

## INDICE

4	MACCHINE, AZIONAMENTI E IMPIANTI ELETTRICI.....	4
4.1	Introduzione.....	4
4.2	Le macchine elettriche .....	4
4.2.1	Classificazione.....	4
4.2.2	Trasformatori .....	5
4.2.2.1	Relazione tra corrente primaria e secondaria .....	6
4.2.2.2	Trasformatori .....	7
4.2.2.3	Autotrasformatori .....	8
4.2.2.4	Raffreddamento dei trasformatori.....	10
4.2.3	Motori elettrici in corrente continua .....	11
4.2.3.1	Parti del motore .....	12
4.2.3.2	La potenza nel motore a corrente continua e il rendimento .....	15
4.2.3.3	Spunto del motore .....	15
4.2.3.4	Regolazione della velocità.....	15
4.2.3.5	Funzionamento da generatore .....	17
4.2.3.6	Funzionamento da freno .....	17
4.2.4	La dinamo.....	17
4.2.5	Motori elettrici in corrente alternata trifase .....	17
4.2.5.1	Tipologie di motori trifase .....	19
4.2.5.2	Motori Sincroni.....	19
4.2.5.3	Motori asincroni .....	19
4.2.5.4	Struttura generale dei motori asincroni .....	20
4.2.5.5	Il rotore .....	22
4.2.5.6	Caratteristiche del MAT .....	25
4.2.5.7	Lo scorrimento.....	25
4.2.5.8	Coppia .....	26
4.2.5.9	Avviamento.....	26
4.2.5.10	Inversione di marcia .....	28
4.2.5.11	Regolazione della velocità.....	28
4.2.5.12	Funzionamento come generatore e freno .....	31
4.2.6	Gruppo Ward Leonard.....	31
4.3	Elettronica dipotenza – Raddrizzatori a ponte, chopper e inverter .....	31
4.3.1	Dispositivi di potenza a semiconduttore .....	32
4.3.1.1	Diodi .....	32

4.3.1.2	Tiristori .....	33
4.3.1.3	Transistor di potenza .....	34
4.3.2	Raddrizzatori .....	34
4.3.3	Chopper .....	38
4.3.4	Inverter .....	39
4.4	Gli azionamenti elettrici .....	42
4.4.1	Azionamenti in corrente continua .....	43
4.4.1.1	Controllo di velocità .....	44
4.4.1.2	Inversione del moto .....	44
4.4.1.3	Frenatura elettrica .....	45
4.4.2	Azionamenti in corrente alternata.....	45
4.4.2.1	Controllo di velocità .....	46
4.4.2.2	Inversione del moto .....	46
4.4.2.3	Frenatura elettrica .....	46
4.4.3	I regolatori.....	47
4.5	I sistemi di controllo a logica cablata e i PLC.....	48
4.5.1	Generalità .....	48
4.5.2	Sistemi di controllo a logica cablata .....	48
4.5.3	Sistemi di controllo a logica programmabile - PLC .....	50
4.5.3.1	Vantaggi del PLC.....	50
4.5.3.2	Caratteristiche .....	51
4.5.3.3	Conclusioni .....	51
4.6	Concetti generali sugli impianti elettrici .....	51
4.6.1	Caratteristiche principali .....	51
4.6.2	La distribuzione dell'energia negli impianti elettrici .....	54
4.7	La sicurezza negli impianti elettrici.....	58
4.7.1	Tipologie di guasto e dispositivi di protezione .....	58
4.7.2	Effetti della corrente nel corpo umano.....	59
4.7.3	Contatti diretti e indiretti.....	61
4.7.4	Classificazione dei sistemi di distribuzione elettrica.....	62
4.7.4.1	Sistema TT .....	63
4.7.4.2	Sistema TN.....	63
4.7.4.3	Sistema IT .....	65
4.7.5	Protezione con i differenziali .....	65
4.8	Dispositivi di interruzione della corrente.....	68
4.8.1	Interruttori, deviatori, sezionatori .....	68
4.8.2	Fusibili .....	70

---

4.8.3	Relé e contattori .....	71
4.8.4	Interruttori magnetotermici e differenziali .....	73
4.9	Strumenti di misura, sensori e trasduttori.....	74
4.9.1	Strumenti di misura delle grandezze elettriche .....	74
4.9.1.1	Amperometri e galvanometri .....	74
4.9.1.2	Voltmetri .....	75
4.9.1.3	Altri strumenti.....	75
4.9.2	Sensori negli azionamenti dei motori elettrici.....	76
4.9.2.1	Sensori di corrente. ....	76
4.9.2.2	Sensori di tensione .....	78
4.9.2.3	Sensori di velocità .....	78
4.9.3	Sensori nei sistemi di sorveglianza degli impianti funiviari.....	79
4.9.3.1	Sensori di posizione .....	79
4.9.3.2	Altri sensori.....	80
4.10	Unità di misura delle principali grandezze elettriche .....	81

## 4 MACCHINE, AZIONAMENTI E IMPIANTI ELETTRICI

### 4.1 Introduzione

Lo scopo di questo capitolo è quello di fornire agli aspiranti capi servizio degli impianti funiviari, le conoscenze di base relative al funzionamento degli apparati e degli strumenti elettrici che vengono utilizzati negli impianti. Di conseguenza le caratteristiche di tali apparati sono qui descritte in maniera generale, facendo riferimento ove occorre alle applicazioni pratiche in ambito funiviario.

Si fa presente che per comprendere al meglio i concetti espressi in questo capitolo, sono necessarie conoscenze fondamentali di elettrotecnica ed elettromagnetismo. Si consiglia pertanto, per coloro che non possedessero tali conoscenze, lo studio dell'appendice A prima di affrontare lo studio del presente capitolo.

### 4.2 Le macchine elettriche

#### 4.2.1 Classificazione

Le **macchine elettriche** sono dispositivi che convertono l'energia elettrica in meccanica o viceversa, oppure modificano le forme dell'energia elettrica. Quest'ultimo è il caso del **trasformatore**, che è una macchina **statica** (non ha parti mobili), ed ha il compito di trasformare i parametri dell'energia elettrica, nella forma della corrente alternata, ma non produce né riceve lavoro meccanico.

Le **macchine rotanti** si suddividono in **motori** quando assorbono energia elettrica dalla rete e la trasformano in energia meccanica, e in **generatori** quando, al contrario, ricevono energia meccanica e la trasformano in elettrica.

Le macchine elettriche si possono suddividere, in base al tipo di alimentazione, in:

- **macchine elettriche a corrente continua**
- **macchine elettriche a corrente alternata**

Una classificazione, anche se molto schematica, delle macchine elettriche può essere anche la seguente:

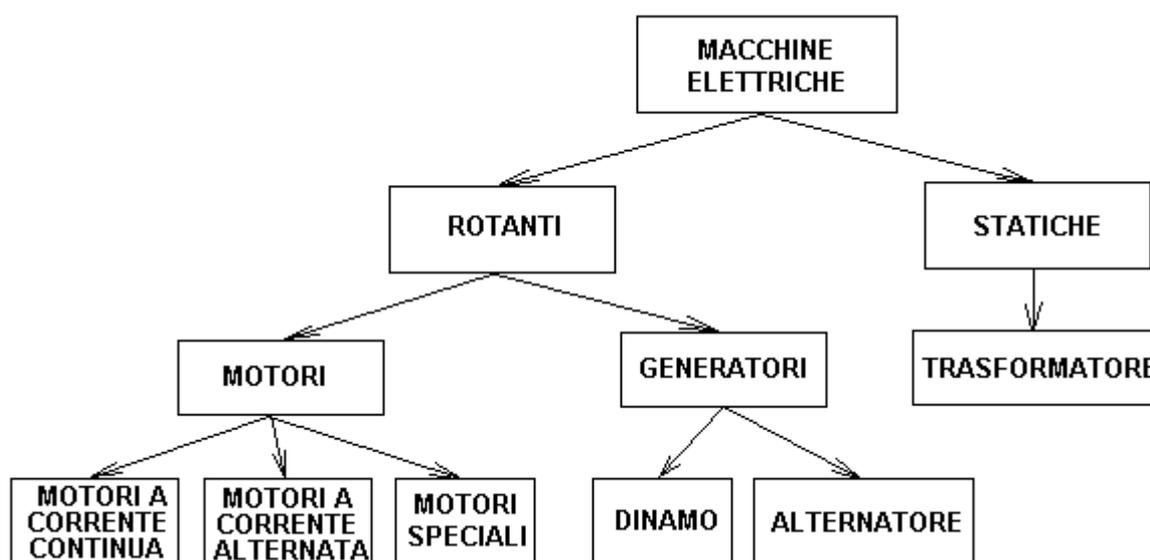


Figura 1 – Classificazione delle macchine elettriche

Si usa il termine “macchine” in quanto generalmente sono **reversibili**. Si può capire meglio questo concetto con l’aiuto di alcuni esempi:

- i trasformatori possono essere usati per abbassare la tensione, ma anche per ottenere l'effetto contrario, ossia di elevare una tensione;
- un motore elettrico trasforma l'energia elettrica in meccanica, ma può essere usato come generatore semplicemente applicando all'asse una appropriata forza;
- una macchina in corrente continua può essere chiamata dinamo o motore, ma il fabbricante non può sapere se il suo cliente la utilizzerà per produrre energia elettrica o per eseguire un lavoro meccanico.

Anche se talvolta le macchine rotanti hanno una progettazione leggermente diversa se usate come generatori piuttosto che come motori, il concetto di reversibilità resta.

Per i nostri scopi le macchine elettriche di interesse sono: i trasformatori, i motori in corrente continua e i motori elettrici in corrente alternata trifase sincroni e asincroni.

## 4.2.2 Trasformatori

Il trasformatore è una macchina elettrica, che ha lo scopo di **trasformare il valore della tensione e della corrente alternata, mantenendo invariata la potenza e la frequenza.**

Esso è costituito da due circuiti detti **avvolgimenti**, formati da spire isolate elettricamente tra loro, ed avvolte su di un nucleo di ferro.

L'avvolgimento che riceve corrente dalla linea di alimentazione viene detto **primario**, mentre quello che la fornisce all'utilizzatore viene detto **secondario**.

