	si
	- Numero di ingressi/uscite	10 rilevatori	< 100	< 100	< 100	< 100
	- Tipo e funzioni di dialogo	Tastiera locale SCADA Telegestione	Tastiera display	Tastiera display	Tastiera display	Tastiera display
	- Logica di elaborazione	controllore programmabile	programmabile funzioni base	software funzioni avanzate	software funzioni avanzate	software + collaborazioni con altri sistemi
	- Servizi a distanza (diagnostica, aggiornamento)	Telegestione	no	possibile	possibile	si
Installazione	- Numero di quadri	non definito	< 5	< 10	< 10	n
	- Evolutivo	si	si	si	si	si
Limiti ambientali	- Ambiente (temperatura, polvere...)	si per quadri esterni	si	si	si	si
	- Sicurezza (persone, materiali...)	intrusione e continuità di servizio	funzioni automazione	funzioni automazione	funzioni automazione	funzioni automazione
Costo	- Costo di progettazione	considerevole	si	si	si	si
	- Costo di utilizzo	considerevole	si	si	si	si
Superficie e dimensione	- Dimensione installazione	media	media	media	media	grande
	- Rete interna	senza limiti	IST	Canopen	Canopen	Rete
	- Lunghezza della rete esterna		100m	250m	250m	250m
Codici colore	<i>adatto</i> <i>non adatto</i>					

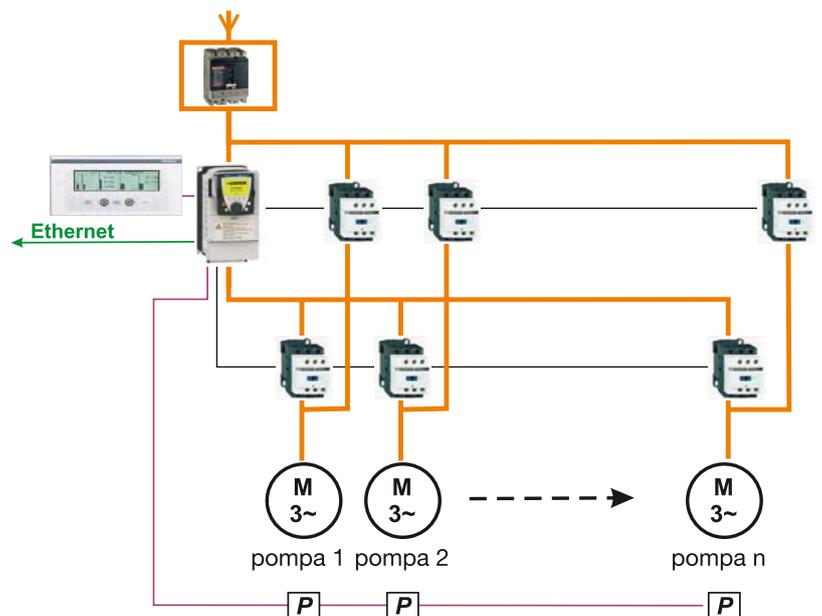
↑ Fig. 32 Scelta dell'architettura per un impianto di trattamento delle acque

La soluzione più adatta è quella con protocollo Ethernet che consente una trasparenza totale dell'impianto. Le ridotte capacità di scambio del bus ASI lo rendono una soluzione limitata non adatta a questo tipo di applicazione. Le altre due soluzioni con Can Open possono essere utilizzate con collegamento modem, ma le possibilità rimangono anche in questo caso molto limitate.

Negli esempi sotto riportati (↔ Fig. 33 e 34) vengono presentate due soluzioni, una con un PLC che comanda l'insieme dei componenti ed una con variatore di velocità equipaggiato di scheda di controllo e di applicazione specifica di comando pompe.



↑ Fig. 33 Soluzione con PLC

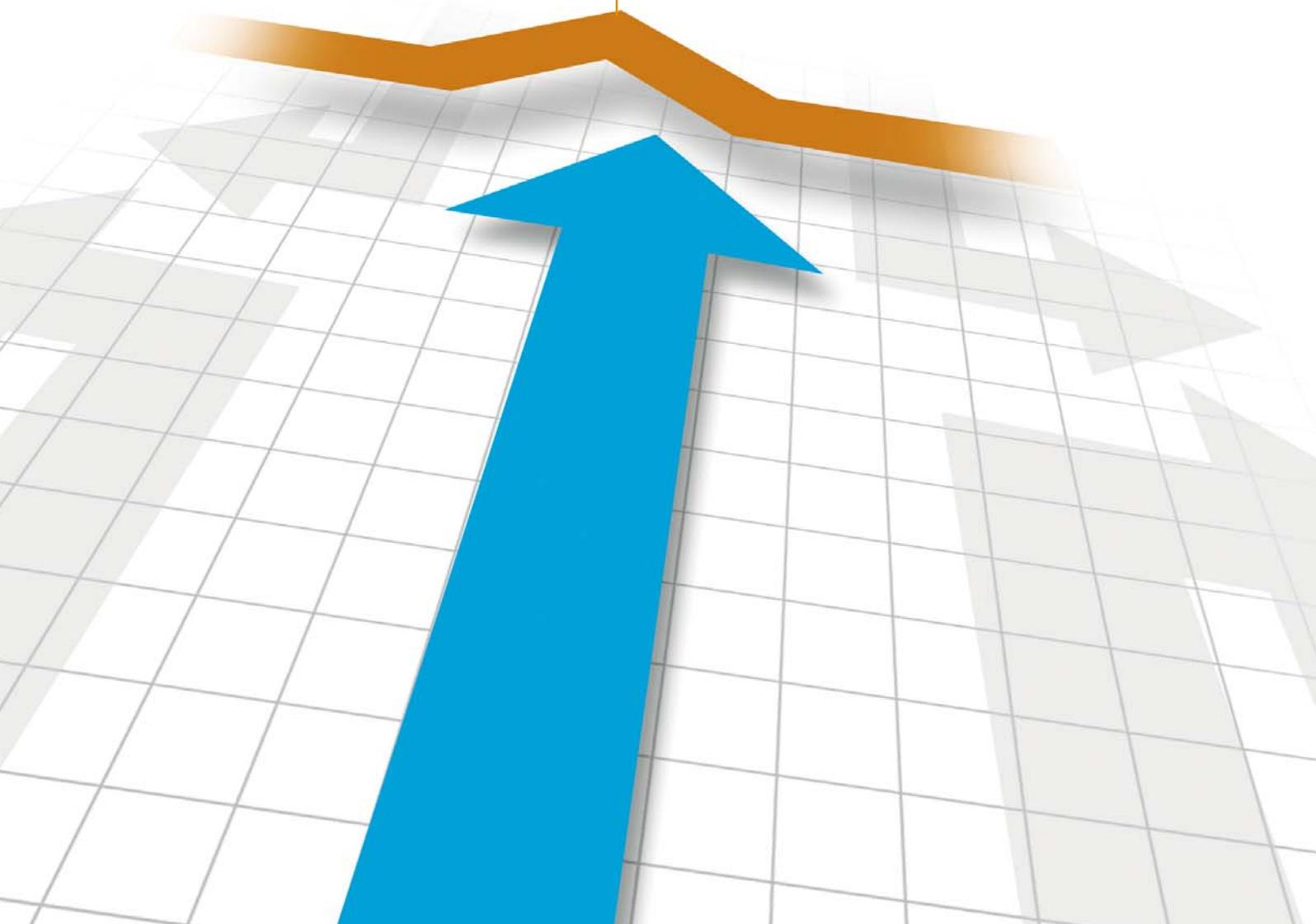


↑ Fig. 34 Soluzione con variatore di velocità

# 2

## capitolo Alimentazione elettrica

*Regole fondamentali, norme e condotte da seguire per gestire l'interfaccia tra la distribuzione elettrica e la macchina. Presentazione delle funzioni di alimentazione, potenza e controllo*



---

- 2.1 Introduzione ..... pagina 30
- 2.2 L'alimentazione elettrica delle macchine ..... pagina 30
- 2.3 Le norme e le abitudini ..... pagina 30
- 2.4 Le funzioni dell'alimentazione elettrica ..... pagina 32
- 2.5 L'alimentazione del circuito di comando ..... pagina 33

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

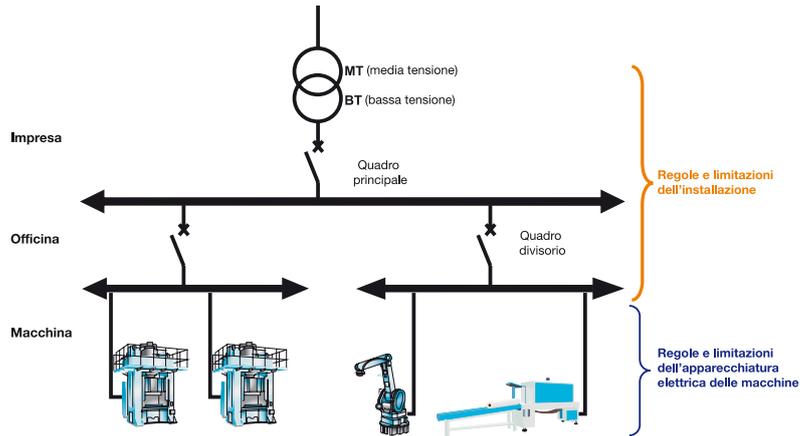
11

12

M

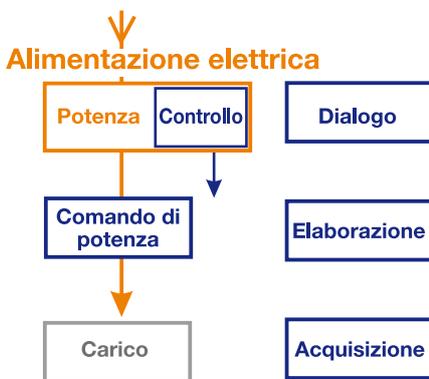
**2.1 Introduzione**

In questo capitolo viene trattata l'alimentazione elettrica dell'equipaggiamento elettrico delle macchine. L'alimentazione assicura le funzioni d'interfaccia tra il circuito elettrico e la macchina e deve rispondere a regole e vincoli tecnici di entrambi (⇔ Fig.1). Per informazioni dettagliate consigliamo di consultare la *Guida alla bassa tensione* che completa le informazioni qui di seguito riportate.



↑ Fig. 1 L'architettura dell'alimentazione elettrica

**2.2 L'alimentazione elettrica delle macchine**



↑ Fig. 2 Le funzioni dell'alimentazione elettrica

Come illustrato nello schema della figura 2 l'alimentazione elettrica comprende due parti:

Il circuito di potenza, destinato ad alimentare i diversi carichi della macchina, quali i motori e i circuiti di riscaldamento attraverso componenti di comando potenza, i pre-azionatori. Le gamme di tensione vanno da 200 a 660 V in trifase e da 120 a 230 V in monofase.

Il circuito di comando, destinato ad alimentare i componenti di automazione, quali le bobine dei contattori, le elettrovalvole, i controllori programmabili, i rilevatori, ecc... Le gamme di tensione sono quelle della bassa tensione (da 120 a 200 V in monofase) e della bassissima tensione (da 12 a 48 V).

Questo insieme spesso viene chiamato « testa dell'apparecchiatura » e garantisce una serie di funzioni descritte nel paragrafo 2.4.

**2.3 Le norme e le abitudini**

Come precedentemente detto, l'alimentazione elettrica è sottoposta ai vincoli e alle regole di due campi:

■ **La rete elettrica**

Ogni Paese ha le proprie abitudini e stabilisce le proprie regole; questo ha come conseguenza una moltitudine di norme diverse, come la C15-100 in Francia.

Cerchiamo tuttavia di riassumere i vincoli e le abitudini nei seguenti punti:

- la tensione di rete. Nella *Guida dell'installazione elettrica* è fornita una tabella con le tensioni dei diversi Paesi, mentre la norma EN 50160:1999 definisce le caratteristiche delle reti pubbliche di distribuzione di energia elettrica,
- la distribuzione del neutro e il regime di neutro,
- i metodi di cablaggio,
- le norme prodotto e le distanze d'isolamento,
- i tipi di fusibili in caso di utilizzo di basi o interruttori a fusibili.

## ■ La macchina

Lo sforzo di armonizzazione della norma IEC 60 204-1 facilita l'esportazione e l'utilizzo delle macchine in tutto il mondo. Soltanto alcuni Paesi hanno conservato delle specificità. La tabella sottostante (*figura 3*) fornisce un estratto delle differenze più rilevanti.

Norvegia: schemi di collegamento a terra TN-C non consentiti nelle reti bassa tensione degli edifici.

USA: schemi TT di potenza non consentiti.

Francia e Norvegia: interruzione del conduttore di neutro obbligatoria nello schema TN-S.

USA e Norvegia: distribuzione di un conduttore di neutro in schema IT non consentita.

USA : la tensione nominale max di un circuito di comando in CA è di 120 V.

USA: La sezione minima dei conduttori in rame viene specificata nella norma ANSI/NFPA 79 in dimensioni americane (AWG). L'allegato G della norma fornisce le corrispondenze delle sezioni AWG in mm<sup>2</sup>.

USA e Canada: BIANCO o GRIGIO utilizzati per identificare i conduttori di neutro messi a terra al posto del BLU.

USA: esigenze di marcatura della targa dati.

↑ Fig. 3 Particolarità normative e abitudini di alcuni paesi

## ■ Tre zone d'influenza

Malgrado le differenze delle norme e delle abitudini nei diversi Paesi, è possibile identificare tre zone d'influenza: l'Europa, gli USA e il Giappone (*Fig.4*).

	Zona d'influenza	USA	Europa	Giappone
<b>Distribuzione elettrica</b>	Tensione rete 3~	480 V	400 V	220 V
	Regole /norme d'installazione BT	NEC	IEC 60364	JIS 0364
<b>Norme apparecchiatura macchine</b>	Vedere sopra	IEC60204-1	IEC 60204-1	JIS-B 9960
<b>Apparecchiatura di testa dell'apparecchio</b>	Interruttore automatico	UL489	IEC 60947	JIS-C 8201-2-1
	Interruttore / fusibili	UL98	IEC 60269 Fusibili diversi per Paese	JIS-C-8269
	Contattori / interr. aut. magneto-termici	UL508	IEC 60947	JIS-C 8201-4-1
<b>Tipo di collegamento a monte</b>	< 100 A	Connettori > 100 A	Connettori, viti-serrafilo, connessioni elastiche	Capicorda chiusi
	> 100 A	Cavi in parallelo	Cavi con capicorda o barre	Cavi con capicorda chiusi

↑ Fig. 4 Esigenze nelle diverse zone d'influenza

## 2.4 Le funzioni dell'alimentazione elettrica

È possibile distinguere le seguenti funzioni:

### ■ Alimentazione e interruzione dei circuiti di potenza e di comando della macchina, controllando i punti seguenti

#### □ Potere d'interruzione

A seconda della potenza installata, la corrente di cortocircuito presunta in caso d'incidente può variare da alcuni kA a diverse centinaia di kA. È necessario quindi che l'apparecchio sia dimensionato di conseguenza.

#### □ Tenuta ai cortocircuiti

Un corto circuito a valle dell'apparecchiatura elettrica non deve provocarne la distruzione.

#### □ Capacità di collegamento

Il cablaggio interno degli apparecchi viene realizzato normalmente in rame; è da notare tuttavia che alcuni utenti, utilizzano l'alluminio per i propri circuiti elettrici. In questo caso l'apparecchio dovrà essere compatibile con entrambi i tipi di collegamenti.

#### □ Comando manuale sul prodotto o a distanza su armadio

Le norme di sicurezza impongono un comando diretto sul quadro elettrico che assicuri l'interruzione e il sezionamento del circuito.

### ■ Protezione delle persone

Come regola generale gli armadi e quadri elettrici sono bloccati durante il funzionamento e gli operatori non possono accedervi.

La normativa impone dei vincoli sulla protezione delle persone durante le operazioni di intervento sulle apparecchiature elettriche, in particolare durante le fasi di avviamento e durante le operazioni di manutenzione.

La protezione delle persone impone il rispetto di alcune regole:

- protezione IP20 contro i contatti accidentali con parti in tensione,
- sezionamento.

Questa funzione è destinata ad assicurare la messa fuori tensione di una parte o dell'intero circuito, separandolo tutto o in parte da qualsiasi fonte di energia elettrica, per motivi di sicurezza.

#### • Isolamento

Quando un dispositivo di comando è aperto è necessario garantire le caratteristiche d'isolamento, ossia è necessario che la corrente di fuga sia inferiore alla soglia di pericolo.

#### • Blocco della manovra (blocco con lucchetti)

Questa funzione ha lo scopo di impedire ad una persona non autorizzata di effettuare la rimessa in tensione di un apparecchio elettrico.

#### • Isolamento del controllo

È necessario che l'isolamento del controllo sia sufficiente a proteggere le persone e il materiale elettrico contro le sovratensioni e gli altri disturbi elettrici

#### • Collegamenti equipotenziali

In base ai regimi di neutro utilizzato, le norme d'installazione possono imporre masse isolate da terra o masse collegate a terra.

## 2.4 Le funzioni dell'alimentazione elettrica

### 2.5 L'alimentazione del circuito di comando

#### ■ La protezione della rete di distribuzione

La protezione contro gli incidenti originati dalla macchina deve tener conto del potere d'interruzione e delle caratteristiche di coordinamento e selettività.

Un incidente non deve avere ripercussioni sul resto dell'installazione.

#### ■ L'alimentazione del circuito di potenza

La tabella della *figura 5* riassume delle funzioni realizzate dai componenti di potenza.

Funzione	Porta fusibili	Interruttore Vario	Interruttore INS	Interruttore e fusibili	Interr. autom. magnetico	Interruttore linea	Relè differenziale
							
Sezionamento	XX	XX	XX	XX	XX	XX	
Interruzione		X	XX	XX	XX	XX	
Protezione contro i cortocircuiti	XX			XX	X	XX	
Isolamento	XX	XX	XX	XX	XX	XX	
Tenuta ai cortocircuiti	X	X	XX	XX	X	XX	
Blocco della manovra	XX	XX	XX	XX	X	XX	
Protezione contro i guasti di terra						opzione	XX

1 Fig. 5 Tabella comparativa dei dispositivi di potenza

## 2.5 L'alimentazione del circuito di comando

L'alimentazione del circuito di comando è sottoposta a vincoli tecnologici e normativi. La protezione delle persone richiede l'impiego di alimentatori e sistemi a bassissima tensione, con tensioni inferiori a 50V. Il diffuso utilizzo di componenti elettronici impone la loro alimentazione in corrente continua.

All'infuori delle applicazioni semplici che restano a bassa tensione e di alcune applicazioni particolari, la tendenza è quella di utilizzare alimentatori a corrente continua a bassissima tensione.

#### ■ Gli alimentatori 24V

Qui di seguito prenderemo in esame diversi tipi di alimentazione 24V. Nel settore industriale la tensione di alimentazione a 24V è diventata uno standard. La maggior parte dei costruttori offre ampie gamme di prodotti. La normalizzazione consente inoltre agli utilizzatori di limitare i rischi d'incompatibilità tra i diversi prodotti.

##### • Diversi vantaggi contribuiscono alla scelta di questa soluzione

- il guadagno di spazio e di materiale,
- la maggior affidabilità, la funzione di rilevamento delle interruzioni di circuito disponibile su alcuni PLC,
- la sicurezza delle persone,
- la continuità di servizio grazie a gruppi di continuità o filtri stabilizzatori di tensione,
- l'assenza di effetto capacitivo e quindi di disturbi nei cavi,
- la protezione dell'ambiente grazie alla riduzione dei consumi nell'apparecchiatura elettrica.

- **Tuttavia esistono delle limitazioni**

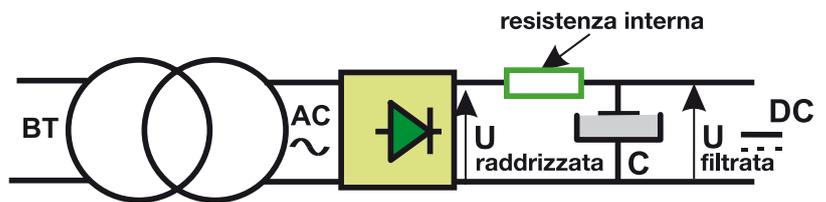
- la bassa tensione impone un limite nella lunghezza dei cavi,
  - il numero di contatti o di sensori installati in serie è limitato,
  - è necessario curare i collegamenti di messa a terra,
  - in caso di utilizzo in ambiente severo (polveri, agenti chimici, ecc...) l'affidabilità dei contatti può essere soggetta ad una rapida usura,
  - possono verificarsi problemi di compatibilità tra le caratteristiche delle uscite dei PLC, i rilevatori e le bobine dei contattori.
- Si consiglia quindi di utilizzare contattori a basso consumo particolarmente adatti a questo impiego.

- **Le tecnologie degli alimentatori 24V CC**

Le tecnologie si evolvono anche in questo settore. Gli alimentatori tradizionali sono costituiti da un trasformatore ad avvolgimenti separati che, oltre a convertire la tensione, assicura anche l'isolamento necessario tra la bassa e la bassissima tensione. I progressi della tecnologia switching uniti all'abbassamento dei costi, ne fanno un'interessante alternativa sotto diversi punti di vista. Esamineremo qui di seguito le due tecnologie.

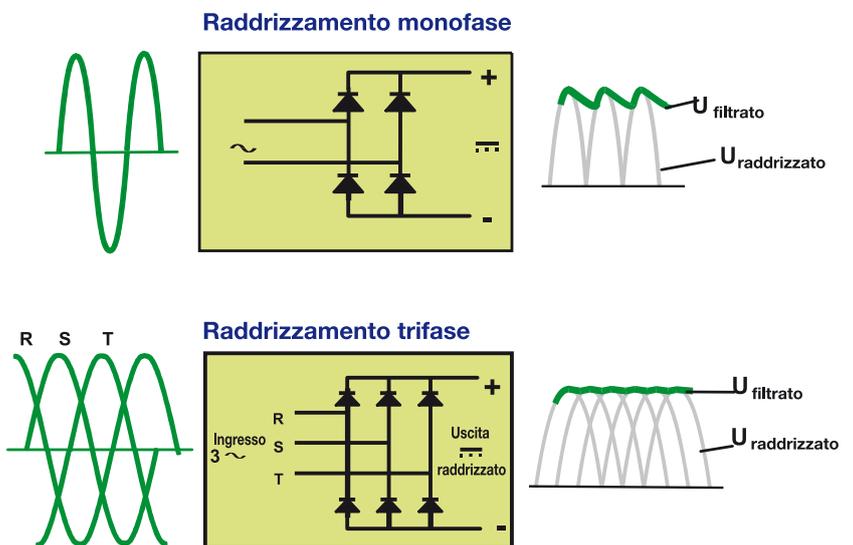
- **Gli alimentatori raddrizzati**

Sono costituiti da un trasformatore bassa tensione/bassissima tensione, da un raddrizzatore (normalmente a ponte) e da un filtro (⇨ Fig.6).



↑ Fig. 6 Schema di principio di un'alimentazione 24 V

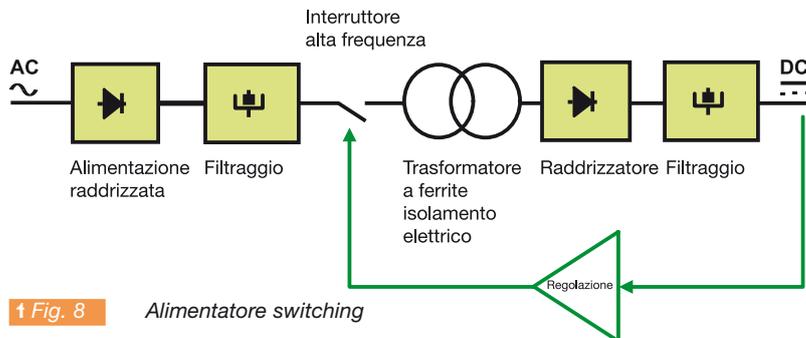
Il primario del trasformatore può essere alimentato in monofase o in trifase. Quest'ultima soluzione (⇨ Fig.7) consente di eliminare i condensatori di filtraggio; se aumenta l'affidabilità, la tenuta alle microinterruzioni diminuisce.



↑ Fig. 7 Raddrizzamento monofase e trifase

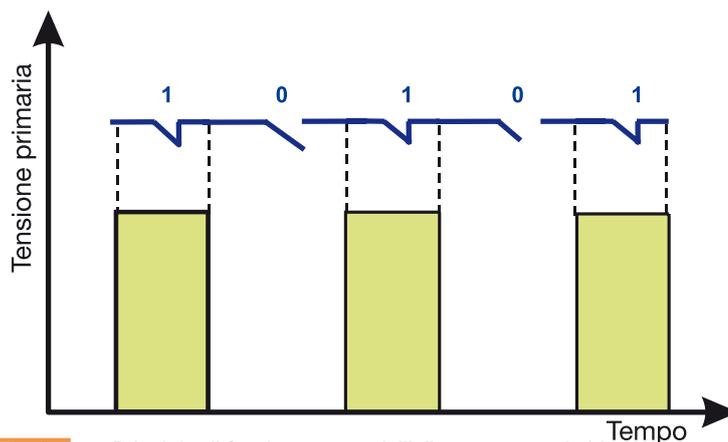
□ **Gli alimentatori switching** (↔ Fig.8)

Il principio di funzionamento consiste nel commutare ad alta frequenza una tensione (da alcune decine a qualche centinaia di kHz) raddrizzata. Questo permette ad esempio di alimentare un trasformatore in ferrite più efficiente rispetto ai trasformatori tradizionali. L'uscita viene quindi raddrizzata e filtrata.



↑ Fig. 8 Alimentatore switching

Un anello di regolazione consente di regolare il tempo di ciclo del commutatore alta frequenza in modo da garantire la stabilizzazione della tensione in uscita(↔ Fig.9).



↑ Fig. 9 Principio di funzionamento dell'alimentatore switching

□ **Conclusione**

La tabella della figura 10 mostra un rapido confronto tra le due tecnologie. Si consiglia successivamente di consultare il capitolo sulla messa in opera dei prodotti.

Confronto per un alimentatore 10A /24V DC	Alimentatori switching	Alimentatori raddrizzati filtrati
<b>Gamma di tensione d'ingresso</b>	Vasta gamma da 85 a 264V	Diverse gamme fisse da 110V a 230V
<b>Dimensioni d'ingombro</b>	3 dm <sup>2</sup>	7 dm <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	1.5 kg	6 kg
<b>Rendimento</b>	Oltre l'85%	Fino a 75%
<b>Regolazione tensione uscita</b>	Sì	No
<b>Immunità microinterruzioni</b>	Buona > 20ms	Bassa <5ms
<b>Regolazione del carico</b>	dall'1 al 3%	5%
<b>Regolazione linea</b>	<1%	In funzione della rete dal 5 al 10%
<b>Inquinamento EMC</b>	Richiede precauzioni di realizzazione	Naturalmente bassa
<b>Inquinamento armoniche</b>	secondo EN61000-3-2 con filtro	Conforme di base alla norma EN61000-3-2
<b>Affidabilità, durata</b>	Buono	Ottima

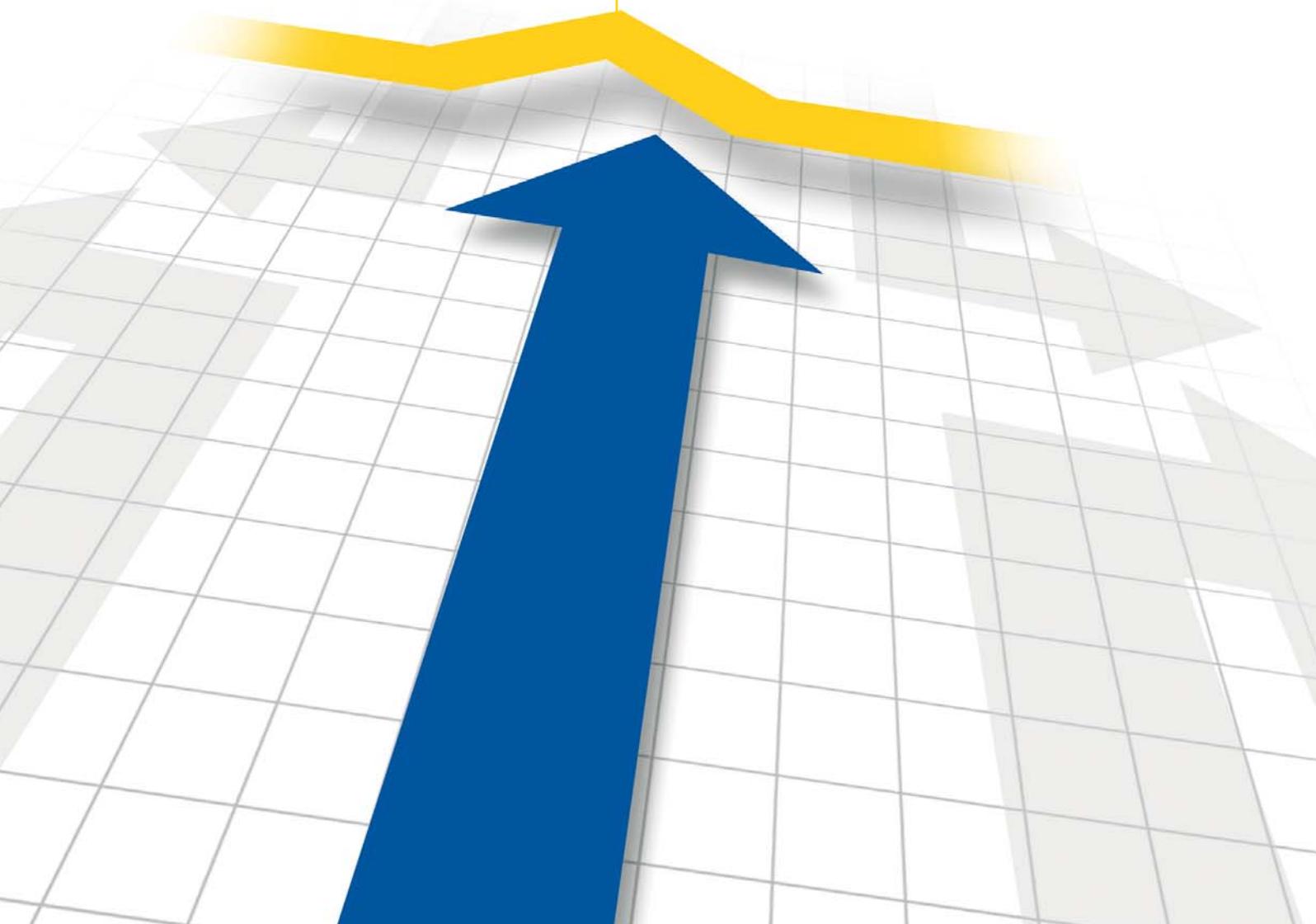
↑ Fig. 10 Confronto degli alimentatori a corrente continua

# 3

## capitolo

### Motori e carichi

*Influenza del funzionamento dei motori  
e dei carichi sul loro comportamento  
elettrico*



---

■ 3.1 I motori asincroni trifase .....	<i>pagina 38</i>
■ 3.2 I motori monofase .....	<i>pagina 42</i>
■ 3.3 I motori sincroni .....	<i>pagina 43</i>
■ 3.4 I motori a corrente continua .....	<i>pagina 46</i>
■ 3.5 L'utilizzo dei motori asincroni trifase .....	<i>pagina 48</i>
■ 3.6 Confronto dei diversi tipi di motori .....	<i>pagina 52</i>
■ 3.7 I diversi tipi di carichi .....	<i>pagina 52</i>
■ 3.8 Le valvole e gli assi elettrici .....	<i>pagina 59</i>

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

M

Questo capitolo è dedicato alla descrizione fisica ed elettrica degli apparecchi utilizzatori elettrici e dei loro carichi. A seconda dei casi, il carico influenza o meno le caratteristiche dell'apparecchio utilizzatore. Distingueremo quindi i carichi attivi, generalmente associati ad un motore, e i carichi passivi quali il riscaldamento e l'illuminazione. Termineremo con una presentazione di valvole e cilindri, mentre l'avviamento dei motori e la variazione dei velocità saranno oggetto dei capitoli successivi.

3.1 I motori asincroni trifase

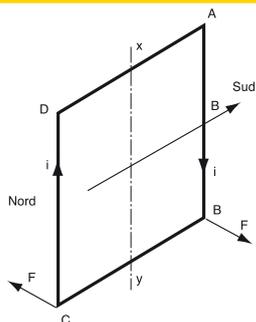


Fig. 1 Creazione di una corrente indotta in una spira in cortocircuito

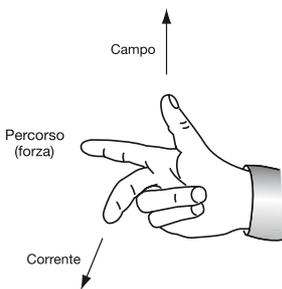


Fig. 2 La regola delle tre dita della mano destra per trovare la direzione della forza

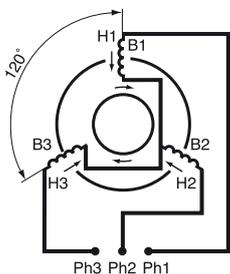


Fig. 3 Principio di un motore asincrono trifase

Questa prima parte è dedicata alla presentazione dei motori asincroni trifase, i più utilizzati per l'azionamento delle macchine. Questi motori vengono infatti impiegati in un gran numero di applicazioni per i vantaggi che presentano: standardizzazione, robustezza, semplicità di manutenzione, facilità di messa in opera, basso costo.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di un motore asincrono si basa sulla creazione di una corrente indotta in un conduttore quando questo interrompe le linee di forza di un campo magnetico; da qui deriva il nome di "motore a induzione". L'azione combinata di questa corrente indotta e del campo magnetico crea una forza motrice sul rotore del motore.

Supponiamo una spira ABCD in corto-circuito, situata in un campo magnetico B, e mobile intorno ad un asse xy.

Se ad esempio facciamo ruotare il campo magnetico in senso orario, la spira viene sottoposta ad un flusso variabile e diventa sede di una forza elettromotrice indotta che genera una corrente indotta i (legge di Faraday).

Secondo la legge di Lenz, il senso della corrente è tale da opporsi per la sua azione elettromagnetica alla causa che lo ha generato. Ciascuno dei due conduttori è quindi sottoposto ad una forza F di Laplace (di Lorentz, per gli anglosassoni), di senso opposto al suo spostamento relativo rispetto al campo induttore.

La regola delle tre dita della mano destra (azione del campo su una corrente, Fig. 2) consente di definire facilmente il senso della forza F applicata a ogni conduttore.

Il pollice è posizionato nel senso del campo dell'induttore. L'indice indica il senso della forza. Il medio è posizionato nel senso della corrente indotta. La spira è quindi sottoposta ad una coppia che provoca la sua rotazione nello stesso senso del campo induttore, detto campo rotante. La spira inizia a ruotare e la coppia elettromotrice prodotta equilibra la coppia resistente.

Creazione del campo rotante

Tre avvolgimenti, geometricamente scalati di 120°, vengono alimentati ciascuno da una delle fasi di una rete trifase alternata.

Gli avvolgimenti sono percorsi da correnti alternate che presentano lo stesso sfasamento elettrico e che producono ciascuno un campo magnetico alternato sinusoidale. Questo campo, sempre diretto in base allo stesso asse, è massimo quando la corrente nell'avvolgimento è massima.

Il campo generato da ogni avvolgimento è la risultante di due campi che girano in senso inverso e aventi ognuno come valore costante la metà del valore del campo massimo. Ad un istante t1 qualunque del periodo, i campi prodotti da ciascun avvolgimento possono venire rappresentati come segue:

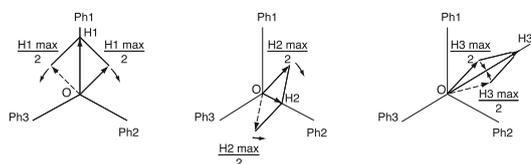


Fig. 4 Campi generati dalle tre fasi

- il campo H1 diminuisce. I due campi che lo costituiscono tendono ad allontanarsi dall'asse OH1,
- il campo H2 aumenta. I due campi che lo costituiscono tendono ad avvicinarsi all'asse OH2,
- il campo H3 aumenta. I due campi che lo costituiscono tendono ad avvicinarsi all'asse OH3.

Il flusso corrispondente alla fase 3 è negativo. Il campo è quindi diretto nel senso opposto alla bobina.

Sovrapponendo i tre diagrammi, constatiamo che:

- i tre campi che ruotano in senso antiorario sono spostati di 120° e si annullano,
- i tre campi che ruotano in senso orario si sovrappongono. Questi campi si uniscono per formare il campo rotante di ampiezza costante  $3H_{max}/2$ . È un campo a coppia di poli,
- questo campo effettua un giro durante un ciclo della corrente d'alimentazione. La sua velocità dipende dalla frequenza della rete (f) e dal numero di coppie di poli (p) e viene chiamata "velocità di sincronismo".

### ■ Scorrimento

La coppia motore esiste solo se una corrente indotta circola nella spira. Questa coppia è determinata dalla corrente che circola nella spira e che può essere presente solo se esiste una variazione di flusso nella spira. Quindi è necessario che ci sia una differenza di velocità tra la spira e il campo rotante. È il motivo per cui un motore elettrico che funziona in base al principio appena descritto viene chiamato "motore asincrono". La differenza tra la velocità di sincronismo ( $N_s$ ) e quella della spira ( $N$ ) è detta "scorrimento" (g) e si esprime in % della velocità di sincronismo.

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

In funzionamento, la frequenza della corrente rotorica si ottiene moltiplicando la frequenza di alimentazione per lo scorrimento. All'avviamento la frequenza della corrente rotorica è quindi massima e pari a quella della corrente statorica. La frequenza della corrente statorica diminuisce progressivamente nel corso della messa in fase del motore.

Lo scorrimento in regime stabilito varia in base al carico del motore e in base al livello della tensione d'alimentazione applicato.

Sarà minore quanto più il motore sarà a carico ridotto ed aumenterà se il motore sarà alimentato al di sotto della tensione nominale corrispondente alla frequenza d'alimentazione.

### ■ Velocità di sincronismo

La velocità di sincronismo dei motori asincroni trifase è proporzionale alla frequenza della corrente d'alimentazione e inversamente proporzionale al numero di coppie di poli che compongono lo statore.

Ad esempio:  **$N_s = 60 f/p$**

Con:  $N_s$ : velocità di sincronismo in gr/min,  
 $f$ : frequenza in Hz,  
 $p$ : numero di coppie di poli.

Per le frequenze industriali di 50 Hz e 60 Hz e per la frequenza di 100 Hz, le velocità di rotazione del campo rotante, o velocità di sincronismo, in funzione del numero di poli, sono indicate nella tabella della *figura 5*.

Questo non significa che sia sempre possibile aumentare la velocità di un motore asincrono alimentandolo con una frequenza superiore a quella per la quale è previsto, anche se la tensione è adatta.

Conviene in effetti verificare se le caratteristiche meccaniche ed elettriche proprie del motore lo consentono.