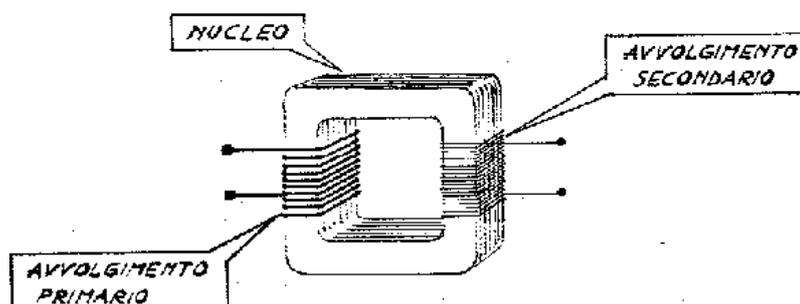


Figura 2 – Schema di principio del trasformatore

Alimentando con tensione alternata il primario del trasformatore, si ha in esso un passaggio di corrente che crea nel nucleo un flusso alternato.

Questo flusso, concatenandosi con il secondario, a causa del fenomeno **induzione mutua**, vi genera una tensione indotta che, a secondario chiuso, fa circolare in esso una corrente.

**Nota: alimentando il trasformatore con corrente continua, si genera un flusso costante, e quindi nel secondario non si induce alcuna tensione.**

Il valore della tensione secondaria  $V_2$  dipende dalla tensione primaria  $V_1$  e dal rapporto tra il numero di spire del secondario  $N_2$  ed il numero di spire del primario  $N_1$ :

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1}$$

Il rapporto tra il numero di spire del secondario ed il numero di spire del primario, corrisponde al rapporto tra la tensione secondaria e la tensione primaria e viene detto **rapporto di trasformazione**

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

La relazione esistente tra il numero di spire e le tensioni può essere spiegata dal fatto che, essendo il flusso magnetico uguale in ogni sezione del nucleo di ogni spira, sia del primario che del secondario, si ha la stessa forza elettromotrice (f.e.m.), quindi:

- maggiore è il numero di spire di un avvolgimento, maggiore è la tensione ai suoi capi,
- minore è il numero di spire di un avvolgimento, minore è la tensione ai suoi capi.

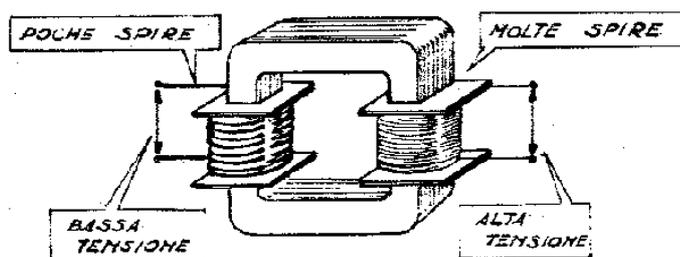


Figura 3 – Rapporto di trasformazione

Pertanto l'avvolgimento ad alta tensione (A.T.), è costituito da un elevato numero di spire, mentre quello a bassa tensione (B.T.), è costituito da un basso numero di spire.

Il trasformatore può funzionare da **elevatore** o da **riduttore** di tensione.

Il trasformatore funziona da elevatore quando la tensione ai morsetti del secondario è superiore a quella del primario.

Il trasformatore funziona da riduttore quando la tensione ai morsetti del secondario è inferiore a quella del primario.

#### 4.2.2.1 Relazione tra corrente primaria e secondaria

L'intensità di corrente che attraversa il circuito secondario di un trasformatore, a parità di tensione secondaria, dipende dall'impedenza del circuito esterno collegato al trasformatore stesso (legge di Ohm).

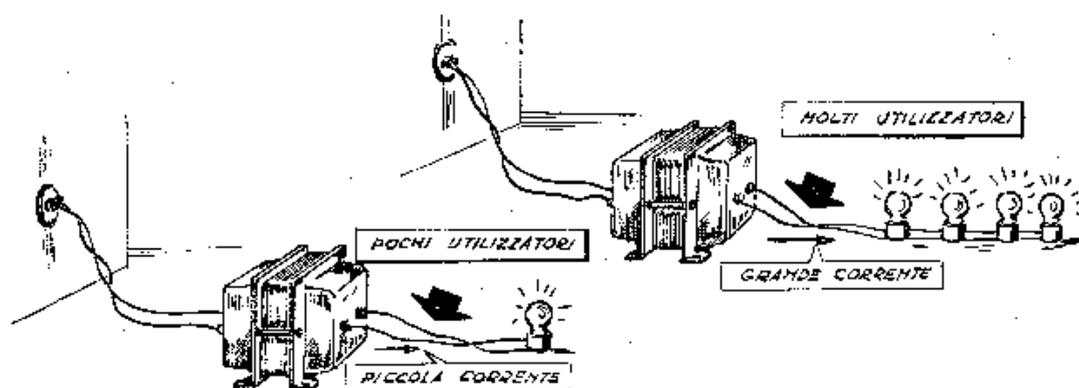


Figura 4 – Corrente nel secondario

La corrente secondaria provoca un passaggio di corrente nel circuito primario, il cui valore dipende dal rapporto di trasformazione del trasformatore.

Infatti, **in un trasformatore la potenza assorbita dal primario è uguale, escluse le perdite, a quella fornita dal secondario** e quindi:

$$\text{POTENZA PRIMARIA } V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \quad \text{POTENZA SECONDARIA}$$

Di conseguenza la corrente primaria e la corrente secondaria vengono calcolate mediante le seguenti formule:

$$I_1 = I_2 \frac{V_2}{V_1} ; \quad I_2 = I_1 \frac{V_1}{V_2}$$

La corrente che percorre l'avvolgimento di un trasformatore, risulta tanto minore quando maggiore è la tensione a cui viene sottoposto l'avvolgimento stesso.

Ad esempio: in un trasformatore riduttore da alta a bassa tensione con rapporto di trasformazione 500/125 V, alimentando un utilizzatore che assorbe 4 A, si provoca un passaggio di corrente nel primario di:

$$I_1 = 4 \frac{125}{500} = 1 \text{ A}$$

Quindi l'avvolgimento secondario di un trasformatore, poiché viene attraversato da una corrente maggiore, si costruisce con conduttori di sezione maggiore rispetto a quelli dell'avvolgimento primario.

#### 4.2.2.2 Trasformatori

I trasformatori più usati in pratica sono: monofasi e trifasi.

I trasformatori **monofasi** sono costruiti da un avvolgimento A.T. ed uno di B.T. sistemati su di un nucleo, formato da lamierini di ferro isolati fra loro allo scopo di limitare la circolazione in esso di **correnti parassite**.

Il nucleo magnetico viene fissato e pressato per evitare rumori causati dall'attrazione magnetica tra lamierino e lamierino.

In questo tipo di nucleo si ha che il flusso creato da un avvolgimento viene in parte disperso nell'aria, e quindi non interseca l'altro avvolgimento.

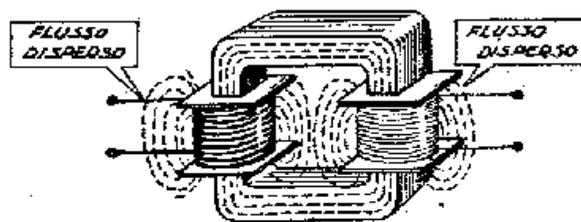


Figura 5 – Trasformatore con nucleo a colonne

Pertanto la forma del nucleo viene modificata come indicato nella figura seguente, in modo che le linee di forza vengono incanalate nei due rami laterali e ricondotte nella colonna centrale, attorno alla quale vengono avvolti entrambi gli avvolgimenti.

I terminali degli avvolgimenti A.T. e B.T. vengono collegati a quattro morsetti fissati su di una basetta sistemata sulla carcassa che racchiude il trasformatore.

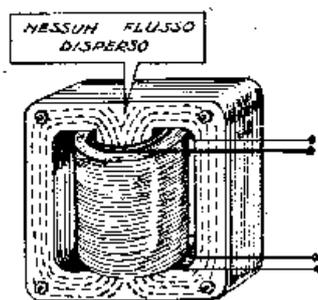


Figura 6 – Trasformatore con nucleo a mantello

I trasformatori **trifase** sono costituiti da un nucleo a tre colonne, su ciascuna delle quali viene sistemato un avvolgimento A.T. ed uno B.T.

Le colonne vengono chiuse e fissate all'estremità, mediante tiranti, a due traverse o gioghi. Ciò rende possibile la sostituzione degli avvolgimenti evitando di smontare totalmente il nucleo del trasformatore.

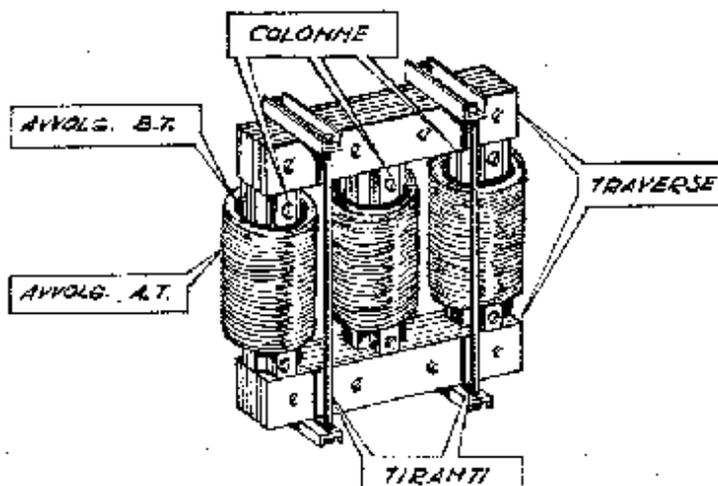
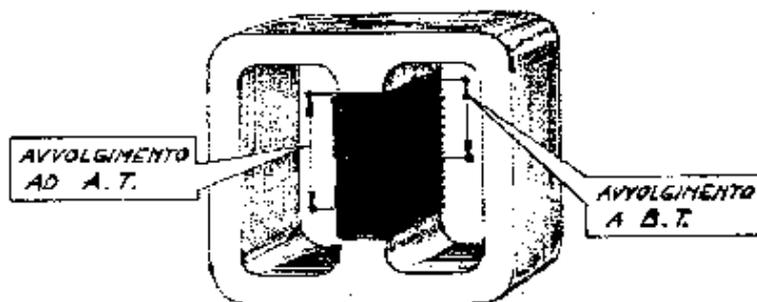


Figura 7 – Trasformatore trifase

#### 4.2.2.3 Autotrasformatori

Gli autotrasformatori sono macchine elettriche che svolgono le stesse funzioni dei trasformatori.