Numero di poli	Velocità di rotazione in gr/mn		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

↑ Fig. 5 Velocità di sincronismo funzione del numero di poli e della frequenza della corrente

Come già detto, tenuto conto dello scorrimento, le velocità di rotazione a carico dei motori asincroni sono leggermente inferiori alle velocità di sincronismo indicate nella tabella.

□ **Composizione**

Un motore asincrono trifase a gabbia è composto da due parti principali: un induttore o statore e un indotto o rotore.

□ **Lo statore**

È la parte fissa del motore. Un'armatura in ghisa o in lega leggera racchiude una corona di lamierini sottili (dell'ordine di 0,5 mm di spessore) in acciaio al silicio. I lamierini vengono isolati tra loro mediante ossidazione o con vernice isolante. La "composizione lamellare" del circuito magnetico riduce le perdite mediante isteresi e mediante correnti di Foucault.

I lamierini sono dotati di incastri nei quali vengono posizionati gli avvolgimenti dello statore destinati a produrre il campo rotante (tre avvolgimenti nel caso di un motore trifase).

Ogni avvolgimento è composto da diverse bobine. Il modo di accoppiamento di queste bobine tra loro definisce il numero di coppie di poli del motore e quindi la velocità di rotazione.

□ **Il rotore**

È la parte mobile del motore. Come il circuito magnetico dello statore, è costituito da un impilaggio di lamierini sottili isolati tra loro e che formano un cilindro inchiodato sull'albero del motore.

A seconda della tecnologia del rotore è possibile distinguere due tipi di motori asincroni: quelli il cui rotore è detto "a gabbia", e quelli il cui rotore bobinato è detto "ad anelli".

■ **I diversi tipi di rotore**

□ **Il rotore a gabbia**

Esistono diversi tipi di rotore a gabbia, tutti progettati come l'esempio illustrato nella *figura 6*.

I diversi tipi di rotore a gabbia, dal meno diffuso al più comunemente utilizzato sono:

• **Rotore a gabbia resistente**

Il rotore resistente è molto diffuso soprattutto in gabbia singola (vedere più avanti la definizione di motore a gabbia singola). Di solito la gabbia è racchiusa tra due anelli in inox resistente (lega particolare, sezione ridotta, ecc...).

Questi motori presentano un forte scorrimento alla coppia nominale.

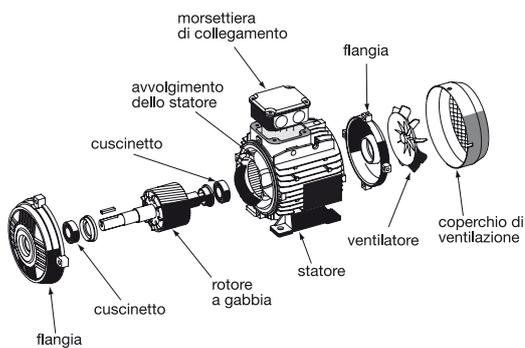
La coppia di avviamento è elevata e la corrente di avviamento è debole (↔ *Fig. 7*).

A causa delle perdite nel rotore, il loro rendimento non è buono.

Questi motori vengono generalmente utilizzati in applicazioni per le quali è importante avere uno scorrimento, ad esempio per regolare la velocità in funzione della coppia:

- caso di più motori collegati meccanicamente sui quali deve essere ripartito il carico, quali treni di laminazione a rulli, azionamento gru di sollevamento,
- funzione avvolgitore-svolgitore con motori a coppia Alquist previsti a tale scopo,
- necessità di una forte coppia di avviamento con una corrente di spunto limitata (paranchi o nastri trasportatori).

Consentono la variazione di velocità tramite modifica della sola tensione, ma questa applicazione tende a scomparire a vantaggio dei convertitori di frequenza. La maggior parte dei motori sono autoventilati, anche se alcuni motori con rotore a gabbia resistente sono motorizzati (motorizzazione separata dal ventilatore).



↑ Fig. 6 Scoppio di un motore a rotore a gabbia

• **Rotore a gabbia singola**

Nei fori o negli incastrati disposti sulla parte esterna del rotore (cilindro costituito da lamiere impilate) sono posizionati alcuni conduttori collegati ad ogni estremità da una corona metallica e sui quali si esercita la coppia motore generata dal campo rotante. Perchè la coppia sia regolare i conduttori vengono leggermente inclinati rispetto all'asse del motore. L'insieme ha l'aspetto di una gabbia di scoiattolo, da cui deriva il nome di questo tipo di rotore.

La gabbia di scoiattolo è generalmente costituita da un unico pezzo (soltanto i motori molto grandi vengono realizzati utilizzando dei conduttori inseriti negli incastrati). L'alluminio viene iniettato sotto pressione e le alette di raffreddamento, colate durante la stessa operazione, garantiscono la messa in cortocircuito dei conduttori dello statore.

Questi motori hanno una coppia di avviamento relativamente bassa e la corrente consumata alla messa sotto tensione è notevolmente superiore alla corrente nominale (⇨ Fig. 7).

*I motori asincroni motoventilati a forte scorrimento vengono utilizzati nella variazione di velocità; la loro corrente al bloccaggio è vicina alla corrente nominale. La loro caratteristica coppia/velocità è importante. Con un'alimentazione variabile, è possibile adattare questa caratteristica e regolare la coppia motore in funzione della trazione desiderata.*

D'altro canto hanno uno scorrimento debole alla coppia nominale e vengono utilizzati principalmente in forte potenza per migliorare il rendimento delle installazioni su pompe e ventilatori. Vengono anche associati a convertitori di frequenza a velocità variabile risolvendo perfettamente i problemi di coppia e di corrente di avviamento.

• **Rotore a gabbia doppia**

È composto da due gabbie concentriche, una esterna con maggiore valore resistivo e una sezione minore; l'altra interna, di resistenza minore e con una sezione maggiore

- All'inizio dell'avviamento, dal momento che le correnti rotoriche hanno una frequenza elevata, l'effetto pelle risultante fa sì che tutta la corrente rotorica circoli alla periferia del rotore e quindi in una sezione ridotta dei conduttori. La coppia prodotta dalla gabbia esterna resistente è elevata e lo spunto di corrente ridotto (⇨ Fig. 7).

- A fine avviamento la frequenza nel rotore diminuisce, il passaggio del flusso attraverso la gabbia interna risulta più facile. Il motore si comporta quindi come se fosse composto da una sola gabbia poco resistente. In regime stabilito, la velocità è solo leggermente inferiore a quella del motore a gabbia singola.

• **Rotore a incastrati profondi**

È la realizzazione standard. I conduttori sono saldati negli incastrati del rotore che hanno una forma trapezoidale con il lato corto del trapezio all'esterno del rotore.

Il funzionamento è analogo a quello del motore a gabbia doppia e l'intensità della corrente del rotore varia in modo inversamente proporzionale alla sua frequenza.

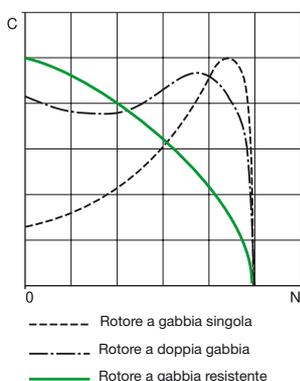
Quindi:

- All'inizio dell'avviamento la coppia è elevata e lo spunto di corrente ridotto.
- In regime stabilito la velocità è sostanzialmente quella del motore a gabbia singola.

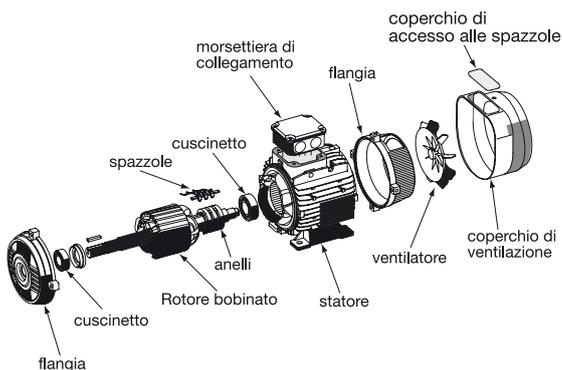
□ **Il rotore bobinato (rotore ad anelli)**

Negli incastrati all'estremità del rotore sono posizionati degli avvolgimenti uguali a quelli dello statore (⇨ Fig. 8).

Il rotore è generalmente trifase. Un'estremità di ciascun avvolgimento è collegata a un punto comune (accoppiamento stella). Le estremità libere possono essere collegate su un'interfaccia centrifuga o su tre anelli in rame, isolati e integrati al rotore.



↑ Fig. 7 Curve coppia/velocità in base ai tipi di rotore a gabbia (a  $U_n$ )



↑ Fig. 8 Esploso di un motore a rotore ad anelli

Sugli anelli scrono delle spazzole in grafite collegate al dispositivo di avviamento.

In funzione del valore delle resistenze inserite nel circuito rotorico, questo tipo di motore può sviluppare una coppia di avviamento che raggiunge fino a 2,5 volte la coppia nominale.

La corrente all'avviamento è sensibilmente proporzionale alla coppia sviluppata sull'albero motore.

Questa soluzione viene sempre meno utilizzata, a vantaggio delle soluzioni elettroniche, associate ad un motore a gabbia standard. Queste consentono infatti di risolvere i problemi di manutenzione (sostituzione delle spazzole d'alimentazione del rotore, manutenzione delle resistenze di regolazione), di ridurre l'energia dissipata nelle resistenze e anche di migliorare notevolmente il rendimento dell'installazione.

## 3.2 I motori monofase

*Il motore monofase, anche se meno utilizzato nell'industria rispetto al motore trifase, rappresenta una parte non trascurabile nelle applicazioni bassa potenza e nelle applicazioni del terziario che utilizzano la rete monofase 230 V.*

### ■ I motori monofase a gabbia

A pari potenza, sono più voluminosi dei motori trifase.

Inoltre, il loro rendimento e il loro coseno  $\varphi$  sono molto più bassi che nel caso dei motori trifase e variano considerabilmente in base alla potenza da una parte e al costruttore dall'altra.

In Europa, il motore monofase è utilizzato relativamente poco nel settore industriale, mentre negli Stati Uniti i motori monofase fino a una decina di KW sono di uso corrente.

È possibile alimentare un motore monofase a gabbia a partire da un convertitore di frequenza; tuttavia il numero di costruttori che propone questo tipo di prodotto è limitato.

#### □ Composizione

Il motore monofase, come il motore trifase, è composto da due parti: lo statore e il rotore.

##### • Lo statore

Comprende un numero pari di poli i cui avvolgimenti sono collegate sulla rete di alimentazione.

##### • Il rotore

Solitamente è a gabbia di scoiattolo.

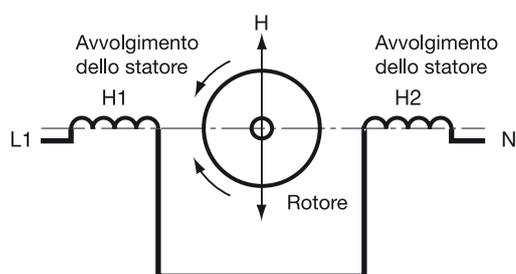
#### □ Principio di funzionamento

Consideriamo uno statore che comprenda due avvolgimenti collegati sulla rete di alimentazione L1 e N (↔ Fig. 9). La corrente alternata monofase genera nel rotore un campo alternato semplice H che è la sovrapposizione di due campi rotanti H1 e H2 di stesso valore e senso contrario.

Poiché all'arresto lo statore è alimentato, questi campi presentano lo stesso scorrimento rispetto al rotore e di conseguenza producono due coppie uguali e opposte.

Il motore non può essere avviato.

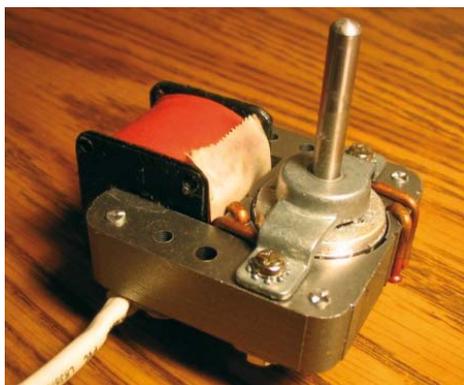
Un impulso meccanico sul rotore provoca una disegualianza degli scorrimenti. Una delle coppie diminuisce mentre l'altra aumenta. La coppia risultante provoca l'avviamento del motore nel senso in cui è stato avviato.



↑ Fig. 9 Principio di funzionamento di un motore asincrono monofase

## 3.2 I motori monofase

## 3.3 I motori sincroni



↑ Fig. 10 Motore ad anelli di sfasamento

Per risolvere questo problema di coppia durante la fase di avviamento, viene inserito nello statore un secondo avvolgimento sfasato di  $90^\circ$ .

Questa fase ausiliaria viene alimentata da un dispositivo di sfasamento (condensatore o induttanza). Una volta effettuato l'avviamento, la fase ausiliaria può essere eventualmente eliminata mediante un contatto centrifugo.

Un'altra soluzione consiste nell'utilizzare degli anelli di sfasamento (↔ Fig. 10) che provocano uno sfasamento del campo e consentono l'avviamento del motore. Questo tipo di motore viene utilizzato solo nelle piccole potenze (100 W max).

*Un motore trifase di bassa potenza (4kw max circa) può anche essere utilizzato in monofase. Il condensatore di avviamento viene inserito in serie o in parallelo con l'avvolgimento non utilizzato. Questa disposizione può essere considerata solo un palliativo, poiché le prestazioni del motore diminuiscono notevolmente. Ciascun costruttore indica nel proprio catalogo lo schema da realizzare, i valori dei condensatori da utilizzare e il declassamento da applicare.*



↑ Fig. 11 Motori universali

### ■ I motori monofase universali

Poco utilizzato nel settore industriale, è il motore più fabbricato al mondo, diffuso nel campo degli elettrodomestici e in quello delle attrezzature portatili.

La sua costruzione è analoga a quella di un motore a corrente continua a eccitazione seriale (↔ Fig. 11) alimentato a corrente alternata.

Nella macchina il flusso viene invertito contemporaneamente alla tensione. La coppia che si produce è quindi sempre nello stesso senso.

Comprende uno statore bobinato e un rotore con avvolgimenti collegati a degli anelli. La commutazione è assicurata da un collettore e da spazzole.

La potenza massima è di circa 1000 W e la velocità di rotazione a vuoto è dell'ordine di 10000 gr/mn. Questi motori sono adatti ad un utilizzo intermittente e il loro rendimento è mediocre.

## 3.3 I motori sincroni

### ■ I motori sincroni a rotore magnetizzato

#### □ Composizione

Il motore sincrono è costituito, come il motore asincrono, da uno statore e da un rotore separati dal traferro. Si differenzia dal motore asincrono per il fatto che il flusso nel traferro non è dovuto ad una componente della corrente dello statore. È creato da magneti o dalla corrente indotta, fornita da un'alimentazione a corrente continua esterna, che alimenta un avvolgimento posizionato nel rotore.

#### • Lo statore

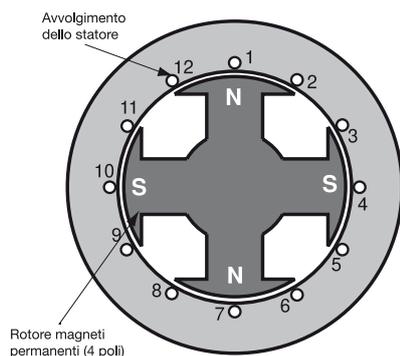
Lo statore comprende una carcassa e un circuito magnetico solitamente costituiti da lamiera di acciaio al silicio e da un avvolgimento trifase analogo a quello di un motore asincrono, alimentato in corrente alternata trifase per produrre un campo rotante.

#### • Il rotore

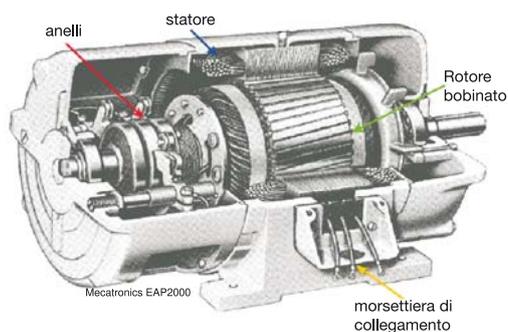
Il rotore presenta dei magneti o delle bobine di eccitazione attraversati da una corrente continua che creano dei poli Nord e Sud intercalati. Il rotore, a differenza delle macchine asincrone, gira senza scorrimento alla velocità del campo rotante.

Sono quindi disponibili due tipi diversi di motori sincroni: i motori a magneti e i motori a rotore bobinato.

- Per i primi il rotore del motore è dotato di magneti permanenti (↔ Fig. 12) solitamente in terra cruda per ottenere un campo elevato in un volume ridotto. Lo statore comprende degli avvolgimenti trifase.



↑ Fig. 12 Motore a magneti permanenti



↑ Fig. 13 Motore sincrono a rotore bobinato

Questi motori accettano correnti di sovraccarico importanti per effettuare accelerazioni molto rapide. Sono sempre associati ad un variatore di velocità; questi insiemi moto-variatori sono destinati a mercati specifici come quelli dei robot o delle macchine utensili per i quali sono fondamentali il volume ridotto, le accelerazioni e la banda passante.

- L'altro tipo di motori sincroni sono a rotore bobinato (⇔ Fig.13), L'avvolgimento del rotore è accessibile tramite anelli e pattini, ma vi sono altri dispositivi come ad esempio i diodi rotanti.

Queste macchine sono reversibili e possono funzionare come generatori (alternatori) o motori. Per molto tempo queste macchine sono state utilizzate soprattutto con funzione di alternatori. Il loro utilizzo come motore era confinato alle applicazioni che richiedevano l'azionamento dei carichi a velocità fissa, a scapito delle variazioni relativamente importanti della coppia resistente.

La capacità delle macchine sincrone di fornire potenza reattiva e lo sviluppo dei convertitori di frequenza diretti (del tipo ciclo-convertitore) o indiretti funzionanti in commutazione naturale, ha permesso di realizzare degli azionatori elettrici a velocità variabile performanti, affidabili e particolarmente competitivi quando la potenza supera il megawatt.

Anche se è possibile trovare motori sincroni utilizzati nel settore industriale nella gamma di potenza da 150 kW a 5 MW, gli azionatori elettrici con motori sincroni si sono imposti soprattutto oltre i 5 MW, nella maggior parte dei casi in associazione ai variatori di velocità.

#### □ Caratteristiche di funzionamento

La coppia motore della macchina sincrona è proporzionale alla tensione alle sue estremità, mentre quella della macchina asincrona è proporzionale al quadrato di questa tensione.

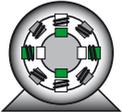
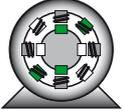
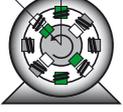
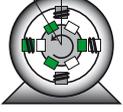
Contrariamente al motore asincrono, il motore sincrono può lavorare con un fattore di potenza pari all'unità o molto vicino a questa.

Il motore sincrono, rispetto al motore asincrono, beneficia quindi di un certo numero di vantaggi particolari per quanto riguarda l'alimentazione tramite rete a tensione e frequenza costanti:

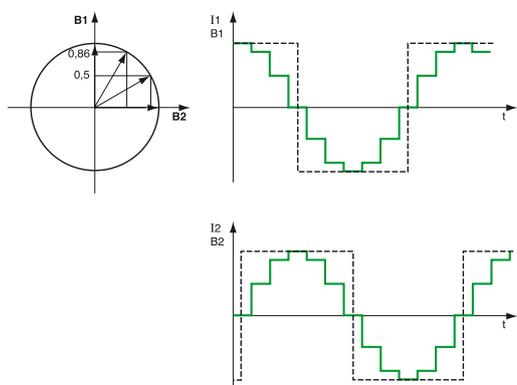
- la velocità del motore è costante, con qualsiasi carico,
- può fornire potenza reattiva e consentire il miglioramento del fattore di potenza di una linea,
- può supportare, senza sganciare, cadute di tensione relativamente importanti (dell'ordine del 50 %).

Tuttavia, il motore sincrono alimentato direttamente dalla rete di distribuzione di energia a tensione e frequenza costanti presenta due inconvenienti:

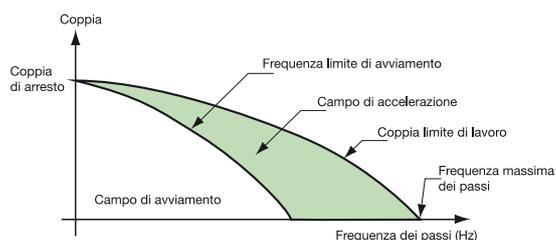
- presenta difficoltà di avviamento se il motore non è associato ad un variatore di velocità; l'avviamento deve essere effettuato a vuoto, sia in caso di avviamento diretto per i piccoli motori, sia con motore che lo aziona ad una velocità vicina al sincronismo prima dell'accoppiamento diretto sulla rete,
- potrebbe sganciare se la coppia resistente supera la sua coppia elettromagnetica massima e, in questo caso, sarà necessario ripetere l'intero processo di avviamento.

Tipo	Bipolare a magneti permanente	Unipolare a riluttanza variabile	Bipolare ibrido
Caratteristiche	2 fasi, 4 fili	4 fasi, 8 fili	2 fasi 14 fili
N° passo/giri	8	24	12
Fasi di funzionamento			
Passo 1			
Stato intermedio			
Passo 2			

↑ Fig. 14 I tre tipi di motore passo-passo



↑ Fig. 15 Livelli di corrente applicate alle bobine di un motore passo a passo per ridurre il passo



↑ Fig. 16 Coppia massima in funzione della frequenza del passo

## ■ Altri tipi di motori sincroni

Per concludere il panorama sui motori industriali, citiamo i motori lineari, i motori asincroni sincronizzati e i motori passo-passo.

### □ I motori lineari

La loro struttura è identica a quella dei motori rotanti di tipo sincrono. Sono costituiti da uno statore (piastra) e da un rotore (asta di avanzamento) sviluppati in linea. Generalmente la piastra si sposta su una guida di scorrimento lungo un'asta di avanzamento.

Questo tipo di motore non ha elementi cinematici intermedi per la trasformazione del movimento e garantisce quindi assenza di gioco e di usura meccanica.

### □ I motori asincroni sincronizzati

Sono motori a induzione. Durante la fase di avviamento, il motore funziona in modo asincrono e quando ha raggiunto una velocità vicina al sincronismo, passa in modo sincrono.

Se il carico meccanico è elevato il motore non può girare in modo sincrono e il funzionamento torna in modo asincrono.

Questa particolarità è dovuta alla costruzione speciale del rotore generalmente per motori di bassa potenza.

### □ I motori passo-passo

Il motore passo-passo è un motore che gira in funzione degli impulsi elettrici che alimentano gli avvolgimenti. In funzione dell'alimentazione elettrica, può essere:

- unipolare se gli avvolgimenti sono sempre alimentati nello stesso senso da un'unica tensione, da cui il nome di unipolare,
- bipolare se gli avvolgimenti sono alimentati sia in un senso che nell'altro. Creano di volta in volta un polo Nord e un polo Sud, da cui il nome di bipolare.

I motori passo-passo possono essere a riluttanza variabile, a magneti o una combinazione dei due (⇔ Fig. 14).

L'angolo di rotazione minimo tra due modifiche degli impulsi elettrici si chiama "passo". Un motore è caratterizzato dal numero di passi per giro (ossia per 360°). I valori correnti sono 48, 100 o 200 passi per giro.

La rotazione del motore avviene quindi in modo discontinuo.

Per migliorare la risoluzione il numero di passi può essere aumentato in modo puramente elettronico (funzionamento in micro passi). Questa soluzione viene descritta in dettaglio nel capitolo dedicato alla variazione di velocità.

Facendo variare la corrente (⇔ Fig. 15) nelle bobine, si crea un campo risultante che scorre da un passo all'altro provocando la riduzione effettiva del passo.

Alcuni circuiti per micro passi moltiplicano per 500 il numero di passi di un motore che diventerà, ad esempio, da 200 a 100000 passi.

L'elettronica consente di comandare la cronologia di questi impulsi e di conteggiarne il numero. I motori passo-passo e il loro circuito di comando consentono quindi la rotazione di un asse in modo molto preciso per quanto riguarda velocità e ampiezza.

Il loro funzionamento è quindi simile a quello di un motore sincrono quando l'albero è in rotazione continua; questo corrisponde a dei limiti specifici di frequenza, di coppia e d'inerzia del carico azionato (⇔ Fig. 16).

Se questi limiti vengono superati, il motore sgancia e quindi si arresta.

Un posizionamento angolare preciso è possibile senza anello di misura. Questi motori, generalmente di potenza al di sotto del kW, sono, per i piccoli modelli, alimentati a bassa tensione. Nel settore industriale vengono utilizzati per applicazioni di posizionamento, quali la regolazione di limitatori di posizione per taglio in lunghezza, comando valvole, dispositivi ottici o di misura, caricamento/scaricamento presse o macchine utensili, ecc...

La semplicità di questa soluzione la rende particolarmente economica (nessun anello di reazione). I motori passo-passo a magneti presentano anche il vantaggio di una coppia all'arresto in assenza di alimentazione. Per garantire un comando efficace è tuttavia necessario che la parte elettronica conosca e acquisisca la posizione iniziale del corpo mobile.

### 3.4 I motori a corrente continua



↑ Fig. 17 Motore a corrente continua

I motori a corrente continua (↔ Fig.17) ad eccitazione separata sono ancora utilizzati per l'azionamento delle macchine a velocità variabile, nonostante la grande concorrenza dei motori asincroni associati a convertitori di frequenza.

Molto facili da miniaturizzare, si impongono nelle potenze molto basse e nelle basse tensioni. Si prestano anche molto bene, fino a potenze rilevanti (diversi megawatt), alla variazione di velocità con tecnologie elettroniche semplici e poco onerose per prestazioni elevate (gamma di variazione correntemente utilizzata da 1 a 100).

Le loro caratteristiche consentono anche una regolazione precisa della coppia, in motore o in generatore. La loro velocità di rotazione nominale, non collegata alla frequenza della rete, si adatta facilmente a tutte le applicazioni.

Sono tuttavia meno robusti e più costosi dei motori asincroni e richiedono una manutenzione regolare del collettore e delle spazzole.

#### ■ Composizione

Un motore a corrente continua è composto dai seguenti elementi:

##### □ L'induttore o statore

È un elemento di circuito magnetico immobile sul quale, per produrre un campo magnetico, è bobinato un avvolgimento. L'elettromagnete così realizzato presenta tra i poli una cavità cilindrica. L'avvolgimento statorico può essere sostituito da magneti permanenti; questo vale in generale per i motori di bassa potenza.

##### □ L'indotto o rotore

È un cilindro in lamiera magnetiche isolate tra loro e perpendicolari all'asse del cilindro. L'indotto si muove intorno al suo asse ed è separato dall'induttore mediante un intraferro. Intorno, sono regolarmente ripartiti alcuni conduttori.

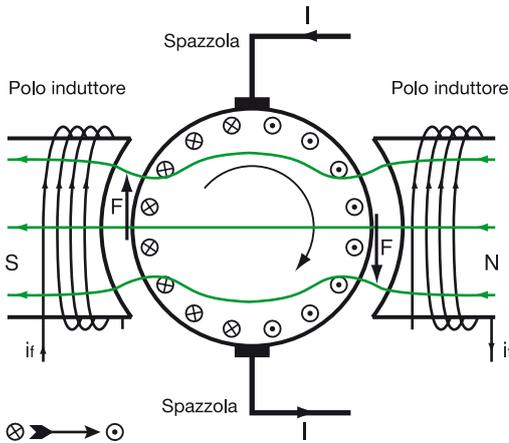
##### □ Il collettore e le spazzole

Il collettore è parte integrante dell'indotto, le spazzole sono fisse. I conduttori dell'indotto sono alimentati da questo dispositivo.

#### ■ Principio di funzionamento

Quando l'induttore è alimentato crea un campo magnetico (flusso di eccitazione) nel traferro, diretto in base ai raggi dell'indotto.

Questo campo magnetico "entra" nell'indotto dal lato del polo Nord dell'induttore ed "esce" dall'indotto dal lato del polo Sud dell'induttore.



↑ Fig. 18 Produzione di una coppia in un motore a corrente continua

Quando l'indotto è alimentato i suoi conduttori, posizionati sotto lo stesso polo induttore (dallo stesso lato delle spazzole), vengono percorsi da correnti di senso uguale e quindi, secondo la legge di Laplace, sono sottoposti ad una forza. I conduttori posizionati sotto l'altro polo sono sottoposti ad una forza della stessa intensità e di senso opposto. Le due forze creano una coppia che fa ruotare l'indotto del motore (↔ Fig. 18).

Quando l'indotto del motore è alimentato a tensione continua o raddrizzata  $U$  e il rotore è in rotazione, si produce una forza contro-elettromotrice  $E$  e il cui valore è  $E = U - RI$ .

$RI$  rappresenta la caduta di tensione ohmica nell'indotto.

La forza contro-elettromotrice  $E$  è collegata alla velocità e all'eccitazione dalla relazione

$$E = k \omega \phi$$

ove:

- $k$  è una costante propria del motore,
- $\omega$  la velocità angolare,
- $\phi$ , il flusso.

Questo rapporto mostra che a eccitazione costante, la forza contro-elettromotrice  $E$ , proporzionale  $\omega$ , è un'immagine della velocità.

La coppia è collegata al flusso induttore e alla corrente nell'indotto dalla relazione:

$$C = k \phi I$$

Riducendo il flusso, la coppia diminuisce.

Due metodi consentono di far crescere la velocità:

- aumentare la forza contro-elettromotrice  $E$ , quindi la tensione d'alimentazione a eccitazione costante: si tratta del funzionamento detto "a coppia costante",
  - diminuire il flusso di eccitazione, quindi la corrente di eccitazione, mantenendo costante la tensione d'alimentazione: si tratta del funzionamento detto in regime "deflussato" o "a potenza costante".
- Questo funzionamento impone che la coppia diminuisca con l'aumento della velocità (↔ Fig. 19).

D'altra parte, per rapporti di deflussaggio elevati, questo funzionamento richiede motori specifici (adatti meccanicamente o elettricamente) per evitare problemi di commutazione.

Il funzionamento di un motore a corrente continua è reversibile:

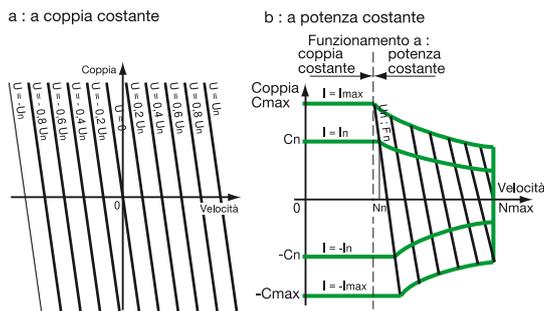
- se il carico si oppone al movimento di rotazione (carico detto resistente), l'apparecchio fornisce una coppia e funziona come motore,
- se il carico è tale da far ruotare l'apparecchio (carico azionante) o si oppone al rallentamento (fase di arresto di un carico che presenta una certa inerzia), l'apparecchio fornisce energia elettrica e funziona come generatore.

### ■ Diversi tipi di motori a corrente

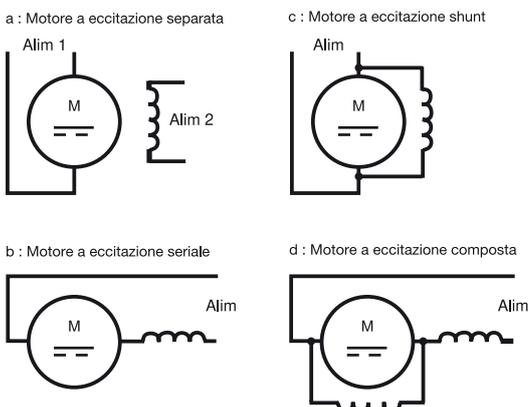
#### □ Continua a rotore bobinato (↔ Fig.20)

- a e c motore a eccitazione parallela (separata o shunt)

Gli avvolgimenti indotti e induttore sono collegati in parallelo o alimentati da due sorgenti di tensioni diverse per questioni di adattamento alle caratteristiche della macchina (es.: tensione d'indotto 400 volt e tensione d'induttore 180 volt). L'inversione del senso di rotazione si ottiene mediante inversione di uno o dell'altro avvolgimento, generalmente mediante inversione della tensione d'indotto per motivi riguardanti le costanti di tempo molto più ridotte. La maggior parte dei variatori bidirezionali per motore a corrente continua lavorano in questo modo.



↑ Fig. 19 Curve coppia/velocità di un motore a eccitazione separata



↑ Fig. 20 Schemi dei diversi tipi di motori a corrente continua

• **b motore a eccitazione seriale**

Questo motore è di costruzione simile a quella del motore a eccitazione separata. L'avvolgimento induttore è collegato in serie con l'avvolgimento indotto, da cui deriva il suo appellativo. L'inversione del senso di rotazione si ottiene indifferentemente mediante inversione delle polarità dell'indotto o dell'induttore. Questo motore viene utilizzato essenzialmente in trazione, in particolare sui carrelli alimentati da batterie di accumulatori. Nel campo della trazione ferroviaria, le vecchie motrici del TGV utilizzavano questo tipo di motore, mentre quelle più recenti utilizzano motori asincroni.

• **d motore a eccitazione seriale-parallela (composta o "compound")**

Questa tecnologia consente di riunire le qualità del motore a eccitazione seriale e del motore a eccitazione parallela. Questo motore comprende due avvolgimenti. Uno è in parallelo con l'indotto (avvolgimento shunt) o è realizzato sotto forma di un avvolgimento di eccitazione separato ed è percorso da una corrente bassa rispetto alla corrente di lavoro. L'altro è in serie. Il motore è a flusso aggiuntivo se gli Ampere-spire dei due avvolgimenti aggiungono i loro effetti. Nel caso contrario è a flusso sottrattivo, ma questo tipo di montaggio viene utilizzato solo raramente poichè porta ad un funzionamento instabile per carichi elevati.

**3.5 L'utilizzo dei motori asincroni trifase**

■ **Motori a gabbia**

□ **Conseguenze di una variazione di tensione**

• **Effetto sulla corrente di avviamento**

La corrente di avviamento varia con la tensione d'alimentazione. Se quest'ultima è più elevata durante la fase di avviamento, la corrente consumata al momento della messa sotto tensione aumenta. Questo aumento di corrente sarà aggravato dalla saturazione della macchina.

• **Effetto sulla velocità**

In caso di variazioni di tensione, la velocità di sincronismo non viene modificata. Su un motore in carico, tuttavia, un aumento della tensione genera una leggera diminuzione dello scorrimento. Concretamente, questa proprietà non è utilizzabile poichè, per la saturazione del circuito magnetico dello statore, la corrente consumata aumenta notevolmente e potrebbe verificarsi un riscaldamento anormale della macchina, anche su un funzionamento a basso carico. In compenso, se la tensione di alimentazione diminuisce, lo scorrimento aumenta e, per fornire la coppia, la corrente consumata aumenta, con il rischio di riscaldamento che ne risulta.

D'altra parte, poichè la coppia massima diminuisce come il quadrato della tensione, potrebbe verificarsi uno sgancio in caso di notevole diminuzione della tensione.

□ **Conseguenze di una variazione di frequenza**

• **Effetto sulla coppia**

Come in tutte le macchine elettriche, la coppia del motore asincrono è data da  $C = K I \phi$

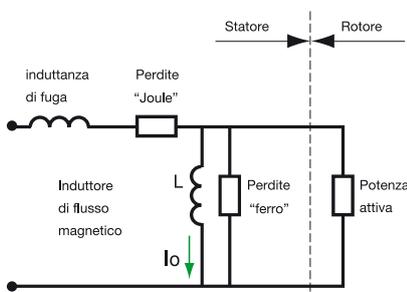
(K = coefficiente costante dipendente dalla macchina). (↔ Fig. 21)

Nello schema equivalente del disegno 21, l'avvolgimento L è quello che produce il flusso e  $I_0$  è la corrente di magnetizzazione. Si osserverà che lo schema equivalente di un motore asincrono è identico a quello di un trasformatore ed entrambi gli apparecchi sono caratterizzati dalle stesse equazioni.

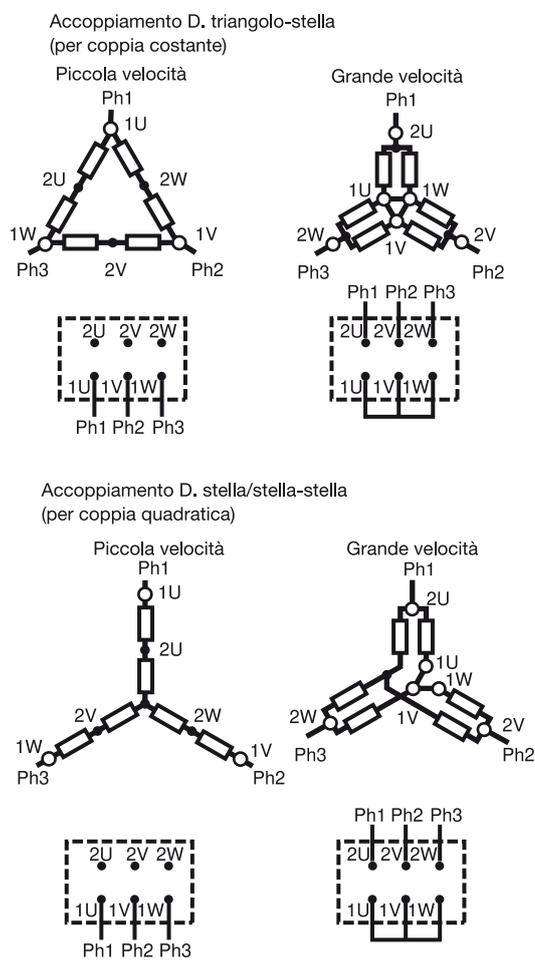
Come prima approssimazione, trascurando la resistenza davanti all'induttanza di magnetizzazione (ossia per frequenze di qualche Hertz) la corrente  $I_0$  verrà espressa con:  $I_0 = U / 2\pi L f$  e il flusso verrà espresso con:  $\phi = k I_0$

La coppia della macchine verrà quindi espressa con:

$C = K k I_0 I$ .  $I_0$  e  $I$  sono le correnti nominali per le quali il motore è calibrato.



↑ Fig. 21 Schema equivalente di un motore asincrono



↑ Fig. 22 Diversi tipi di accoppiamento Dahlander

Per non superare i limiti, è necessario mantenere lo al suo valore nominale; questo è possibile soltanto se il rapporto  $U/f$  rimane costante.

Di conseguenza è possibile ottenere la coppia e le correnti nominali fino a quando la tensione d'alimentazione  $U$  potrà essere regolata in funzione della frequenza.

Quando questa regolazione non sarà più possibile, la frequenza potrà essere sempre aumentata, ma la corrente lo e la coppia utile diminuiranno, poiché non è possibile superare in modo continuativo la corrente nominale della macchina senza rischi di riscaldamento.

Per ottenere un funzionamento a coppia costante con qualunque velocità è necessario mantenere il rapporto  $U/f$  costante; questo è possibile con un convertitore di frequenza.

• **Effetto sulla velocità**

La velocità di rotazione di un motore asincrono è proporzionale alla frequenza della tensione di alimentazione. Questa proprietà viene spesso utilizzata per far funzionare a velocità elevata motori progettati a tale scopo, ad esempio a 400 Hz (rettificatrici, apparecchiature mediche o chirurgiche, ecc...). È inoltre possibile ottenere una velocità variabile mediante regolazione della frequenza, ad esempio da 6 a 50 Hz (rulli trasportatori, apparecchi di sollevamento, ecc...).

□ **Regolazione di velocità dei motori asincroni trifase**

Per lungo tempo le possibilità di regolazione della velocità dei motori asincroni sono state molto ridotte. La maggior parte delle volte i motori a gabbia venivano utilizzati alla loro velocità nominale.

Praticamente solo i motori ad accoppiamento di poli o ad avvolgimenti separati, ancora oggi frequentemente utilizzati, consentivano di disporre di più velocità fisse.

Con i convertitori di frequenza, i motori a gabbia sono oggi correntemente comandati a velocità variabile e possono essere anche utilizzati in applicazioni fino ad ora riservate ai motori a corrente continua.

□ **Motori ad accoppiamento di poli**

Come abbiamo visto in precedenza, la velocità di un motore a gabbia dipende dalla frequenza della rete di alimentazione e dal numero di coppie di poli. È quindi possibile ottenere un motore a due o più velocità creando nello statore delle combinazioni di bobinature corrispondenti a numeri di poli diversi.

Questo tipo di motore consente solo rapporti di velocità 1 a 2 (4 e 8 poli, 6 e 12 poli, ecc.). Comprende sei morsetti (↔ Fig.22).

Per una delle velocità, la rete è collegata sui tre morsetti corrispondenti. Per la seconda, questi sono collegati tra di loro e la rete è collegata sugli altri tre morsetti.

La maggior parte delle volte l'avviamento, sia ad alta che bassa velocità, viene effettuato mediante accoppiamento alla rete senza utilizzare dispositivi particolari (avviamento diretto).

In alcuni casi, se le condizioni d'impiego lo richiedono e se il motore lo consente, il dispositivo di avviamento realizza automaticamente il passaggio a bassa velocità prima di inserire l'alta velocità o prima dell'arresto.

In base alle correnti assorbite negli accoppiamenti Bassa Velocità (-BV-) o Alta Velocità (-AV-), la protezione può essere realizzata con lo stesso relè termico per entrambe le velocità o con due relè (uno per ogni velocità).

Solitamente questi motori hanno un rendimento basso e un fattore di potenza abbastanza ridotto.

□ **Motori con avvolgimenti statorici separati**

Questo tipo di motore, che comprende due avvolgimenti statorici elettricamente indipendenti, consente di ottenere due velocità in un rapporto qualsiasi. Poichè gli avvolgimenti BV devono sopportare i limiti meccanici ed elettrici che risultano dal funzionamento del motore in AV, le loro caratteristiche elettriche spesso ne risentono. Talvolta un motore funzionante a BV consuma una corrente più elevata che in AV.

È anche possibile realizzare motori a tre o quattro velocità procedendo all'accoppiamento dei poli su uno degli avvolgimenti dello statore o su entrambi. Questa soluzione richiede prese supplementari sulle bobinature.

■ **Motori ad anelli**

□ **Utilizzo della resistenza rotorica**

La resistenza inserita all'esterno del circuito del rotore per questo tipo di motore consente di definirne:

- la coppia di avviamento,
- e la velocità.

In effetti, il collegamento di una resistenza permanente ai morsetti del rotore di un motore ad anelli riduce la sua velocità in modo direttamente proporzionale al crescere del suo valore. Si tratta di una soluzione semplice per far variare la velocità.

□ **Regolazione di velocità mediante scorrimento**

Le resistenze del rotore o resistenze "di scorrimento" possono essere messe in cortocircuito in più sezioni per ottenere una regolazione discontinua della velocità, o l'accelerazione progressiva e l'avviamento completo del motore. Devono essere in grado di sopportare la durata del funzionamento, soprattutto quando sono previste per far variare la velocità. Per questo il loro volume è talvolta notevole e il loro costo elevato.

Questo processo, estremamente semplice, viene utilizzato sempre meno poiché presenta due importanti inconvenienti:

- durante la marcia a velocità ridotta, una gran parte dell'energia sottratta alla rete viene dissipata in pura perdita nelle resistenze.
- la velocità ottenuta, non è indipendente dal carico, ma varia con la coppia resistente applicata dalla macchina sull'albero motore. (← Fig. 23).

Per una data resistenza, lo scorrimento è proporzionale alla coppia.

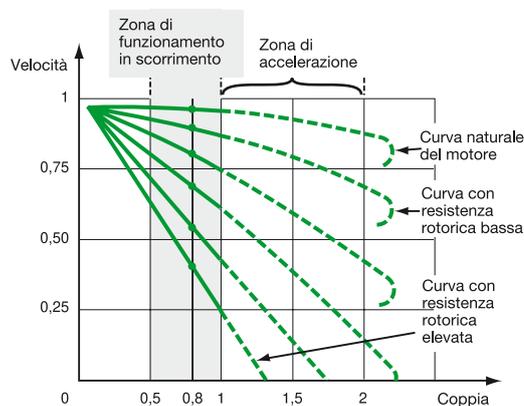
Così, ad esempio, la diminuzione di velocità ottenuta da una resistenza può essere del 50% a pieno carico e del 25% soltanto a mezzo carico, mentre la velocità a vuoto resta praticamente invariata.

Se un conduttore controlla permanentemente la macchina, può, modificando su richiesta il valore della resistenza, fissare la velocità in una certa zona per le coppie relativamente elevate; tuttavia per le coppie basse è praticamente impossibile qualsiasi regolazione. In effetti, se per ottenere un punto "bassa velocità a coppia bassa", esso inserisce una resistenza molto elevata, la minima variazione della coppia resistente fa passare la velocità da zero a circa il 100%. La caratteristica è troppo instabile.

Per macchine a variazione particolare della coppia resistente in base alla velocità, la regolazione può risultare impossibile.

Esempio di funzionamento in scorrimento. Per un carico variabile che applica al motore una coppia resistente di 0.8 Cn, si possono ottenere velocità diverse, rappresentate dal segno • sul diagramma della fig. 23.

A coppia uguale, la velocità diminuisce quando la resistenza rotorica aumenta.



↑ Fig. 23 Curva velocità/coppia con resistenza "di scorrimento"

■ **Altri sistemi di variazione di velocità**

□ **Il variatore di tensione**

Questo dispositivo viene utilizzato esclusivamente per i motori asincroni di bassa potenza e richiede un motore a gabbia resistente.

La variazione di velocità si ottiene aumentando lo scorrimento del motore consecutivo alla diminuzione di tensione.

Il variatore di tensione è molto utilizzato nei sistemi di ventilazione, nelle pompe e nei compressori, applicazioni per le quali la sua caratteristica di coppia disponibile consente un funzionamento soddisfacente. Tuttavia questa soluzione viene man mano sostituita dai convertitori di frequenza che diventano sempre più competitivi.

□ **Altri sistemi elettromeccanici**

I sistemi elettromeccanici di regolazione di velocità, ricordati qui di seguito, vengono impiegati meno frequentemente dopo la diffusione dei variatori di velocità elettronici.

• **Motori in alternata a collettore (Schrage)**

Si tratta di motori speciali. La variazione di velocità si ottiene facendo variare, rispetto alla linea del neutro, la posizione delle spazzole sul collettore.

• **Variatori a corrente di Foucault (↔ Fig.24)**

È costituito da una barra collegata direttamente al motore asincrono che ruota a velocità costante e da un rotore con un avvolgimento alimentato da corrente continua.

Il movimento viene trasmesso all'albero di uscita mediante accoppiamento elettromagnetico. Regolando l'eccitazione di questo movimento è possibile regolare lo scorrimento dell'intero sistema.

Un generatore tachimetrico integrato consente di controllare la velocità in modo abbastanza preciso.

Un sistema di ventilazione forzato consente di eliminare le perdite prodotte dallo scorrimento. Questo principio è stato ampiamente utilizzato negli apparecchi di sollevamento e in particolare nelle gru di cantiere.

È per costruzione un sistema robusto senza elementi soggetti ad usura; può essere adatto a sistemi di funzionamento intermittenti e potenze fino ad un centinaio di kW.

• **Gruppo Ward Leonard**

Questo dispositivo, un tempo molto diffuso, è l'antenato dei variatori di velocità per motori a corrente continua. È composto da un motore e da un generatore che alimenta un motore a corrente continua (↔ Fig.25).

La variazione di velocità si ottiene regolando l'eccitazione del generatore. Una bassa corrente di controllo consente di controllare potenze di diverse centinaia di kW in tutti i quadranti coppia velocità. Questo tipo di variatore è stato utilizzato sui laminatoi e sugli ascensori delle miniere.

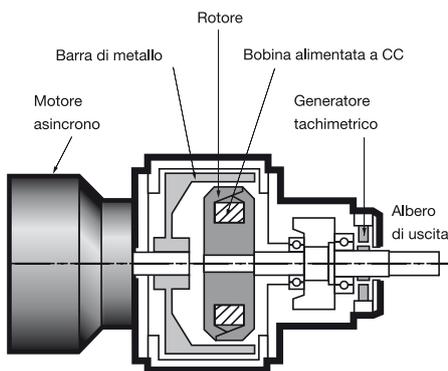
Questa soluzione di variazione velocità era la più performante prima dell'avvento dei semi-conduttori che l'hanno resa obsoleta.

□ **Variatori di velocità meccanici ed idraulici**

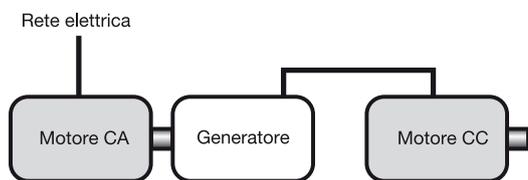
I variatori meccanici ed idraulici sono sempre utilizzati.

Per quanto riguarda i variatori meccanici, sono state immaginate diverse soluzioni (pulegge, cinghie, sfere, con, ecc.). Questi variatori presentano lo svantaggio di richiedere una manutenzione attenta ed accurata e si prestano difficilmente agli asservimenti. Inoltre i convertitori di frequenza fanno loro una grande concorrenza.

I variatori idraulici sono sempre molto diffusi per applicazioni particolari.



↑ Fig. 24 Sezione schematica di un variatore di velocità a corrente di Foucault



↑ Fig. 25 Schema di un gruppo Ward Leonard

Sono caratterizzati da potenze con masse considerevoli e dalla capacità di sviluppare coppie elevate a velocità nulla in modo continuo. Nel settore industriale si trovano principalmente nelle applicazioni di servocomando.

Non rientrando nel quadro di questa guida, questo tipo di variatori non verranno descritti nel dettaglio.

**3.6 Confronto dei diversi tipi di motori**

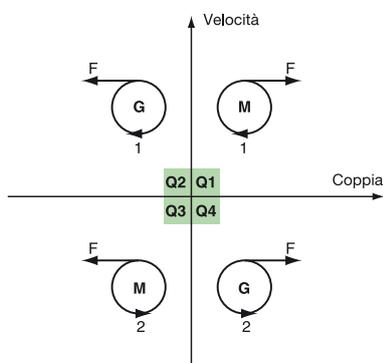
La tabella riportata nella *figura 26* consente di visualizzare rapidamente i motori elettrici disponibili, le loro caratteristiche principali e i loro settori d'impiego.

tipo di motore	asincrono a gabbia		asincrono ad anelli	sincrono a motore bobinato			a corrente continua
	trifase	monofase		rotore bobinato	rotore magneti terra cruda	passo a passo	
costo del motore	basso	basso	elevato	elevato	elevato	basso	basso
motore a tenuta stagna	standard	possibile	su richiesta costoso	su richiesta costoso	standard	standard	
avviamento diretto sulla rete	facilitato	facilitato	dispositivo di avviamento particolare	non possibile a partire da qualche Kw	non previsto	non previsto	non previsto
variante di velocità	facile	raro	possibile	frequente	sempre	sempre	sempre
costo della soluzione variazione di velocità	sempre più economico	molto economico	economico	molto economico	abbastanza economico	molto economico	molto economico
prestazioni di variazioni industriale	sempre più elevato	molto bassa	medie	elevato	molto elevato	da media a elevate	da elevate a molto elevate
impiego	velocità costante o variabile	in maggioranza velocità costante	velocità costante o variabile	velocità costante o variabile	velocità variabile	velocità variabile	velocità variabile
utilizzo industriale	universale	per le basse potenze	in diminuzione	per le forti potenze a media tensione	macchine utensili, dinamica elevata	posizionamento ad anello aperto per le basse potenze	in diminuzione

↑ Fig. 26 Caratteristiche comparate dei motori comuni

È importante sottolineare la posizione dei motori asincroni a gabbia trifase il cui appellativo di « standard » è oggi rinforzato dal perfetto adattamento all'impiego, conseguenza dello sviluppo dei dispositivi elettronici per la variazione di velocità.

**3.7 I diversi tipi di carichi**



Senso di rotazione	Funzionamento	Coppia C	Velocità n	Prodotto C,n	Quadrante
1 (orario)	In motore	si	si	si	1
	In generatore				2
2 (antiorario)	In motore			si	3
	In generatore	si			4

↑ Fig. 27 Le quattro situazioni possibili di funzionamento di una macchina

I carichi possono essere classificati in due gruppi:

- i carichi motrici che mettono in movimento un corpo mobile o un fluido o che ne cambiano lo stato (ad esempio passaggio dallo stato gassoso allo stato liquido),
- i carichi passivi che non sviluppano forza motrice, come l'illuminazione o il riscaldamento.

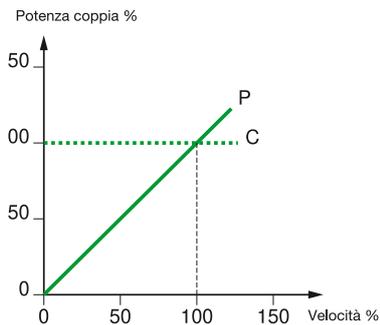
**I carichi attivi**

Con questo termine vengono definiti tutti i sistemi che consentono di mettere in movimento un corpo mobile o un fluido.

Il movimento di un corpo mobile richiede la modifica della sua velocità o della sua posizione e quindi di fornire una coppia che consenta di vincere la resistenza al movimento accelerando al contempo l'inerzia del carico. La messa in velocità è una conseguenza diretta della coppia applicata.

**I quadranti di funzionamento**

La *figura 27* illustra le quattro situazioni possibili nel diagramma coppia-velocità di una macchina, riassunte nella tabella associata.



↑ Fig. 28 Funzionamento a coppia costante

È importante notare che quando la macchina funziona come generatore, deve beneficiare di una forza di azionamento. Questo stato è utilizzato per la frenatura. L'energia cinetica presente sull'albero della macchina viene trasferita alla rete di alimentazione oppure dissipata nelle resistenze o, per le piccole potenze, nelle perdite della macchina.

Sono possibili diversi tipi di funzionamento. Le illustrazioni riportate a lato rappresentano sommariamente i carichi riscontrabili.

#### □ I tipi di funzionamento

##### • Funzionamento a coppia costante

Il funzionamento è detto a coppia costante quando le caratteristiche del carico sono tali che in regime stabilito la coppia richiesta è pressoché la stessa con qualsiasi velocità (↔ Fig.28).

Questo modo di funzionamento è riscontrabile su macchine quali i nastri trasportatori, i frantumatori o le apparecchiature di sollevamento.

Per questo tipo di applicazione, il dispositivo di avviamento deve avere la capacità di fornire una coppia di avviamento importante (1.5 volte o più la coppia nominale) per vincere gli attriti statici e per accelerare la macchina (inerzia).

##### • Funzionamento a coppia crescente con la velocità

Le caratteristiche del carico sono tali da provocare l'aumento della coppia richiesta con la velocità. È il caso in particolare delle pompe volumetriche a viti di Archimede la cui coppia cresce linearmente con la velocità (↔ Fig.29a) o delle macchine centrifughe (pompe e ventilatori) la cui coppia varia con il quadrato della velocità (↔ Fig.29b).

La potenza delle pompe volumetriche a viti varia con il quadrato della velocità.

La potenza delle macchine centrifughe varia con il cubo della velocità.

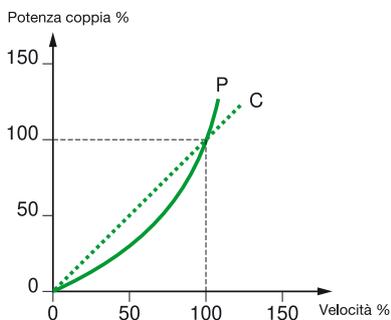
Un avviatore destinato a questo tipo di applicazione avrà una coppia di avviamento inferiore. Generalmente è sufficiente un valore pari a 1.2 volte la coppia nominale del motore.

##### • Funzionamento a coppia decrescente con la velocità

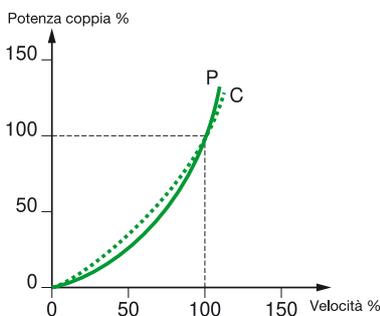
Per alcune macchine la coppia richiesta dal carico diminuisce quando la velocità aumenta. È il caso in particolare del funzionamento detto a potenza costante, quando il motore fornisce una coppia inversamente proporzionale alla velocità angolare (↔ Fig.30).

È il caso, ad esempio, di un avvolgitore la cui velocità angolare deve diminuire progressivamente con l'aumentare del diametro dell'avvolgimento dovuto all'accumulo di materiale. È anche il caso dei motori dei mandrini.

La gamma di funzionamento a potenza costante è limitata per natura: a bassa velocità dalla corrente fornita dal variatore e ad alta velocità dalla coppia disponibile del motore. Di conseguenza, la coppia motore disponibile con i motori asincroni e la capacità di commutazione delle macchine a corrente continua devono essere ben verificati.

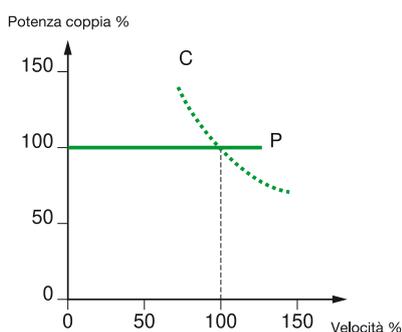


a



b

↑ Fig. 29 a/b Funzionamento a coppia crescente con la velocità



↑ Fig. 30 Funzionamento a coppia decrescente con la velocità

Nella tabella della *figura 31* sono elencate le macchine comuni e la loro legge di coppia in funzione della velocità.

Tipo di macchina	Legge di coppia in funzione della velocità
Nastri trasportatori	Costante
Macchine rotative per tipografia	Costante
Pompe volumetriche a viti	Coppia crescente in linea con la velocità
Pompe di dosaggio	Costante
Pompe centrifughe	Coppia crescente come il quadrato della velocità
Ventilatori e termoventilatori	Coppia crescente come il quadrato della velocità
Compressori a viti	Costante
Compressori scroll	Costante
Compressori a pistoni	Costante
Forni per cementifici	Costante
Estrusori	Costante o decrescente in linea con la velocità
Presse meccaniche	Costante
Avvolgitori, svolgitori	Costante o decrescente in linea con la velocità
Spappolatori	Costante
Macchine sezionali	Costante
Mulini	Costante
Mescolatori	Coppia crescente in linea con la velocità
Impastatrici, calandatrici	Costante o decrescente in linea con la velocità
Centrifughe	Coppia crescente come il quadrato della velocità
Mandrini	Costante o decrescente in linea con la velocità
Apparecchi di sollevamento	Costante

† Fig. 31 Profilo della caratteristica della coppia per tipi di macchine

Spesso all'inizio della messa in velocità, il motore deve vincere una coppia transitoria, come, ad esempio nel caso di un frantumatore che viene avviato con prodotto nella tramoggia. Possono verificarsi anche degli attriti secchi che scompaiono quando la macchina è in movimento oppure una macchina fredda può presentare, con l'aumento di temperatura, una coppia resistente superiore alla marcia normale.

### ■ I carichi passivi

Nell'industria troviamo due tipi di carichi passivi:

- il riscaldamento,
- l'illuminazione.

#### □ Il riscaldamento

Il riscaldamento dei locali industriali è una spesa notevole e per ridurla al minimo è indispensabile diminuire le dispersioni di calore; questo dipende dalla progettazione dell'edificio ed esula dall'argomento trattato in questo documento.

Ogni edificio è un caso a sé e le nostre risposte sarebbero evasive e non applicabili.

Al contrario la gestione dell'edificio può apportare contemporaneamente confort e risparmi significativi. Per ulteriori informazioni, contattare la nostra organizzazione commerciale.

Se necessario è possibile consultare i consulenti dei fornitori di materiale elettrico che faciliteranno la scelta della soluzione più adatta.

□ **L'illuminazione**

• **L'illuminazione a incandescenza**

L'illuminazione a incandescenza (brevetto di Thomas Edison del 1879) è stata una vera rivoluzione. Per decenni, l'illuminazione è ricorsa a dispositivi che utilizzavano un filamento portato ad alta temperatura per irradiare una luce visibile.

Questo tipo di illuminazione, ancora oggi molto diffusa, presenta due grandi inconvenienti:

- un basso rendimento, poiché la maggior parte dell'elettricità consumata viene sprecata in calore,
- una sostituzione periodica del dispositivo d'illuminazione che ha una durata di qualche migliaio di ore.

È stato possibile aumentare questa durata grazie a miglioramenti quali l'introduzione di gas rari come il cripton o il gas alogeno.

Alcuni paesi (scandinavi in particolare) hanno tuttavia previsto di eliminare a breve dal mercato questo tipo di illuminazione.

• **L'illuminazione fluorescente**

Questo tipo di illuminazione è rappresentata dai tubi fluorescenti e dalle lampade fluo-compatte. La loro tecnologia viene generalmente detta « ai vapori di mercurio bassa pressione ».

**I tubi fluorescenti**

Sono comparsi nel 1938. In questi tubi, una scarica elettrica provoca la collisione di elettroni con ioni di vapori di mercurio, che produce, tramite eccitazione degli atomi di mercurio, un irraggiamento ultravioletto.

Il materiale fluorescente di cui è ricoperto l'interno dei tubi trasforma l'irraggiamento in luce visibile.

I tubi fluorescenti dissipano meno calore e hanno una maggior durata rispetto alle lampade a incandescenza, ma richiedono l'impiego di due dispositivi: uno per l'accensione chiamato «starter » e l'altro per la limitazione della corrente d'arco dopo l'accensione chiamato «reattore », costituito generalmente da un'induttanza posizionata in serie con l'arco.

**Lampade fluo-compatte** (↔ Fig.32)

Il loro principio è identico a quello dei tubi fluorescenti. Le funzioni dello starter e del reattore sono garantite da un circuito elettronico (integrato nella lampada) che consente di utilizzare tubi di dimensioni ridotte e ripiegati su se stessi.

Le **lampade fluo-compatte** sono state sviluppate per sostituire le lampade a incandescenza: permettono un risparmio notevole (15 W contro 75 W per la stessa luminosità) e una maggior durata (8000 h in media e per alcune fino a 20000 h).

**Lampade a scarica** (↔ Fig.33)

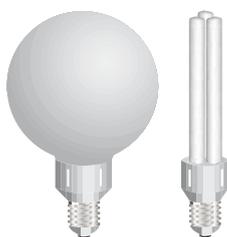
La luce viene prodotta mediante una scarica elettrica creata tra due elettrodi all'interno di un gas in una lampadina al quarzo. Questo tipo di lampade richiede un reattore per limitare la corrente d'arco.

Lo spettro di emissione dipende dalla composizione del gas e migliora con l'aumento della pressione. Sono state sviluppate diverse tecnologie per diverse applicazioni.

**Lampade a vapori di sodio bassa pressione**

Offrono il miglior rendimento luminoso, ma la resa dei colori è pessima poiché il loro irraggiamento è monocromatico, di color arancione.

Applicazioni: illuminazione di autostrade e gallerie.



↑ Fig. 32 Lampade fluo compatte



↑ Fig. 33 Lampade a scarica

**Lampade a vapori di sodio alta pressione**

Emettono una luce bianca caricata leggermente di arancione.

Applicazioni: illuminazione urbana e monumentale.

**□ Lampade a vapori di mercurio alta pressione**

La scarica viene prodotta in una lampadina al quarzo o in ceramica a pressioni superiori a 100 kPa. Questo tipo di lampade viene chiamato « palloni fluorescenti ». Emettono una caratteristica luce bianca caricata di blu.

Applicazioni: parcheggi, ipermercati e magazzini.

**• Lampade agli alogenuri metallici**

Sono di recente tecnologia ed emettono un colore che ha un largo spettro.

L'utilizzo del tubo in ceramica permette un'efficacia luminosa e una miglior stabilità dei colori.

Applicazioni: stadi, aree commerciali e proiettori.

**• Diodi elettroluminescenti o LED (Light Emitting Diodes)**

È la tecnologia più promettente: il principio dei diodi elettroluminescenti è l'emissione di luce mediante un semi-conduttore al passaggio della corrente elettrica.

I LED sono d'impiego corrente in numerose applicazioni, ma lo sviluppo recente di diodi di colore bianco o blu ad alto rendimento luminoso apre nuove prospettive, in particolare per la segnalazione (semafori, pannelli di sicurezza o illuminazione di emergenza) o i fari dei veicoli stradali.

La corrente media in un LED è di 20 mA, poiché la caduta di tensione è compresa tra 1.7 e 4.6 V a seconda del colore. Queste caratteristiche sono propizie ad un'alimentazione a bassissima tensione, in particolar modo tramite batterie.

L'alimentazione tramite la rete richiede un convertitore non troppo costoso.

Il vantaggio dei LED è il basso consumo energetico. Ne risulta una bassa temperatura di funzionamento che porta ad una durata quasi illimitata.

Nel prossimo futuro, sarà possibile integrare l'illuminazione degli alloggi direttamente durante la loro costruzione.

Per contro, un diodo elementare ha una potenza luminosa bassa.

Un'illuminazione potente richiede quindi il collegamento di un gran numero di unità in serie.

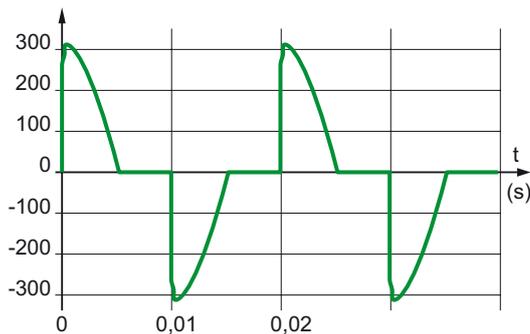
Dal momento che i diodi elettroluminescenti sono privi di inerzia termica, si prestano ad applicazioni innovative quali la trasmissione contemporanea dell'illuminazione e dei dati. Per ottenere questa trasmissione, l'alimentazione viene modulata ad alta frequenza. L'occhio umano non è in grado di discernere questa modulazione, ma un ricettore dotato dell'interfaccia adatta sarà in grado di rilevare questi segnali e gestirli.

**□ L'alimentazione delle lampade a incandescenza****• Limiti legati all'alimentazione diretta**

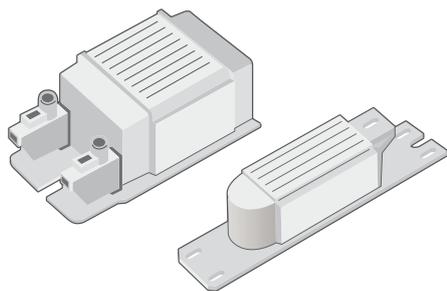
A causa dell'elevata temperatura del filamento durante il funzionamento (fino a 2 500° C), i valori della sua resistenza variano molto.

Dal momento che la resistenza a freddo è bassa, ne risulta un picco di corrente all'accensione che può raggiungere da 10 a 15 volte la corrente nominale per un periodo di tempo che va da qualche millisecondo a qualche decina di millisecondi.

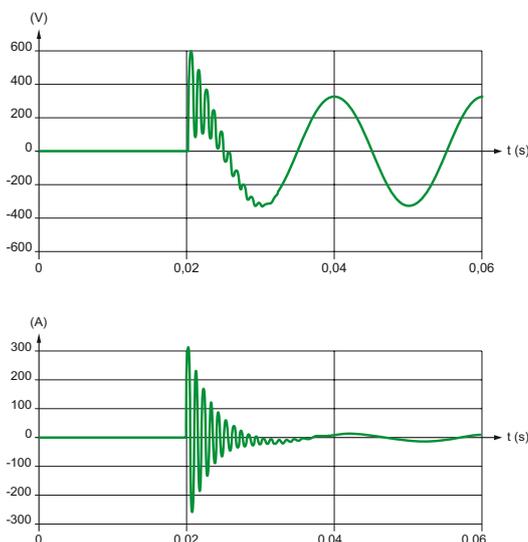
Questo limite riguarda le lampade ordinarie e le lampade alogene: impone la riduzione del numero massimo di lampade che possono essere alimentate da uno stesso dispositivo quale il teleruttore, il contattore modulare o i relè per canalizzazioni prefabbricate.



↑ Fig. 34 Forma della tensione applicata alla lampada



↑ Fig. 35 Reattore magnetico



↑ Fig. 36 Forma della tensione e della corrente alla messa sotto tensione

#### • La variazione della luminosità

Può essere ottenuta mediante variazione della tensione efficace applicata alla lampada.

La maggior parte delle volte questa variazione di tensione viene realizzata mediante un dispositivo tipo variatore a triac di cui si fa variare l'angolo d'innesco nel periodo della tensione rete.

La forma d'onda della tensione applicata alla lampada viene illustrata nella fig. 34.

La messa sotto tensione progressiva della lampada consente inoltre di ridurre, se non addirittura di eliminare, il picco di corrente all'accensione.

È importante notare che la variazione di luce:

- è accompagnata da una modifica della temperatura e del colore,
- compromette la durata delle lampade alogene quando viene mantenuto per lungo tempo un basso livello di tensione. In effetti, il fenomeno di rigenerazione del filamento è meno efficace quando la temperatura del filamento è più bassa.

Alcune lampade alogene sono alimentate a bassa tensione tramite un trasformatore. Il magnetizzante di quest'ultimo può generare dei picchi di corrente dell'ordine da 50 a 75 volte la corrente nominale per qualche millisecondo.

I fornitori propongono anche dei convertitori statici che consentono di eliminare questo inconveniente.

#### • L'alimentazione delle lampade fluorescenti e delle lampade a scarica

I tubi fluorescenti e le lampade a scarica richiedono una limitazione della corrente d'arco, funzione che viene realizzata da un dispositivo limitatore (induttanza) posizionato in serie con la lampadina stessa.

Il reattore magnetico (↔ Fig.35) è di utilizzo corrente nelle applicazioni domestiche.

Il reattore magnetico è associato ad un dispositivo di avviamento chiamato starter. Ha una doppia funzione: garantire il preriscaldamento degli elettrodi del tubo e poi generare una sovratensione per l'innesco del tubo.

Questa sovratensione viene generata dall'apertura di un contatto (comandato da una lama bimetallica) che interrompe la corrente che circola nel reattore.

Durante il funzionamento dello starter (circa 1 s), la corrente assorbita dalla lampada è circa 2 volte la corrente nominale.

Dal momento che la corrente assorbita dall'insieme tubo e reattore è essenzialmente induttiva, il fattore di potenza è molto basso (mediamente tra 0.4 e 0.5). Nelle installazioni che comprendono molti tubi, è necessario prevedere una compensazione per migliorare il fattore di potenza.

Sovvente, questa compensazione viene realizzata a livello di ciascuna lampada.

I condensatori di compensazione sono quindi calibrati in modo che il fattore di potenza totale sia superiore a 0.85.

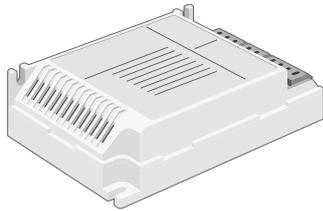
Nel caso della compensazione parallela, la più frequente, la sua capacità è in media di 1  $\mu\text{F}$  per 10 W di potenza attiva, per ogni tipo di lampada.

Lo schema di compensazione parallela comporta dei limiti per l'accensione della lampada.

Dal momento che il condensatore è inizialmente scarico la messa in tensione provoca una sovracorrente.

Una sovracorrente compare anche a causa delle oscillazioni nel circuito costituito dal condensatore e dall'induttanza dell'alimentazione.

Le forme d'onda di tensione e di corrente incontrate sono illustrate nella fig. 36.



↑ Fig. 37 Reattore magnetico

Il reattore elettronico (↔ Fig. 37), comparso negli anni 80, elimina tutti questi inconvenienti.

Il principio del reattore elettronico consiste nell'alimentare l'arco della lampada tramite un dispositivo elettronico che genera una tensione alternata di forma rettangolare.

Si distinguono i dispositivi a bassa frequenza o ibridi, la cui frequenza è compresa tra 50 e 500 Hz e i dispositivi ad alta frequenza la cui frequenza è compresa tra 20 e 60 kHz. L'alimentazione dell'arco con una tensione ad alta frequenza consente di eliminare completamente i fenomeni di sfarfallamento e gli effetti stroboscopici.

Il reattore elettronico è totalmente silenzioso. Durante la fase di preriscaldamento di una lampada a scarica, fornisce alla lampada una tensione crescente, imponendo una corrente quasi costante. In regime permanente regola la tensione applicata alla lampada indipendentemente dalle fluttuazioni della tensione rete.

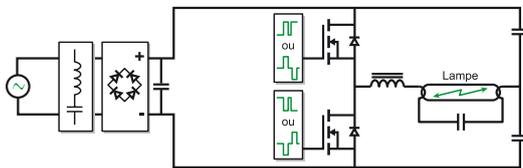
Poiché l'arco è alimentato in condizioni ottimali di tensione, ne risulta un risparmio energetico compreso tra il 5 e il 10 % e un aumento della durata della lampada. Peraltro, il rendimento di un reattore elettronico può superare il 93 %, mentre il rendimento medio di un dispositivo magnetico è solo dell'85 %. Il fattore di potenza è elevato (> 0.9).

I reattori elettronici hanno comunque dei limiti dovuti allo schema utilizzato (↔ Fig. 38).

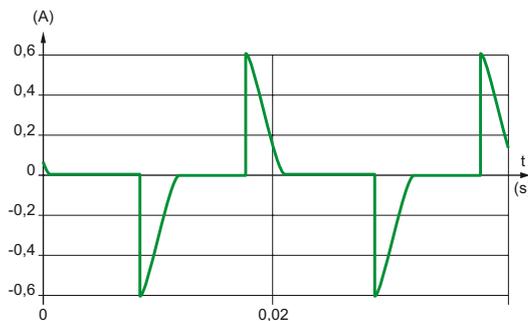
La presenza di un ponte di diodi associato ai condensatori genera un picco di corrente alla messa sotto tensione. In funzionamento la corrente assorbita (↔ Fig. 39) è ricca di armoniche di ordine 3 e questo genera un pessimo fattore di potenza, dell'ordine del 55 %.

Le armoniche di ordine 3 provocano il sovraccarico del conduttore di neutro.

I reattori elettronici dispongono generalmente di capacità installate tra i conduttori di alimentazione e la terra. Questi condensatori antidisturbi sono responsabili della circolazione di una corrente di fuga permanente da 0.5 a 1 mA per reattore. Per questo motivo è necessario limitare il numero di reattori che è possibile alimentare mediante un Dispositivo a corrente Differenziale Residua (DDR).



↑ Fig. 38 Esempio di schema di un reattore elettronico



↑ Fig. 39 Forma d'onda della corrente prelevata alla rete

### 3.8 Le valvole e gli assi elettrici

#### ■ Introduzione

I processi richiedono il posizionamento e lo spostamento di carichi. Questa funzione viene garantita da cilindri pneumatici e idraulici, ma anche da cilindri elettromeccanici gestiti da motori elettrici o collegabili a dispositivi di regolazione (ad esempio per controlli di posizione). Nelle pagine che seguono verrà fornita una breve descrizione di questi dispositivi di posizionamento.

Le valvole, destinate a controllare il passaggio di fluidi, rappresentano un ampio mercato e sono utilizzate per:

- provocare l'interruzione di un fluido (valvole di arresto),
- cambiare il circuito del fluido (valvole tre vie),
- miscelare i prodotti (valvole miscelatrici),
- regolare una portata (valvole di regolazione).

I fluidi possono essere liquidi o gassosi (ventilazione o industria chimica).

#### ■ Gli assi elettrici

Le applicazioni di azionamento lineare richiedono assi elettrici ad elevate prestazioni, soprattutto per quanto riguarda lo sforzo, la velocità, la durata e l'affidabilità.

I fornitori propongono gamme complete di assi elettrici adatti a soddisfare la maggior parte delle richieste.

#### □ Composizione di un asse elettrico

Gli assi elettrici (↔ Fig.40) integrano, in un unico elemento, un asse di comando o un organo di azionamento, una scatola di guida e un motore elettrico.

La foto (↔ Fig.40) rappresenta un tipo di asse elettrico per spostamento lineare.

L'organo di azionamento può avere un movimento lineare per realizzare una traslazione o un movimento rotativo.

Nel caso di movimenti lineari, l'organo di azionamento si sposta linearmente sotto l'effetto di un sistema vite-dado.

Le realizzazioni più comuni sono due: la vite a filetto trapezoidale e la vite a ricircolo di sfere.

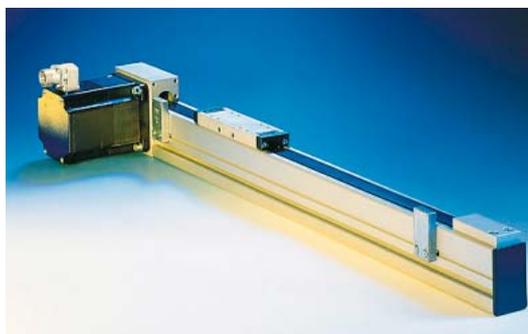
La vite a filetto trapezoidale è in acciaio e il dado è in plastica.

È una soluzione relativamente economica con proprietà favorevoli: plastica e metallo lavorano bene insieme senza attriti.

La vite a filetto trapezoidale ha un funzionamento silenzioso, adatto quindi ad ambienti tipo uffici, ospedali, ecc...

Un altro vantaggio interessante è l'elevato coefficiente di attrito nella vite a filetto trapezoidale. Questo tipo di progettazione è particolarmente adatto a cilindri utilizzati nelle applicazioni in cui è necessario che siano autobloccanti, quindi senza "balzo indietro" sotto il peso del carico. Ad esempio utilizzando un cilindro per la regolazione verticale di una tavola ad altezza variabile, la progettazione con una vite a filetto trapezoidale consente alla tavola di supportare carichi elevati senza modificare la sua posizione verticale. Questo significa che non è necessario alcun freno o meccanismo di bloccaggio supplementare per mantenere il cilindro nella sua posizione quando non funziona.