Costruttivamente un autotrasformatore si distingue dal trasformatore per il fatto di avere i due circuiti elettrici AT e BT riuniti in un solo avvolgimento. Il circuito AT è costituito dall'intero avvolgimento, mentre quello BT ne comprende solo una parte.



### Figura 8 – Autotrasformatore

Alimentando il circuito AT con tensione alternata, si ha una circolazione di corrente che genera un flusso variabile e che induce in ogni spira dell'avvolgimento una tensione di autoinduzione.

Pertanto, ai capi dell'avvolgimento BT si ha una tensione, proporzionale al numero delle spire dell'avvolgimento stesso, che a circuito chiuso provoca un passaggio di corrente.

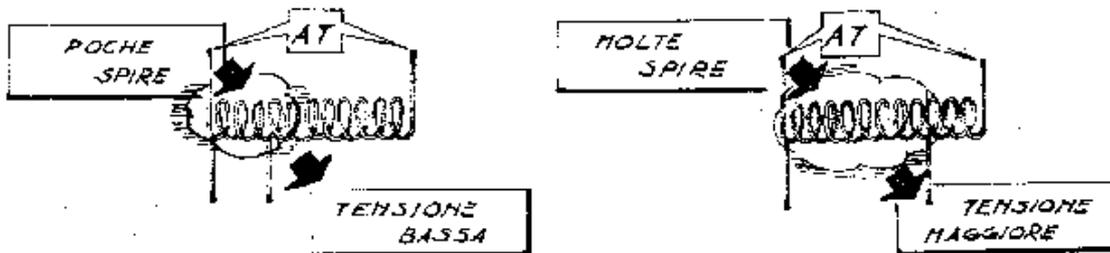


Figura 9 – rapporto numero di spire - tensione nell'autotrasformatore

Il rapporto di trasformazione dell'autotrasformatore viene definito in modo analogo a quello del trasformatore, considerando il numero delle spire dei due circuiti.

Quindi, per il calcolo della tensione e della corrente dei due circuiti vengono adottate le stesse formule del trasformatore.

La corrente che percorre il circuito di BT dell'autotrasformatore è di segno contrario a quella che percorre il circuito di AT, poiché generata dalla tensione di autoinduzione, che si oppone alla tensione che la genera. Pertanto nel tratto di avvolgimento comune si ha un passaggio di corrente che è uguale alla differenza delle due correnti.

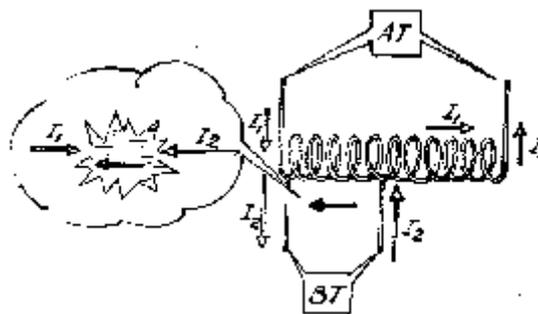


Figura 10 – corrente nell'autotrasformatore

Ciò rende l'autotrasformatore più economico rispetto al trasformatore in quanto consente un risparmio di rame, nella costruzione dell'avvolgimento. Questo in modo particolare quando la differenza tra le tensioni è piccola, cioè quando è piccolo il rapporto di trasformazione e quindi è grande il tratto del circuito comune.

L'autotrasformatore, a seconda di come viene inserito, può funzionare da riduttore o da elevatore di tensione.

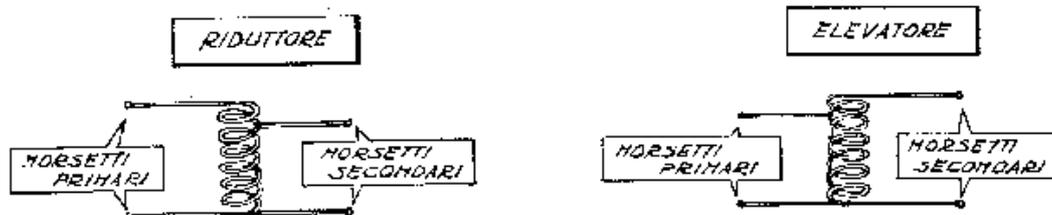


Figura 11 – Autotrasformatore come riduttore e come elevatore

L'autotrasformatore può essere, oltre che monofase, anche trifase. In quest'ultimo caso esso è costituito da tre avvolgimenti anziché sei.

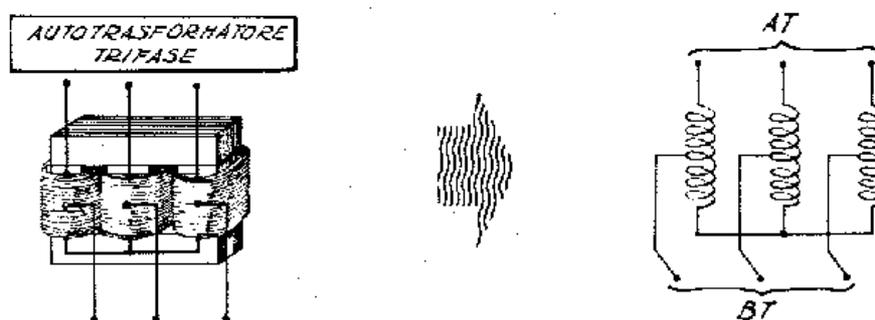


Figura 12 – Trasformatore trifase

#### 4.2.2.4 Raffreddamento dei trasformatori

I trasformatori durante il funzionamento producono calore, a causa dell'effetto termico prodotto dalle correnti che percorrono gli avvolgimenti e dalle correnti parassite che si generano nel nucleo.

Questo calore deve essere asportato in modo che la temperatura non superi determinati limiti, previsti dalle norme C.E.I per la buona conservazione degli isolanti che rivestono gli isolamenti.

Lo sviluppo di calore è tanto maggiore quanto maggiore è la potenza erogata.

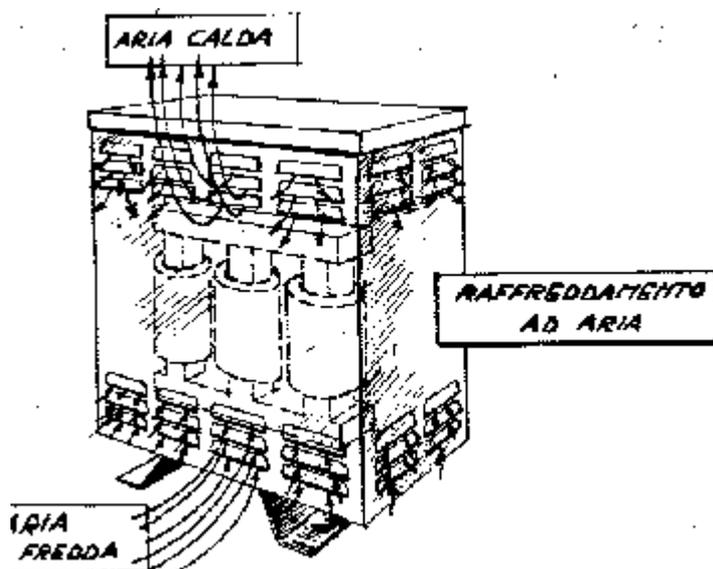


Figura 13 – Raffreddamento del rasformatore

I trasformatori di potenza inferiore ai 20 KVA, vengono generalmente raffreddati ad aria che, venendo a contatto con gli avvolgimenti ed il nucleo, disperde il calore che si sviluppa in essi.

I trasformatori di potenza superiore ai 20 KVA, invece, vengono raffreddati immergendoli in un cassone contenente olio minerale. Quest'olio, che ha subito particolari trattamenti, oltre ad essere un buon isolante elettrico, è anche un buon refrigerante, cioè sottrae calore al trasformatore e lo trasmette alle pareti del cassone che a loro volta vengono raffreddate.

Il raffreddamento dell'olio contenuto nel cassone può essere naturale o artificiale.

### 4.2.3 Motori elettrici in corrente continua

Secondo i principi dell'elettromagnetismo (vedi appendice A), una spira percorsa da una corrente all'interno di un campo magnetico, viene sottoposta ad una forza che tende a farla ruotare. La forza è proporzionale all'intensità del campo magnetico, alle dimensioni della spira e alla corrente che la percorre.

Il motore elettrico basa il proprio funzionamento su questo principio. Infatti esso può essere schematizzato come un circuito costituito da molte spire avvolte attorno ad un elemento di materiale ferromagnetico (**rotore**), immerso in un campo magnetico generato da un elettromagnete fisso (**statore**).

Lo statore costituisce il **sistema di eccitazione** o sistema induttore, il rotore costituisce il sistema indotto che prende anche il nome di **armatura**.

Il motore a corrente continua (c.c.) è usato prevalentemente negli azionamenti elettrici dove si rende necessario il controllo e la regolazione della velocità di rotazione. Per realizzare tale controllo viene usato principalmente il motore del tipo ad **eccitazione indipendente**, chiamato così perché il sistema di eccitazione è elettricamente separato, quindi indipendente, dal sistema indotto.

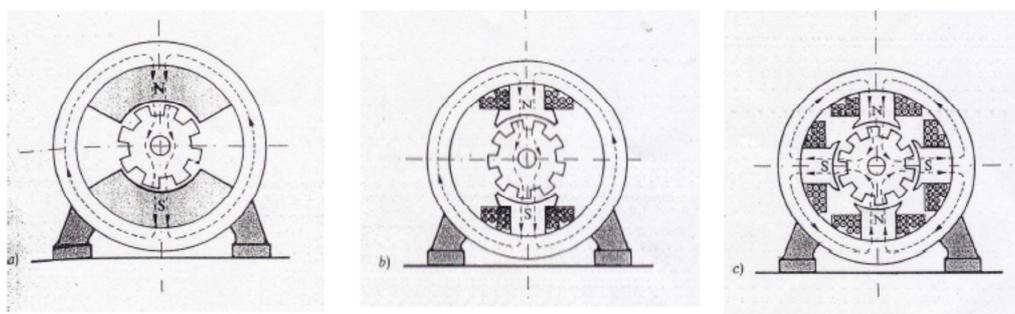
Altri tipi di motore in c.c. sono a **eccitazione serie** o **eccitazione parallela** (detta anche **in derivazione**), a seconda di come vengono collegati tra di loro i circuiti di eccitazione e di armatura, ma non sono utili per i nostri scopi, per cui non verranno trattati.