Il sistema con vite a ricircolo di sfere si incontra nei sistemi ad elevate prestazioni (↔ Fig.41).



↑ Fig. 40 Asse elettrico (Schneider Electric)



↑ Fig. 41 Cilindro elettrico ad alta prestazione (Schneider Electric)



↑ Fig. 42 Cilindri elettrici SKF

Le viti a ricircolo di sfere nei cilindri sono in acciaio e sono dotate di una fila di cuscinetti situati in un sistema chiuso tra il dado e la vite.

Questo tipo di progettazione consente un coefficiente di attrito estremamente basso tra il dado e la vite, grazie al contatto volvente tra le sfere, il dado e la scanalatura della chiocciola.

In condizioni di funzionamento identico, l'usura è ridotta rispetto ad una vite a filetto trapezoidale; questo permette alla vite a ricircolo di sfere di avere una durata di 10 volte superiore anche tollerando un ciclo di lavoro importante e carichi elevati.

Grazie al basso coefficiente di attrito la vite a ricircolo di sfere ha un rendimento particolarmente elevato e quindi un basso grado di riscaldamento.

Di conseguenza, la vite a circolazione di sfere è particolarmente adatta a situazioni in cui è necessario lavorare per lunghi periodi a velocità elevata.

Un cilindro che utilizza una vite a circolazione di sfere ha un gioco minimo e la sua precisione è quindi significativamente superiore nelle applicazioni in cui posizionamento e precisione sono essenziali.

#### □ Gamma di prodotti

Gli assi elettrici possono essere realizzati in numerose disposizioni meccaniche per essere facilmente incorporati nelle macchine.

I costruttori propongono anche delle unità di controllo che facilitano il controllo dell'asse.

La foto (⇐ Fig. 42) fornisce uno prospetto della gamma proposta da un costruttore (SKF).

#### □ Guida alla scelta

Scegliere l'asse elettrico ideale richiede spesso la conoscenza di numerosi dettagli dell'applicazione oltre che la realizzazione di qualche calcolo.

Tuttavia servendosi dei cataloghi dei diversi costruttori è possibile effettuare una prima selezione di cilindri che rispondano ai criteri base come il carico e la velocità.

#### Motorizzazione degli assi e accessori

Motorizzazioni proposte dai costruttori.

Gli assi elettrici possono essere azionati dai motori,

- a corrente continua,
- asincroni,
- sincroni di tipo brushless,
- passo passo.

I motori a corrente continua sono solitamente motori bassa tensione (12 o 24 Volt) per forze medie (ordine di grandezza 4 000 N) e prestazioni moderate (ordine di grandezza 50 mm/s). Questi cilindri si troveranno su apparecchi mobili e autonomi (funzionamento su batterie).

L'equipaggiamento con motore asincrono consente di aumentare sensibilmente le prestazioni fino a 50 000 N e 80 mm/s. Questi cilindri sono installati soprattutto nelle macchine a postazione fissa.

L'equipaggiamento con motore brushless consente di ottenere prestazioni dinamiche elevate (ordine di grandezza 750 mm/s) per forze massimo di circa 30000 N.

L'equipaggiamento con motore passo passo consente di ottenere un posizionamento preciso del carico senza anello di reazione.

#### □ Accessori e varianti

- **Controllore integrato**

Alcuni cilindri elettrici hanno il loro dispositivo di comando integrato. È il caso in particolare di alcuni cilindri comandati da un motore brushless. Questo tipo di cilindri integra il variatore di velocità, che può essere collegato al sistema di automazione mediante un bus di campo.

- **Potenziometro**

Per rilevare uno spostamento viene utilizzato un potenziometro elettrico. Questo dispositivo permette di conoscere la posizione della parte mobile e di realizzare un posizionamento preciso.

- **Protezione termica**

Protegge gli azionamenti e le unità di comando dai surriscaldamenti.

- **Encoder**

È un rilevatore che, collegato ad un'unità di comando, indica la posizione del cilindro.

- **Limitatori di sforzi**

Alcuni tipi di cilindri sono dotati di un dispositivo meccanico di sicurezza simile ad un innesto a frizione per proteggere il motore e il riduttore contro eventuali danneggiamenti.

- **Limitatori di finecorsa**

È un interruttore che limita lo spostamento in una direzione; consiste in dispositivi meccanici che, attivati, aprono e chiudono un contatto elettrico. I **limitatori di finecorsa** sono disponibili in diverse dimensioni e configurazioni e possono essere montati all'interno o all'esterno del cilindro.

Questi dispositivi di sicurezza fanno parte del sistema di controllo ed è importante fare particolare attenzione quando si utilizzano i cilindri in un sistema di automazione o con qualsiasi altro sistema.

- **Anti-inceppamento meccanico**

Questo meccanismo di sicurezza è destinato a proteggere le persone contro sollecitazioni eccessive.

- **Anti-inceppamento elettrico**

È un'opzione di sicurezza disponibile su alcuni cilindri elettrici.

Interrompe l'alimentazione del motore quando una sollecitazione esterna viene applicata nel senso contrario allo spostamento del cilindro.

#### ■ Le valvole

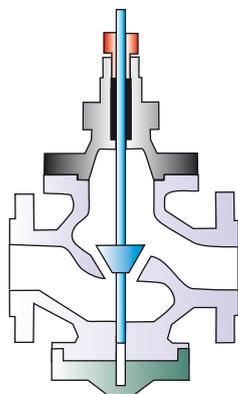
Il funzionamento delle valvole esula dagli argomenti trattati in questa guida. Tuttavia, dal momento che le valvole possono essere associate a sistemi di controllo industriale quali ad esempio anelli di regolazione o variatori di velocità, è interessante conoscere la composizione sommaria di una valvola e i fenomeni generati dal suo funzionamento.

#### □ Composizione di una valvola

Una valvola (⇐ Fig. 43) è composta da un corpo e da un otturatore appoggiato ad una base. Un'asta di manovra comandata da un motore elettrico consente di aprire o chiudere il passaggio del fluido. Lo stesso prodotto è disponibile in comando pneumatico.

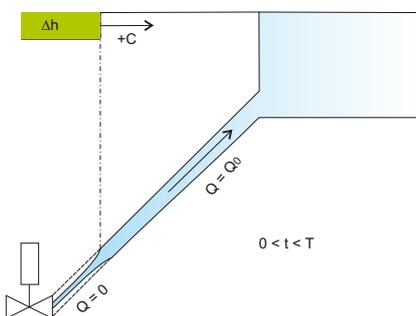
Molte valvole sono a comando pneumatico, altre a comando elettrico (elettrovalvole).

Sono disponibili diversi tipi di valvole (valvole a farfalla, valvole sferiche, valvole a membrana, ecc...), a seconda dell'utilizzo a cui sono destinate, del fluido che controllano e della legge di progressività della valvola (rapporto portata/posizione dell'otturatore o segnale di comando nel caso delle valvole di regolazione).

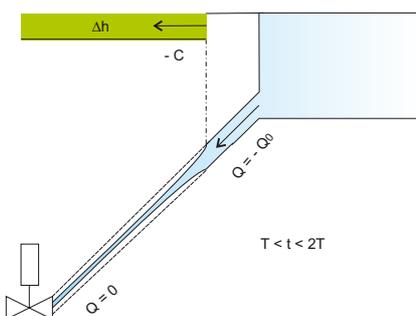


↑ Fig. 43

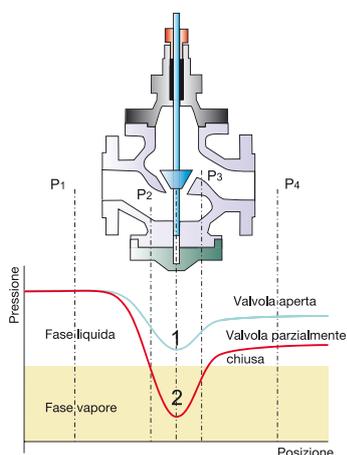
Sezione di una valvola



↑ Fig. 44a Inizio del fenomeno del colpo d'ariete



↑ Fig. 44b Propagazione dell'onda del colpo d'ariete



↑ Fig. 45 Fenomeno di cavitazione

L'otturatore ha spesso una forma particolare per evitare o attenuare gli effetti dei fenomeni indesiderati conosciuti con il nome di colpo d'ariete e cavitazione.

• **Colpo d'ariete**

Questo fenomeno si incontra nei condotti idraulici, durante la chiusura di una valvola d'arresto. In quel momento, la portata attraverso il condotto viene bruscamente interrotta e questo genera un fenomeno conosciuto con il nome di colpo d'ariete.

A titolo esemplificativo (↔ fig. 44a e 44b) eccone la descrizione in una stazione di pompaggio che alimenta un serbatoio situato al di sopra della pompa di alimentazione.

Alla chiusura della valvola che garantisce lo svuotamento del serbatoio attraverso la pompa situato al di sotto, la colonna di liquido tende a proseguire il suo movimento mentre più nessuna portata proviene dalla pompa.

Questo movimento genera una deformazione elastica del condotto che si contrae in prossimità della valvola.

Questo fenomeno crea una disponibilità temporanea di massa liquida che consente di mantenere in movimento la colonna di liquido.

In questo modo si genera una depressione che si propaga nel condotto alla velocità delle onde elastiche fino a che tutto il condotto è sottoposto alla depressione così generata, ovvero dopo un tempo  $T=L/c$ , dove L è la lunghezza del condotto tra la valvola e l'evacuazione.

Ne risulta che la pressione al passaggio del condotto nel serbatoio è inferiore alla pressione nel serbatoio e questo provoca un flusso in senso inverso. Quest'onda si propaga dal serbatoio verso la stazione di pompaggio e raggiunge la valvola otturatrice alla fine di un tempo  $2T$  da calcolare dall'inizio del fenomeno.

La colonna di liquido proseguendo la sua discesa sbatte sulla valvola chiusa, e questo genera un rigonfiamento del condotto e l'inversione del movimento del fluido.

Questo fenomeno si riprodurrebbe in modo perpetuo se, sotto l'effetto delle perdite di carico, le onde di depressione e di sovrappressione non si trovassero progressivamente smorzate.

Per evitare questo fenomeno che può avere effetti distruttivi, è possibile comandare la chiusura della valvola in modo graduale per limitare le eventuali sovrappressioni e depressioni a valori ragionevoli.

Un altro procedimento consiste nel rallentare progressivamente la velocità della pompa di alimentazione per effettuare la chiusura del condotto mediante la valvola.

Nel caso di pompe funzionanti a velocità costante, il dispositivo più adatto è l'avviatore/rallentatore progressivo come l'Altistart o l'Altivar nel caso di pompe funzionanti a velocità variabile.

• **Cavitazione**

La chiusura della valvola ha per effetto la riduzione della sezione riservata al passaggio del fluido.

Applicando il teorema di Bernoulli, la restrizione della sezione di passaggio, presentata dalla valvola, ha per effetto l'accelerazione della velocità di passaggio del fluido e la riduzione della pressione statica in quel punto.

(↔ Fig.45).

Questa diminuzione di pressione statica è più o meno importante a seconda:

- della geometria interna della valvola,
- del valore della pressione statica a valle della valvola.

In funzionamento valvola aperta, la pressione ha un andamento presentato dalla curva 1.

---

Poiché l'otturatore presenta una restrizione, al passaggio del fluido, si produce un abbassamento di pressione e un'accelerazione del passaggio del fluido (effetto Venturi).

Quando l'otturatore si chiude, l'effetto Venturi aumenta e la curva 1 si deforma progressivamente (⇔ *curva 2*).

Quando la pressione statica nella vena di liquido raggiunge il valore della tensione di vapore alla temperatura di flusso, si formano delle bolle di vapore. Queste bolle si formano nell'immediata vicinanza della restrizione di passaggio.

Quando la pressione statica aumenta nuovamente a valle della valvola (pressione P2), le bolle di vapore si condensano e implodono.

Questo fenomeno di cavitazione presenta i seguenti inconvenienti:

- rumore, ad un livello sonoro inaccettabile, simile a quello che provocherebbero dei sassi nella tubatura,
- vibrazioni a frequenze elevate aventi come effetto l'allentamento dell'intera bulloneria della valvola e dei suoi accessori,
- rapida distruzione dell'otturatore, della sede e del corpo mediante eliminazione di particelle metalliche. Le superfici sottoposte alla cavitazione presentano una superficie granulosa,
- la portata che passa nella valvola non è più proporzionale al comando.

Le valvole di regolazione possono avere un funzionamento prolungato in condizioni in cui la cavitazione può prodursi; la loro durata ne sarebbe fortemente condizionata.

I rimedi per limitare o evitare il fenomeno della cavitazione non sono oggetto di questa guida.

# 4 capitolo

## Avviamento e protezione dei motori

*Presentazione:*

- *Tipo di avviamento e frenatura dei motori*
- *Protezione dei motori e analisi dei guasti*
- *Tabella di scelta delle funzioni di protezione e dei relativi prodotti*



## 4. Avviamento e protezione dei motori

- 4.1 Avviamento dei motori a induzione .....pagina 66
- 4.2 Frenatura elettrica dei motori asincroni trifase .....pagina 73
- 4.3 Gli avviatori multifunzione .....pagina 78
- 4.4 La protezione dei motori .....pagina 80
- 4.5 Perdite e riscaldamenti nei motori .....pagina 81
- 4.6 Le diverse cause di guasto e le relative conseguenze .....pagina 81
- 4.7 Le funzioni e i prodotti di protezione .....pagina 87

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

M

Questo capitolo è dedicato esclusivamente all'avviamento, alla frenatura e alla protezione di tutti i tipi di motori asincroni.

Per una descrizione completa dei motori consultare il capitolo sui motori. Questo capitolo non tratta i motori a velocità variabile che vengono affrontati nel capitolo dedicato alla funzione di variazione della velocità.

La protezione delle persone è un argomento trattato parzialmente nel capitolo sulla sicurezza dei beni e delle persone.

### ■ Introduzione

Alla messa sotto tensione di un motore lo spunto di corrente sulla rete è elevato e può, soprattutto se la sezione dei conduttori della linea di alimentazione è insufficiente, provocare una caduta di tensione capace di condizionare il funzionamento dei carichi. Talvolta la caduta di tensione è tale da essere percepita sugli apparecchi di illuminazione. Per rimediare a questi inconvenienti le normative non consentono, al di sopra di una certa potenza, l'impiego di motori ad avviamento diretto.

In funzione delle caratteristiche del motore e del carico vengono utilizzati diversi metodi di avviamento.

La scelta verrà dettata da esigenze elettriche, meccaniche ed economiche.

Anche il tipo di carico comandato avrà una grande rilevanza sul modo di avviamento da utilizzare.

### ■ I principali modi di avviamento Introduzione

#### □ Avviamento diretto

È il tipo di avviamento più semplice nel quale lo statore viene direttamente collegato sulla rete (⇐ Fig.1). Il motore si avvia sulle sue caratteristiche naturali.

Alla messa sotto tensione il motore si comporta come un trasformatore il cui secondario è in cortocircuito. La corrente indotta nel rotore è elevata. Ne risulta un picco di corrente sulla rete:

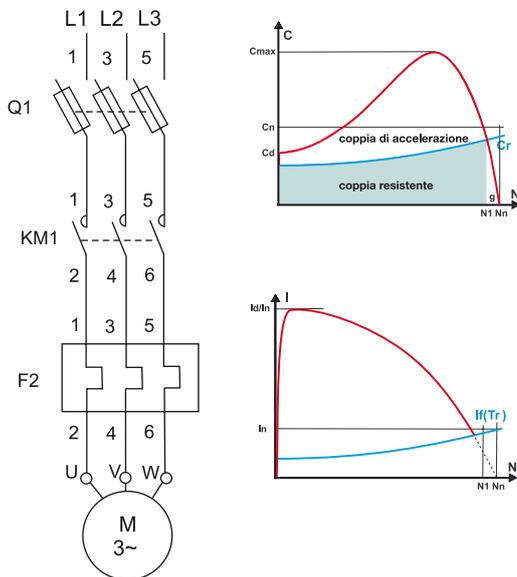
I avviamento = da 5 a 8 I nominale

La coppia di avviamento è in media:

C avviamento = da 0.5 a 1.5 C nominale.

Malgrado gli evidenti vantaggi (semplicità dell'apparecchiatura, coppia di avviamento elevata, avviamento rapido, prezzo accessibile) l'avviamento diretto conviene solo nel caso in cui:

- la potenza del motore sia bassa rispetto alla potenza della rete, in modo da evitare i disturbi dovuti allo spunto di corrente,
- la macchina azionata non richieda una messa in velocità progressiva e comprenda un dispositivo meccanico che eviti un avviamento troppo brusco,
- la coppia di avviamento possa essere elevata senza incidere sul funzionamento della macchina o del carico azionato.



↑ Fig. 1 Avviamento diretto

□ **Avviamento stella-triangolo**

Questo tipo di avviamento (⇔ Fig.2) può essere utilizzato solo con un motore avente le estremità di ciascuno dei tre avvolgimenti dello statore sulla morsetteria. L'avvolgimento deve essere realizzato in modo che la tensione di triangolo corrisponda alla tensione della rete: ad esempio, per una rete trifase 380 V, è necessario un motore bobinato a 380 V triangolo e 660 V stella.

Il principio consiste nell'avviare il motore collegando gli avvolgimenti a stella alla tensione di rete, cosa che coincide col dividere la tensione nominale del motore a stella per  $\sqrt{3}$  (nell'esempio sopra riportato la tensione rete 380 V = 660 V/ $\sqrt{3}$ ).

Il picco di corrente di avviamento è diviso per 3:  
 -  $I_d$  = da 1.5 a 2.6  $I_n$

In effetti un motore 380V / 660 V accoppiato a stella alla sua tensione nominale 660 V assorbe una corrente  $\sqrt{3}$  volte più bassa che il collegamento a triangolo 380 V. Poichè il collegamento a stella viene effettuato a 380 V, la corrente viene divisa ancora una volta per  $\sqrt{3}$  quindi in totale per 3.

Poichè la coppia di avviamento è proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione anch'essa viene divisa per 3:  
 -  $C_d$  = da 0.2 a 0.5  $C_n$

La velocità del motore si stabilisce quando le coppie motore e resistente si equilibrano, generalmente tra il 75 e l'85 % della velocità nominale. Gli avvolgimenti sono allora collegati a triangolo e il motore raggiunge le sue caratteristiche naturali. Il passaggio dal collegamento a stella al collegamento a triangolo è comandato da un temporizzatore. La chiusura del contattore triangolo viene effettuata con un ritardo compreso tra 30 e 50 millesimi di secondo dall'apertura del contattore a stella, cosa che evita un cortocircuito tra le fasi dal momento che i contattori non possono essere chiusi contemporaneamente.

La corrente che attraversa gli avvolgimenti viene interrotta all'apertura del contattore stella. Viene ristabilita alla chiusura del contattore triangolo. Questo passaggio in triangolo si accompagna con un picco di corrente transitorio molto breve, ma di elevata intensità, dovuto alla forza controelettromotrice (f.c.e.m.) del motore.

L'avviamento stella-triangolo è adatto alle macchine che hanno una coppia resistente bassa, o che si avviano a vuoto. Per limitare questi fenomeni transitori può essere necessario, oltre una certa potenza, utilizzare alcuni accorgimenti. Uno consiste in una temporizzazione da 1 a 2 secondi al passaggio stella-triangolo.

Questa temporizzazione consente una diminuzione della f.c.e.m. e quindi del picco di corrente transitorio.

Questa temporizzazione può essere utilizzata solo se la macchina ha un'inerzia sufficiente ad evitare un rallentamento eccessivo durante il periodo di temporizzazione.

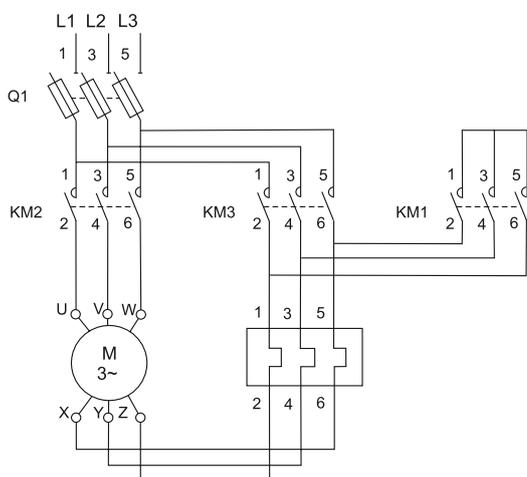
Un altro accorgimento è nell'avviamento in 3 tempi: stella-triangolo + resistenza-triangolo.

L'interruzione sussiste, ma la resistenza messa in serie per tre secondi circa con gli avvolgimenti collegati a triangolo riduce il picco di corrente transitorio.

Un'altra soluzione è l'avviamento stella-triangolo + resistenza-triangolo senza interruzione.

La resistenza viene messa in serie con gli avvolgimenti immediatamente prima dell'apertura del contattore stella. Questo evita ogni interruzione di corrente, quindi la comparsa di fenomeni transitori.

L'impiego di questi sistemi comporta l'installazione di componenti supplementari, cosa che può comportare un aumento non trascurabile del costo dell'impianto.



1 Fig. 2 Avviamento stella triangolo

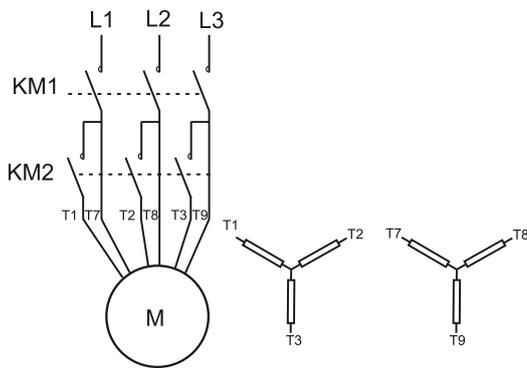


Fig. 3 Avviamento ad avvolgimenti divisi

### Avviamento di motori ad avvolgimenti divisi "part winding"

Questo sistema (⇔ Fig.3), poco utilizzato in Europa, viene impiegato soprattutto sul mercato nord americano (tensione 230/460 V, rapporto uguale a 2). Questo tipo di motore ha l'avvolgimento dello statore sdoppiato in due avvolgimenti paralleli con sei o dodici morsetti uscite. Equivale a due "semi-motori" di uguale potenza.

All'avviamento, un solo "mezzo-motore" viene collegato alla piena tensione di rete, cosa che divide approssimativamente in due la corrente di avviamento e la coppia. Quest'ultima è a sua volta superiore alla coppia che potrebbe fornire un motore a gabbia della stessa potenza con avviamento stella-triangolo.

A fine avviamento il secondo avvolgimento viene collegato sulla rete. In questo momento il picco di corrente è basso e breve poiché il motore non è stato separato dalla rete di alimentazione e non resta che un basso scorrimento.

### Avviamento statorico a resistenza

Il principio (⇔ Fig.4) consiste nell'avviare il motore a tensione ridotta inserendo alcune resistenze in serie con gli avvolgimenti. Quando la velocità si stabilizza, le resistenze vengono scollegate e il motore è collegato direttamente sulla rete. Questa operazione è generalmente comandata da un temporizzatore.

In questo tipo di avviamento, il collegamento degli avvolgimenti del motore non viene modificato. Quindi non è necessario che le due estremità siano portate sulla morsettiera.

Il valore della resistenza viene calcolato in modo da non superare il picco di corrente desiderato o il valore minimo della coppia di avviamento necessario, tenuto conto della coppia resistente della macchina azionata.

- $I_d = 4.5 I_n$
- $C_d = 0.75 C_n$

Durante la fase di accelerazione con le resistenze, la tensione applicata ai morsetti del motore non è costante. Questa tensione è uguale alla tensione della rete meno la caduta di tensione nella resistenza di avviamento.

La caduta di tensione è proporzionale alla corrente assorbita dal motore. Dal momento che la corrente diminuisce in proporzione all'accelerazione del motore, succede lo stesso per la caduta di tensione nella resistenza. La tensione applicata ai morsetti del motore è quindi minima al momento dell'avviamento e aumenta progressivamente.

Poiché la coppia è proporzionale al quadrato della tensione dei morsetti del motore, essa aumenta più rapidamente che in avviamento stella-triangolo dove la tensione resta fissa durante tutto il tempo dell'accoppiamento a stella.

Questo tipo di avviamento è quindi particolarmente adatto alle macchine con coppia resistente crescente con la velocità, quali ad esempio i ventilatori o le pompe centrifughe.

Presenta l'inconveniente di un picco di corrente relativamente elevato all'avviamento. Questo picco potrebbe essere ridotto aumentando il valore della resistenza, ma in tal modo si genera una caduta di tensione supplementare ai morsetti del motore e di conseguenza una notevole diminuzione della coppia di avviamento.

In compenso, l'eliminazione della resistenza a fine avviamento avviene senza interruzione dell'alimentazione del motore, quindi senza fenomeni transitori.

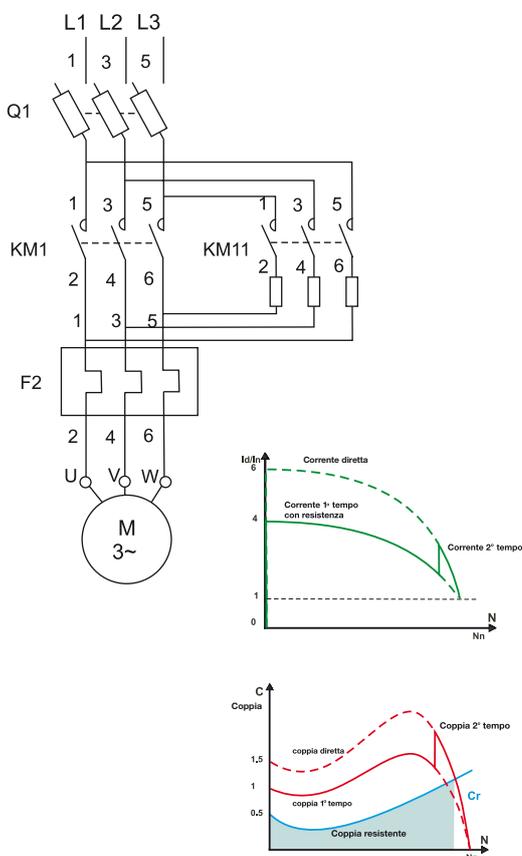
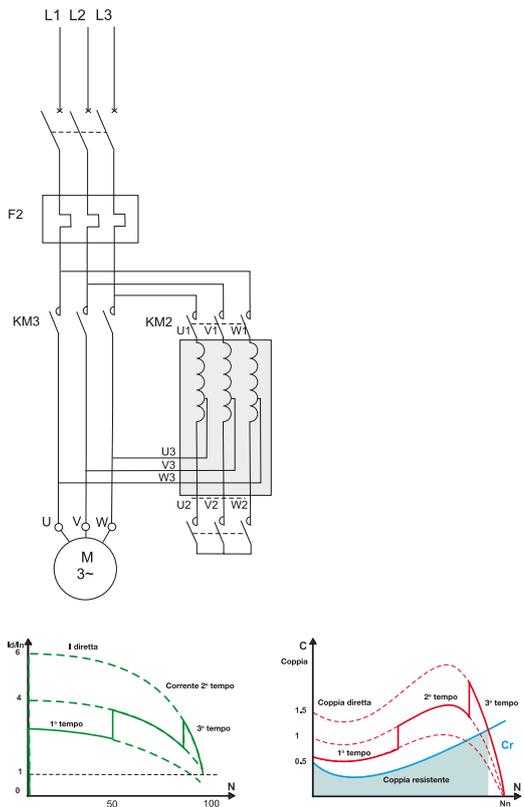


Fig. 4 Avviamento dello statore mediante resistenza



1 Fig. 5 Avviamento mediante autotrasformatore

#### □ Avviamento mediante autotrasformatore

Il motore è alimentato a tensione ridotta mediante un autotrasformatore che viene scollegato ad avviamento terminato (⇐ Fig.5).

L'avviamento si effettua in tre tempi:

- durante il primo tempo l'autotrasformatore viene innanzitutto collegato a stella, poi il motore viene collegato alla rete attraverso una parte degli avvolgimenti dell'autotrasformatore.
- L'avviamento si effettua ad una tensione ridotta che dipende dal rapporto di trasformazione. L'autotrasformatore è solitamente dotato di prese che consentono di scegliere il rapporto di trasformazione, quindi il valore della tensione ridotta più adatta,
- prima di passare alla piena tensione, il collegamento a stella viene aperto. La parte di bobinatura collegata alla rete costituisce dunque un'induttanza in serie con il motore. Questa operazione viene effettuata quando viene raggiunta la velocità di equilibrio alla fine del primo tempo,
- il collegamento alla piena tensione avviene dopo il secondo tempo generalmente molto breve (una frazione di secondo). La parte di avvolgimento dell'autotrasformatore in serie con il motore viene messa in cortocircuito, quindi viene messo fuori circuito l'autotrasformatore.

La corrente e la coppia di avviamento variano nelle stesse proporzioni. Sono divise per  $(U_{\text{rete}}/U_{\text{ridotta}})$ .

I valori ottenuti sono i seguenti:

$$I_d = \text{da } 1.7 \text{ a } 4 I_n$$

$$C_d = \text{da } 0.5 \text{ a } 0.85 C_n$$

L'avviamento si effettua senza interruzione della corrente nel motore.

Per questo i fenomeni transitori collegati a questo tipo di interruzione non esistono.

In compenso possono verificarsi fenomeni transitori della stessa natura in caso di alimentazione a piena tensione se non vengono prese alcune precauzioni. In effetti il valore dell'induttanza in serie con il motore dopo l'apertura del collegamento a stella è elevato rispetto a quella del motore. Ne consegue una caduta di tensione rilevante che genera un picco di corrente transitorio elevato al momento del passaggio a piena tensione. Per evitare questo inconveniente, il circuito magnetico dell'autotrasformatore comprende un intraferro la cui presenza porta ad una diminuzione del valore dell'induttanza. Questo valore viene calcolato in modo che al momento dell'apertura del collegamento a stella durante il secondo tempo, non ci sia variazione di tensione ai morsetti del motore.

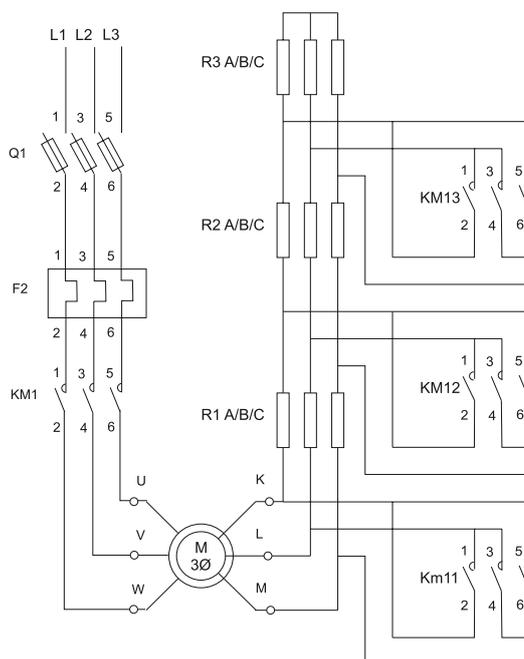
La presenza del traferro provoca un aumento della corrente magnetizzante dell'autotrasformatore. Questa corrente magnetizzante aumenta lo spunto di corrente nella rete durante la messa sotto tensione dell'autotrasformatore.

Questo tipo di avviamento viene generalmente utilizzato in BT per motori di potenza superiore a 150 kW, ma porta comunque ad apparecchiature relativamente costose a causa dell'elevato prezzo dell'autotrasformatore.

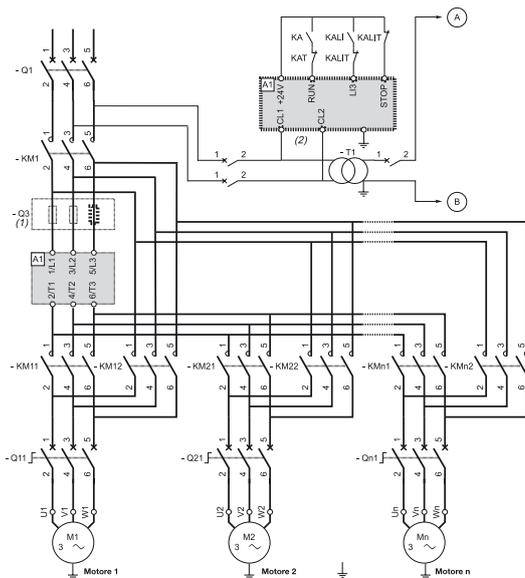
#### □ Avviamento dei motori ad anelli

Un motore ad anelli non può essere avviato direttamente con gli avvolgimenti rotorici in cortocircuito, senza provocare picchi di corrente inaccettabili.

È necessario, alimentando lo statore alla piena tensione della rete, inserire nel circuito rotorico delle resistenze (⇐ Fig.6) che in seguito verranno progressivamente messe in cortocircuito.



1 Fig. 6 Avviamento di un motore ad anelli



↑ Fig. 7 Avviamento multi-motore con un avviatore elettronico

Il calcolo della resistenza inserita in ogni fase consente di determinare in modo rigoroso la curva coppia-velocità ottenuta. Ne risulta che questa deve essere inserita tutta al momento dell'avviamento e che la piena velocità viene raggiunta quando è interamente messa in cortocircuito.

La corrente assorbita è sostanzialmente proporzionale alla coppia fornita, o, perlomeno, supera solo di poco questo valore teorico.

Ad esempio, per una coppia di avviamento uguale a  $2 C_n$ , il picco di corrente è di circa  $2 I_n$ . Questo picco è quindi considerabilmente più basso e la coppia massima di avviamento più elevata che con un motore a gabbia per il quale i valori tipici, in accoppiamento diretto sulla rete, sono dell'ordine di  $6 I_n$  per  $1,5 C_n$ .

Il motore ad anelli, con un avviamento rotorico, è obbligatorio in tutti i casi in cui i picchi di corrente devono essere bassi e per macchine con avviamento a pieno carico.

Questo tipo di avviamento è inoltre estremamente veloce, poiché è facile adeguare il numero e l'andatura delle curve che rappresentano i tempi successivi ai limiti meccanici o elettrici (coppia resistente, valore di accelerazione, picco massimo di corrente, ecc.).

### □ Avviamento/rallentamento con soft starter

I soft starter, o più comunemente avviatori progressivi, sono apparecchiature elettroniche relativamente recenti (↔ Fig.7) rispetto ai tradizionali sistemi di avviamento. Consentono un avviamento e un arresto in graduale (per maggiori dettagli consultare la parte dedicata agli avviatori elettronici nel capitolo 5 Partenze-motore).

Possono essere utilizzati:

- in limitazione di corrente,
- in regolazione di coppia.

Il controllo a limitazione di corrente consente di fissare una corrente massima (da 3 a  $4 \times I_n$ ) durante la fase di avviamento a scapito delle prestazioni in coppia. Questo tipo di controllo è particolarmente adatto alle turbomacchine (pompe centrifughe, ventilatori).

Il controllo a regolazione di coppia consente di ottimizzare le prestazioni in coppia all'avviamento a scapito dello spunto di corrente sulla rete. Questo tipo di avviamento è particolarmente adatto alle macchine a coppia costante.

Questo tipo di avviatore permette di realizzare diversi tipi di schemi:

- un senso di marcia,
- due sensi di marcia,
- lo shunt dell'apparecchio a fine avviamento,
- avviamento e rallentamento di più motori in cascata, (↔ Fig.7).
- ecc...

### □ Avviamento con convertitore di frequenza

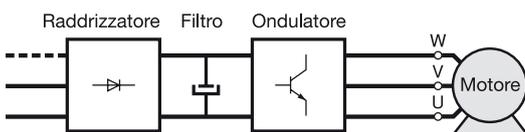
È un tipo di avviamento (↔ Fig.8) utilizzato quando è necessario controllare e variare la velocità (per maggiori dettagli consultare la parte dedicata alla variazione di velocità nel capitolo 5 Partenze-motore).

Il convertitore di frequenza consente tra l'altro:

- l'avviamento di carichi di forte inerzia,
- l'avviamento di carichi elevati su una rete con basso potere di cortocircuito,
- l'ottimizzazione del consumo energetico in funzione della velocità sulle turbomacchine.

Questo tipo di avviamento si applica a tutti i tipi di macchina.

Questa soluzione viene utilizzata per la regolazione della velocità del motore e in modo complementare per l'avviamento.



↑ Fig. 8 Schema di principio di un convertitore di frequenza

□ **Tabella riepilogativa dei diversi modi di avviamento dei motori trifase** (↔ Fig.9)

	Diretto	Stella-triangolo	Avvolgimenti divisi	Resistenze	Auto-trasformatore	Motori ad anelli	Soft starter	Convertitore di frequenza
Motore	Standard	Standard	6 avvolgimenti	Standard	Standard	Specifico	Standard	Standard
Costo	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++
Corrente di avviamento motore	da 5 a 10 I <sub>N</sub>	da 2 a 3 I <sub>N</sub>	2 I <sub>N</sub>	Circa 4.5 I <sub>N</sub>	da 1.7 a 4 I <sub>N</sub>	Circa 2 I <sub>N</sub>	da 4 a 5 I <sub>N</sub>	I <sub>N</sub>
Caduta di tensione	Elevato	Elevato al cambiamento di accoppiamento	Basso	Basso	Basso, precauzioni da prendere all'accoppiamento diretto	Basso	Basso	Basso
Armoniche tensione e corrente	Elevato	Moderato	Moderato	Moderato	Moderato	Basso	Elevato	Elevato
Fattore di potenza	Basso	Basso	Moderato	Moderato	Basso	Moderato	Basso	Elevato
Numero di avviamenti possibili	Limitato	da 2 a 3 volte di più rispetto al diretto	da 3 a 4 volte di più rispetto al diretto	da 3 a 4 volte di più rispetto al diretto	da 3 a 4 volte di più rispetto al diretto	da 2 a 3 volte di più rispetto al diretto	Limitato	Elevato
Coppia disponibile	Circa 2.5 C <sub>n</sub>	da 0.2 a 0.5 C <sub>n</sub>	2 C <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	Circa 0.5 C <sub>n</sub>	Circa 2c <sub>n</sub>	Circa 0.5 C <sub>n</sub>	da 1.5 a 2 C <sub>n</sub>
Sollecitazione termica	Notevole	Elevata	Moderata	Elevata	Moderata	Moderata	Moderata	Bassa
Choc meccanico	Notevole	Moderato	Moderato	Moderato	Moderato	Basso	Moderato	Basso
Tipo di carico consigliato	Tutti	A vuoto	Coppia crescente	Pompe e ventilatori	Pompe e ventilatori	Tutti	Pompe e ventilatori	Tutti
Carichi a forte inerzia	Si *	No	No	No	No	Si	No	Si

\* può richiedere un dimensionamento particolare del motore

↑ Fig. 9 Tabella riepilogativa

□ **Avviamento dei motori monofase**

Un motore monofase non può partire da solo; per il suo avviamento si usano diversi metodi.

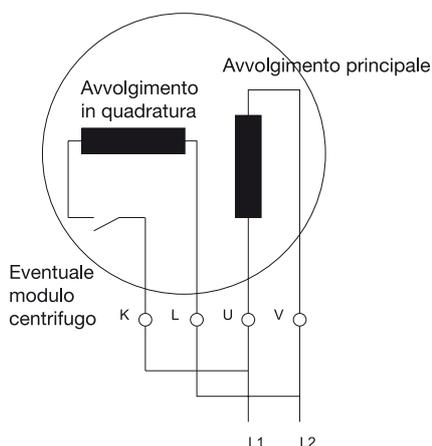
□ **Avviamento mediante fase ausiliaria**

Su questo tipo di motore (↔ Fig.10), lo statore comprende due avvolgimenti sfasati geometricamente di 90°.

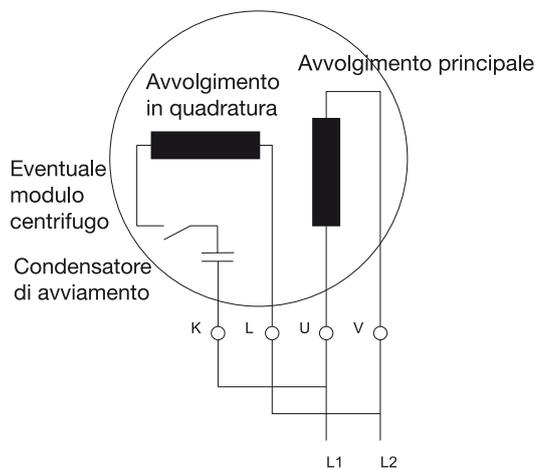
Alla messa sotto tensione, per la differenza di costruzione degli avvolgimenti, una corrente I<sub>1</sub> attraversa la fase principale e una corrente più bassa I<sub>2</sub>, sfasata nel tempo di  $\pi/2$ , circola nella fase ausiliaria. Poichè i campi generati sono prodotti da due correnti sfasate una rispetto all'altra, il campo rotante risultante è sufficiente a provocare l'avviamento a vuoto del motore. Quando il motore raggiunge circa l'80% della sua velocità, la fase ausiliaria può essere esclusa (modulo centrifugo), o mantenuta in servizio. Lo statore del motore si trova così trasformato, al momento dell'avviamento o permanentemente, in statore bifase.

Per invertire il senso di rotazione è sufficiente invertire le connessioni di una fase.

Poichè la coppia fornita all'avviamento è bassa per elevarla conviene aumentare lo sfasamento tra i due campi prodotti dalle bobinature.



↑ Fig. 10 Motore monofase a fase ausiliaria



↑ Fig. 11 Motore monofase a condensatore di avviamento

□ **Avviamento mediante fase ausiliaria e resistenza**

Una resistenza posizionata in serie nella fase ausiliaria ne aumenta l'impedenza e accresce lo sfasamento tra I1 e I2.

Il funzionamento a fine avviamento è uguale a quello con fase ausiliaria unica.

□ **Avviamento mediante fase ausiliaria e induttanza**

Il principio è lo stesso di prima, ma la resistenza viene sostituita da un'induttanza che, montata in serie nella fase ausiliaria, aumenta lo sfasamento tra le due correnti.

□ **Avviamento mediante fase ausiliaria e condensatore**

È il metodo più utilizzato (⇔ Fig. 11). Consiste nel posizionare un condensatore nella fase ausiliaria. Il valore pratico della capacità per il condensatore permanente è di circa 8 µF per un motore da 200 W. Per l'avviamento, potrebbe essere necessario un condensatore supplementare da 16 µF, da eliminare ad avviamento terminato.

Il funzionamento all'avviamento e in marcia normale è più o meno simile a quello di un motore bifase a campo rotante, dal momento che la presenza di un condensatore provoca uno sfasamento inverso a quello di un'induttanza. D'altra parte, la coppia e il fattore di potenza sono più elevati. La coppia di avviamento Cd è pari a 3 volte la coppia nominale Cn e la coppia massima Cmax raggiunge 2 Cn.

Una volta effettuato l'avviamento può essere utile mantenere lo sfasamento tra le due correnti, anche se la capacità del condensatore può essere ridotta poichè l'impedenza dello statore è aumentata.

Lo schema (⇔ Fig. 11) rappresenta un motore monofase con un condensatore permanentemente collegato. Vengono utilizzati altri metodi, come l'apertura del circuito di sfasamento mediante un interruttore centrifugo a partire da una certa velocità.

Un motore trifase (230/400 V) può essere utilizzato su rete monofase 230 V dotandolo di un condensatore di avviamento e di un condensatore permanente di marcia collegato fisso a scapito della potenza utile (declassamento di circa 0.7), della coppia di avviamento e della riserva termica.

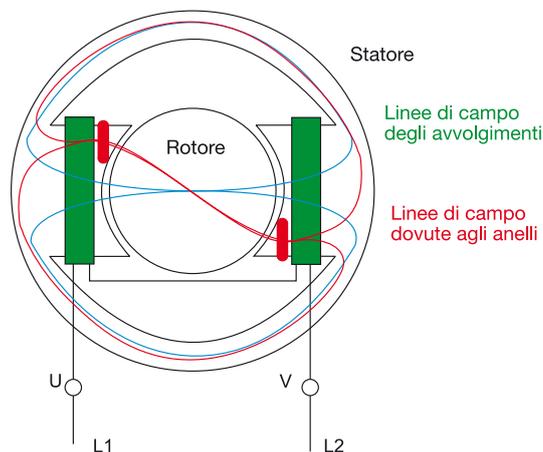
Questo tipo di funzionamento è possibile solo per motori quattro poli di bassa potenza (4 kW max).

I costruttori forniscono apposite tabelle per la scelta dei condensatori di valore appropriato.

□ **Avviamento mediante anello di sfasamento**

È il dispositivo (⇔ Fig. 12) utilizzato nei motori di bassissima potenza (dell'ordine di un centinaio di watt). I poli presentano degli incastri in cui vengono inseriti degli anelli conduttori in cortocircuito. La corrente indotta, così generata, provoca una distorsione del campo rotante che permette l'avviamento.

Il rendimento è basso, ma accettabile per questa gamma di potenza.



↑ Fig. 12 Motore ad anelli di sfasamento

## 4.2 Frenatura elettrica dei motori asincroni trifase

### 4.2 Frenatura elettrica dei motori asincroni trifase

#### ■ Introduzione

In un gran numero di applicazioni l'arresto del motore si ottiene semplicemente mediante decelerazione naturale. Il tempo di decelerazione, quindi, dipende unicamente dall'inerzia della macchina azionata. Spesso tuttavia è necessario ridurre questo tempo. La frenatura elettrica in questo caso fornisce una soluzione semplice ed efficace. Rispetto alle frenature idraulica e meccanica offre il vantaggio di essere semplice e di non provocare l'usura di alcun elemento.

#### ■ Frenatura in controcorrente: principio

Il principio di funzionamento consiste nell'isolare il motore dalla rete quando gira ancora e nel ricollegarlo sulla rete in senso inverso. Si tratta di un tipo di frenatura molto efficace con una coppia, solitamente superiore alla coppia di avviamento, bisogna arrestare abbastanza presto per evitare che il motore riparta in senso opposto.

Per comandare l'arresto quando la velocità si avvicina a zero vengono utilizzati diversi dispositivi automatici:

- rilevatori di arresto a frizione, rilevatori centrifughi di arresto,
- dispositivi cronometrici,
- relè di misura della frequenza o della tensione al rotore (rotore avvolto), ecc...

#### □ Motore a gabbia

Prima di adottare questo sistema (↔ Fig. 13) è assolutamente necessario assicurarsi che il motore sia in grado di sopportare frenature in controcorrente con il servizio in oggetto. In effetti, oltre alle sollecitazioni meccaniche, questo processo richiede energie termiche specifiche elevate al rotore, poichè l'energia corrispondente a ogni frenatura (energia di scorrimento sottratta alla rete ed energia cinetica) viene dissipata nella gabbia. Le sollecitazioni termiche in fase di frenatura sono tre volte più elevate rispetto all'avviamento.

Al momento della frenatura i picchi di corrente e di coppia sono nettamente superiori a quelli prodotti durante l'avviamento.

Per ottenere una frenatura non brusca viene spesso inserita, durante l'accoppiamento in controcorrente, una resistenza in serie con ogni fase dello statore. La coppia e la corrente vengono quindi ridotte come nel caso dell'avviamento dello statore.

Gli inconvenienti della frenatura in controcorrente di un motore a gabbia sono tali che questo processo viene utilizzato solo su alcune applicazioni con motori di bassa potenza.

#### □ Motore a rotore bobinato (Motore ad anelli)

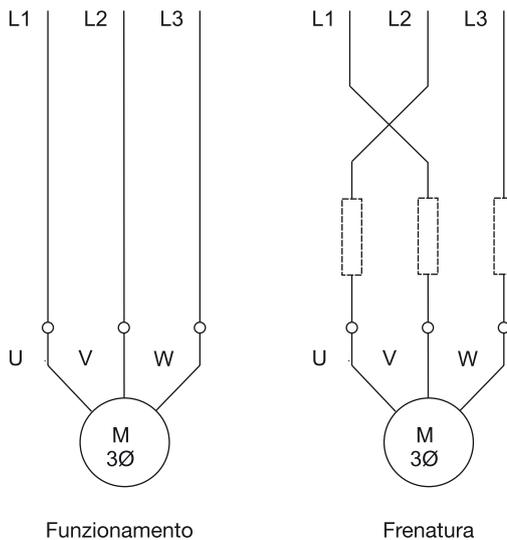
Per limitare il picco di corrente e di coppia è assolutamente necessario, prima di collegare lo statore del motore in controcorrente, reinserire le resistenze rotoriche utilizzate all'avviamento, e spesso anche aggiungere una sezione supplementare detta di frenatura (↔ Fig. 14).

La coppia di frenatura può essere facilmente regolata al valore desiderato scegliendo una resistenza rotorica adatta.

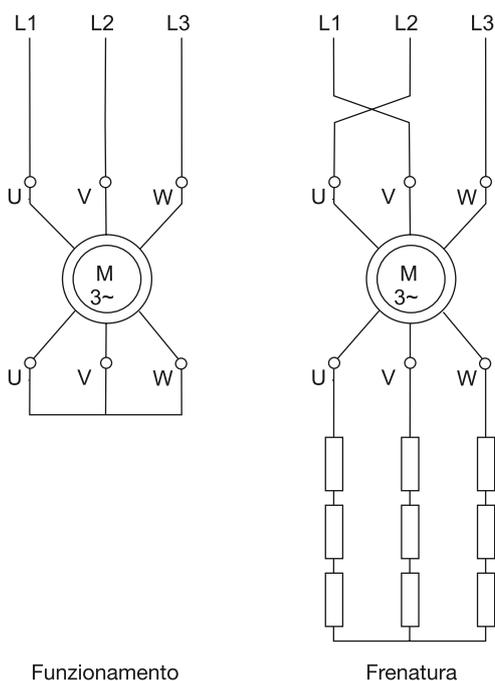
Al momento dell'inversione la tensione rotorica è quasi il doppio della tensione rotorica all'arresto, cosa che talvolta richiede particolari accorgimenti d'isolamento.

Come per i motori a gabbia nel circuito rotorico si produce un'elevata energia in gran parte dissipata nelle resistenze.

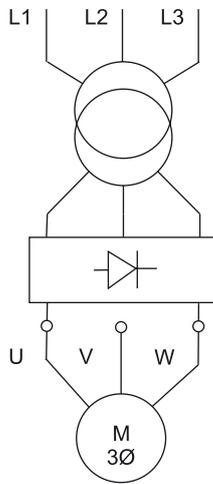
Il comando automatico dell'arresto a velocità nulla può essere effettuato con uno dei dispositivi sopra citati o anche mediante un relè di tensione o di frequenza inserito nel circuito rotorico.



↑ Fig. 13 Principio della frenatura controcorrente



↑ Fig. 14 Principio della frenatura controcorrente per una macchina asincrona ad anelli



↑ Fig. 15 Principio di frenatura a corrente continua per una macchina asincrona

Con questo sistema è possibile mantenere un carico trascinante ad una velocità moderata. La caratteristica è molto instabile (forti variazioni di velocità per basse variazioni di coppia).

#### ■ Frenatura con iniezione di corrente raddrizzata

Questo tipo di frenatura viene utilizzato sui motori ad anelli e a gabbia (↔ Fig.15). Rispetto al sistema in controcorrente, il prezzo dell'alimentazione di corrente raddrizzata viene compensato da un minor volume delle resistenze. Con i variatori e con gli avviatori elettronici, questa possibilità di frenatura viene offerta senza supplemento di costo.

Il processo consiste nell'inviare corrente raddrizzata nello stator precedentemente separato dalla rete. Questa corrente raddrizzata crea un flusso statico nel traferro del motore. Perché il valore di questo flusso corrisponda ad una corretta frenatura, la corrente deve essere circa 1,3 volte la corrente nominale. L'eccesso di perdite termiche dovute a questa leggera sovracorrente viene generalmente compensato dal tempo di arresto dopo la frenatura.

Poiché il valore della corrente è fissato dall'unica resistenza degli avvolgimenti dello stator, la tensione dell'alimentazione di corrente raddrizzata è bassa. Questa alimentazione è solitamente costituita da raddrizzatori o fornita da variatori. Questi devono poter sopportare le sovratensioni transitorie prodotte dagli avvolgimenti appena scollegati dalla rete alternata (ad esempio a 400 volt efficaci).

Il movimento del rotore rappresenta uno scorrimento rispetto a un campo fisso nello spazio (mentre, nel sistema in controcorrente, il campo ruota in senso inverso). Il motore si comporta come un generatore sincrono con emissione nel rotore. Le caratteristiche ottenute con un sistema di frenatura a iniezione di corrente raddrizzata presentano, rispetto a quelle di un sistema in controcorrente, importanti differenze:

- l'energia dissipata nelle resistenze rotoriche o nella gabbia è meno elevata. Si tratta unicamente dell'equivalente dell'energia meccanica trasmessa dalle masse in movimento. L'unica energia sottratta alla rete è l'eccitazione dello stator,
- se il carico non è trascinante, il motore non si avvia in senso inverso,
- se il carico è trascinante, il sistema fornisce una frenatura permanente che mantiene il carico a bassa velocità. Si tratta quindi di una frenatura di rallentamento e non di una frenatura di arresto. La caratteristica è molto più stabile che in controcorrente.

Nel caso di un motore ad anelli, le caratteristiche coppia-velocità dipendono dalla scelta delle resistenze.

Nel caso di un motore a gabbia questo sistema consente di regolare facilmente la coppia di frenatura agendo sulla corrente continua di eccitazione. Tuttavia quando il motore gira a velocità elevata la coppia di frenatura sarà bassa.

Per evitare inutili riscaldamenti, è necessario prevedere un dispositivo che interrompa la corrente nello stator una volta realizzata la frenatura.

#### ■ Frenatura elettronica

La frenatura elettronica si ottiene facilmente con un variatore di velocità dotato di una resistenza di frenatura. Il motore asincrono si comporterà come un generatore e l'energia meccanica verrà dissipata nella resistenza di frenatura senza aumento delle perdite nel motore.

Per maggiori dettagli consultare la parte dedicata alla variazione di velocità elettronica nel [capitolo 5 Partenze-motore](#).

### ■ Frenatura a funzionamento in ipersincronismo

Si tratta del caso in cui il motore viene azionato mediante il suo carico al di sopra della velocità di sincronismo. Si comporta come un generatore asincrono e sviluppa una coppia di frenatura. A parte le perdite, l'energia viene recuperata mediante la rete.

Su un motore di sollevamento, la discesa del carico alla velocità nominale corrisponde a questo tipo di funzionamento.

La coppia di frenatura equilibra esattamente la coppia dovuta al carico e non provoca un rallentamento, ma una marcia a velocità costante.

Se si tratta di un motore ad anelli, è indispensabile mettere in cortocircuito tutte o parte delle resistenze rotoriche per evitare che il motore venga azionato troppo al di là della sua velocità nominale, con i rischi meccanici che questo comporterebbe.

Questo funzionamento ha le qualità ideali di un sistema di ritenuta di carico trascinante:

- la velocità è stabile, praticamente indipendente dalla coppia trascinante,
- l'energia viene recuperata e rinviata alla rete.

Corrisponde comunque ad una sola velocità, ossia approssimativamente alla velocità nominale.

La frenatura in ipersincronismo si incontra anche sui motori a più velocità al passaggio dall'alta alla bassa velocità.

La frenatura in ipersincronismo può essere facilmente realizzata con un variatore di velocità elettronico; per azionarla automaticamente è sufficiente il semplice abbassamento del valore di regolazione della frequenza.

### ■ Altri sistemi di frenatura

Talvolta si incontra ancora la frenatura in monofase che consiste nell'alimentare il motore tra due fasi della rete riunendo il morsetto libero a uno degli altri due collegati alla rete. La coppia di frenatura è limitata a 1/3 della coppia massima motore. Questo sistema non tuttavia è in grado di frenare il pieno carico e richiede quindi di essere completato da una frenatura in controcorrente. Questo funzionamento si accompagna tuttavia a squilibri e perdite rilevanti. Citiamo anche la frenatura con rallentatori basati sul principio delle correnti parassite di Foucault che si creano su masse metalliche massicce ruotanti in un campo magnetico uniforme. L'energia meccanica viene dissipata in calore nel rallentatore. La regolazione della frenatura si ottiene facilmente mediante un avvolgimento di eccitazione. L'aumento elevato dell'inerzia rappresenta tuttavia un inconveniente.

#### □ Inversione del senso di marcia

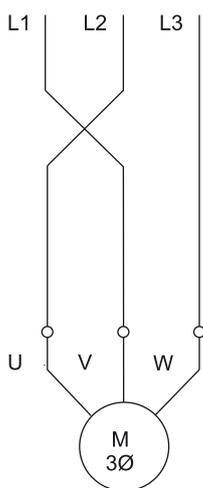
L'inversione del senso di marcia dei motori asincroni trifase (⇔ Fig. 16) si ottiene semplicemente con l'inversione del campo rotante nel motore, realizzabile incrociando due avvolgimenti.

Questa inversione si effettua generalmente nella fase di arresto. In caso contrario l'inversione delle fasi produce una frenatura in controcorrente (vedere il paragrafo Motore a rotore bobinato). Sono possibili anche gli altri tipi di frenatura sopra descritti.

L'inversione del senso di rotazione dei motori monofase è ugualmente realizzabile se è possibile accedere a tutti gli avvolgimenti.

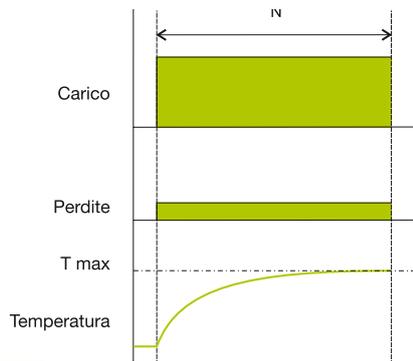
### ■ Definizione dei tipi di servizio

Il numero di avviamenti e il numero di frenature per unità di tempo ha un'incidenza maggiore sul riscaldamento dei motori. La norma IEC 60034-1 (caratteristiche nominali e caratteristiche di funzionamento) definisce dei tipi di servizio che consentono di calcolare un'immagine termica e di calibrare i motori in funzione dell'impiego previsto. I paragrafi che seguono forniscono un panorama dei tipi di servizio. Per maggiori dettagli consultare la norma e i cataloghi dei costruttori di motori.

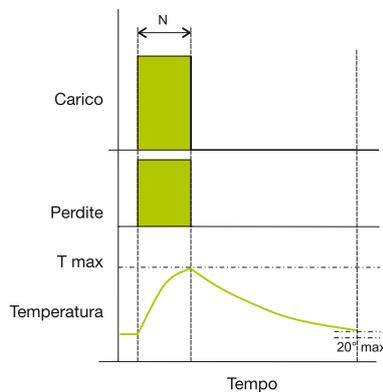


↑ Fig. 16

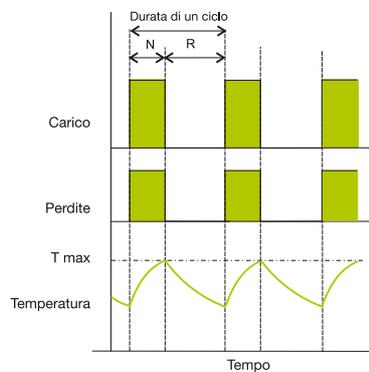
Principio d'inversione del senso di marcia di un motore asincrono



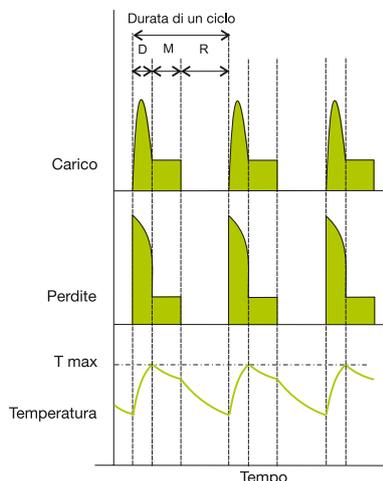
↑ Fig. 17 S1 Servizio continuo



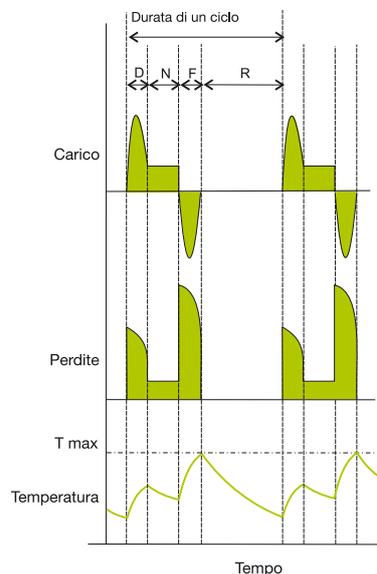
↑ Fig. 18 S2 Servizio di durata limitata



↑ Fig. 19 S3 Servizio intermittente periodico



↑ Fig. 20 S4 Servizio intermittente periodico con avviamento



↑ Fig. 21 S5 Servizio intermittente periodico con frenatura elettrica

□ S1 - Servizio continuo (↔ Fig.17)

Funzionamento a carico costante di durata sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio termico.

□ S2 - Servizio di durata limitata (↔ Fig.18)

Funzionamento a carico costante per un periodo di tempo determinato inferiore a quello richiesto per raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un periodo di riposo (spento) di durata sufficiente a ristabilire l'eguaglianza fra la temperatura della macchina e quella del fluido di raffreddamento.

□ S3 - Servizio intermittente periodico (↔ Fig.19)

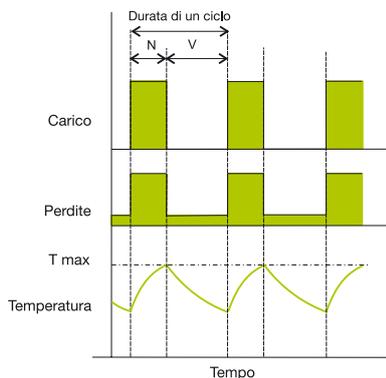
Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un periodo di funzionamento a carico costante ed un periodo di riposo a motore spento. La corrente di avviamento, in questo tipo di ciclo, non influenza la sovratemperatura in modo significativo.

□ S4 - Servizio intermittente periodico con avviamento (↔ Fig.20)

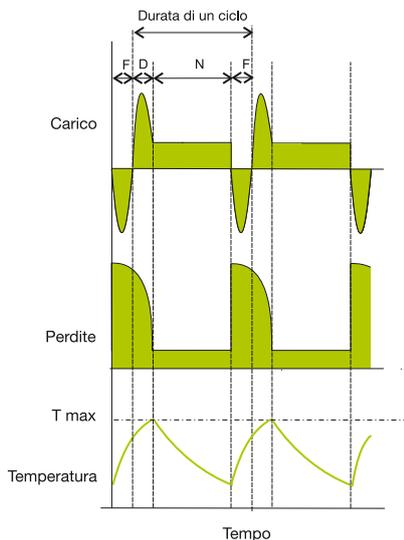
Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno con un periodo di funzionamento e un periodo di riposo. La corrente di spunto ha effetti trascurabili sul surriscaldamento del motore.

□ S5 - Servizio intermittente periodico con frenatura elettrica (↔ Fig.21)

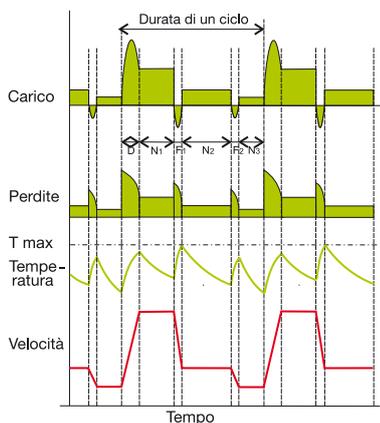
Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente una fase di avviamento, un periodo di funzionamento a carico costante, una fase di frenatura elettrica rapida e un periodo di riposo.



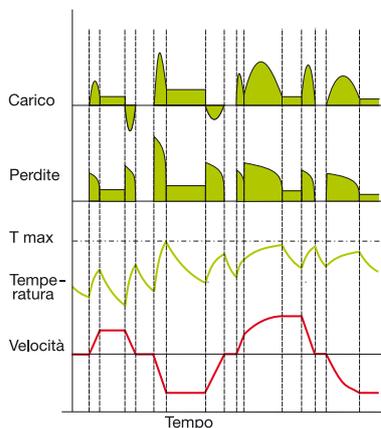
↑ Fig. 22 S6 Servizio interrotto periodico con carico intermittente



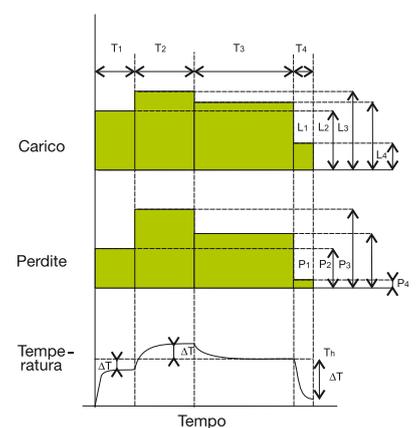
↑ Fig. 23 S7 Servizio interrotto periodico con frenatura elettrica



↑ Fig. 24 S8 Servizio interrotto periodico con variazioni correlate di carico e di velocità



↑ Fig. 25 S9 Servizio con variazioni non periodiche di carico e di velocità



↑ Fig. 26 S10 Servizio a regimi costanti distinti

#### □ S6 - Servizio ininterrotto periodico con carico intermittente (↔ Fig.22)

Sequenza di cicli di funzionamento identici ciascuno comprendente un periodo di funzionamento a carico costante e un periodo di funzionamento a vuoto. Non esiste alcun periodo di riposo.

#### □ S7 - Servizio ininterrotto periodico con frenatura elettrica (↔ Fig.23)

Sequenza di cicli di funzionamento identici ciascuno comprendente una fase di avviamento, un periodo di funzionamento a carico costante e una fase di frenatura elettrica. Non esiste alcun periodo di riposo.

#### □ S8 - Servizio ininterrotto periodico con variazioni correlate di carico e di velocità (↔ Fig.24)

Sequenza di cicli di funzionamento identici ciascuno comprendente un periodo di funzionamento a carico costante corrispondente a una prestabilita velocità di rotazione, seguito da uno o più periodi di funzionamento con altri carichi costanti corrispondenti a diverse velocità di rotazione. Non esiste alcun periodo di riposo.

#### □ S9 Servizio con variazioni non periodiche di carico e di velocità (↔ Fig.25)

Servizio in cui generalmente il carico e la velocità hanno una variazione non periodica compresa nella gamma di funzionamento ammessa. Prevede sovraccarichi frequenti che possono essere ampiamente superiori al pieno carico.

#### □ S10 Servizio a regimi costanti distinti (↔ Fig.26)

Servizio con un massimo di quattro diversi valori di carico (o di carichi equivalenti), applicati ciascuno per un periodo di tempo sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico. Il carico minimo per un ciclo di carico può avere valore zero (funzionamento a vuoto o tempo di riposo).

4.3 Gli avviatori multifunzione

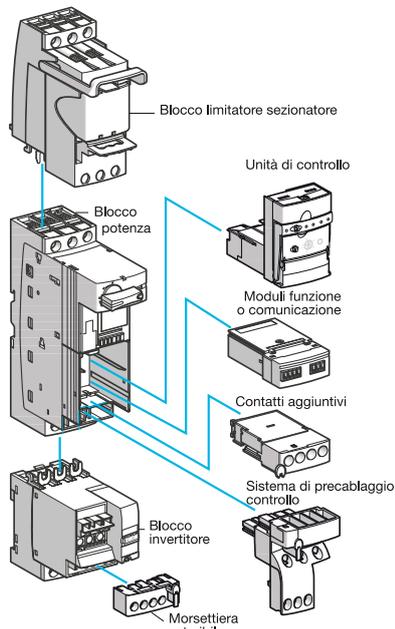


Fig. 27 Tesys U

Negli ultimi anni l'evolversi delle esigenze dell'utenza ha prodotto la profonda evoluzione degli avviatori.

Tra le esigenze dell'utenza vi sono:

- la riduzione del volume dei prodotti per facilitarne l'integrazione nelle apparecchiature riducendo le dimensioni di queste ultime,
- la semplificazione del coordinamento della protezione,
- la diminuzione del numero di prodotti (codici),
- la facilità e rapidità di cablaggio per riduzione dei costi di mano d'opera,
- l'aumento di funzione di automazione a costi contenuti,
- le necessità di comunicazione impiegando i bus di campo.

Nel 1983 la serie Integral di Telemecanique è stata la prima a rispondere a tutte queste esigenze. Questa gamma di prodotti offriva infatti per la prima volta e raggruppate nello stesso involucro, le seguenti funzioni:

- il sezionamento,
- la commutazione,
- la protezione contro i sovraccarichi e i cortocircuiti con le prestazioni dei miglior apparecchi disponibili sul mercato (per maggiori dettagli vedere par. 4.4 Protezione dei motori).

Quasi vent'anni dopo con i sensibili progressi tecnologici Schneider Electric propone Tesys U, una gamma di prodotti che rappresenta una notevole evoluzione.

Tesys U garantisce il coordinamento totale. Rispetto ad una soluzione tradizionale la gamma è composta da un decimo dei componenti, il risparmio di cablaggio raggiunge il 60 % e le dimensioni d'ingombro sono ridotte di oltre il 40 %.

Il disegno (Fig.27) rappresenta un avviatore Tesys U con una parte degli accessori.

Comprende le funzioni essenziali delle partenze-motore alle quali si sommano, grazie ad elementi aggiuntivi, sofisticate funzioni di dialogo e di comunicazione che permettono la realizzazione di schemi inediti particolarmente economici. L'avviatore Tesys U è composto da una base di potenza che integra le funzioni di sezionamento, di commutazione e di protezione. La base potenza è l'elemento che permette la funzione elementare qui di seguito illustrata.

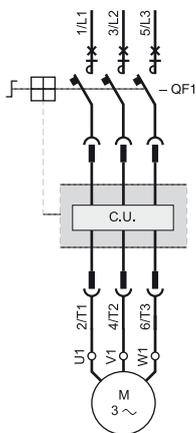


Fig. 28 Schema di principio dell'avviatore Tesys U

■ Un senso di marcia

Lo schema (Fig.28) rappresenta la composizione interna del prodotto. La base potenza integra tutti i componenti necessari alle funzioni di sezionamento, di protezione contro i cortocircuiti e i sovraccarichi e di commutazione.

La base potenza consente di realizzare, senza alcun elemento aggiuntivo, i seguenti schemi tradizionali:

- Comando 3 fili (Fig.29), comando ad impulso auto-mantenuto.
- o comando 2 fili (Fig.30), comando con commutatore 2 posizioni.

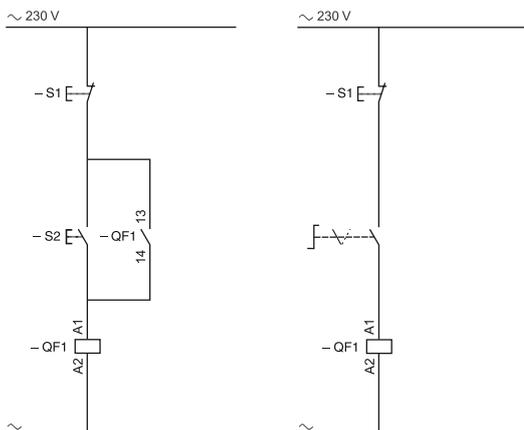
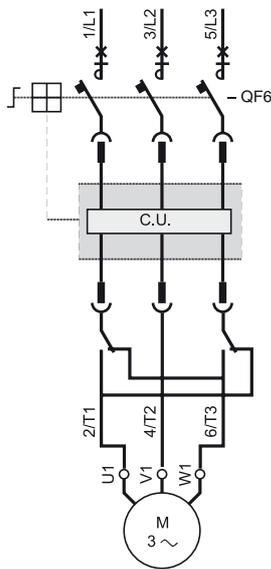


Fig. 29 Comando 3 fili

Fig. 30 Comando 2 fili



↑ Fig. 31 Tesys U, con modulo invertitore di marcia (principio)

■ Due sensi di marcia

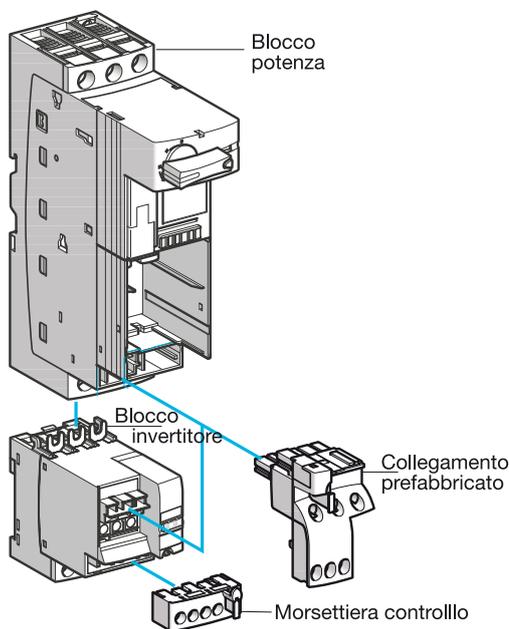
I disegni delle Fig. 31 e 32 rappresentano la base potenza e l'elemento aggiuntivo collegabile sul fianco del prodotto o direttamente agganciabile per un prodotto compatto.

La base potenza realizza la funzione Marcia/Arresto, garantisce le funzioni di interruzione, di protezione termica e di protezione contro i cortocircuiti.

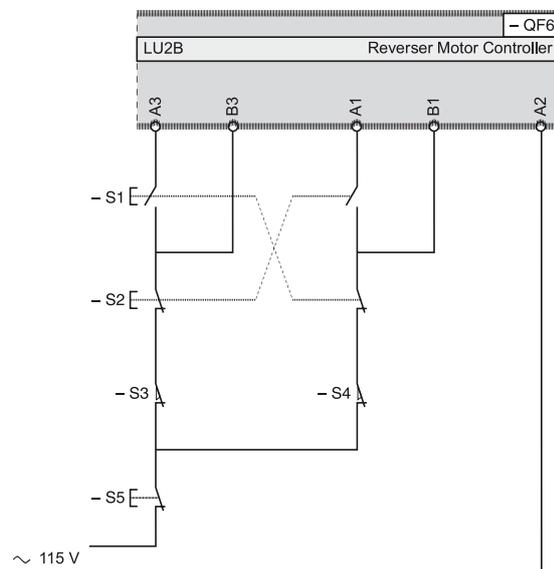
L'invertitore non commuta mai in carico, eliminando in questo modo l'usura elettrica.

Il blocco meccanico è inutile poiché l'elettromagnete che comanda l'invertitore è bistabile e l'accesso all'invertitore è impossibile.

Esempio di comando 3 fili (↔ Fig.33) : comando ad impulsi con auto-mantenimento e finecorsa livelli alto e basso.



↑ Fig. 32 Tesys U, con modulo invertitore di marcia



↑ Fig. 33 Esempio di utilizzo del Tesys U con funzione invertitore

## 4.4 La protezione dei motori

Qualsiasi motore elettrico ha dei limiti di funzionamento, il superamento dei quali porta, più o meno a lungo termine, alla sua distruzione, oltre che alla distruzione dei meccanismi che lo compongono. Le conseguenze immediate sono invece arresti e interruzioni del servizio.

Questo tipo di macchina che trasforma l'energia elettrica in energia meccanica può essere soggetta a guasti elettrici o meccanici.

- **Elettrica**
  - sovratensione, caduta di tensione, squilibrio o assenza di fasi che provocano variazioni sulla corrente assorbita,
  - cortocircuiti con corrente che può raggiungere livelli distruttivi per l'utenza.
- **Meccanica**
  - blocco del rotore, sovraccarico temporaneo o prolungato che genera un aumento della corrente assorbita dal motore e quindi un pericoloso riscaldamento degli avvolgimenti.

I costi legati a tali guasti possono essere elevati; devono infatti tenere conto delle perdite di produzione, delle perdite di materie prime, del ripristino dello strumento di produzione, della perdita di qualità della produzione, dei ritardi nelle consegne.

La costante esigenza di aumento della competitività impone alle imprese la riduzione dei costi legati ai fermi di servizio e alla perdita di qualità della produzione.

Questi guasti possono inoltre avere gravi conseguenze per la sicurezza del personale che lavora a contatto diretto o indiretto con il motore.

Per evitare gli incidenti o almeno limitarne le conseguenze in termini di usura dei prodotti e disturbi sulla rete di alimentazione, è necessario utilizzare protezioni adeguate che consentano di isolare dalla rete l'apparecchio. Le funzioni di protezione rilevano e misurano le variazioni delle grandezze elettriche (tensione, corrente, ecc..) azionando i dispositivi di interruzione.

- **Ogni partenza-motore deve quindi comprendere**
  - una protezione contro i cortocircuiti, per rilevare ed interrompere il più rapidamente possibile le correnti anomale generalmente superiori a 10 volte la corrente nominale ( $I_n$ ),
  - una protezione contro i sovraccarichi, per rilevare gli aumenti di corrente fino a  $10 I_n$  circa e interrompere la partenza prima che il riscaldamento del motore e dei conduttori provochi l'usura degli isolanti.

Queste funzioni di protezione vengono garantite da apparecchi specifici, quali i fusibili, gli interruttori automatici, i relè di sovraccarico o mediante dispositivi integrati che offrono diversi tipi di protezione.