Possiamo distinguere i motori ad eccitazione indipendente in due famiglie:

- a) motori a **magneti permanenti**;
- b) motori a eccitazione separata a **campo avvolto**.

I primi sono motori di piccola potenza; in essi il campo magnetico induttore è generato da una coppia di poli magnetici realizzati mediante due magneti permanenti di opposta polarità.

I secondi possono raggiungere potenze di centinaia di kW; in essi il campo magnetico induttore è generato da appositi avvolgimenti (avvolgimenti di campo) disposti intorno alle espansioni polari dello statore e sono percorsi da corrente continua (**corrente di eccitazione**) in modo tale da formare due poli di segno opposto, o quattro o sei poli ecc., alternativamente N-S-N-S.



Motore a c.c. a magneti permanenti
Motore a c.c. a eccitazione indipendente a due poli e a quattro poli

**Figura 14 – Esempi di motore in c.c., a magneti permanenti e a campo avvolto**

La figura seguente mostra la struttura elettrica meccanica e magnetica di un motore a corrente continua a due poli con eccitazione indipendente mediante bobine.

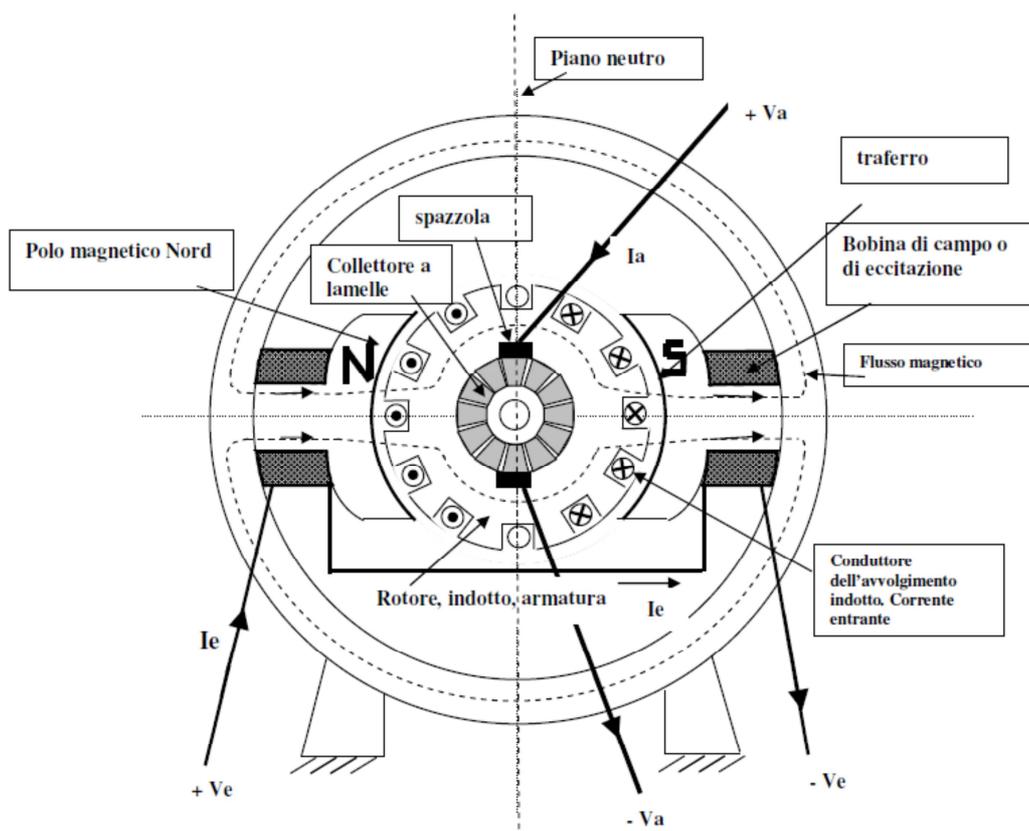


Figura 15 – Schema di principio di un motore in c.c. a eccitazione indipendente

#### 4.2.3.1 Parti del motore

Si distinguono:

- lo statore**, di forma cilindrica cava, di materiale ferromagnetico; lo statore è dotato all'interno di due prolungamenti intorno ai quali sono collocate le bobine di eccitazione. I prolungamenti terminano con due espansioni che prendono il nome di **espansioni polari** e realizzano i poli magnetici di eccitazione N e S.

Le bobine di eccitazione costituiscono il circuito elettrico di eccitazione. Esso è alimentato con una tensione, detta **tensione di eccitazione,  $V_e$** . Questa determina la corrente di eccitazione:

$$I_e = \frac{V_e}{R_e}$$

dove  $R_e$  = resistenza del circuito di eccitazione.

La corrente di eccitazione a sua volta genera il **flusso di eccitazione**  $\Phi$  che è alla base del funzionamento della macchina.

Il piano intermedio tra i due poli è detto **piano neutro**.

- **Il rotore**, chiamato comunemente anche con i termini **indotto o armatura**, di forma cilindrica, di materiale ferromagnetico laminato, al fine di ridurre al minimo le perdite di potenza.

Sulla periferia del rotore sono ricavate delle scanalature o cave in cui sono alloggiati i conduttori dell'avvolgimento di indotto. Tali conduttori sono percorsi dalla corrente  **$I_a$**  detta **corrente di armatura**.

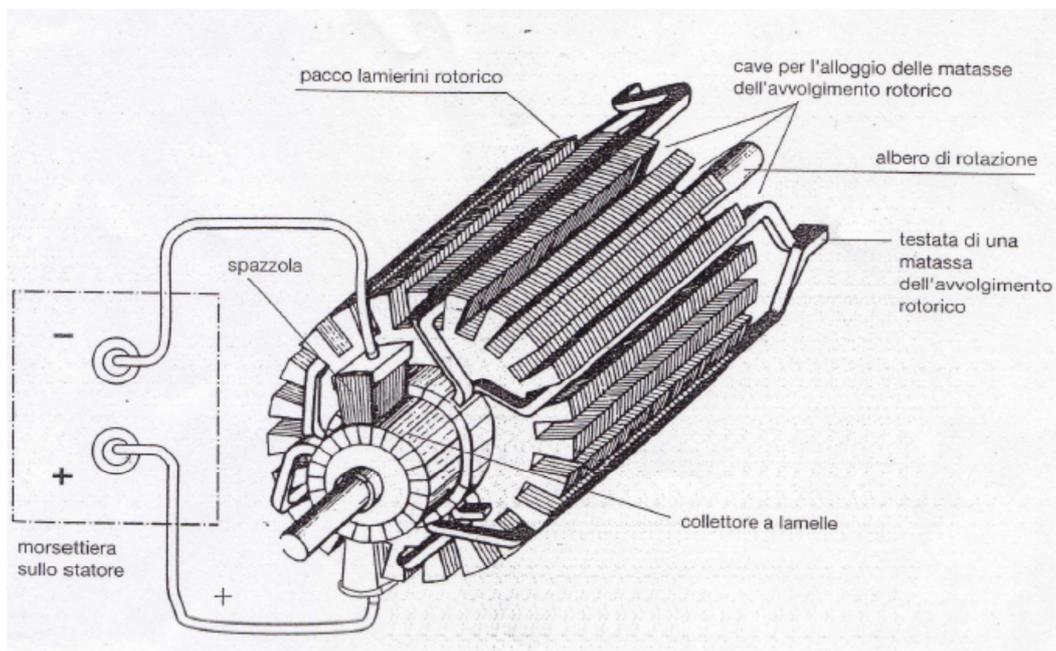
L'avvolgimento di armatura, alimentato dalla **tensione di armatura  $V_a$** , è realizzato in maniera tale da formare una serie di spire, nelle quali tutti i conduttori sotto l'influenza di un polo sono percorsi dalla corrente  $I_a$  nello stesso verso, mentre tutti i conduttori sotto l'influenza del polo di nome opposto sono percorsi dalla stessa corrente  $I_a$  ma nel verso opposto al precedente (quindi sono percorsi dalla corrente  $-I_a$ ).

La distribuzione della corrente  $I_a$  nei conduttori e il suo andamento particolare in un conduttore in corrispondenza del piano neutro è ottenuto grazie al collegamento con il sistema collettore-spazzole.

- **Collettore a lamelle**: è un organo meccanico di forma cilindrica, solidale col rotore e posizionato sul prolungamento dell'albero del rotore, costituito da un certo numero di settori di forma opportuna, di rame, isolati tra di loro e rispetto all'albero del motore. Ogni lamella è collegata ad un conduttore dell'avvolgimento di armatura.

Il collettore è la parte più critica del motore a corrente continua per motivi di ordine meccanico (usura meccanica a causa dello strisciamento delle spazzole che poggiano su di esso con una certa pressione per garantire un buon contatto elettrico) ed elettrico (a causa dello scintillio che si ha tra spazzole e lamelle quando ogni spazzola perde il contatto con una lamella e attiva un nuovo contatto con la lamella che segue nel senso della rotazione).

- **Spazzole**: sono di grafite e hanno la funzione di permettere un buon collegamento elettrico del circuito indotto, in permanente rotazione, con il circuito esterno di alimentazione, che è fisso.



**Figura 16 – Elementi costitutivi del rotore di un motore in c.c.**

Quando il motore è alimentato dalla corrente di eccitazione, e quindi è attivo il flusso magnetico di eccitazione, ogni conduttore dell'avvolgimento di armatura, alimentato dalla tensione di armatura e quindi percorso dalla corrente di armatura, subisce una forza.

La somma di tutte le forze applicate a tutti i conduttori avvolti attorno al rotore costituisce la forza complessiva con cui il rotore ruota, ovvero la **coppia totale**. Questa coppia risulta costante se il numero dei conduttori è sufficientemente grande, ed è **proporzionale al flusso di eccitazione  $\Phi$  e alla corrente di armatura assorbita dal motore**.

Essendo il flusso magnetico determinato dalle caratteristiche costruttive del motore, si ha che, in condizioni ideali, cioè senza attriti o perdite nel ferro o dissipazioni di potenza nel circuito elettrico, **la coppia motrice è direttamente proporzionale alla corrente di armatura**.

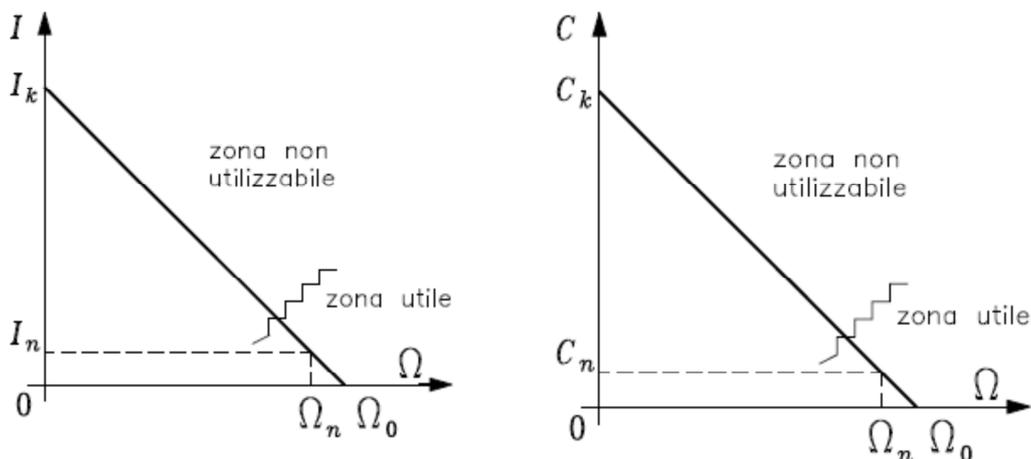
Da quanto descritto è possibile dedurre quali sono i criteri con cui può essere invertito il senso di rotazione del motore:

- invertendo il verso della corrente assorbita dal motore (quindi mediante inversione della polarità della tensione di alimentazione), oppure
- invertendo il segno del flusso di eccitazione, quindi invertendo il verso della corrente di eccitazione, e quindi, in definitiva, invertendo la polarità della tensione di eccitazione.

Data la rotazione delle spire dell'armatura all'interno del campo magnetico dello statore, il fenomeno dell'induzione elettromagnetica (vedi allegato A) genera all'interno delle spire stesse una corrente che si oppone alla rotazione, ed è tanto più grande quanto maggiore è la velocità di rotazione. **Tale corrente scorre in senso contrario alla corrente fornita all'armatura** dall'alimentazione, diminuendone il valore all'aumentare dei giri del motore.

Di conseguenza **la corrente di armatura che effettivamente circola nei conduttori del rotore, e di conseguenza la coppia motrice, sono entrambe inversamente proporzionali alla rotazione del motore**.

Questo fenomeno determina la **caratteristica elettromeccanica fondamentale** del motore, che può essere sintetizzata negli schemi seguenti



**Figura 17 – Corrente di armatura e coppia motrice in funzione della velocità di rotazione**

dove:

$I_k, C_k$  = corrente e coppia di spunto (a velocità di rotazione nulla, cioè a rotore bloccato),

$\Omega_0$  = velocità di rotazione a vuoto (con coppia motrice nulla, cioè senza carico applicato),

$I_n, C_n$  = corrente e coppia nominale (a regime),

$\Omega_n$  = velocità nominale (a regime).

Nelle figure precedenti viene rappresentata la cosiddetta **zona utile**, cioè quella zona della caratteristica in cui normalmente il motore viene fatto operare, in quanto in quelle condizioni presenta il migliore compromesso fra potenza erogata e rendimento (vedi paragrafo successivo).

#### 4.2.3.2 La potenza nel motore a corrente continua e il rendimento

La **potenza elettrica assorbita** da un motore elettrico, cioè quella che viene fornita per il suo funzionamento, è data dal prodotto della tensione di armatura per la corrente di armatura:

$$P_{el} = V_a \times I_a$$

mentre la **potenza meccanica sviluppata**, cioè quella erogata dal motore al proprio carico, è data dal prodotto della coppia sviluppata o **coppia motrice**, per la velocità angolare del sistema:

$$P_{mecc} = C_{mot} \times \omega$$

In condizioni ideali ogni macchina elettrica rotante trasforma tutta la potenza elettrica in potenza meccanica, cioè presenta **rendimento** = 1.

Nella realtà il motore dissipa parte dell'energia elettrica fornita senza che questa venga trasformata in rotazione meccanica, cioè ha un rendimento inferiore a 1. La maggior parte della potenza persa viene dissipata in calore per effetto Joule dalla corrente che scorre nei circuiti di armatura, corrente che abbiamo visto fare parte del funzionamento fondamentale del motore, quindi ineliminabile. Per tale motivo il motore viene fatto operare in condizioni nominali in una zona di funzionamento in cui, tenuto conto della potenza che deve erogare, la corrente non sia troppo elevata.

Vi sono inoltre altri due fenomeni che causano una diminuzione della potenza sviluppata:

- perdite nel materiale ferromagnetico dell'armatura,
- attrito delle ventole e dei cuscinetti.

Questi fenomeni, oltre alla dissipazione di calore nel circuito di armatura, fanno sì che il rendimento del motore sia sempre minore di 1.

#### 4.2.3.3 Spunto del motore

Consideriamo la macchina inizialmente ferma e applichiamo ai suoi morsetti una tensione di armatura. Essendo il rotore fermo, dai grafici della Figura 17, nel circuito di armatura circola una corrente chiamata **corrente di spunto** (o **corrente di avviamento**) limitata esclusivamente dalla resistenza interna del rotore.

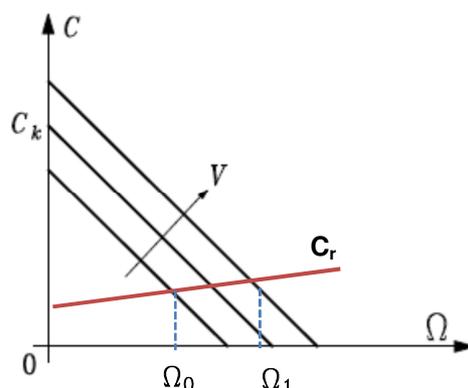
Essendo la resistenza di armatura nella totalità dei casi molto piccola (qualche ohm), la corrente di spunto assume un valore iniziale molto grande che può essere incompatibile con l'integrità della macchina, o può dar luogo a intervento non desiderato delle protezioni di macchina.

L'interazione tra questa corrente e il campo magnetico di eccitazione genera una coppia (**coppia di spunto**) per effetto della quale il motore entra rapidamente in rotazione con velocità via via crescente e tendente a una velocità finale il cui valore dipende dalla coppia resistente.

Il motore raggiunge una velocità finale detta **velocità di regime** in corrispondenza della quale **la coppia motrice risulta perfettamente uguale alla coppia resistente**.

#### 4.2.3.4 Regolazione della velocità

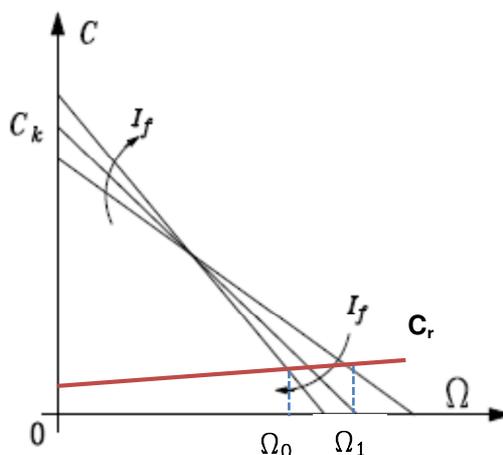
Il modo più semplice per variare la velocità del motore è quello di variare la tensione di armatura. In questo caso la caratteristica coppia-velocità di rotazione trasla parallelamente a sé stessa, come mostrato nella figura seguente, dove con  $C_r$  viene indicata la coppia resistente (nota: il leggero aumento della coppia resistente con la velocità è dovuta all'incremento degli attriti).



**Figura 18 – Variazione della velocità con variazione della tensione di armatura**

Aumentando la tensione di armatura  $V$ , il punto di equilibrio di funzionamento del motore, cioè quello per cui coppia motrice  $C$  è uguale alla coppia resistente  $C_r$ , passa dal punto a velocità  $\Omega_0$  al punto a velocità  $\Omega_1$ .

Un altro modo per variare la velocità viene utilizzato quando il motore, alla velocità nominale, ha raggiunto il massimo possibile di tensione di armatura. In questo caso viene **diminuita la corrente di eccitazione**, cioè viene diminuito il flusso magnetico di statore. Questa condizione viene detta di **deflussaggio**. Infatti, la variazione di flusso magnetico comporta una variazione delle caratteristiche del motore. In particolare la caratteristica coppia-velocità di rotazione cambia inclinazione come mostrato nella figura seguente, dove  $I_f$  è la corrente di eccitazione: diminuendo  $I_f$ , la curva diventa meno inclinata e, nella cosiddetta zona utile, a parità di coppia resistente, la velocità risulta maggiore.



**Figura 19 – Variazione della velocità con variazione del flusso magnetico**

In questo caso la diminuzione di  $I_f$  comporta il passaggio del punto di equilibrio da  $\Omega_0$  al punto a velocità  $\Omega_1$ .

Questa condizione di funzionamento è particolarmente vantaggiosa perché è possibile raggiungere velocità superiori senza dover raggiungere tensioni di armatura elevate. Di conseguenza il motore può essere dimensionato con caratteristiche meno stringenti in termini di isolamento elettrico, quindi può essere di dimensioni e costi ridotti. Questo principio trova applicazione negli azionamenti degli impianti a fune più recenti.

Tuttavia essendo la curva di funzionamento più inclinata (vedi grafico precedente), in questa condizione, ad una piccola variazione di coppia corrisponde una grande variazione di velocità, con conseguente difficoltà di regolazione della stessa per mantenere il motore nella zona di funzionamento ottimale. Di conseguenza, oltre certi limiti, anche con il deflussaggio non è più possibile aumentare la velocità.