*La protezione contro i guasti di "terra" che comprende la protezione delle persone e la protezione contro i rischi d'incendio non viene trattata in questo documento perchè generalmente integrata alla distribuzione elettrica.*

## 4.5 Perdite e riscaldamento nei motori

### 4.6 Le diverse cause di guasto e le relative conseguenze

#### 4.5 Perdite e riscaldamenti nei motori

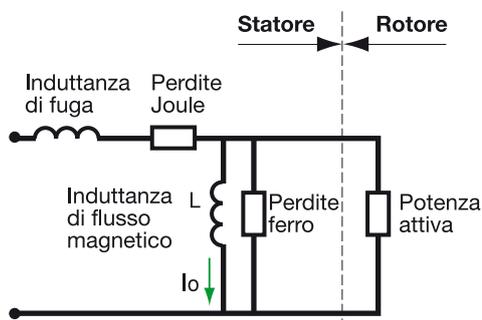


Fig. 34 Circuito equivalente di un motore asincrono

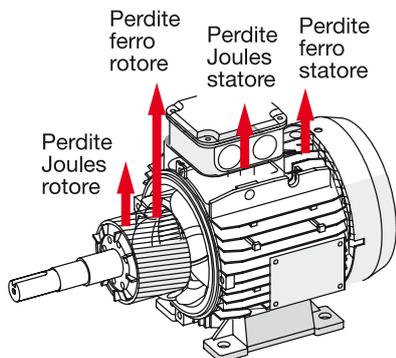


Fig. 35 Perdite di un motore asincrono

#### ■ Circuito equivalente del motore

Il motore asincrono a gabbia può essere rappresentato dal circuito equivalente illustrato a lato (⇔ Fig.34).

Una parte della potenza elettrica fornita allo statore viene trasformata all'albero sotto forma di potenza motrice o potenza attiva

L'altra parte di potenza elettrica viene trasformata in calore nel motore (⇔ Fig. 35):

- perdite "joule" negli avvolgimenti dello statore,
- perdite "joule" nel rotore dovute alle correnti di circolazione (Consultare il capitolo sui motori),
- perdite "ferro" nel rotore e nello statore.

Queste perdite dipendono dalle condizioni d'impiego e dalle caratteristiche costruttive del motore e si traducono con un riscaldamento (consultare la parte sull'avviamento dei motori).

È possibile che si verifichino delle anomalie dovute al carico, alla tensione di alimentazione o ad entrambi i fattori; tali anomalie possono provocare un riscaldamento non trascurabile.

#### ■ Classi d'isolamento

La maggior parte delle macchine industriali hanno classe d'isolamento F (⇔ Fig.36).

La classe F ammette riscaldamenti di 105°K e temperature massime di 155°C ai punti caldi della macchina misurati con il metodo di variazione di resistenza (rif. CEI 85 e CEI 34-1). Per ambienti speciali, in particolar modo ambienti caratterizzati da temperatura elevata e forte umidità, si consiglia la classe H.

Le macchine di qualità sono calibrate affinché il riscaldamento massimo sia di 80° nelle condizioni nominali d'impiego (temperatura ambiente 40°C, altitudine inferiore a 1.000 m, tensione e frequenza nominali e carico nominale).

Ne consegue, per un motore di classe F, una riserva di riscaldamento di 25°K per sopportare le eventuali variazioni rispetto al funzionamento nominale.

	$\Delta t$	T max
<b>Classe B</b>	80°K	125°C
<b>Classe F</b>	105°K	155°C
<b>Classe H</b>	125°K	180°C

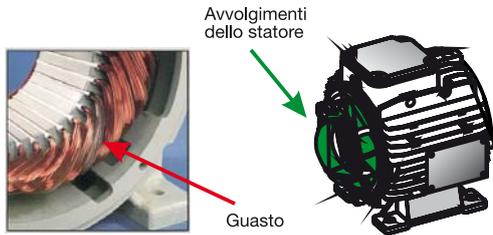
Fig. 36 Classi d'isolamento

#### 4.6 Le diverse cause di guasto e le relative conseguenze

In un impianto comprendente dei motori elettrici è possibile distinguere due tipi di guasti: i guasti di origine interna al motore e i guasti di origine esterna.

- I principali guasti di origine interna sono:
  - cortocircuito fase - terra,
  - cortocircuito tra fasi,
  - cortocircuito tra spire,
  - surriscaldamento degli avvolgimenti,
  - rottura di una barra nei motori a gabbia,
  - problemi legati ai cuscinetti,
  - ecc...
- I principali guasti di origine esterna sono:

Le origini dei guasti sono localizzabili all'esterno del motore elettrico, ma le loro conseguenze possono provocare un'usura del motore stesso.



↑ Fig. 37 Gli avvolgimenti sono, per i motori, le parti più soggette a guasti elettrici e incidenti di utilizzo

### □ I problemi di funzionamento possono essere dovuti

- alla sorgente di alimentazione
  - interruzione dell'alimentazione,
  - inversione o squilibrio di fasi,
  - calo di tensione,
  - sovratensione,
  - ecc...
- al modo di utilizzo del motore
  - regimi di sovraccarico,
  - numero di avviamenti e regime di avviamento,
  - inerzia del carico,
  - ecc...
- all'installazione del motore
  - disallineamento,
  - squilibrio,
  - sforzi eccessivi sull'albero,
  - ecc...

### ■ I guasti interni al motore

#### Avarie dell'avvolgimento dello statore o del rotore

L'**avvolgimento dello statore** di un motore elettrico è costituito da conduttori in rame isolati. Il deterioramento dell'isolamento può provocare un **cortocircuito** permanente, tra una fase e la massa, tra due o addirittura tre fasi, o tra spire di una stessa fase (⇔ Fig. 37).

Il deterioramento dell'isolamento può essere provocato da fenomeni elettrici (scariche superficiali, sovratensioni), termici (surriscaldamento) o anche meccanici (vibrazioni, sforzi elettrodinamici sui conduttori).

I guasti d'isolamento possono crearsi anche all'interno **dell'avvolgimento del rotore** e generare la medesima conseguenza: la messa fuori servizio del motore.

La causa più frequente di avaria a livello degli avvolgimenti di un motore è un aumento eccessivo della loro temperatura, spesso provocato da un sovraccarico che implica un aumento della corrente che attraversa gli avvolgimenti stessi.

La curva rappresentata nel disegno della Fig. 38 fornita dalla maggior parte dei costruttori di motori elettrici, mostra l'evoluzione della resistenza d'isolamento in funzione della temperatura: più la temperatura aumenta e più la resistenza d'isolamento diminuisce. La durata degli avvolgimenti e di conseguenza quella del motore, si riduce notevolmente.

La curva rappresentata nel disegno della Fig. 39 mostra che un aumento del 5 % della corrente, equivalente ad un aumento della temperatura di circa + 10°, dimezza la durata degli avvolgimenti.

Per evitare surriscaldamenti e ridurre i rischi di avarie interne al motore dovuti al deterioramento dell'isolamento degli avvolgimenti è quindi necessaria una protezione contro i sovraccarichi.

### ■ I guasti esterni al motore

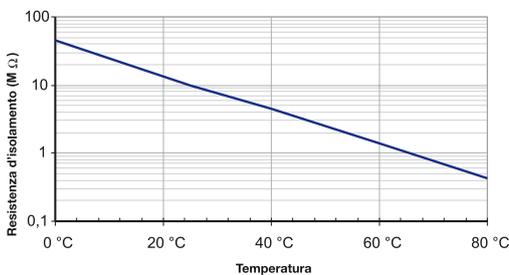
#### Fenomeni legati all'alimentazione elettrica del motore

##### □ Sovratensioni

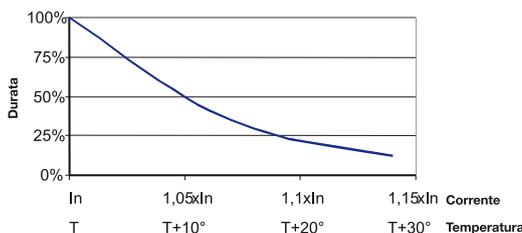
Qualsiasi tensione applicata ad un'apparecchiatura il cui valore di cresta supera i limiti specificati è una sovratensione.

Le sovratensioni (⇔ Fig. 40) temporanee o permanenti possono avere diverse origini:

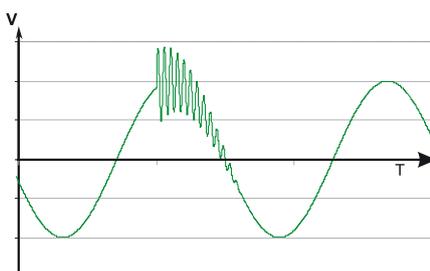
- atmosferica (colpo di fulmine),
- scarica elettrostatica,
- comando di apparecchi collegati alla stessa rete,
- ecc...



↑ Fig. 38 Resistenza d'isolamento in funzione della temperatura



↑ Fig. 39 Durata dei motori in funzione della loro temperatura di funzionamento o della corrente assorbita



↑ Fig. 40 Esempio di sovratensione

Le principali caratteristiche delle sovratensioni sono riportate nella tabella sottostante (Fig. 41).

Tipo di sovratensione	Durata	Rigidità del fronte / frequenza	Smorzamento
Atmosferica	Molto breve (da 1 a 10µs)	Molto elevata (1000 kV/µs)	Forte
Scarica elettrostatica	Molto breve (ns)	Elevata (10 MHz)	Molto forte
Manovra	Breve (1ms)	Media (da 1 a 200 kHz)	Medio
A frequenza industriale	Lunga (>1s)	Frequenza della rete	Nulla

↑ Fig. 41 Caratteristiche dei diversi tipi di sovratensione

Questi disturbi, che si sovrappongono alla tensione della rete, possono verificarsi in due modi:

- modo comune, tra i conduttori attivi e la terra,
- modo differenziale, tra i diversi conduttori attivi.

Nella maggior parte dei casi le sovratensioni causano una perforazione dielettrica degli avvolgimenti del motore che ne provocherà la distruzione.

#### □ Fasi squilibrate

Un sistema trifase è squilibrato quando le tre tensioni non sono uguali in ampiezza e/o non sono sfasate tra loro di 120°.

Lo squilibrio (⇔ Fig. 42) può essere provocato dall'apertura di una fase (dissimmetria) dovuta alla presenza di carichi monofase nelle immediate vicinanze del motore o dall'alimentazione stessa.

Lo squilibrio può essere calcolato con la seguente formula:

$$\text{Squilibrio (\%)} = 100 \times \text{MAX} \left( \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{med}}}{V_{\text{med}}}, \frac{V_{\text{med}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{med}}} \right)$$

ove:

V<sub>max</sub> tensione più alta,

V<sub>min</sub> tensione più bassa,

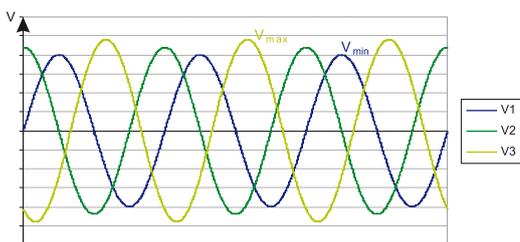
$$V_{\text{med}} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

Le conseguenze di uno squilibrio delle tensioni applicate ad un motore sono la diminuzione della coppia utile e l'aumento delle perdite; gli squilibri si traducono in una componente inversa che genera forti correnti rotoriche provocando un notevole riscaldamento del rotore con conseguente surriscaldamento del motore (⇔ Fig. 43).

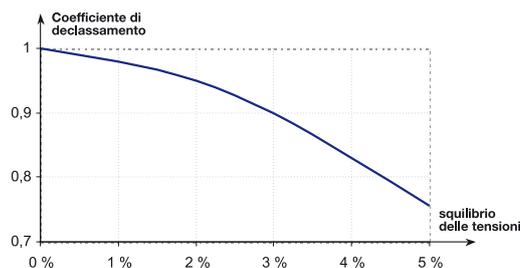
Valore dello squilibrio (%)	0	2	3,5	5
Corrente dello statore (A)	I <sub>n</sub>	1,01 x I <sub>n</sub>	1,04 x I <sub>n</sub>	1,075 x I <sub>n</sub>
Aumento delle perdite (%)	0	4	12,5	25
Riscaldamento (%)	100	105	114	128

Fig. 43 Influenza di uno squilibrio di tensione sulle caratteristiche di funzionamento di un motore

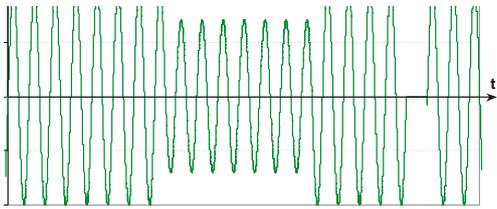
La norma IEC 60034-26 fornisce una regola di declassamento in funzione dello squilibrio delle tensioni (⇔ Fig. 44), regola che è consigliabile applicare quando la presenza di questo fenomeno è verificata o prevedibile sulla rete che alimenta il motore. Questo coefficiente di declassamento permette di "sovradimensionare" un motore per tener conto dello squilibrio o di diminuire la corrente di funzionamento di un motore rispetto alla sua corrente nominale.



↑ Fig. 42 Rilevamento di tensione di un sistema trifase squilibrato



↑ Fig. 44 Declassamento di un motore in funzione di uno squilibrio delle tensioni dell'alimentazione



↑ Fig. 45 Esempio di un calo e di una breve  
interruzione di tensione

#### □ Abbassamenti e interruzioni di tensione

Il buco di tensione (↔ Fig. 45) è una diminuzione improvvisa della tensione di alimentazione (valore efficace) ad un valore compreso tra il 90 e l'1% della tensione dichiarata. La durata di un buco di tensione è di 1/2 periodo a 50 Hz o comunque compresa tra 10 ms e 1 minuto.

Una breve interruzione è un caso particolare di buco di tensione la cui diminuzione è superiore al 90%. È caratterizzata unicamente dalla sua durata (inferiore a 3 minuti). Le interruzioni lunghe superano i 3 minuti.

Si parla di microinterruzioni per durate di interruzione dell'ordine di millesimi di secondo.

L'origine di queste variazioni di tensione può essere un fenomeno non legato all'applicazione (guasto sulla rete di distribuzione pubblica o cortocircuito accidentale), oppure un fenomeno legato all'impianto stesso (collegamento di forti carichi, quali motori o trasformatori).

Le variazioni di tensione possono avere conseguenze gravi sul motore.

#### • Conseguenze su un motore asincrono

Durante un buco di tensione la coppia di un motore asincrono (proporzionale al quadrato della tensione) diminuisce notevolmente provocando un rallentamento che dipende dall'ampiezza e dalla durata del buco di tensione, dall'inerzia delle masse rotanti e dalla caratteristica coppia-velocità del carico trascinante. Se in quel momento la coppia sviluppata dal motore diventa inferiore alla coppia resistente, il motore si arresta (sgancio). Il ripristino della tensione successivo ad un'interruzione genera uno spunto di corrente di riaccelerazione che si avvicina alla corrente di avviamento e la cui durata dipende dalla durata dell'interruzione.

Quando vi sono diversi motori nell'impianto, le loro riaccelerazioni simultanee possono provocare una caduta di tensione a monte della rete. La durata del buco di tensione aumenta e può rendere la riaccelerazione difficile (riavviamenti prolungati con surriscaldamento) o addirittura impossibile (coppia motore inferiore alla coppia resistente).

La rimessa sotto tensione rapida (~ 150 ms) e senza precauzioni di un motore asincrono in fase di rallentamento può provocare una richiusura in opposizione di fase tra l'alimentazione e la tensione residua mantenuta dal motore asincrono. In questo caso, la prima cresta di corrente può raggiungere tre volte la corrente di avviamento (da 15 a 20 I<sub>n</sub>).

Le sovracorrenti e i buchi di tensione che ne derivano hanno diverse conseguenze sul motore:

- riscaldamenti supplementari e sforzi elettrodinamici nelle bobine che possono provocare il deterioramento dell'isolamento,
- impulsi con sollecitazioni meccaniche anomale sugli accoppiamenti con conseguente usura precoce se non addirittura rottura.

Le sovracorrenti e i buchi di tensione possono inoltre danneggiare apparecchiature quali i contattori (usura o saldatura dei contatti), provocare l'intervento delle protezioni generali dell'impianto con conseguente arresto di una linea di produzione o di un'officina.

#### • Conseguenze su un motore sincrono

Le conseguenze sono più o meno simili a quelle sui motori asincroni. I motori sincroni possono tuttavia, grazie alla loro inerzia solitamente maggiore e ad una minor influenza della tensione sulla coppia, supportare buchi di tensione più importanti (dell'ordine del 50%) senza sgancio. In caso di sgancio il motore si arresta ed è quindi necessario ripetere l'intero processo di avviamento.

• **Conseguenze sulle macchine a velocità variabile**

I problemi creati dai buchi di tensione ai variatori di velocità sono:

- impossibilità di fornire la tensione sufficiente al motore (perdita di coppia, rallentamento),
- malfunzionamento dei circuiti di controllo alimentati direttamente dalla rete,
- sovracorrente al ritorno di tensione (ricarica del condensatore di filtraggio dei variatori),
- sovracorrente e squilibrio di corrente sulla rete in caso di buchi di tensione su una sola fase.

I variatori di velocità segnalano generalmente il guasto per cali di tensione superiori al 15 %.

□ **Presenza di armoniche**

Ogni funzione periodica (frequenza f) può essere scomposta in una somma di sinusoidi di frequenza h x f (h: intero):

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \phi_h)$$

con:

$Y_0$ : la componente continua

$h$ : rango dell'armonica

$\omega$ : pulsazione ( $2\pi \cdot f$ )

$Y_h$ : ampiezza dell'armonica di rango

$Y_1$ : la componente fondamentale

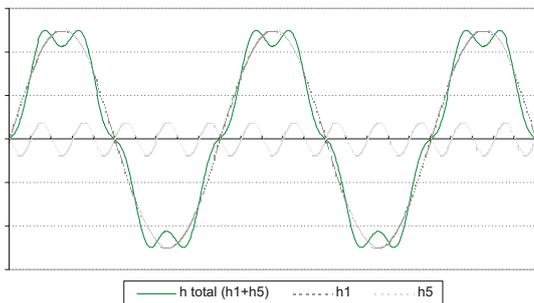
Il tasso di distorsione armonica (THD per Total Harmonic Distorsion) fornisce la misura della deformazione del segnale:

$$DHT(\%) = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2}$$

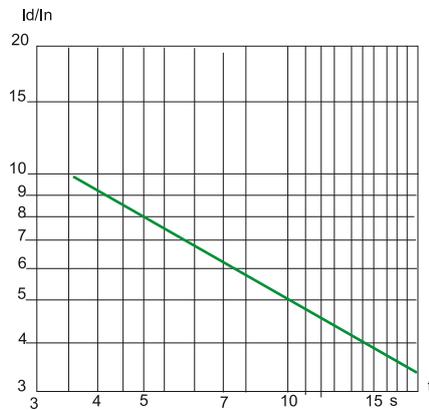
Le correnti e le tensioni armoniche vengono generate dai carichi non lineari collegati alla rete di distribuzione. La distorsione armonica (↔ Fig. 46) è una forma di inquinamento della rete elettrica suscettibile di creare problemi per tassi superiori al 5 %.

Le apparecchiature elettroniche di potenza (variatori di velocità, ondulatori, ecc...) sono le principali fonti di armoniche. Anche il motore può generare armoniche di ordine 3; in caso di collegamento a triangolo potrebbe verificarsi un riequilibrio del flusso suscettibile di creare una corrente negli avvolgimenti del motore.

La presenza di armoniche provoca, nei motori, un aumento delle perdite per correnti parassite o di Foucault con conseguenti riscaldamento supplementari. Le armoniche possono anche generare sollecitazioni meccaniche (vibrazioni, fatica meccanica), inquinamento sonoro e limitare l'impiego di motori a pieno carico.



↑ Fig. 46 Rilevamento di una tensione sinusoidale con armoniche di 5° rango



↑ Fig. 47 Tempo di avviamento ammesso dei motori in funzione del rapporto corrente di avviamento/ corrente nominale

■ I guasti esterni al motore: fenomeni legati al funzionamento del motore

□ Avviamento prolungato e/o troppo frequente

La fase di avviamento di un motore corrisponde al tempo necessario a raggiungere la velocità di rotazione nominale.

Il tempo di avviamento ( $t_D$ ) dipende dalla coppia resistente ( $C_r$ ) e dalla coppia motore ( $C_m$ ).

$$t_D(s) = \frac{\pi \cdot J \cdot N}{30 \cdot C_m - C_r} \text{ con}$$

J: momento d'inerzia globale delle masse in movimento,

N( $tr \cdot s^{-1}$ ): velocità di rotazione del rotore.

Tenuto conto delle sue caratteristiche intrinseche, ogni motore è in grado di consentire un numero limitato di avviamenti, generalmente indicato dal costruttore (numero di avviamenti all'ora).

Allo stesso modo ogni motore ha un tempo di avviamento che dipende dalla corrente di avviamento (⇔ Fig. 47).

□ Blocco del rotore

Il blocco di un motore dovuto ad una causa meccanica provoca una sovracorrente uguale alla corrente di avviamento. Ma il riscaldamento che ne risulta è molto più importante poiché le perdite nel rotore vengono mantenute al valore massimo per tutta la durata della fase di blocco e la ventilazione non è presente perché legata alla rotazione del rotore. Le temperature del rotore possono diventare molto elevate (350 C).

□ Sovraccarico (rallentamento o sovravelocità)

Il sovraccarico di un motore è provocato dall'aumento della coppia resistente o da un abbassamento della tensione di rete (> 10 % di  $U_n$ ). L'aumento della corrente assorbita dal motore genera un riscaldamento che ne riduce la durata e che, più o meno lungo termine, può causarne la distruzione.

■ Sintesi

La tabella della Fig. 48 presenta una sintesi dei diversi tipi di guasto con le possibili relative motivazioni e i possibili relativi effetti e conseguenze.

In ogni caso per i motori sono sempre necessarie due protezioni:

- protezione contro i cortocircuiti,
- protezione contro i sovraccarichi (surriscaldamento).

Guasti	Origini	Effetti	Conseguenze sul motore
Cortocircuito	• Messa in contatto di più fasi, di una fase e del neutro o di più spire	• Picco di corrente • Sforzi elettrodinamici sui conduttori	• Distruzione degli avvolgimenti
Sovratensione	• Fulmine • Scarica elettrostatica • Manovra	• Perforazione dielettrica degli avvolgimenti	• Distruzione degli avvolgimenti mediante perdita d'isolamento
Squilibrio di tensione	• Apertura di una fase • Carico monofase a monte del motore	• Diminuzione della coppia utile	• Surriscaldamento(*)
Calo di tensione	• Instabilità della tensione di rete • Colegamento di forti carichi	• Diminuzione della coppia utile • Aumento delle perdite	• Surriscaldamento(*)
Armoniche	• Inquinamento della rete da variatori di velocità, ondulatori, etc ...	• Diminuzione della coppia utile • Aumento delle perdite	• Surriscaldamento(*)
Avviamento prolungato	• Coppia resistente troppo importante • Calo di tensione	• Aumento del tempo di avviamento	• Surriscaldamento(*)
Bloccaggio	• Problema meccanico	• Sovracorrente	• Surriscaldamento(*)
Sovraccarico	• Aumento della coppia resistente • Calo di tensione	• Aumento della corrente assorbita	• Surriscaldamento(*)

(\*) Poi, più o meno a lungo termine, in base all'importanza del guasto e/o alla frequenza, cortocircuito e distruzione degli avvolgimenti.

↑ Fig.48 Sintesi dei possibili guasti di un motore con origini, effetti e conseguenze

### 4.7 Le funzioni e i prodotti di protezione

#### ■ Protezione contro i cortocircuiti

##### □ Generalità

Un cortocircuito è un circuito chiuso su di una impedenza trascurabile:

- *a corrente alternata*: collegamento tra fasi, tra fase e neutro, tra fase e massa conduttrice o tra spire di una stessa fase,
- *a corrente continua*: collegamento tra le due polarità o tra una massa conduttrice e la polarità da essa isolata.

Può essere dovuto a cause diverse: deterioramento dello strato di vernice isolante dei conduttori, scollegamento, fili o cavi scoperti o rotti, presenza di corpi metallici estranei, depositi conduttori (polveri, umidità...), penetrazione di acqua o di altri liquidi conduttori, deterioramento dell'apparecchio utilizzatore, errore di cablaggio all'avviamento o successivo ad un intervento.

Un cortocircuito si traduce in un aumento improvviso della corrente che può raggiungere in alcuni millesimi di secondo un valore pari a diverse centinaia di volte la corrente d'impiego. Può avere effetti devastanti e provocare notevoli danni al materiale. È caratterizzato da due fenomeni:

##### • Un fenomeno termico

Corrisponde alla quantità di energia liberata nel circuito elettrico attraversato dalla corrente di cortocircuito  $I$  per un tempo  $t$  secondo la formula  $I^2t$  ed espressa in  $A^2s$ . L'effetto termico può provocare:

- la fusione dei contatti del contattore,
- la distruzione degli elementi termici di un relè a lamine bimetalliche se il coordinamento è di tipo I,
- la creazione di archi elettrici,
- la calcinazione della pellicola isolante,
- l'incendio dell'apparecchiatura.

##### • Un fenomeno elettrodinamico

Si traduce in sforzi meccanici intensi tra i conduttori provocati dal passaggio della corrente con i seguenti effetti:

- deformazione dei conduttori che formano gli avvolgimenti del motore,
- rottura dei supporti isolanti dei conduttori,
- repulsione dei contatti (all'interno dei contattori) con possibile fusione e saldatura.

Tali effetti rappresentano un pericolo sia per i beni che per le persone. È quindi tassativo l'utilizzo di dispositivi di protezione contro i cortocircuiti per rilevare il guasto e interrompere molto rapidamente il circuito, prima che la corrente raggiunga il suo valore massimo.

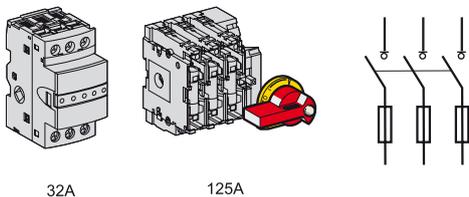
I due dispositivi di protezione comunemente utilizzati sono:

- i fusibili che con la loro fusione interrompono il circuito e dovranno quindi essere sostituiti,
- gli interruttori automatici a sganciatore magnetico, spesso definiti più semplicemente interruttori automatici magnetici, che interrompono automaticamente il circuito con l'apertura dei poli.  
Per il loro ripristino è sufficiente una manovra di riaggancio.

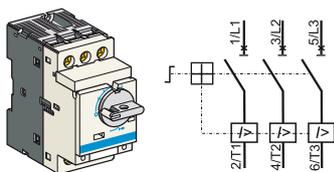
La protezione contro i cortocircuiti può anche essere integrata in apparecchi multifunzione quali gli interruttori automatici magneto-termici e i contattori-interruttori automatici.

Potere di interruzione (PC)	Cos $\varphi$	Potere di chiusura (PF)
4.5kA < PC < 6kA	0.7	1.5 PC
6kA < PC < 10kA	0.5	1.7 PC
10kA < PC < 20kA	0.3	2 PC
20kA < PC < 50kA	0.25	2.1 PC
50kA < PC	0.2	2.2 PC

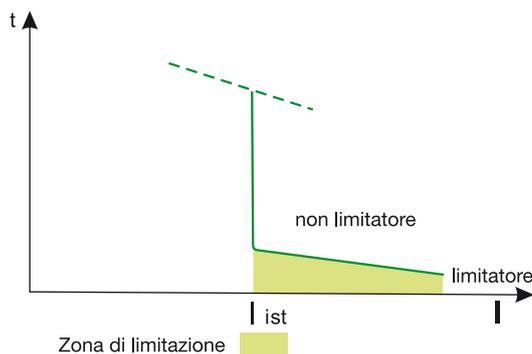
↑ Fig. 49 Poteri di interruzione e di chiusura fissati dalla norma CEI 60947-2 per gli interruttori automatici



↑ Fig. 50 Sezionatori 32 e 125 A a fusibili (LS1-D32 e GS1-K4 - Telemecanique)



↑ Fig. 51 Interruttore automatico magnetico GV2-L (marchio Telemecanique) e relativo simbolo grafico



↑ Fig. 52 Curve di intervento degli interruttori automatici magnetici

### Definizioni e caratteristiche

Le principali caratteristiche delle protezioni contro i cortocircuiti sono:

- il potere di interruzione: è il massimo valore della corrente presunta di cortocircuito che un apparecchio di protezione può interrompere ad una data tensione,
- il potere di chiusura: è il massimo valore della corrente che un apparecchio di protezione può stabilire alla sua tensione nominale in condizioni specifiche. Il potere di chiusura è pari a  $k$  volte il potere di interruzione come mostrato dalla tabella della Fig. 49.

### I fusibili

I fusibili realizzano una protezione fase per fase (unipolare), con un grande potere di interruzione in un ingombro molto ridotto. Garantiscono la limitazione di  $I^2t$  e delle sollecitazioni elettrodinamiche ( $I_{cresta}$ ).

Possono essere montati:

- su supporti specifici detti porta-fusibili,
- o in sezionatori in sostituzione di manicotti o barrette. (↔ Fig. 50).

I fusibili dotati di un percussore possono essere associati ad un dispositivo di interruzione omipolare (spesso il contattore di comando del motore) per impedire la marcia monofase durante la fusione.

Per la protezione dei motori vengono utilizzati i fusibili di tipo aM.

La loro particolarità è di lasciar passare le sovracorrenti magnetizzanti all'avviamento dei motori; sono per questo del tutto inadatti alla protezione contro i sovraccarichi (diversamente dai fusibili di tipo gG). Ecco perché è necessario aggiungere un relè di sovraccarico nel circuito di alimentazione dei motori.

Il loro calibro deve essere in genere immediatamente superiore alla corrente di pieno carico del circuito protetto.

### Gli interruttori automatici magnetici

Questo tipo di interruttori garantisce, nel limite del loro potere di interruzione e mediante i loro sganciatori magnetici (uno sganciatore per fase), la protezione degli impianti contro i cortocircuiti (↔ Fig. 51).

Gli interruttori automatici realizzano di base un'interruzione omipolare: il funzionamento di un solo sganciatore magnetico è sufficiente a comandare l'apertura simultanea di tutti i poli.

Per correnti di cortocircuito poco elevate, il funzionamento degli interruttori automatici è più rapido di quello dei fusibili.

Questo tipo di protezione è conforme alla norma IEC 60947-2.

Per interrompere efficacemente una corrente di cortocircuito è necessario rispettare tre regole fondamentali:

- rilevare molto presto la corrente di guasto,
- separare velocemente i contatti,
- interrompere la corrente di cortocircuito.

La maggior parte degli interruttori automatici magnetici per la protezione dei motori sono limitatori e contribuiscono quindi al coordinamento (↔ Fig. 52). Il loro tempo di interruzione particolarmente breve consente a questi interruttori di interrompere la corrente di cortocircuito prima che questa raggiunga la sua massima ampiezza.

Gli effetti termici ed elettrodinamici vengono quindi limitati e questo consente di proteggere meglio i cavi e l'apparecchiatura.

## ■ Protezione contro i sovraccarichi

### □ Generalità

Il sovraccarico è il difetto più frequente sui motori. Si manifesta con un aumento della corrente assorbita dal motore e con effetti termici.

Il normale riscaldamento di un motore elettrico ad una temperatura ambiente di 40° C viene definito dalla classe d'isolamento. Ogni superamento della temperatura limite di funzionamento conduce ad una diminuzione della durata di vita elettrica degli avvolgimenti a causa dell'usura precoce degli isolanti.

Notiamo comunque che un sovraccarico che porta ad un riscaldamento superiore al normale non avrà effetti negativi immediati se limitato nel tempo e poco frequente. Non implica quindi necessariamente un arresto del motore. È comunque importante il ritorno alle normali condizioni di funzionamento.

L'importanza di una corretta protezione contro i sovraccarichi è quindi necessaria per:

- ottimizzare la durata dei motori evitando il funzionamento in condizioni anomale di riscaldamento,
- garantire la continuità d'impiego delle macchine:
  - evitando arresti intempestivi dei motori,
  - rendendo possibile il riavviamento, il più velocemente possibile in seguito ad uno sganciamento, nelle migliori condizioni di sicurezza per le apparecchiature e per il personale.

Le condizioni reali d'impiego (temperatura ambiente, altitudine d'impiego e servizio normalizzato) sono fondamentali per determinare i valori d'impiego del motore (potenza, corrente) e per poter scegliere una protezione efficace contro i sovraccarichi (↔ Fig.53).

I valori d'impiego vengono forniti dal costruttore del motore.

Altitudine m	Temperatura ambiente						
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
1000	1.07	1.04	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82
1500	1.04	1.01	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79
2000	1.01	0.98	0.94	0.90	0.86	0.82	0.77
2500	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84	0.79	0.75
3000	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71
3500	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68
4000	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72	0.68	0.64

I valori riportati nella tabella sono forniti a titolo indicativo. Il declassamento di un motore dipende infatti dalle dimensioni, dalla classe d'isolamento, dal modo di costruzione (motore auto-ventilato o moto-ventilato, grado di protezione IP 23, IP 44, ecc...) e varia a seconda dei costruttori.

*Il valore di potenza nominale che generalmente compare sulla targa del motore viene definito dal costruttore per un servizio continuo S1 (funzionamento a regime costante e di durata sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico).*

*Sono previsti altri tipi di servizio normalizzati, quali il servizio di durata limitata S2, o i servizi intermittenti periodici S3, S4, e S5 per i quali il costruttore di un motore definisce, per ciascun caso, una potenza d'impiego diversa dalla potenza nominale.*

† Fig. 53 Coefficienti di declassamento dei motori in base alle condizioni d'impiego

In base al livello di protezione desiderato la protezione contro i sovraccarichi può essere realizzata mediante:

- relè di sovraccarico, termici (a lamine bimetalliche) o elettronici, che proteggono i motori in caso di:
  - sovraccarico, con il controllo della corrente assorbita su ciascuna delle fasi,
  - squilibrio o assenza di fasi, con il dispositivo differenziale,
- a sonde a termistori PTC (Positive Temperature Coefficient),
- di sovracoppia,
- multifunzione.

Un relè di protezione non svolge la funzione di interruzione ma comanda l'apertura di un dispositivo di interruzione che dovrà avere il potere d'interruzione richiesto adatto alla corrente di default da interrompere (generalmente un contattore).

Per questo motivo i relè di protezione dispongono di un contatto di guasto (NC) da posizionare in serie con l'alimentazione della bobina del contattore.

□ I relè di sovraccarico (termici o elettronici)

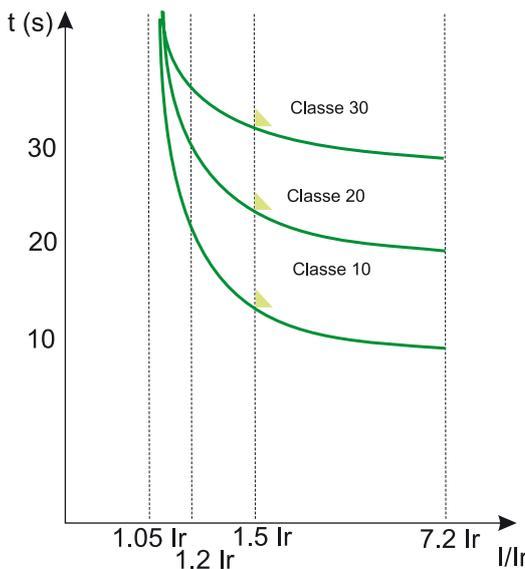
• Generalità

Questo tipo di relè protegge i motori contro i sovraccarichi, ma deve ammettere il sovraccarico temporaneo dovuto all'avviamento ed effettuare lo sgancio solo in caso di avviamento prolungato.

In base alle applicazioni il tempo di avviamento dei motori può variare da alcuni secondi (avviamento a vuoto, coppia resistente poco elevata, ecc...) a qualche decina di secondi (coppia resistente importante, forte inerzia del carico trascinate, ecc...).

È quindi necessario disporre di relè adatti a tempo di avviamento.

Per soddisfare questa esigenza la norma IEC 60947-4-1 definisce diverse classi di relè di sovraccarico, ciascuna caratterizzata dal tempo di sgancio (↔ Fig.54).



↑ Fig. 55 Curve di sgancio dei relè di sovraccarico

Classe	Tempo di sgancio a partire dallo stato:				Tolleranze più strette (banda E)
	Freddo a $1,05 \times I_r$	Caldo a $1,2 \times I_r$	Caldo a $1,5 \times I_r$	Freddo a $7,2 \times I_r$	
10 A	> 2 h	< 2 h	< 2 h min	2 s < tp < 10 s	-
10	> 2 h	< 2 h	< 4 h min	4 s < tp < 10 s	5 s < tp < 10 s
20	> 2 h	< 2 h	< 8 h min	6 s < tp < 20 s	10 s < tp < 20 s
30(*)	> 2 h	< 2 h	< 12 h min	9 s < tp < 30 s	20 s < tp < 30 s

(\*) classe poco utilizzata nei paesi europei, ma molto diffusa negli Stati Uniti.  
**Stato freddo:** stato iniziale senza carico precedente  
**Stato caldo:** equilibrio termico raggiunto a  $I_r$   
 **$I_r$ :** corrente di regolazione del relè di sovraccarico

↑ Fig. 54 Principali classi di sgancio dei relè di sovraccarico in base alla norma CEI 60947-4-1

Il calibro del relè deve essere scelto in funzione della corrente nominale del motore e del tempo di avviamento calcolato.

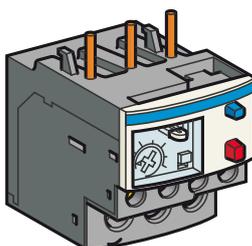
I limiti d'impiego sono caratterizzati da curve (↔ Fig. 55) in funzione del tempo e del valore della corrente di regolazione (in multiplo di  $I_r$ ).

Questi relè hanno una memoria termica (tranne alcuni relè elettronici di sovraccarico segnalati dai costruttori) e possono essere collegati:

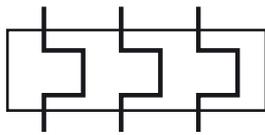
- in serie con il carico,
- oppure, per le potenze elevate, a TA posizionati in serie con il carico.

□ I relè termici di sovraccarico a lamine bimetalliche (↔ Fig. 56 e 57)

Questo tipo di relè, associato ad un contattore, garantisce la protezione del motore, della linea e dell'apparecchiatura contro i sovraccarichi deboli e prolungati. È quindi stato progettato per permettere l'avviamento normale dei motori senza effettuare lo sgancio. Tuttavia deve essere protetto contro le sovracorrenti forti mediante un interruttore automatico o mediante fusibili (vedere protezione contro i cortocircuiti).



↑ Fig. 56 Relè termico di sovraccarico a lamine bimetalliche LRD (marchio Telemecanique) e relativo simbolo grafico



↑ Fig. 57 Vista interna di un relè termico di sovraccarico e dettaglio di una delle lamine bimetalliche

Il principio di funzionamento di un relè termico di sovraccarico si basa sulla deformazione delle lamine bimetalliche provocata dal riscaldamento generato dalla corrente che le attraversa.

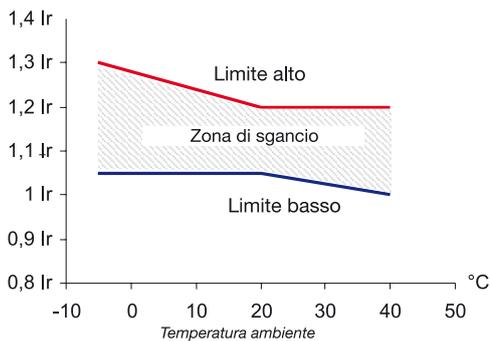
Al passaggio della corrente le lamine bimetalliche si deformano e, a seconda della regolazione, provocano un'improvvisa apertura del contatto del relè.