#### 4.2.3.5 Funzionamento da generatore

Il funzionamento del motore come generatore si ha quando si vuole rallentare rapidamente l'impianto e quindi **si diminuisce bruscamente la coppia motrice diminuendo la tensione di armatura, oppure aumentando la corrente di eccitazione in condizioni di deflussaggio.**

Per effetto dell'inerzia dell'impianto, la velocità rimane inizialmente alta, per cui il motore, per effetto del flusso magnetico sui circuiti del rotore, continua a produrre una forte corrente indotta di opposizione al moto, mentre quella fornita dall'alimentazione può diminuire di molto.

Se la diminuzione dell'alimentazione è sufficientemente grande, questa può essere superata dalla corrente indotta, quindi la corrente di armatura complessiva può cambiare segno, cioè diventare uscente, mentre la coppia motrice si inverte rispetto al senso di marcia. In questa condizione il **motore contribuisce a frenare l'impianto** insieme alla coppia resistente, mentre **genera corrente** che viene restituita alla rete elettrica.

Quando, durante il rallentamento, la velocità si abbassa a sufficienza, la corrente di armatura ritorna entrante e la coppia motrice torna positiva, mentre l'impianto si avvicina al nuovo punto di equilibrio.

Nel caso in cui la tensione di alimentazione sia stata azzerata, ad esempio perché si vuole arrestare l'impianto, **la coppia motrice è nulla.** Ma se l'impianto ha una forte automotricità, ad esempio in condizioni di carico trascinante in discesa, la **coppia resistente** ha cambiato segno e **spinge l'impianto** invece di frenarlo. Anche in questo caso il **motore genera corrente e frena l'impianto**, ma, essendo nulla la tensione di alimentazione, esso si comporta esattamente come una **dinamo.**

#### 4.2.3.6 Funzionamento da freno

Il funzionamento del motore come freno si ha quando si vuole rallentare, o più probabilmente, arrestare l'impianto con maggiore rapidità rispetto al caso precedente, per cui, per ottenere una **coppia motrice contraria al senso di marcia, si inverte il senso dell'alimentazione** (tensione e corrente o di armatura o di eccitazione).

In questo caso anche la corrente fornita ai circuiti di armatura cambia segno e si somma alla corrente indotta dal flusso magnetico. **La corrente di armatura risultante assume valori molto elevati** e, se mantenuta per molto tempo, può danneggiare i circuiti rotorici su cui viene dissipata. A volte, per questo tipo di frenature, sono previste delle resistenze che vengono inserite automaticamente in serie ai circuiti rotorici per mantenere il valore della corrente circolante entro limiti accettabili (vedi Capitolo 4.4.1.3).

Durante il rallentamento dell'impianto, i circuiti dell'azionamento del motore devono **diminuire progressivamente la tensione di armatura fino al completo arresto.** In caso contrario si otterrebbe l'inversione del senso di marcia, fino al raggiungimento di un nuovo punto di equilibrio, cioè una velocità per cui la coppia motrice eguaglia la coppia resistente.

### 4.2.4 La dinamo

Il principio di funzionamento del motore in corrente continua come generatore è lo stesso che regola il funzionamento della **dinamo.** In effetti tra le due macchine non ci sono differenze dal punto di vista costruttivo. Quello che varia è il fatto che, nella dinamo, la tensione di armatura applicata dall'esterno è nulla e quindi la coppia motrice è nulla.

La dinamo, come tutte le macchine elettriche, è reversibile, ma assai raramente tale capacità viene utilizzata. Un tipico esempio si ha nei gruppi Ward-Leonard utilizzati per alcuni tipi di impianti a fune.

### 4.2.5 Motori elettrici in corrente alternata trifase

I motori elettrici in corrente alternata sono motori che utilizzano direttamente la corrente alternata fornita dalla rete elettrica generale, oppure da questa derivano una corrente, comunque sempre in alternata, con frequenza e tensione variabile.

Motori in corrente alternata monofase sono utilizzati per la realizzazione di apparecchiature domestiche, per cui non verranno trattati.

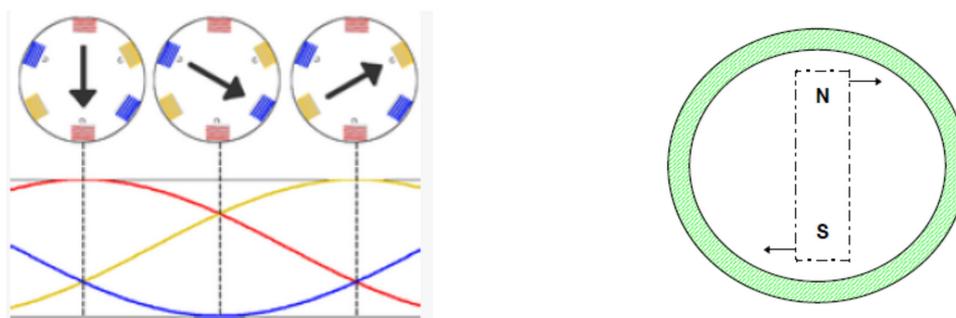
In generale tutti i motori in corrente alternata sono composti essenzialmente di due parti: lo **statore** ed il **rotore**.

Lo statore è la parte fissa nella quale sono inseriti i tre avvolgimenti primari, ai quali viene applicata la tensione di alimentazione.

All'interno dello statore trova posto il rotore che, "trascinato" dal campo magnetico generato degli avvolgimenti statorici, si pone in rotazione.

Quando ai tre avvolgimenti dello statore viene applicata una tensione alternata, nello spazio all'interno si crea un campo magnetico rotante. In poche parole è come se il campo magnetico "alternato" prodotto dallo statore generasse un magnete virtuale in rotazione (vedi appendice A).

Nella figura seguente è schematizzato l'andamento del campo magnetico rotante in funzione delle tre correnti alternate sfasate di 120°.



**Figura 20 – Correnti alternate trifase generano campo magnetico rotante (magnete virtuale)**

All'interno dello statore è comunque possibile installare più "terne" di avvolgimenti (montati sfalsati di un certo angolo), cosicché vengono generati più magneti virtuali, ossia uno per ogni terna di avvolgimenti.

Nella terminologia specifica dei motori elettrici si dice che un motore con una terna di avvolgimenti ha una **coppia polare**, o anche più semplicemente **due poli**; nel caso di due terne di avvolgimenti si avranno **quattro poli**, cioè **due coppie polari**.

La **velocità di rotazione** di un motore dipende dal campo magnetico rotante, che a sua volta dipende dalla frequenza della tensione di alimentazione. In pratica, per un motore con una coppia polare, applicando una tensione a 50 Hz si avrà una velocità del rotore di 50 giri al secondo, ossia 3000 giri al minuto.

Quando invece lo statore è costituito da più coppie polari, il campo magnetico rotante non gira più a 3000 giri, ma a velocità inferiori, vista la presenza di altri poli magnetici che consentono al rotore di percorrere "meno spazio" prima di trovare il polo che lo attrae.

Da ciò deriva la tabella fondamentale delle velocità dei motori trifase a 50 Hz :

Numero di Poli	Coppie Polari	Velocità (giri/min.)
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10	5	600

**Tabella 1 – velocità dei motori trifase in funzione del numero di poli**

Tipicamente i costruttori hanno a catalogo motori a 2, 4, 6, 8 poli, mentre per modelli con un numero di poli superiore è necessario richiederne la costruzione su misura. Negli impianti a fune si utilizzano tipicamente motori a 4 poli.

Nota: Il numero di coppie polari incide sugli aspetti costruttivi dello statore, soprattutto dal punto di vista meccanico. I motori con più coppie polari infatti, a parità di potenza, hanno una dimensione dello statore maggiore di quelli con poche coppie polari.

Ricapitolando: nello statore si trovano i due “fattori” che influiscono nella **velocità di rotazione** di un motore, e cioè:

- la **frequenza** della tensione di alimentazione;
- le **coppie polari**, ossia il numero di “terne” di avvolgimenti che lo costituiscono.

#### 4.2.5.1 Tipologie di motori trifase

I motori trifase in corrente alternata in linea generale si dividono in due grandi famiglie: **motori sincroni** e **motori asincroni**.

Come già detto nei capitoli precedenti, tutti i motori trifase in corrente alternata sono costituiti da uno statore, nel quale trovano spazio i tre avvolgimenti che sono tipicamente alimentati alla tensione della rete. Il rotore invece cambia in modo sostanziale da un tipo ad un altro.

In linea generale i motori trifase in corrente alternata sono **macchine reversibili**. Si intende cioè che se all'asse del motore si impone una forza che imprime una velocità maggiore della velocità nominale (rispettando lo stesso verso di rotazione), il **motore** diventa un **generatore**. E' questo un uso molto diffuso per realizzare gruppi elettrogeni, centrali elettriche, ecc....

#### 4.2.5.2 Motori sincroni

I motori sincroni sono macchine elettriche il **cui rotore gira alla stessa velocità del campo magnetico rotante**; il rotore si muove quindi in “sincronia” con esso. Sono usati per applicazioni molto particolari che richiedono elevata potenza e molta stabilità nella velocità (cartiere, laminatoi, ecc.).

Il **rotore** è composto da uno o più avvolgimenti **alimentati in corrente continua, detti di eccitazione**, che creano un campo magnetico “statico” che, opponendosi al campo magnetico rotante, costringono il rotore a girare.

Sebbene sotto certi punti di vista costituiscano una macchina “ideale”, dal punto di vista pratico richiedono personale specializzato per la manutenzione, ma soprattutto hanno costi elevati a causa della complessità costruttiva.

Inoltre, per avviare una macchina sincrona è necessario utilizzare un **motore ausiliario**, detto anche “di lancio”, per portare la macchina alla velocità di sincronismo prima di alimentarlo con la tensione di rete, oppure è necessario avviarlo tramite un **inverter**. Quest'ultimo è il caso dei motori sincroni utilizzati sugli impianti a fune.

#### 4.2.5.3 Motori asincroni

Il **motore asincrono trifase**, che nel seguito indicheremo più semplicemente con la sigla **MAT**, rappresenta il motore elettrico più semplice, economico, robusto ed affidabile che la tecnica conosca. È ad elevato rendimento, non richiede lubrificazione, né manutenzione, non presenta alcuna difficoltà o particolarità per l'avviamento ed è il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come ‘forza motrice’.

Il MAT è una macchina elettrica nella quale il rotore gira ad una velocità diversa da quella imposta del campo magnetico rotante; il rotore non ruota in sincronismo, ma ad una velocità leggermente inferiore.

A differenza di quello sincrono, il MAT non ha un sistema separato di eccitazione che crea un campo magnetico sul rotore, ma sfrutta il fenomeno dell'induzione per fare in modo che il campo magnetico rotante crei delle correnti nel rotore che si oppongono allo stesso. Il rotore inizia quindi a girare in quanto i campi magnetici dovuti alle correnti rotoriche sono attratti (o respinti) dal campo magnetico dello statore. Quindi, affinché funzioni, il rotore del motore asincrono deve “sottrarre” al campo magnetico rotante parte dell'energia per magnetizzarsi. Da qui ne scaturisce una velocità reale inferiore a quella del campo magnetico, tipicamente del 3-5%.

Generalmente l'alimentazione del MAT è trifase. Tuttavia. Per piccole potenze, oppure per limitate applicazioni speciali, questo motore può anche essere di tipo monofase.

Rispetto agli altri tipi di motori elettrici a corrente alternata, il MAT presenta diversi **vantaggi**:

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

D'altro canto, presenta alcuni **aspetti vincolanti**, tra i quali:

- all'avviamento, con inserzione diretta sulla rete, la corrente di spunto può risultare anche 4 - 10 volte maggiore della corrente assorbita a pieno carico, con problemi alla rete di distribuzione (cadute di tensione) ed agli interruttori (intervento);
- inoltre questa corrente risulta essere tanto sfasata rispetto alla tensione (come nei trasformatori in corto circuito) che la coppia motrice sviluppata dal motore all'avviamento, detta coppia di spunto, è piccola nonostante l'elevato valore della corrente assorbita;
- la velocità di rotazione del MAT, nel campo di funzionamento normale, è strettamente legata alla frequenza della corrente di alimentazione.

Segue da quanto detto che, laddove un dispositivo meccanico debba essere azionato senza particolari esigenze di regolazione di velocità o di coppia, ivi è il regno incontrastato di applicazione del MAT: montacarichi, gru, ascensori, macchine utensili tradizionali, pompe, ventilatori sono da decenni azionati in maniera soddisfacente da questo tipo di motore.

L'unico ostacolo che si oppone ad una diffusione praticamente universale del MAT è l'impossibilità di regolare velocità e coppia in ampi intervalli, a costi contenuti.

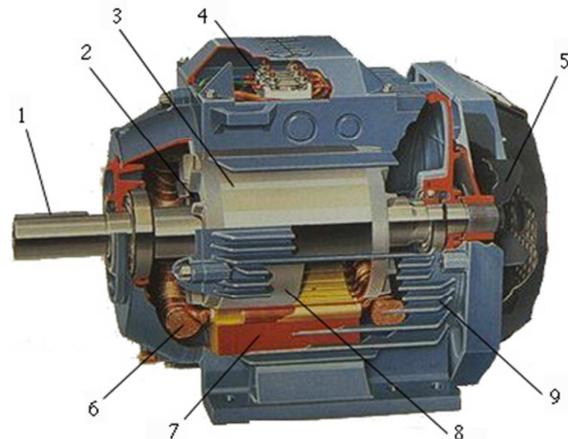
Questo ostacolo è stato superato ai nostri giorni con l'elettronica di potenza che, grazie alla rivoluzionaria capacità dei **diodi** e dei **tiristori di potenza** di rendere **indipendenti la tensione e la frequenza della linea di alimentazione da quelle che alimentano i motori**, ha reso possibile utilizzare il MAT anche sugli impianti dove è richiesta una potenza elevata e una **regolazione precisa di coppia e velocità**.

Il MAT, avendo un funzionamento reversibile come tutte le macchine elettriche, può funzionare anche da generatore, ma la sua utilizzazione in questa veste non è molto frequente. In alcuni casi il funzionamento da generatore è temporaneo, come avviene nel caso degli impianti a fune con carico trascinate in discesa in fase di frenatura o rallentamento.

### **Struttura generale dei motori asincroni**

Come detto, il motore asincrono è costituito da due parti fondamentali di forma cilindrica coassiali: una parte esterna, fissa, detta '**statore**' ed una interna, coassiale, munita di albero, sostenuto da due supporti, libera di ruotare intorno all'asse della macchina, detta '**rotore**'. In particolare, con riferimento alla figura seguente, si notano i seguenti dettagli:

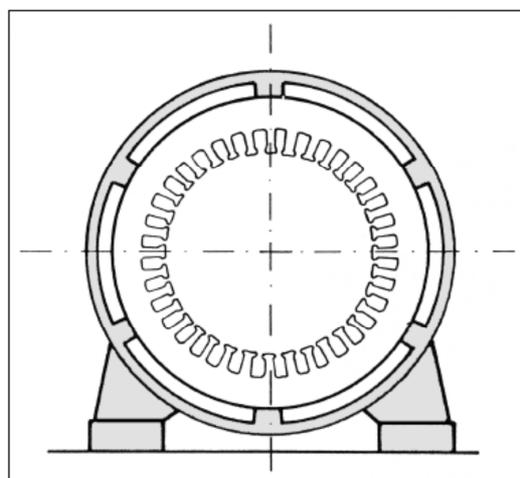
1. albero con chiavetta;
2. anello della gabbia;
3. sbarra di rame;
4. morsettiera;
5. ventola di raffreddamento;
6. spaccato delle matasse degli avvolgimenti di statore;
7. spaccato del circuito magnetico statorico;
8. pacco del circuito magnetico rotorico;
9. alette di raffreddamento della carcassa esterna.



**Figura 21 – Spaccato di un MAT**

Proprio come accade per la macchina sincrona, lo statore ed il rotore sono separati da una intercapedine in aria, di spessore uniforme, detto traferro, sempre realizzato del più piccolo valore possibile (da qualche decimo di millimetro per i piccoli motori, a qualche millimetro, per i motori più grossi).

Lo statore della figura seguente è formato da un pacco di lamierini a forma di corona circolare, isolati tra loro, ed è munito al suo interno di cave in cui trovano posto i conduttori costituenti l'avvolgimento di statore, sempre di tipo polifase.



**Figura 22 – Schema dello statore del MAT**

Lo statore è sostenuto dalla carcassa, come mostrato nella figura seguente, che costituisce la struttura portante del MAT e che deve permettere il fissaggio del motore al piano di supporto e resistere alle sollecitazioni meccaniche trasmesse dalle diverse parti in rotazione.



Figura 23 – Carcassa di un MAT

Un aspetto da non trascurare è il raffreddamento del MAT che, a seconda della potenza della macchina, può essere naturale, forzato o con scambiatori di calore (aria - aria oppure aria - acqua).

### Il rotore

Il motore asincrono trifase può essere costruito in due modi: con il **rotore in cortocircuito, detto a gabbia di scoiattolo** o con il **rotore avvolto**.

I segni grafici secondo le norme CEI, usati per individuare questi due tipi di motore, sono mostrati nella figura seguente.

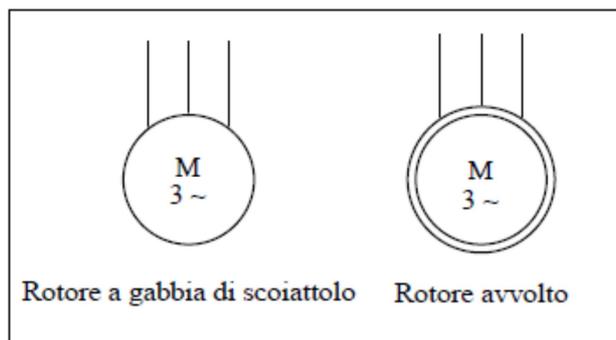


Figura 24 – Simboli elettrici dei due tipi di MAT

Il rotore a gabbia di scoiattolo dà luogo al più semplice e robusto dei MAT: in ognuno dei canali di rotore si infila una sbarra di rame, le cui testate, ad entrambe le terminazioni, vengono chiuse da un anello anch'esso di rame.

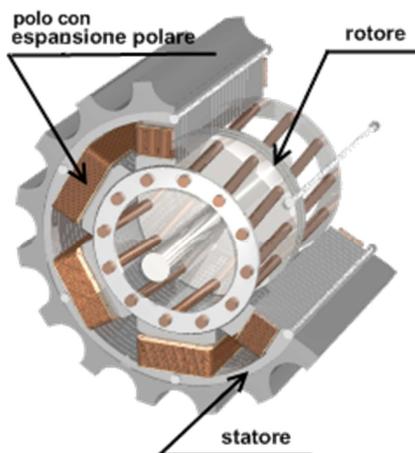


Figura 25 – Schema del MAT a rotore a gabbia di scoiattolo



Figura 26 – Rotore del MAT del tipo “a gabbia di scoiattolo”

Questo motore, grazie alla sua **semplicità costruttiva**, è utilizzato per la stragrande maggioranza delle applicazioni, in quanto :

- garantisce una buona robustezza,
- non richiede manutenzione,
- ha dei costi molto contenuti,
- raggiunge rendimenti anche elevati.

Questo circuito presenta resistenze bassissime e non ha un numero di poli propri, adeguandosi, in maniera naturale, al numero dei poli di statore, che può essere un numero qualsiasi.

Le tensioni in gioco per ogni barra sono molto basse, dell'ordine di qualche volt, mentre le correnti, data la bassa resistenza, sono piuttosto elevate.

Le correnti assorbite dallo statore in queste condizioni possono raggiungere 4 - 10 volte la corrente nominale, a seconda del tipo di rotore; questa corrente, tuttavia, è così sfasata, che **la coppia di spunto**, cioè la coppia necessaria ad avviare il motore, risulta essere **particolarmente bassa**.

Per motori di potenza elevata e che debbono partire sotto carico, risulta necessario limitare la corrente di spunto e ridurre lo sfasamento tra tensione e corrente. Per far ciò occorre **umentare la resistenza rotorica**, anche se ciò comporta un aumento delle perdite che, **a regime**, significa una **diminuzione del rendimento**.

Per conciliare queste due opposte esigenze, elevate resistenze all'avviamento e basse resistenze a regime, per potenze elevate nel passato si è abbandonato il motore a gabbia di scoiattolo per sostituirlo con quello **'a rotore avvolto'**.

In questo tipo di macchine il rotore è costituito da un pacco di lamierini, all'interno del quale passa l'albero di rotazione e nella cui parte esterna sono disposte un certo numero di cave in cui sono allocati i conduttori che costituiscono l'avvolgimento di rotore.