Il riarmo può essere effettuato solo quando le lamine bimetalliche si sono sufficientemente raffreddate.

I relè termici di sovraccarico sono utilizzabili a corrente alternata e a corrente continua. Sono generalmente:

- tripolari,
- compensati, ovvero insensibili alle variazioni della temperatura ambiente (curva di sgancio uguale da 0 a 40°C secondo la norma (↔ Fig.58),
- a riarmo manuale o automatico,
- graduati in "Ampere motore": impostazione diretta sul relè del valore di corrente indicato sulla targa del motore.

Possono essere sensibili anche ad una perdita di fase: è la nozione di differenziale. Questa funzione evita la marcia in monofase del motore e soddisfa le condizioni della norma IEC 60947-4-1 e 60947-6-2 (↔ tabella Fig. 59).



↑ Fig. 58 Zona di sgancio per i relè di sovraccarico termico compensati in base alla temperatura ambiente (IEC 60947-4-2 e 6-2)

Tempo di sgancio	Multiplo del valore della corrente di regolazione
> 2 h	2 poli : 1.0 Ir
	1 polo : 0.9 Ir
> 2 h	2 poli : 1.15 Ir
	1 polo : 0

↑ Fig. 59 Limite di funzionamento di un relè di sovraccarico termico differenziale (sensibile ad una perdita di fase)

Comunemente utilizzato, questo relè offre un'eccellente affidabilità ad un costo contenuto. È consigliato in modo particolare se è presente il rischio di bloccaggio del rotore. L'inconveniente di questo tipo di relè è rappresentato dal fatto di non tener conto in modo preciso dello stato termico del motore da proteggere e dalla sensibilità alle caratteristiche termiche del luogo in cui è installato (ventilazione dell'armadio, ecc...).

#### □ I relè elettronici di sovraccarico (↔ Fig. 60)

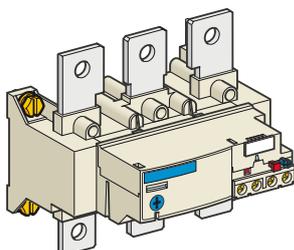
Questo tipo di relè beneficia dei vantaggi dell'elettronica che consente di creare un'immagine termica del motore più elaborata.

A partire da un modello che ricostruisce le costanti di tempo termiche del motore, l'elettronica è in grado di calcolare costantemente la temperatura del motore in funzione della corrente che lo attraversa e dei tempi di funzionamento.

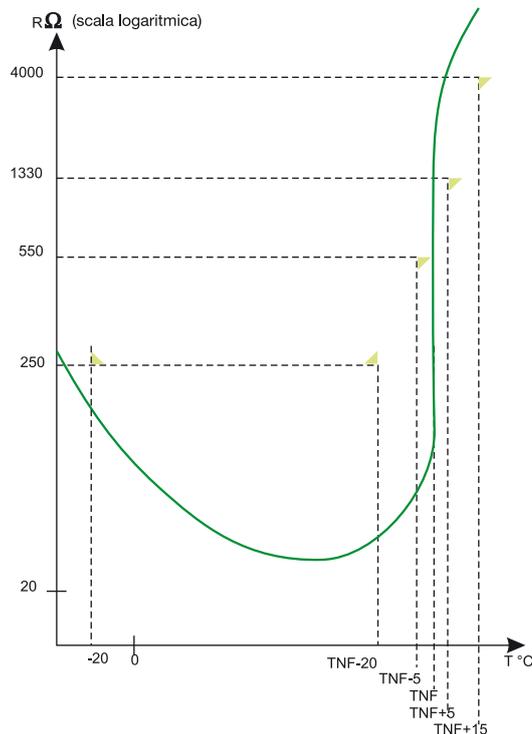
La protezione può evitare sganci intempestivi. I relè elettronici di sovraccarico sono meno sensibili alle caratteristiche termiche del luogo in cui sono installati.

Oltre alle funzioni classiche dei relè di sovraccarico (protezione dei motori contro i sovraccarichi, gli squilibri e le assenze di fase), i relè elettronici di sovraccarico possono essere completati da opzioni quali:

- il controllo della temperatura con sonde PTC,
- la protezione contro bloccaggi e sovracoppie,
- la protezione contro le inversioni di fasi,
- la protezione contro i guasti d'isolamento,
- la protezione contro la marcia a vuoto,
- ecc...



↑ Fig. 60 Relè elettronico di sovraccarico (LR9F - Telemecanique)



↑ Fig. 61 Punti di funzionamento delle sonde a termistori CTP

### □ I relè a sonde a termistori PTC

Questo tipo di relè di protezione controlla la temperatura reale del motore da proteggere. Grazie al loro ridotto volume le sonde hanno un'inerzia termica molto debole che garantisce un tempo di risposta brevissimo, quindi un'eccellente precisione della misura della temperatura.

Controllando direttamente la temperatura degli avvolgimenti dello statore i relè a sonde proteggono i motori contro: sovraccarichi, aumento della temperatura ambiente, difetto del circuito di ventilazione, frequenza di avviamenti troppo elevata, marcia ad impulsi, ecc...

Sono costituiti da più elementi distinti: una o più sonde a termistori PTC posizionate all'interno degli avvolgimenti dei motori.

Sono componenti statici la cui resistenza aumenta bruscamente quando la temperatura raggiunge una soglia chiamata Temperatura Nominale di Funzionamento (TNF) secondo la curva della Fig. 61.

### • Un dispositivo elettronico

Un dispositivo elettronico alimentato a corrente alternata o continua misura costantemente la resistenza delle sonde ad esso associate. Al raggiungimento della Temperatura Nominale di Funzionamento (TNF) il forte aumento del valore della resistenza viene rilevato da un circuito a soglia che comanda il cambiamento di stato dei contatti di uscita.

In base alle sonde scelte questo tipo di protezione può essere utilizzato:

- sia per fornire un allarme senza arresto della macchina (TNF delle sonde inferiore alla temperatura massima indicata per l'elemento da proteggere),
- sia per comandare l'arresto (la TNF corrisponde alla temperatura massima indicata) (⇔ Fig.62).

L'impiego di questo tipo di protezione deve essere previsto in anticipo poiché le sonde devono essere integrate agli avvolgimenti in fase di produzione del motore o durante un'eventuale ribobinatura in seguito ad incidente.

La scelta delle sonde PTC da integrare dipende dalla classe d'isolamento e dalla struttura del motore. Generalmente la scelta viene effettuata dai costruttori di motori.

Queste due caratteristiche rendono la protezione con sonde PTC adatta alle apparecchiature ad alta gamma con motori dal costo elevato.



↑ Fig. 62 Dispositivo elettronico (LT3 - Telemecanique) da associare a tre sonde a termistori, per comandare l'arresto di un motore per superamento di temperatura

### □ I relè di sovrappia: una protezione complementare

(⇔ Fig.63)

I relè di sovrappia sono complementari ad una protezione termica mediante relè o mediante sonda PTC e garantiscono la protezione della catena cinematica in caso di blocco del rotore, di grippaggio o di impulsi meccanici.

Questo tipo di relè, contrariamente alla maggior parte dei relè di sovraccarico, non ha memoria termica. È caratterizzato da un funzionamento a tempo definito (soglia di corrente e temporizzazione regolabili).

I relè di sovrappia possono essere utilizzati come protezione contro i sovraccarichi per i motori caratterizzati da avviamenti prolungati o molto frequenti (ad esempio i paranchi).

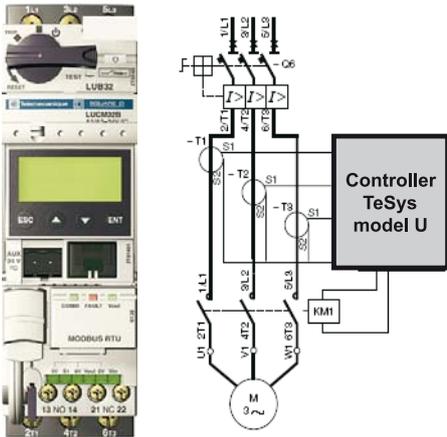
### □ I relè multifunzione

#### • I relè termici elettromeccanici o elettronici

I relè termici elettromeccanici o elettronici proteggono i motori con la misura della corrente. Sono adatti alle applicazioni comuni, mentre non sono sufficienti a risolvere i problemi legati alla tensione, alla temperatura o ad applicazioni particolari. Inoltre le nuove esigenze di gestione della produzione o della manutenzione hanno indotto i costruttori di materiale elettrico a proporre nuovi prodotti in grado di garantire non soltanto una protezione adeguata, ma anche una gestione completa del motore e del carico azionato.



↑ Fig. 63 Relè di sovrappia, marchio Telemecanique



↑ Fig. 65 Relè multifunzione separato dalla linea potenza

#### • Lo sviluppo

Lo sviluppo di questi relè è reso possibile dall'utilizzo congiunto delle seguenti tecnologie:

- rilevatori di tensione e di corrente (TA e TV); questi ultimi, basati su principi di funzionamento che non prevedono materiale magnetico (toroidi di Rogowsky), assicurano tempi di risposta brevissimi ed un'eccellente linearità,
- una tecnologia elettronica mista analogica e digitale con buona potenza di elaborazione e capacità di memoria,
- l'utilizzo dei bus di comunicazione per gli scambi di dati e il controllo,
- algoritmi performanti di modellizzazione dei motori,
- programmi applicativi integrati e configurabili.

Queste nuove generazioni di prodotti consentono di ridurre i costi dalla fase progettazione, semplificando la programmazione dei controllori automatici, fino alla fase di utilizzo, riducendo i costi della manutenzione e i tempi di arresto.

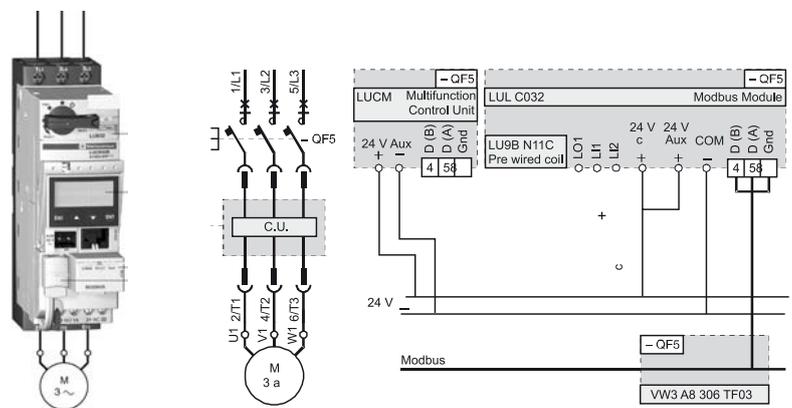
Qui di seguito forniamo una rapida presentazione delle possibili soluzioni oltre ad una guida alla scelta semplificata. Per una presentazione esauriente dell'offerta consultare la documentazione specifica Schneider Electric.

#### • Tre famiglie di prodotti

L'insieme dei relè multifunzione può essere suddiviso in tre famiglie di prodotti.

#### Soluzione 1: relè multifunzione integrato all'avviatore (↔Fig. 64).

Questa soluzione presenta il vantaggio di essere molto compatta con un cablaggio ridotto. È disponibile a correnti fino a 32A.



↑ Fig. 64 Relè multifunzione integrato all'avviatore

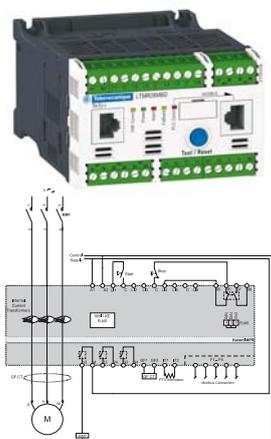
**Soluzione 2:** relè multifunzione separato dalla linea potenza; utilizza i blocchi funzione della soluzione 1, consente l'associazione con apparecchi di qualsiasi potenza (↔Fig. 65).

**Soluzione 3:** relè multifunzione separato dalla linea potenza; integra più ingressi/uscite (↔Fig. 66).

È la soluzione che presenta più funzioni.

#### Tabella di scelta dei relè di protezione

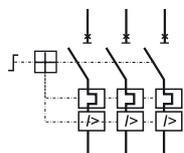
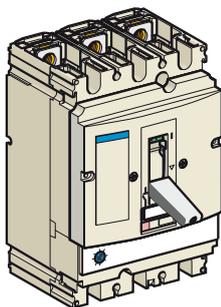
Nella tabella della Fig. 67 vengono riportate le principali funzioni delle protezioni motore. Per maggiori dettagli far riferimento ai documenti tecnici dei costruttori.



↑ Fig. 66 Relè multifunzione indipendente

Tipi di relè	Relè di sovraccarico (termico o elettrico)	Relè a sonde PTC	Relè di sovracoppia	Relè multifunzione		
				Integrato nell'avviatore	Controllore motore separato	Sistema di gestione del motore separato
<b>Tipo di funzione</b>						
<b>Corrente</b>						
Classe di protezione	10 e 20			da 5 a 20	da 5 a 20	da 5 a 30
Sovracorrente	++		+++	+++	+++	+++
Guasti di terra						
Squilibrio delle fasi	++			++	++	+++
Blocco meccanico durante/ dopo l'avviamento	+		++	++	++	+++
Marcia a vuoto				modulo	modulo	+++
<b>Tensione e potenza</b>						
Squilibrio di tensione						+++
Perdita di una fase						+++
Inversione di fase						+++
Sottotensione						+++
Sovratensione						+++
Potenza e fattore di potenza						+++
<b>Temperatura</b>						
Sonde PTC				modulo	modulo	+++
Sonde PT100				modulo	modulo	+++
<b>Logica</b>						
Tabella di verità				3 I/O	10 I/O	da 10 a 20 I/O
Temporizzatore						++
<b>Controllo applicazione</b>						
Avviamento diretto				+++	+++	+++
Invertitore				+++	+++	+++
Stella triangolo				+++	+++	+++
Part winding – due velocità					+++	+++
<b>Utilizzo / manutenzione</b>						
Diagnostica				+	+	+++
Report cronologico				modulo	modulo	+++
<b>Collegamenti/comunicazione</b>						
Visualizzazione locale	+			modulo	modulo	+++
Visualizzazione remotata mediante bus di comunicazione				modulo	modulo	+++
Controllo/comando mediante bus di comunicazione				modulo	modulo	+++

↑ Fig. 67 Tabella delle protezioni motore



↑ Fig. 68 (Interruttore automatico magneto-termico (GV7 - Telemecanique) e relativo simbolo grafico)

## ■ Gli interruttori automatici magneto-termici

### □ Generalità

L'interruttore automatico magneto-termico realizza contemporaneamente le funzioni di protezione contro i cortocircuiti e contro i sovraccarichi mediante l'apertura rapida del circuito in sovraccarico. È la combinazione di un interruttore automatico magnetico e di un relè di sovraccarico. Soddisfa le norme IEC 60947-2 e 60947-4-1 (↔ Fig.68).

In questi interruttori automatici, i dispositivi magnetici (protezione contro i cortocircuiti) hanno una soglia di sgancio non regolabile, generalmente pari a 10 volte la corrente di regolazione massima degli sganciatori termici.

Gli elementi termici (protezione contro i sovraccarichi) sono compensati contro le variazioni della temperatura ambiente. La soglia di protezione termica può essere regolata sul fronte dell'interruttore automatico e il suo valore deve corrispondere alla corrente nominale del motore da proteggere.

Per tutti questi interruttori automatici il coordinamento (tipo II) tra gli elementi termici e la protezione cortocircuito è garantita dalla costruzione.

Inoltre, in posizione di apertura, la maggior parte di questi apparecchi ha una distanza d'isolamento (tra i contatti) sufficiente a realizzare la funzione di sezionamento. Integrano anche un dispositivo di blocco necessario al dispositivo di sicurezza.

### □ Curve di sgancio

L'interruttore automatico magneto-termico è caratterizzato dalla curva di sgancio che rappresenta i tempi di sgancio dell'interruttore in funzione della corrente (multiplo di  $I_r$ ).

Questa curva comprende quattro zone (↔ Fig. 69) :

- la zona di funzionamento normale. Finché  $I < I_r$ , non si verifica lo sgancio,
- la zona di sovraccarico termico. Lo sgancio è garantito dalla protezione termica; più il sovraccarico è elevato, più il tempo di sgancio è breve. Nelle norme, questo modo di sgancio viene anche chiamato "a tempo inverso",
- la zona delle correnti forti, controllata dal "magnetico istantaneo" o "cortocircuito" con funzionamento istantaneo (inferiore a 5 ms),
- e su alcuni interruttori automatici (interruttori automatici elettronici), una zona intermedia controllata da un "magnetico temporizzato" con funzionamento ritardato (da 0 a 300 ms). Nelle norme questo modo di sgancio viene definito "a ritardo indipendente". Consente di evitare sganci intempestivi all'aggancio sui picchi di correnti magnetizzanti dei motori.

I loro limiti sono:

$I_r$  : corrente di regolazione della protezione contro i sovraccarichi.  
Deve corrispondere al valore della corrente nominale ( $I_n$ ) del motore da proteggere,

$I_m$  : corrente di sgancio della protezione magnetica temporizzata,

$I_{inst}$  : corrente di sgancio della protezione magnetica istantanea.

Può variare da 3 a 17 volte  $I_r$  ma è generalmente vicina a 10  $I_r$ ,

$I_{cs}$  : potere nominale d'interruzione di servizio in cortocircuito,

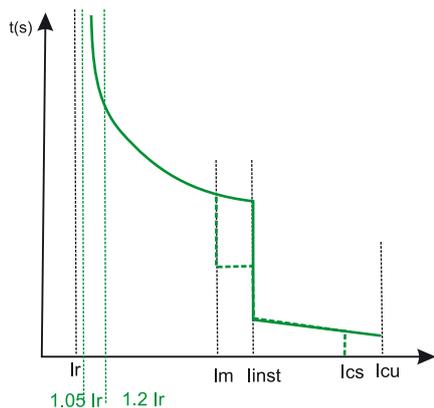
$I_{cu}$  : potere d'interruzione ultimo (massimo) in cortocircuito.

## ■ Conclusione

La protezione dei motori è una funzione essenziale per la continuità del funzionamento delle macchine.

La scelta del dispositivo di protezione deve essere rigorosa.

L'utente avrà tutto l'interesse a selezionare i dispositivi che integrano un'elettronica di comunicazione per anticipare e prevenire eventuali guasti. In questo modo la ricerca di anomalie e la rapidità di riavviamento verranno notevolmente migliorate.



↑ Fig. 69 Zone di funzionamento di un interruttore automatico magneto-termico

# 5 capitolo

## Partenze-motore

*Presentazione:*

- *Funzioni necessarie alla realizzazione di una partenza-motore*
- *Tabella di scelta delle funzioni delle partenze-motore e dei relativi prodotti*



■ 5.1 Generalità .....	pagina 98
■ 5.2 Le funzioni base delle partenze-motore .....	pagina 98
■ 5.3 Una funzione complementare: la comunicazione.....	pagina 101
■ 5.4 Partenze-motore e coordinamento .....	pagina 102
■ 5.5 I variatori di velocità.....	pagina 105
■ 5.6 Composizione, componenti degli avviatori e variatori elettronici .....	pagina 110
■ 5.7 Variatore-regolatore per motore a corrente continua .....	pagina 114
■ 5.8 Convertitore di frequenza per motore asincrono .....	pagina 116
■ 5.9 Variatore di tensione per motore asincrono .....	pagina 123
■ 5.10 Moto-variatori sincroni .....	pagina 125
■ 5.11 Moto-variatori passo-passo .....	pagina 126
■ 5.12 Le funzioni complementari dei variatori di velocità .....	pagina 127
■ 5.13 I variatori di velocità e il bilancio energetico.....	pagina 129
■ 5.14 I variatori di velocità e il risparmio energetico e di manutenzione .....	pagina 131
■ 5.15 Tabella di scelta delle partenze-motore.....	pagina 132

1

2

3

4

5

6

7

8

9

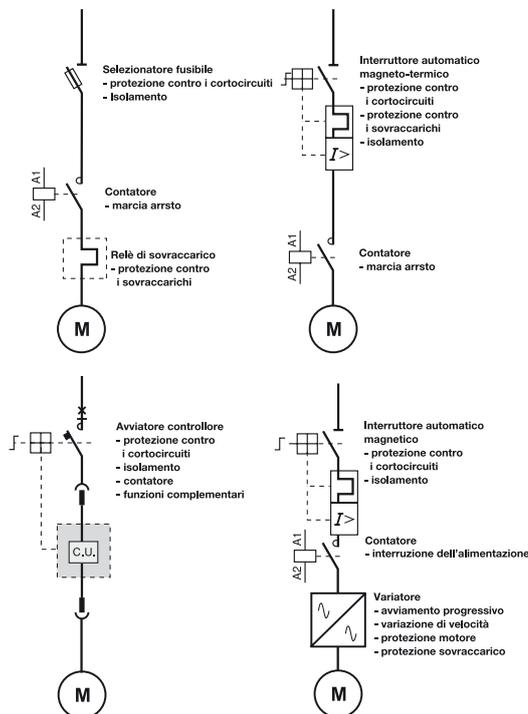
10

11

12

M

## 5.1 Generalità



↑ Fig. 1 Le diverse funzioni e la loro associazione per comporre una partenza-motore

Una partenza-motore garantisce quattro funzioni base:

- il sezionamento,
- la protezione contro i cortocircuiti,
- la protezione contro i sovraccarichi,
- la commutazione o comando (marcia - arresto).

Ogni partenza-motore può essere arricchita con funzioni supplementari in base alle esigenze applicative.

Le funzioni supplementari possono riguardare:

- la potenza: variazione di velocità, avviamento progressivo, inversione di fase, ecc...
- il controllo: contatti ausiliari, temporizzazione, comunicazione, ecc...

A seconda della composizione di una partenza-motore le funzioni possono essere ripartite in diversi modi, come illustrato nella Fig. 1.

La variazione di velocità o gli avviatori progressivi, sistemi sofisticati di partenze-motore, sono oggetto di una sezione specifica di questo capitolo 5.5.

I motorvariatori particolari come i variatori per motori sincroni e motori passo-passo trovano anch'essi spazio in questa sezione grazie alle caratteristiche di funzionamento molto simili.

Nella sezione 5.13 e 5.14, verranno trattati e sottolineati argomenti quali il bilancio energetico e i possibili risparmi, informazioni troppo spesso mal interpretate.

## 5.2 Le funzioni base delle partenze-motore

## ■ Il sezionamento

La funzione di sezionamento è obbligatoria e si deve trovare all'origine di ogni circuito (cf. norme d'installazione NF C15-100, CEI 60364-5-53); non è imposta, ma consigliata a livello di ogni partenza-motore.

Il sezionamento consiste nell'isolare i circuiti dalla loro fonte di energia (rete di alimentazione potenza) in modo sicuro, per garantire la protezione dei beni e delle persone in caso di operazioni di manutenzione, di riparazioni o modifiche sui circuiti elettrici a valle.

Il sezionamento deve essere progettato in conformità con le specifiche che esigono:

- l'interruzione omni-polare e simultanea,
- il rispetto delle distanze d'isolamento in funzione delle tensioni d'alimentazione,
- l'interblocco,
- l'interruzione visibile o sezionamento visualizzato:
  - con «interruzione visibile» si intende che l'apertura dei poli è direttamente visibile da un operatore,
- il sezionamento visualizzato viene identificato dalla posizione dell'organo di manovra o da un indicatore meccanico di posizione che, in base alla norma, può indicare la posizione « fuori tensione » solo se i contatti sono effettivamente separati da una distanza sufficiente conforme a quanto previsto dalle norme. I costruttori offrono numerosi apparecchi con questa funzione. Spesso lo stesso apparecchio associa le funzioni di sezionamento e di protezione contro i cortocircuiti (ad esempio il sezionatore a fusibili). Per questo motivo alcuni apparecchi base devono essere completati da un dispositivo complementare, quale ad esempio un supporto di aggancio.

Un sezionatore è destinato ad isolare un circuito e non ha potere d'interruzione né potere di chiusura. Viene sempre comandato a vuoto.

Un interruttore offre, oltre alla capacità di sezionamento, quella di poter stabilire, sopportare ed interrompere delle correnti (norme IEC 947-3).

## ■ La protezione

### □ La protezione contro i cortocircuiti (⇔ capitolo 4 Avviamento e protezione dei motori)

Questa funzione richiede il rilevamento delle sovracorrenti consecutive ai cortocircuiti (generalmente superiori a 10 volte la corrente nominale) e l'apertura del circuito in difetto.

Viene realizzata da fusibili o da interruttori automatici magnetici.

### □ La protezione contro i sovraccarichi (⇔ capitolo 4 Avviamento e protezione dei motori)

Questa funzione richiede il rilevamento delle sovracorrenti consecutive ai sovraccarichi ( $I_r < I_{\text{sovraccarichi}} < I_{rn}$ ) e l'apertura del circuito in difetto.

Viene realizzata da dispositivi elettromeccanici o elettronici (relè di sovraccarico) associati ad un organo d'interruzione (interruttore automatico o contattore) o integrati agli avviatori o variatori di velocità elettronici. Protegge anche la linea del motore contro i sovraccarichi termici.

### □ Protezioni associate agli avviatori e ai variatori di velocità elettronici

L'avviamento diretto sulla rete di distribuzione dei motori asincroni è la soluzione più utilizzata, più economica e spesso più conveniente per una gran varietà di macchine. Tuttavia questa soluzione si rivela talvolta non adatta ad alcune applicazioni, o addirittura non compatibile con il funzionamento desiderato a livello della macchina (spunto di corrente all'avviamento, impulsi meccanici durante gli avviamenti, impossibilità di controllare l'accelerazione e la decelerazione, impossibilità di far variare la velocità, ecc...).

Gli avviatori e i variatori di velocità elettronici (⇔ Fig. 2) permettono di eliminare questi inconvenienti, ma le protezioni convenzionali descritte precedentemente non sono efficaci con questi apparecchi che modulano l'energia elettrica fornita al motore.

I variatori di velocità e gli avviatori elettronici hanno quindi delle protezioni integrate. I variatori moderni garantiscono generalmente la protezione di sovraccarico dei motori e la protezione dei motori stessi.

A partire dalla misura della corrente e da un'informazione sulla velocità, un microprocessore calcola l'aumento di temperatura del motore e fornisce un segnale d'allarme o di sgancio in caso di riscaldamento eccessivo.

Inoltre le informazioni elaborate dalla protezione termica integrata nel variatore possono essere scambiate con un controllore programmabile o un supervisore mediante il collegamento di comunicazione di cui sono dotati i variatori e gli avviatori più evoluti.

La variazione di velocità è oggetto del paragrafo 5.5 di questo capitolo.

## ■ La commutazione o comando

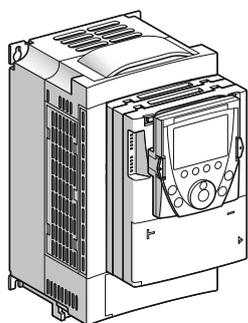
### □ La funzione di comando

Con « comandare », è necessario comprendere il concetto di chiudere (stabilire) e aprire (interrompere) un circuito elettrico in carico.

La funzione di comando viene realizzata dagli interruttori, dagli interruttori automatici magneto-termici, dagli avviatori e dai variatori di velocità.

Il contattore è tuttavia il prodotto più utilizzato per realizzare questa funzione poiché permette il comando a distanza (telecomando).

Per i motori, questo dispositivo di comando deve consentire un elevato numero di manovre (durata elettrica) ed essere conforme alle norme CEI 60947-4-1.



↑ Fig. 2

Variatore di velocità  
(ATV61 - ATV71 - Telemecanique)

In base a queste norme i costruttori devono precisare le seguenti caratteristiche relative al prodotto:

- **Circuito di comando**
  - tipo di corrente di comando, oltre alla frequenza in caso di corrente alternata,
  - tensione nominale dei circuiti di comando ( $U_c$ ) o tensione d'alimentazione di comando ( $U_s$ ).
- **Circuito di potenza**
  - tensione nominale d'impiego ( $U_e$ ): si esprime generalmente mediante la tensione tra fasi. Determina l'impiego dei circuiti ai quali fanno riferimento i poteri di chiusura e d'interruzione, il tipo di servizio e le caratteristiche di avviamento,
  - corrente nominale d'impiego ( $I_e$ ) o potenza nominale d'impiego: questa caratteristica viene definita dal costruttore a seconda delle condizioni d'impiego specificate e prende in considerazione in particolare la tensione nominale d'impiego e la corrente termica convenzionale ( $I_{th}$  corrispondente al valore massimo della corrente di prova). In caso di materiale per il comando diretto di un unico motore, l'indicazione di una corrente nominale d'impiego può essere sostituita o completata con quella della potenza nominale massima disponibile.

In alcuni casi queste informazioni possono essere completate:

- dal servizio nominale, con indicazione della classe di servizio intermittente, se prevista. Le classi definiscono diversi cicli di manovre,
- dai poteri nominali di chiusura e/o di interruzione. Sono i valori massimi di corrente, fissati dal costruttore, che un materiale può stabilire (chiusura) o interrompere (interruzione) in modo soddisfacente e in condizioni specifiche. I poteri nominali di chiusura e di interruzione non sono obbligatoriamente specificati dal costruttore, ma la norma esige dei valori minimi per ciascuna categoria d'impiego.

□ **Le categorie d'impiego degli apparecchi di comando**

Le norme CEI 60947 definiscono delle categorie d'impiego in base alle applicazioni a cui gli apparecchi di comando sono destinati (⇔ Fig. 3). Ciascuna categoria è caratterizzata da una o più condizioni di servizio quali:

- correnti,
- tensioni,
- fattore di potenza o costante di tempo,
- e, se necessario, altre condizioni di servizio.

Tipo di corrente	Categorie d'impiego	Applicazioni caratteristiche
Corrente alternata	<b>AC-1</b>	Carichi non induttivi o poco induttivi, forni a resistenze. Distribuzione di energia (illuminazione, gruppo elettrogeno, ecc...).
	<b>AC-2</b>	Motori ad anelli: avviamento, interruzione. Apparecchiatura a servizio intensivo (sollevamento, movimentazione, frantumatrici, treni di laminazione, ecc...).
	<b>AC-3</b>	Motori a gabbia: avviamento, interruzione dei motori lanciati*. Comando motore (pompe, compressori, ventilatori, macchine utensili, trasportatori, presse, ecc...).
	<b>AC-4</b>	Motori a gabbia: avviamento, inversione di marcia, marcia ad impulsi. Apparecchiatura a servizio intensivo (sollevamento, movimentazione, frantumatori, treni di laminati, ecc...).
Corrente continua	<b>DC-1</b>	Carichi non induttivi o poco induttivi, forni a resistenze.
	<b>DC-3</b>	Motori shunt: avviamento, inversione di marcia, marcia ad impulsi. Interruzione dinamica di motori per corrente continua.
	<b>DC-5</b>	Motori seriali: avviamento, inversione di marcia, marcia ad impulsi. Interruzione dinamica di motori per corrente continua.

\* La categoria AC-3 può essere utilizzata per marcia ad impulsi o inversione di marcia di manovre occasionali di durata limitata, quali il montaggio di una macchina; il numero di manovre per i tempi limitati definiti non supera normalmente le cinque manovre al minuto, né le dieci manovre per 10 min.

1 Fig. 3 Le diverse categorie d'impiego dei contattori in base alla norma CEI 60947-1

## 5.2 Le funzioni base delle partenze-motore

## 5.3 Una funzione complementare: la comunicazione

Ad esempio vengono prese in considerazione:

- le condizioni di definizione e interruzione di corrente,
- il tipo di apparecchio controllato (motore a gabbia, motore ad anelli, resistenza),
- le condizioni in cui vengono effettuate le chiusure e le aperture (motore lanciato, motore bloccato, in corso di avviamento, frenatura in controcorrente, ecc...).

### □ Scegliere un contattore

Le categorie d'impiego definite dalla norma consentono una prima selezione di un prodotto in grado di rispondere alle esigenze applicative a cui è destinato il motore. Tuttavia è necessario tenere conto anche di altre caratteristiche che esulano da quanto stabilito dalla norma.

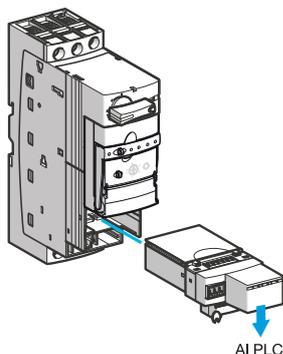
Tra questi, ad esempio, i fattori esterni all'applicazione: condizioni climatiche (temperatura, umidità), situazione geografica (altitudine, vicinanza del mare), ecc...

In alcune situazioni, l'affidabilità dell'apparecchiatura può essere un fattore critico, in particolar modo quando la manutenzione è difficile. La durata elettrica (durata dei contatti) degli apparecchi (contattore) è quindi una caratteristica importante.

Sarà quindi necessario disporre di cataloghi completi e precisi per verificare che il prodotto offra tutte le caratteristiche richieste.

5

## 5.3 Una funzione complementare: la comunicazione



↑ Fig. 4

L'avviatore controllato con relativo modulo di comunicazione Modbus (Tesy U - Telemecanique)

### ■ La comunicazione: una funzione diventata essenziale

Nei processi e nei sistemi di produzione industriali, la funzione di comunicazione consente di controllare, interrogare e comandare a distanza le apparecchiature e le macchine di un impianto di produzione.

Per assicurare la comunicazione tra tutti gli elementi di un impianto di produzione è necessario che molti apparecchi, compresi i dispositivi di protezione quali i relè multifunzione o le partenze-motore, integrino componenti o moduli comunicanti (↔ Fig. 4).

### ■ L'apporto della comunicazione

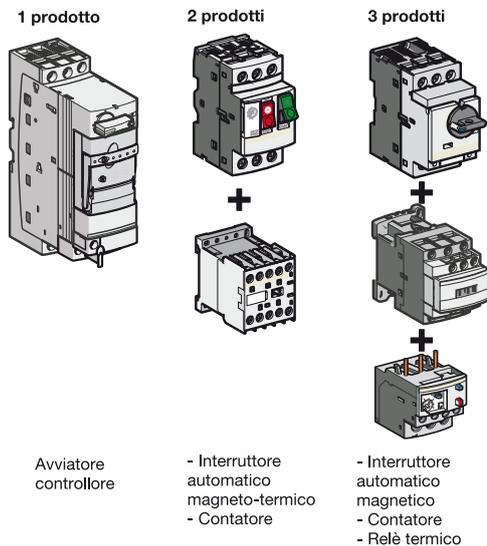
Le interfacce di comunicazione AS-I, Modbus, Profibus, ecc..., consentono di comandare un motore (telecomando marcia-arresto dell'avviatore-motore), di conoscere a distanza il carico motore (misura della corrente) e/o i guasti esistenti (sovracorrenti, sovraccarichi, ecc...) o passati (report cronologico).

La funzione di comunicazione, oltre ad essere utile per l'integrazione delle protezioni nei processi di automazione industriali, offre i seguenti servizi:

- preallarmi per la segnalazione anticipata della comparsa di un guasto,
- report cronologico dei guasti per la facilitare la ricerca e l'identificazione di un evento ricorrente,
- aiuto alla messa in servizio,
- aiuto alla manutenzione tramite l'identificazione di una deriva delle condizioni di funzionamento.

La funzione di comunicazione migliora sensibilmente la gestione delle apparecchiature con conseguenze positive anche sui risultati economici.

## 5.4 Partenze-motore e coordinamento



↑ Fig. 5 Le tre possibilità di associazione di apparecchi per realizzare una partenza-motore

### Le soluzioni partenze-motore

Come già detto all'inizio del capitolo le principali funzioni che una partenza-motore deve assicurare (sezionamento, comando e protezione contro i cortocircuiti e i sovraccarichi), possono essere realizzate da diversi apparecchi. Perchè una partenza-motore realizzi correttamente tutte queste funzioni, sono possibili tre modalità di associazione degli apparecchi (← Fig. 5) che non richiedono comunque la compatibilità tra le caratteristiche dei diversi apparecchi associati.

#### La soluzione « tutto in uno »

Un solo apparecchio riunisce tutte e tre le funzioni. Le sue prestazioni globali sono garantite dal costruttore. Per l'utente, dalla fase di progettazione all'installazione, questa è la soluzione più semplice: facile da installare (cablaggio ridotto) e scelta immediata (non richiede studi particolari).

#### La soluzione « 2 apparecchi »

Interruttore automatico magneto-termico + contattore

La compatibilità tra le caratteristiche di entrambi gli apparecchi deve essere verificata dall'utente.

#### La soluzione « 3 apparecchi »

Interruttore automatico magnetico + contattore + relè di sovraccarico. Consente di coprire un'ampia gamma di potenza. Questa associazione richiede uno studio di compatibilità per la scelta degli apparecchi e d'installazione per il loro montaggio su telaio o in cassetta.

Questo procedimento (compatibilità, scelta e installazione) non è sempre alla portata degli utilizzatori finali poiché richiede la raccolta delle caratteristiche dei diversi apparecchi e il loro successivo confronto. Questo spiega perché i costruttori studiano e poi offrono nei loro cataloghi, associazioni di prodotti. Nella stessa direzione si sforzano di trovare combinazioni ottimali tra le protezioni: è la nozione di coordinamento.

### Il coordinamento tra le protezioni e il comando

Il coordinamento è la combinazione ottimale delle diverse protezioni (contro i cortocircuiti e i sovraccarichi) e dell'organo di comando (contattore) che compongono una partenza-motore.

Studiato per una data potenza, consente di proteggere al meglio le apparecchiature comandate dalla partenza-motore (← Fig. 6).

#### I principi del coordinamento

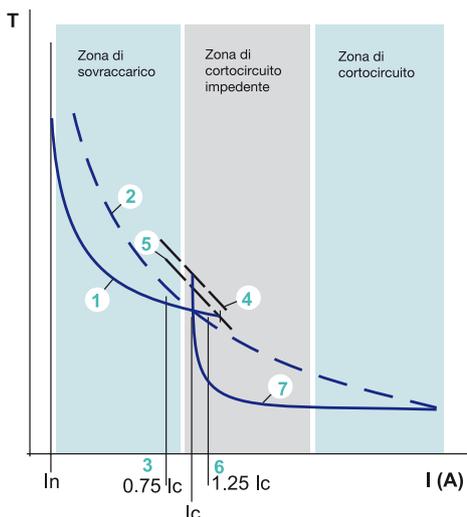
Per il corretto funzionamento di una partenza-motore il coordinamento tra tutti gli apparecchi deve rispondere contemporaneamente alle seguenti istanze:

- il relè di sovraccarico deve proteggere l'interruttore automatico magnetico nella zona di sovraccarico: la sua curva "1" deve passare al di sotto di quella della tenuta termica dell'interruttore automatico,
- inversamente, nelle zone di cortocircuito, per proteggere il relè termico, la curva di sgancio su cortocircuito deve passare al di sotto di quella della tenuta termica del relè,
- infine, per assicurare la protezione del contattore, il suo limite di tenuta termica deve essere al di sopra delle curve dei due sganciatori termici "1" e magnetico "3" (o fusibile "2").

Occorre notare che la norma stabilisce dei limiti per le correnti di prova:

- fino a  $0.75 I_c$  deve intervenire solo la protezione termica,
- a partire da  $1.25 I_c$  deve intervenire solo la protezione contro i cortocircuiti.

Il coordinamento presenta un doppio vantaggio: la riduzione dei costi dell'apparecchiatura e della manutenzione poiché le diverse protezioni si completano in modo ottimale, senza ridondanza.



- 1 Curva del relè di protezione sovraccarico
- 2 Fusibile
- 3 Sgancio solo del relè di sovraccarico
- 4 Limite di tenuta termica dell'interruttore automatico
- 5 Limite di tenuta del relè di sovraccarico
- 6 Interruzione della corrente mediante DPPC(1)
- 7 Sganciatore magnetico dell'interruttore automatico

↑ Fig. 6 I principi del coordinamento

□ **Coordinamenti tipo 1 e tipo 2**

La norma CEI 60947-4-1 definisce due tipi di coordinamento (tipo 1 e tipo 2)

- **Coordinamento tipo 1:** è la soluzione standard, la più utilizzata. In condizioni di cortocircuito, il materiale non deve risultare pericoloso per le persone e gli impianti. In seguito alla scomparsa del cortocircuito, può non essere in grado di funzionare senza riparazione o sostituzione di pezzi.
- **Coordinamento tipo 2:** è la soluzione per prestazioni elevate. In condizioni di corto-circuito, il materiale non deve risultare pericoloso per le persone e gli impianti. In seguito alla scomparsa del cortocircuito non deve presentare nessun deterioramento e nessuna deregolazione. È ammesso solo il rischio di saldatura, ma in questo caso il costruttore deve indicare le misure da adottare per la sepoarazione dei contatti.
- In base alla Norma IEC 947-6-2 esiste un'ulteriore soluzione per prestazioni elevatissime definita « **Coordinamento totale** ». In caso di cortocircuito sugli apparecchi che compongono la partenza non è ammesso alcun guasto, né rischio di saldatura. Il materiale non deve risultare pericoloso per le persone e gli impianti e in seguito deve essere in grado di funzionare. Il riavviamento della partenza-motore deve poter essere immediato.

□ **Gli ACP: Apparecchi integrati di manovra e protezione**

Gli ACP o apparecchi integrati di manovra e protezione sono adatti a realizzare contemporaneamente le funzioni di comando e di protezione (sovraccarico e cortocircuito); sono inoltre in grado di realizzare comandi in condizioni di cortocircuito.

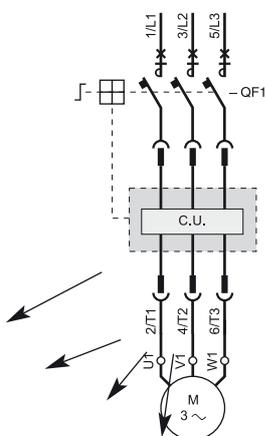
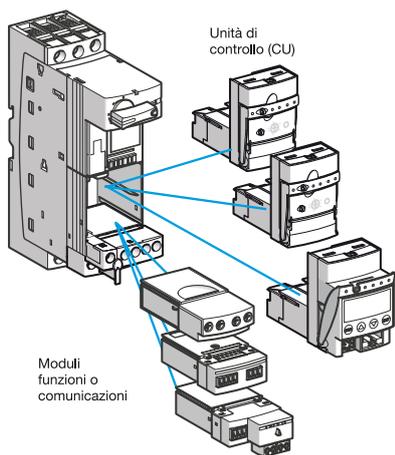
Possono anche garantire funzioni complementari quali il sezionamento assicurando quindi in toto la funzione di « partenza-motore ». Rispondono alla norma CEI 60947-6-2, che definisce in modo specifico le caratteristiche e le categorie d'impiego degli ACP, secondo le norme CEI 60947-1 e 60947-4-1.

Le diverse funzioni realizzate da un ACP sono associate e coordinate in modo da consentire la continuità di servizio con qualsiasi corrente fino al potere nominale di interruzione di servizio in cortocircuito (Ics) dell'ACP. L'ACP può comprendere uno o più apparecchi, ma le sue caratteristiche sono sempre nominali come se si trattasse di un unico apparecchio. La garanzia di un coordinamento « totale » tra tutte le funzioni consente inoltre all'utente di scegliere in modo semplice la migliore soluzione di protezione da installare.

Benché si presenti come un unico apparecchio, l'ACP è in grado di offrire la stessa modularità o anche superiore di una soluzione partenza-motore « tre prodotti ». È il caso ad esempio del Tesys U di Telemecanique (↔ Fig. 7) che consente di inserire o sostituire in qualsiasi momento un'unità di controllo con funzioni di protezione e di comando integrate per motori da 0.15 A fino a 32 A, in una base potenza o base generica da 32 A.

È possibile integrare funzioni supplementari a livello:

- **della potenza: blocco invertitore, limitatore**
- **del comando/controllo**
  - moduli funzione: allarmi, carico motore, riarmo automatico, ecc...
  - moduli di comunicazione: AS-I, Modbus, Profibus, CAN-Open, ecc...
  - contatti ausiliari, contatti aggiuntivi.



↑ Fig. 7 Esempio di modularità di un ACP (avviatore controllore Tesys U - Telemecanique)

Questo sistema offre inoltre funzioni di comunicazione evolute (⇔ Fig. 8).

Funzioni di comunicazione disponibili:	Unità di controllo:		
	Standard	Evolutive	Multifunzione
Stati dell'avviatore (pronto, in marcia, in difetto)			
Allarmi (sovracorrenti, ecc...)			
Allarme termico			
Riarmo a distanza mediante bus			
Indicazione del carico motore			
Differenziazione dei guasti			
Configurazione e consultazione delle funzioni di protezione			
Funzione « report cronologico »			
Funzione « controllo »			
Comandi di Marcia e di Arresto			
Informazioni trasmesse dal bus (Modbus) e funzioni realizzate			

↑ Fig. 8 Le funzioni di comunicazione del Tesys U

#### □ Quale coordinamento scegliere?

La scelta del tipo di coordinamento dipende dai parametri di utilizzo.

La scelta deve essere effettuata in funzione delle esigenze dell'utente e di un'ottimizzazione dei costi dell'impianto:

##### • Tipo 1

Scelta accettabile quando non è necessaria la continuità di servizio e quando è possibile riavviare in seguito alla sostituzione degli elementi guasti. In questo caso è necessario che il servizio di manutenzione sia efficace (disponibile e competente).

Il vantaggio è nel costo ridotto dell'apparecchiatura.

##### • Tipo 2

Scelta da effettuare quando è richiesta la continuità di servizio.

In questo caso il servizio di manutenzione può essere ridotto.

##### • « Coordinamento totale »

Scelta da effettuare quando è necessario il riavviamento immediato del motore. Non richiede alcun servizio di manutenzione.

Le soluzioni di coordinamento proposte nei cataloghi dei costruttori semplificano la scelta dell'utente e assicurano la conformità del prodotto alle norme.

#### ■ La selettività

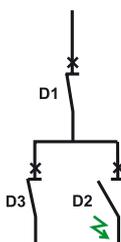
In un impianto elettrico i ricevitori sono collegati ai generatori attraverso una serie di dispositivi di sezionamento, protezione e comando.

Se lo studio di selettività non è realizzato correttamente, un guasto elettrico può provocare l'intervento di più dispositivi di protezione.

Un solo guasto può provocare ad esempio la messa fuori tensione di una parte più o meno grande dell'impianto con gravi conseguenze quali la mancata distribuzione di energia elettrica alle partenze sane.

Per evitare questi tipi di problemi (⇔ Fig. 9) lo scopo della selettività è di scollegare dalla rete la partenza o il motore in difetto, e solo quello, mantenendo sotto tensione la maggior parte possibile di apparecchiature dell'impianto. La selettività consente quindi di garantire sicurezza e continuità di servizio, facilitando inoltre la localizzazione del guasto.

Per garantire una continuità di servizio ottimale è necessario utilizzare dispositivi di protezione coordinati tra loro. A questo scopo vengono utilizzate diverse tecniche che consentono di ottenere una selettività che



↑ Fig. 9 Principio della selettività: in caso di guasto, si apre solo D2

## 5.4 Partenze-motore e coordinamento

### 5.5 I variatori di velocità

potrà essere totale, se garantita per tutti i valori della corrente di guasto, fino al valore massimo disponibile nell'installazione, oppure parziale nel caso contrario.

#### □ Le diverse tecniche di selettività

Esistono diversi tipi di selettività:

- **amperometrica:** risulta dalla differenza tra le soglie degli interruttori posti in serie sull'impianto.
- **cronometrica:** consiste nel temporizzare differentemente (di alcune decina o centinaia di millisecondi) l'intervento dell'interruttore automatico a monte, o nell'utilizzare le caratteristiche normali di funzionamento legate ai calibri degli apparecchi. Quindi è possibile garantire la selettività tra due relè di sovraccarico rispettando la condizione  $I_{r1} > 1,6 \cdot I_{r2}$  (con  $r1$  a monte di  $r2$ ).
- **Sellim o energetica:** consiste nell'installare a monte di un interruttore rapido, un interruttore ultralimitatore equipaggiato con uno sganciatore specifico la cui particolarità è quella di aprire per il tempo necessario al funzionamento dell'interruttore automatico a valle e poi si richiude.
- **logica:** consiste in un trasferimento dell'informazione di superamento di soglia tra gli sganciatori degli interruttori dei diversi livelli della distribuzione radiale, lasciando la possibilità di apertura all'interruttore automatico più a valle.

Per maggiori dettagli consultare il *Dossier Tecnico Schneider-Electric n°167*.

#### □ La selettività nei processi

Per le apparecchiature di comando processi (linee di produzione, unità produttive chimiche, ecc...), le tecniche di selettività più utilizzate tra le partenze-motore e la distribuzione elettrica che alimenta i processi sono generalmente la selettività amperometrica e la selettività cronometrica. Nella maggior parte dei casi la selettività è garantita dal potere limitatore o ultralimitatore delle partenze-motore.

## 5.5 I variatori di velocità

*Questa parte descrive in dettaglio tutti gli aspetti della variazione di velocità. Alcune tecnologie molto specifiche quali ad esempio ciclo-convertitori, cascata subsincrona, convertitore per motore sincro o asincrono non sono trattate. L'impiego di questi variatori è molto specifico ed è proprio di settori e mercati particolari. Ad essi sono dedicate opere specializzate. Il lettore interessato troverà una descrizione esauriente nelle opere, *Funzionamento Elettrico a velocità variabile*, Bonal (Jean) e Séguier (Guy), Ed. Tec e Utilizzo industriale dei motori a corrente alternata, Bonal (Jean), Ed. Tec e Doc.*

*La variazione di velocità per motori a corrente continua, sostituita in gran parte dalla variazione di velocità con convertitori di frequenza viene comunque trattata, poiché riteniamo importante comprendere il principio di funzionamento per affrontare facilmente alcune specificità e caratteristiche della variazione di velocità nel suo insieme.*

#### ■ Storia e note

##### □ Storia

Per avviare i motori elettrici e controllarne la velocità gli avviatori reostatici, i variatori meccanici e i gruppi Ward Leonard in particolare sono state le prime soluzioni utilizzate.

Gli avviatori e i variatori elettronici si sono quindi imposti nel settore industriale come soluzione moderna, economica, affidabile che non richiede manutenzione.

Un variatore o un avviatore elettronico è un convertitore di energia con il ruolo di modulare l'energia elettrica fornita al motore.

Gli avviatori elettronici sono destinati esclusivamente ai motori asincroni. Fanno parte della famiglia dei variatori di tensione.

I variatori di velocità garantiscono una messa in velocità e una decelerazione progressive, consentono un adattamento preciso della velocità alle condizioni di utilizzo. I variatori di velocità sono del tipo raddrizzatore controllato per alimentare i motori a corrente continua; i variatori per motori a corrente alternata sono convertitori di frequenza.

Storicamente, il variatore elettronico per motore a corrente continua è stato la prima soluzione offerta. I progressi dell'elettronica di potenza e della microelettronica hanno permesso la realizzazione di convertitori di frequenza affidabili ed economici. I convertitori di frequenza moderni consentono di alimentare i motori asincroni standard con prestazioni analoghe ai migliori variatori di velocità a corrente continua. Alcuni costruttori propongono anche motori asincroni con variatori di velocità elettronici integrati in un'apposita cassetta terminale; questa soluzione viene proposta per degli insiemi di potenza ridotta (qualche kW).

Nelle ultime pagine di questo capitolo vengono citate le recenti evoluzioni dei variatori di velocità e le future tendenze presso i costruttori.

Queste eleganti evoluzioni ampliano notevolmente l'offerta e le possibilità dei variatori.

□ **Note: le principali funzioni degli avviatori e dei variatori di velocità elettronici**

• **Accelerazione controllata**

La messa in velocità del motore è controllata mediante una rampa di accelerazione lineare o a « S ». Questa rampa generalmente è regolabile e consente, di conseguenza, di scegliere il tempo di messa in velocità adatto all'applicazione.

• **Variatione di velocità**

Un variatore di velocità può non essere allo stesso tempo anche un regolatore. In questo caso, è un sistema rudimentale che possiede un comando elaborato a partire dalle grandezze elettriche del motore con amplificazione di potenza, ma non anello di reazione.

Viene detto « ad anello aperto ».

La velocità del motore è definita da una grandezza d'ingresso (tensione o corrente) chiamata impostazione o riferimento. Per un valore dato dell'impostazione, questa velocità può variare in funzione dei disturbi (variazioni della tensione di alimentazione, del carico, della temperatura).

La gamma di velocità si esprime in funzione della velocità nominale.

• **Regolazione di velocità**

Un regolatore di velocità è un variatore asservito (⇐ Fig. 10).

Possiede un sistema di comando con amplificazione di potenza e un anello di reazione. Viene detto « ad anello chiuso ».

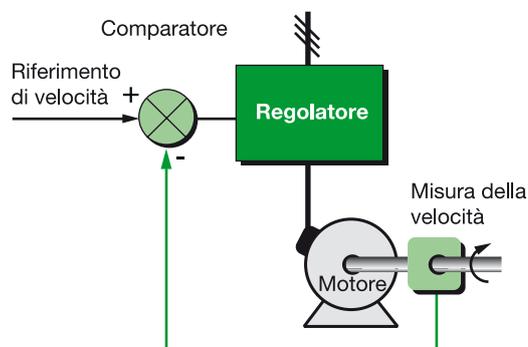
La velocità del motore è definita da un'impostazione.

Il valore di impostazione viene confrontato costantemente con un segnale di ritorno, immagine della velocità del motore.

Questo segnale è generalmente fornito da una dinamo tachimetrica o da un generatore di impulsi montato all'estremità dell'albero motore o ancora da un dispositivo stimatore che determina la velocità del motore a partire da grandezze elettriche disponibili nel variatore. I convertitori di frequenza che alimentano i motori asincroni ne sono spesso dotati.

Se viene rilevato uno scarto in seguito ad una variazione della velocità, le grandezze applicate al motore (tensione e/o frequenza) vengono automaticamente corrette in modo da riportare la velocità al suo valore iniziale.

Grazie alla regolazione, la velocità è praticamente insensibile ai disturbi.



↑ Fig. 10 Principio della regolazione di velocità

La precisione di un regolatore è generalmente espressa in % del valore nominale della grandezza da regolare.

- **Decelerazione controllata**

Quando un motore viene messo fuori tensione, la sua decelerazione è dovuta unicamente alla coppia resistente della macchina (decelerazione naturale).

Gli avviatori e variatori elettronici consentono di controllare la decelerazione mediante una rampa lineare o a « S », solitamente indipendente dalla rampa di accelerazione.

La rampa può essere regolata in modo da ottenere un tempo di passaggio della velocità in regime stabilito ad una velocità intermedia o nulla:

- se la decelerazione desiderata è più rapida della decelerazione naturale, il motore deve sviluppare una coppia resistente che si aggiunge alla coppia resistente della macchina; si parla quindi di frenatura elettrica che può essere effettuata mediante rinvio di energia alla rete di alimentazione o mediante dissipazione in una resistenza di frenatura,
- se la decelerazione desiderata è più lenta rispetto alla decelerazione naturale, il motore deve sviluppare una coppia motore superiore alla coppia resistente della macchina e continuare ad azionare il carico fino all'arresto.

- **Inversione del senso di marcia**

L'inversione della tensione d'alimentazione (variatori per motore a corrente continua) o l'inversione dell'ordine delle fasi d'alimentazione del motore viene realizzata automaticamente, mediante inversione dell'impostazione all'ingresso, mediante un ordine logico su un morsetto o mediante un'informazione trasmessa da una rete seriale. La maggior parte dei variatori attuali per motori alternati consente questa funzione di base.

- **Frenatura di arresto**

Questo tipo di frenatura consiste nell'arrestare un motore senza controllare la rampa di rallentamento. Per gli avviatori e variatori di velocità per motori asincroni, questa funzione viene realizzata in modo economico mediante iniezione di corrente continua nel motore con un funzionamento particolare dello stadio di potenza. Tutta l'energia meccanica viene dissipata nel rotore della macchina e, di conseguenza, la frenatura non può che essere intermittente. Su un variatore per motore a corrente continua, questa funzione verrà garantita collegando una resistenza ai morsetti dell'indotto.

- **Protezioni integrate**

I variatori moderni garantiscono generalmente la protezione termica dei motori e la loro propria protezione. A partire dalla misura della corrente e da un'informazione sulla velocità (se la ventilazione del motore dipende dalla sua velocità di rotazione), un microprocessore calcola l'aumento di temperatura del motore e fornisce un segnale di allarme o di blocco in caso di riscaldamento eccessivo.

I variatori, e in particolare i convertitori di frequenza, sono d'altra parte spesso dotati di protezioni contro:

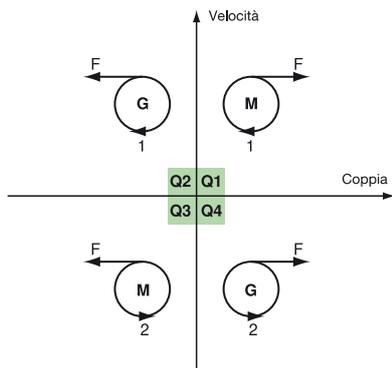
- i cortocircuiti tra fasi e tra fase e terra,
- le sovratensioni e le cadute di tensione,
- gli squilibri di fase,
- la marcia in monofase.

## ■ I principali modi di funzionamento e i principali tipi di variatori elettronici

Nei seguenti paragrafi verranno descritti i principi fondamentali.

### □ I principali modi di funzionamento

I variatori di velocità possono, a seconda del convertitore elettronico, far funzionare un motore in un unico senso di rotazione, nel qual caso saranno chiamati « unidirezionali », oppure comandare entrambi i sensi di rotazione, e allora verranno chiamati « bidirezionali ».



Senso di rotazione	Funzionamento	Coppia C	Velocità n	Prodotto C.n	Quadrante
1 (orario)	In motore	si	si	si	1
	In generatore				2
2 (antiorario)	In motore			si	3
	In generatore	si			4

↑ Fig. 11 Le quattro possibili situazioni di una macchina nel suo diagramma coppia-velocità

I variatori possono essere « reversibili » quando possono recuperare l'energia del motore funzionante in generatore (modo frenatura).

La reversibilità è ottenuta mediante un rinvio di energia sulla rete (ponte d'ingresso reversibile) oppure dissipando l'energia recuperata in una resistenza con un chopper di frenatura.

La Fig. 11 illustra le quattro situazioni possibili nel diagramma coppia-velocità di una macchina riassunte nella tabella associata.

È importante notare che quando la macchina funziona in generatore deve beneficiare di una forza di trascinamento. Questo stato è utilizzato in modo particolare per la frenatura. L'energia cinetica presente sull'albero della macchina viene trasferita alla rete di alimentazione oppure dissipata in delle resistenze o, per le piccole potenze, nelle perdite della macchina.

• **Variatore unidirezionale**

Questo tipo di variatore è nella maggior parte dei casi non reversibile ed è realizzato per:

- un motore a corrente continua, con un convertitore diretto (CA => CC) comprendente un ponte misto a diodi e tiristore (↔ Fig. 12a I),
- un motore a corrente alternata, con un convertitore indiretto (con trasformazione intermedia in corrente continua) comprendente in ingresso un ponte di diodi seguito da un convertitore di frequenza che fa funzionare la macchina nel quadrante 1 (↔ Fig. 12a II).  
In alcuni casi questo tipo di montaggio può essere utilizzato in bidirezionale (quadranti 1 e 3).

Un convertitore indiretto comprendente un chopper di frenatura e una resistenza correttamente dimensionata è adatto per una frenatura momentanea (rallentamento o su un apparecchio di sollevamento quando il motore deve sviluppare una coppia di frenatura in discesa per trattenere il carico).

In caso di funzionamento prolungato con un carico trascinante, un convertitore reversibile è indispensabile poiché il carico restituisce potenza continuamente, ad esempio un motore utilizzato come freno su un banco di prova.

• **Variatore bidirezionale**

Questo tipo di variatore può essere un convertitore reversibile o non reversibile. Se è reversibile, la macchina funziona nei quattro quadranti (↔ Fig. 11) e consente il funzionamento in frenatura permanente.

Se non è reversibile, la macchina funziona solo nei quadranti 1 e 3.

La progettazione e il dimensionamento del variatore o dell'avviatore sono direttamente determinati dal tipo di carico azionante. In particolare modo per quanto riguarda le capacità di fornire una coppia sufficiente per la messa in velocità.

Le differenti gamme di macchine e le relative curve caratteristiche sono descritte nel capitolo Motori e carichi.

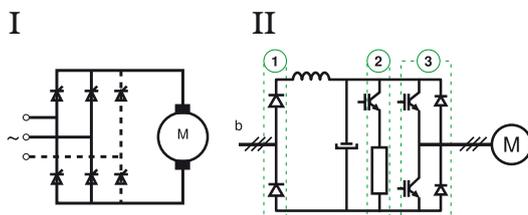
□ **I principali tipi di variatori**

In questa sezione sono citati soltanto i variatori più comuni e le realizzazioni tecnologiche usuali.

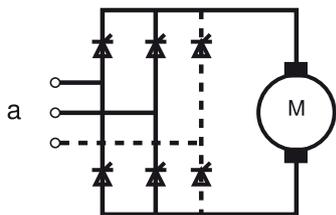
In effetti, esistono numerosi schemi di variatori di velocità elettronici:

- cascata sottosincrona,
- ciclo-convertitori,
- commutatori di corrente, chopper, ecc...

Il lettore interessato troverà una descrizione esauriente nelle opere *Funzionamento elettrico a velocità variabile* Bonal (Jean) e Séguier (Guy), Ed. Tec e Doc e *Utilizzo industriale dei motori a corrente alternata* Bonal (Jean), Ed. Tec e Doc.



↑ Fig. 12a Schemi di principio: [I] convertitore diretto a ponte misto; [II] convertitore indiretto con (1) ponte di diodi in ingresso, (2) dispositivo di frenatura (resistenza e chopper), (3) convertitore di frequenza



↑ Fig. 12b Schema di un raddrizzatore controllato per motore a corrente continua

#### • Raddrizzatore controllato per motore a corrente continua

Fornisce, a partire da una rete alternata monofase o trifase, una corrente continua con controllo del valore medio della tensione.

I semi-conduttori di potenza sono assemblati a ponte di Graëtz, monofase o trifase (↔ Fig.12b). Il ponte può essere misto (diodi / tiristori) o completo (tutto tiristore).

Quest'ultima soluzione è la più frequente poiché permette un miglior fattore di forma della corrente fornita.

Il motore a corrente continua è spesso a eccitazione separata, tranne nel caso delle piccole potenze in cui i motori a magneti permanenti sono abbastanza frequenti.

L'utilizzo di questo tipo di variatore di velocità si adatta ad ogni applicazione. Gli unici limiti, in particolare la difficoltà di ottenere velocità elevate e la necessità di manutenzione (sostituzione delle spazzole), sono imposti dal motore a corrente continua.

I motori a corrente continua e i relativi variatori associati sono stati le prime soluzioni in campo industriale. Da oltre un decennio, il loro utilizzo è in costante diminuzione a vantaggio dei convertitori di frequenza. Infatti, il motore asincrono è più robusto e più economico di un motore a corrente continua. Contrariamente ai motori a corrente continua, standardizzati in involucro IP55, i motori asincroni sono anche praticamente insensibili alle condizioni ambientali (gocciolamento, polveri, ambienti pericolosi, ecc...).

#### • Convertitore di frequenza per motore asincrono

Fornisce, a partire da una rete alternata a frequenza fissa, una tensione alternata trifase di valore efficace e di frequenza variabile (↔ Fig.13).

L'alimentazione del variatore potrà essere monofase per le basse potenze (ordine di grandezza di qualche kW) e trifase per potenze più elevate.

Alcuni variatori di bassa potenza accettano indifferentemente tensioni d'alimentazione monofase e trifase. La tensione di uscita del variatore è sempre trifase. I motori asincroni monofase non sono molto adatti all'alimentazione mediante convertitore di frequenza.

I convertitori di frequenza alimentano motori a gabbia standard con tutti i vantaggi legati a questo tipo di motore: standardizzazione, basso costo, robustezza, tenuta stagna, nessuna manutenzione. Dal momento che questo tipo di motore è auto-ventilato, il suo unico limite d'impiego è l'utilizzo prolungato a bassa velocità per la riduzione di ventilazione. Se si desidera questo tipo di funzionamento è necessario prevedere un motore speciale dotato di una ventilazione forzata indipendente.

#### • Variatore di tensione per l'avviamento dei motori asincroni

Questo tipo di variatore (conosciuto anche con il nome di soft starter, vedere anche il capitolo Motori e Carichi) è utilizzato quasi unicamente per l'avviamento dei motori. In passato, associato a motori speciali (motori a gabbia resistente), veniva utilizzato per realizzare la variazione di velocità di questi motori.

Questo dispositivo fornisce, a partire da una rete alternata, una tensione variabile della stessa frequenza.

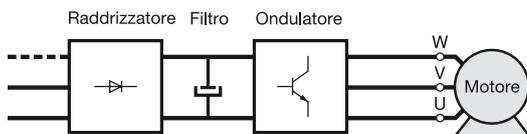
Lo schema più comune comporta due tiristori montati in anti-parallelo in ciascuna fase del motore (↔ Fig.14).

Lo stesso variatore può essere utilizzato per realizzare una decelerazione programmata.

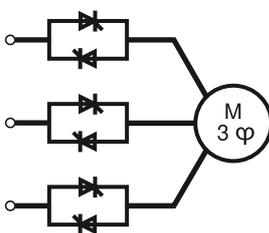
Una volta effettuato l'avviamento, il variatore può essere messo in cortocircuito mediante un contattore ed essere utilizzato per l'avviamento di un altro motore.

Questo tipo di utilizzo è frequente nelle stazioni di pompaggio poiché, per mettere in servizio una pompa supplementare in funzione delle esigenze della rete d'impiego, viene utilizzato un solo avviatore.

Lo schema di principio è descritto nel capitolo Motori e carichi.

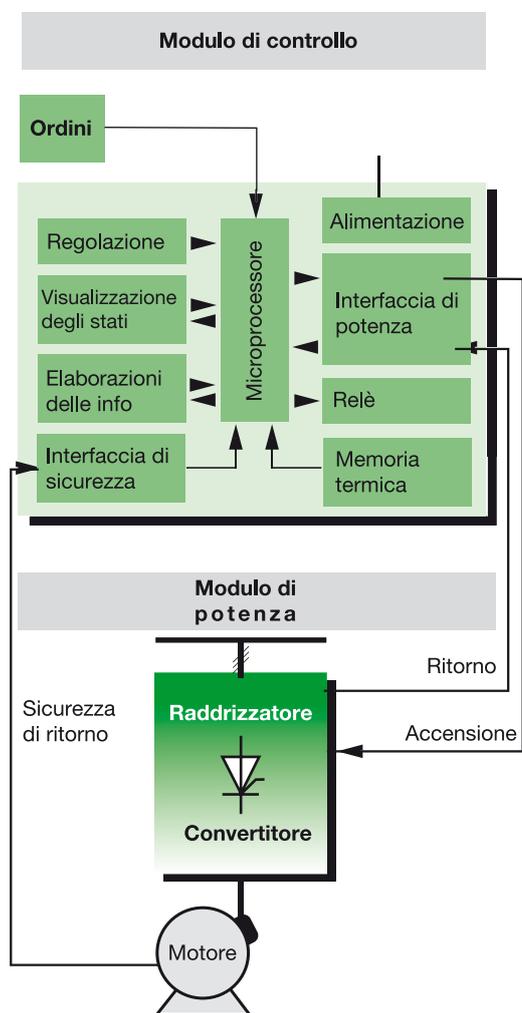


↑ Fig. 13 Schema di principio di un convertitore di frequenza



↑ Fig. 14 Avviatore di motori asincroni e forma della corrente d'alimentazione

## 5.6 Composizione, componenti degli avviatori e variatori elettronici



1 Fig. 15 Struttura generale di un variatore di velocità elettronico

### ■ Composizione

Gli avviatori e i variatori di velocità elettronici sono composti da due moduli generalmente integrati nello stesso contenitore

(↔ Fig. 15) :

- un modulo di controllo che gestisce il funzionamento dell'apparecchio,
- un modulo di potenza che alimenta il motore con l'energia elettrica.

#### □ Il modulo di controllo

Sugli avviatori e i variatori moderni, tutte le funzioni sono comandate da un microprocessore che utilizza le regolazioni, gli ordini trasmessi da un operatore o da un'unità di elaborazione, e i risultati di misurazioni come la velocità, la corrente, ecc...

Le capacità di calcolo dei microprocessori e dei circuiti dedicati (ASIC) hanno permesso di realizzare algoritmi di comando estremamente performanti e, cosa importantissima, il riconoscimento della macchina azionata.

A partire da queste informazioni, il microprocessore gestisce le rampe di accelerazione e decelerazione, l'asservimento di velocità, la limitazione di corrente e genera il comando dei componenti di potenza.

Le protezioni e le sicurezze sono elaborate da circuiti specializzati (ASIC) o integrati nei moduli di potenza (IPM).

Le regolazioni (limiti di velocità, rampe, limitazione di corrente, ecc...) si effettuano mediante tastiere integrate, o a partire da controllori programmabili mediante bus di campo o PC per il caricamento di regolazioni standard. Gli ordini (marcia, arresto, frenatura...) possono essere dati mediante interfacce di dialogo uomo/macchina, controllori programmabili, PC. I parametri di funzionamento e le informazioni di allarme e di difetto possono essere visualizzati mediante lampade spia, LED, visualizzatori a segmenti o a cristalli liquidi, o possono essere remotati verso supervisor mediante bus di campo.

Dei relè spesso configurabili forniscono le informazioni di:

- difetto (rete, termico, prodotto, sequenza, sovraccarico, ecc...),
- controllo (soglia di velocità, preallarme, fine avviamento).

Un'alimentazione integrata al variatore e separata galvanicamente dalla rete fornisce le tensioni necessarie all'insieme dei circuiti di misura e di controllo.

#### □ Il modulo di potenza

Il modulo di potenza è costituito principalmente da:

- componenti di potenza (diodi, tiristori, IGBT, ecc...),
- interfacce di misura delle tensioni e/o delle correnti,
- e spesso da un elemento di ventilazione.

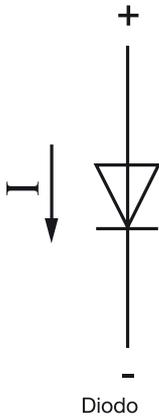
#### • I componenti di potenza

I componenti di potenza sono dei semi-conduttori che funzionano in ON/OFF, quindi paragonabili a interruttori statici che possono assumere i due stati: passante o bloccato.

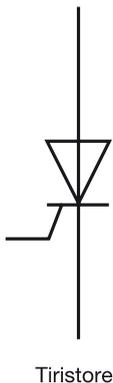
Questi componenti, associati in un modulo di potenza, costituiscono un convertitore che alimenta, a partire dalla rete a tensione e frequenza fisse, un motore elettrico ad una tensione e/o una frequenza variabili.

I componenti di potenza sono la chiave di volta della variazione di velocità; i progressi di questi ultimi anni hanno permesso di realizzare variatori di velocità economici.

*I materiali semi-conduttori, quali il silicio, hanno una resistività situata tra quella dei conduttori e quella degli isolanti.*



↑ Fig. 16a



↑ Fig. 16b

I loro atomi hanno 4 elettroni periferici. Ciascun atomo si associa con 4 atomi vicini per formare una struttura stabile a 8 elettroni.

Un semi-conduttore di tipo P si ottiene incorporando al silicio puro una proporzione ridotta di un corpo con atomi a 3 elettroni periferici. Mancherà quindi un elettrone per formare una struttura a 8 elettroni e si avrà quindi un'eccedenza di cariche positive.

Un semi-conduttore di tipo N si ottiene incorporando un corpo con atomi a 5 elettroni periferici. Si avrà quindi un'eccedenza di elettroni, ovvero un'eccedenza di cariche negative.

#### Il diodo (↔ Fig.16a)

Il diodo è un semi-conduttore non controllato che comprende due zone P (anodo) e N (catodo) e che lascia passare la corrente in un solo senso, dall'anodo verso il catodo.

Il diodo è conduttore quando l'anodo è a una tensione più positiva rispetto a quella del catodo comportandosi quindi come un interruttore chiuso.

Se la tensione dell'anodo diventa meno positiva di quella del catodo, il diodo blocca la corrente e si comporta come un interruttore aperto.

Il diodo presenta le seguenti caratteristiche principali:

- **allo stato passante:**
  - una caduta di tensione composta da una tensione di soglia e una resistenza interna,
  - una corrente massima permanente ammessa (ordine di grandezza fino a 5 000 A per i componenti più potenti).
- **allo stato bloccato:**
  - una tensione massima ammessa che può superare i 5 000 V cresta.

#### Il tiristore (↔ Fig.16b)

È un semi-conduttore controllato composto da quattro strati alternati: P-N-P-N. Si comporta come un diodo mediante invio di un impulso elettrico su un elettrodo di comando chiamato «porta» (gate). Questa chiusura (o accensione) è possibile solo se l'anodo è ad una tensione più positiva del catodo.

Il tiristore si blocca quando la corrente che lo attraversa si annulla.

L'energia di accensione da fornire sulla porta non è collegata alla corrente da commutare e non è necessario mantenere una corrente nella porta durante la conduzione del tiristore.

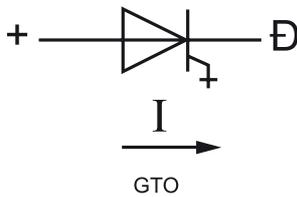
Il tiristore presenta le seguenti caratteristiche principali:

- **allo stato passante:**
  - una caduta di tensione composta da una tensione di soglia e una resistenza interna,
  - una corrente massima permanente ammessa (ordine di grandezza fino a 5 000 A per i componenti più potenti).
- **allo stato bloccato:**
  - una tensione inversa e diretta massima ammessa (che può superare i 5 000 V cresta),
  - generalmente le tensioni dirette e inverse sono uguali,
  - un tempo di ripristino che è il tempo minimo durante il quale non è possibile applicare una tensione anodo catodo positivo al componente per evitare il suo rinesco spontaneo,
  - una corrente di porta che consente l'accensione del componente.

Vi sono tiristori destinati a funzionare alla frequenza della rete, altri detti « rapidi » in grado di funzionare a qualche kilohertz, disponendo di un circuito di estinzione.

I tiristori rapidi presentano talvolta dissimetria tra le tensioni di bloccaggio diretta e inversa.

Negli schemi comuni sono infatti spesso associati ad un diodo collegato in antiparallelo e i costruttori di semi-conduttori utilizzano questa particolarità per aumentare la tensione diretta che il componente può sopportare allo stato bloccato.



↑ Fig. 16c

Oggi questi componenti sono stati completamente sostituiti dai tiristori GTO, dai transistori di potenza e soprattutto dagli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

#### Il tiristore GTO (Gate Turn Off) (↔ Fig.16c)

È una variante del tiristore rapido che presenta la particolarità di poter essere bloccato dal proprio gate. Una corrente positiva inviata sul gate (o porta) genera la messa in conduzione del semi-conduttore a condizione che l'anodo sia ad una tensione più positiva del catodo. Per mantenere il GTO conduttore e limitare la caduta di tensione è necessario mantenere la corrente di porta che generalmente è molto inferiore a quella necessaria per inizializzare la messa in conduzione.

Il bloccaggio si effettua invertendo la polarità della corrente di porta.

Il GTO viene utilizzato sui convertitori di fortissima potenza poiché è in grado di controllare le tensioni e le correnti forti (fino a 5 000 V e 5 000 A). Tuttavia i progressi degli IGBT ne hanno ridotto il mercato.

Il tiristore GTO presenta le seguenti caratteristiche principali:

- **allo stato passante:**
  - una caduta di tensione composta da una tensione di soglia e da una resistenza interna,
  - una corrente di mantenimento di porta (o gate) destinata a ridurre la caduta di tensione diretta,
  - una corrente massima permanente ammessa,
  - una corrente di bloccaggio per provocare l'interruzione di corrente.
- **allo stato bloccato:**
  - tensioni inversa e diretta massime ammesse, spesso dissimmetriche, come con i tiristori rapidi e per gli stessi motivi,
  - un tempo di ripristino che è il tempo minimo durante il quale è necessario mantenere la corrente di estinzione per evitare il suo rinesco spontaneo,
  - una corrente di porta che consente l'accensione del componente.

I GTO possono funzionare a frequenze di qualche kilohertz.

#### Il transistor (↔ Fig.16d)

È un semi-conduttore bipolare controllato costituito da tre zone alternate P-N-P o N-P-N. Lascia passare la corrente in un solo senso: dall'emettitore verso il collettore in tecnologia P-N-P, dal collettore verso l'emettitore in tecnologia N-P-N.

I transistori di potenza in grado di funzionare a tensioni industriali sono del tipo N-P-N, spesso montati in « Darlington ».

Il transistorore è un amplificatore di corrente.

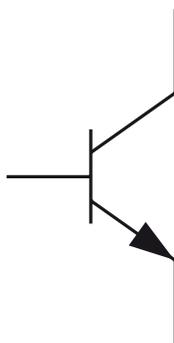
Il valore della corrente comandata dipende quindi dalla corrente di comando che circola nella base. Tuttavia può funzionare anche in ON/OFF come interruttore statico: aperto in assenza di corrente di base, chiuso iniettando nella base una corrente sufficiente per mantenerlo allo stato di saturazione. Si tratta di un secondo tipo di funzionamento che viene utilizzato nei circuiti di potenza dei variatori.

I transistori bipolari coprono tensioni fino a 1 200 V e accettano correnti che possono raggiungere gli 800 A.

Nei convertitori questo componente è stato sostituito dall'IGBT.

Nel funzionamento che ci interessa il transistorore bipolare presenta le seguenti caratteristiche principali:

- **allo stato passante:**
  - una caduta di tensione composta da una tensione di soglia e da una resistenza interna,
  - una corrente massima permanente ammessa,
  - un guadagno in corrente  $\beta$  (per mantenere il transistorore saturo è necessario che la corrente iniettata nella base sia superiore alla corrente che circola nel componente, divisa per il guadagno).



Transistor NPN

↑ Fig. 16d