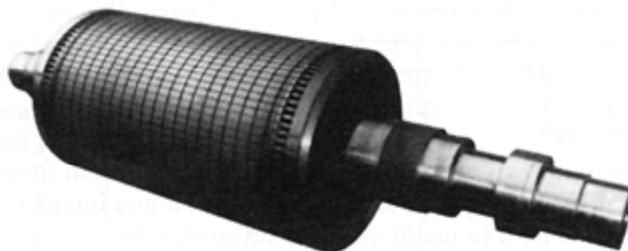


Figura 27 – Rotore del MAT del tipo “a rotore avvolto”

Come lo statore, anche il rotore è laminato in senso perpendicolare all’asse della macchina per ridurre le perdite per correnti parassite, essendo la macchina sede di un flusso magnetico variabile.

Nelle cave rotoriche vi è un normale avvolgimento, simile a quello statorico, di tipo trifase e collegato a stella, come mostrato nella figura seguente.

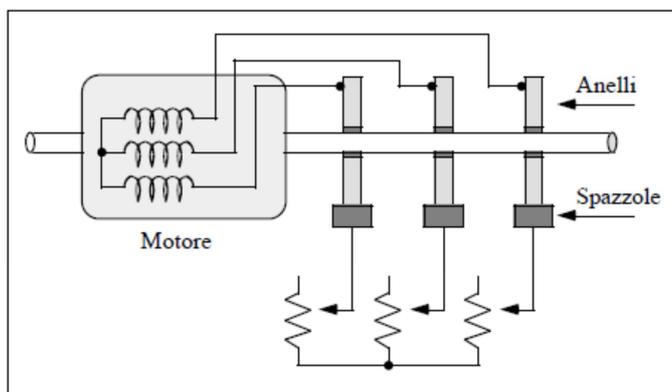


Figura 28 – Schema delle resistenze rotoriche del MAT a rotore avvolto

I capi di queste fasi vengono collegati a degli anelli conduttori, calettati sull’albero del motore ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole collegate ad un **potenziometro**, cioè una **resistenza variabile**, che viene generalmente detto **reostato di avviamento**, completamente inserito all’atto di chiusura dell’interruttore sulla linea, ma che va **disinserito, gradualmente**, all’aumento della velocità di rotazione e completamente escluso, **cortocircuitato, in condizioni di normale funzionamento**.

I motori asincroni con il rotore avvolto erano utilizzati largamente, in passato, anche sugli impianti a fune. Seppur ancora utilizzato in alcuni casi, questo tipo di motore presenta i seguenti **inconvenienti**:

- ha bisogno di manutenzione agli anelli ed alle spazzole,
- occupa uno spazio maggiore sia in grandezza che in lunghezza,
- è inefficiente perché dissipa l’energia inutilizzata su reostati.

Dato l’utilizzo sempre più diffuso di regolatori elettronici di velocità (**inverter**) per i motori asincroni con rotore in cortocircuito, questi motori sono quindi quasi scomparsi.

La figura seguente riporta due spaccati del MAT a gabbia di scoiattolo (a) e a rotore avvolto (b).

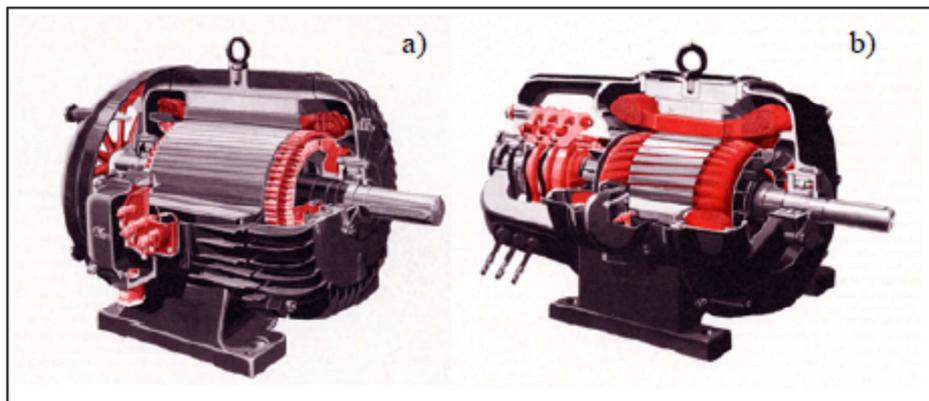


Figura 29 – spaccato di due MAT a gabbia di scoiattolo e a rotore avvolto

### Caratteristiche del MAT

La **velocità del campo magnetico rotante** nei MAT è calcolabile con la seguente formula :

$$n = \frac{60 f}{p}$$

dove :

n = numero di giri al minuto (del campo di statore),

f = frequenza di alimentazione,

p= numero di coppie polari del motore.

Ad esempio, si prenda un motore a 2 poli (1 coppia polare), che alimentato 50Hz funziona a 3000 giri/min. Se viene alimentato con una frequenza di 20 Hz, il campo magnetico rotante funzionerà ad una velocità angolare di:

$$n = 60 * 20 / 1 = 1200 \text{ giri/min.}$$

Ciò di cui abbiamo parlato finora è la velocità del campo magnetico rotante, non la velocità di rotazione effettiva del MAT, la quale risulta leggermente inferiore per effetto del cosiddetto scorrimento.

### Lo scorrimento

A differenza dei motori sincroni, nei motori asincroni **la velocità di rotazione reale è leggermente inferiore a quella del campo magnetico rotante**, ed è proprio per questo motivo che vengono chiamati asincroni, perché non girano in “sincronismo” con esso. Questa differenza di velocità di rotazione è detta **scorrimento**.

A seconda di come viene progettato il motore, il valore dello scorrimento a regime può essere differente da motore a motore, per cui per conoscere il numero di giri al minuto nominale di uno specifico motore è necessario consultare le caratteristiche fornite dal costruttore.

Indicativamente la velocità reale si discosta da quella calcolata di un 3% per i grossi motori (oltre 100kW) fino al 6-7% per i motori di piccola taglia.

Detto questo per regolare la velocità di un motore elettrico è sufficiente utilizzare un dispositivo che alimenti un motore con corrente alternata a frequenza variabile a seconda delle esigenze dell'utente, e questo dispositivo è l'**inverter**.

Tra l'altro, nulla toglie alla possibilità di alimentare il motore con una frequenza superiore a quella di targa, per fargli così raggiungere delle velocità più elevate. Tuttavia, come si vedrà a breve, ci sono altri parametri elettrici da controllare per mantenere il funzionamento del motore entro le caratteristiche progettuali.

## Coppia

L'andamento della coppia sviluppata dal motore asincrono è piuttosto complessa, e può essere schematizzata nel grafico seguente, che rappresenta la **caratteristica meccanica** del motore, dove:

- la retta nera rappresenta l'andamento della coppia resistente in funzione del numero di giri,
- $C_{avv}$  è la coppia all'avviamento;
- $C_F$  e  $n_F$  sono la coppia e il numero di giri nel punto di lavoro, cioè dove la coppia motrice è uguale alla coppia resistente;
- $n_{CR}$  è il numero di giri al punto critico, cioè il punto in cui il motore sviluppa la coppia massima  $C_{MAX}$ ;
- $n_0$  è il numero di giri a vuoto, cioè con carico nullo.

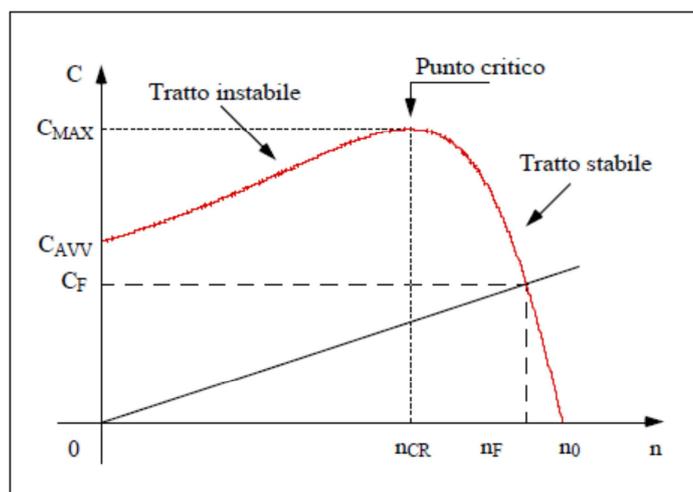


Figura 30 – Caratteristica coppia-velocità di rotazione del MAT a rotore a gabbia

Esaminando la caratteristica notiamo che essa si compone di due rami, il primo, quello ascendente, cui corrisponde un **funzionamento instabile**, l'altro discendente, cui corrisponde un **funzionamento stabile**: il punto di  $C_{MAX}$  segna il valore critico di confine tra queste due zone.

Il secondo tratto è stabile perché, ad ogni aumento della coppia resistente, il motore rallenta e si porta a funzionare stabilmente ad un nuovo scorrimento cui corrisponde una coppia motrice maggiore, di valore pari al nuovo valore della coppia resistente richiesta.

Questa nuova condizione di equilibrio sarà raggiunta dopo una serie di oscillazioni intorno al punto di equilibrio, oscillazioni dipendenti dalla rapidità della variazione del carico, dall'inerzia delle masse rotanti e dalla presenza di attriti e smorzamenti del moto.

Nell'altro tratto, invece, ad ogni aumento della coppia resistente il motore rallenta, con conseguente diminuzione della coppia motrice ed ulteriore rallentamento, sicché, dopo poco, smaltita l'energia cinetica delle masse rotanti, il motore si ferma.

Il punto di normale funzionamento (anche detto **punto di lavoro**), caratterizzato dalla coppia  $n = n_F$  e  $C = C_F$ , si trova nel secondo tratto, quello stabile e come si può vedere dispone ancora di un buon margine di coppia perché **di solito  $C_F$  è da 1/3 a 1/2 rispetto a  $C_{MAX}$** .

Inoltre, poiché il secondo tratto della caratteristica è molto ripido, a regime la velocità è pressoché costante al variare del carico (lo scorrimento varia generalmente tra 0.03 e 0.1).

## Avviamento

Affinché il motore possa avviarsi ed accelerare, è necessario che la coppia di spunto sia superiore alla coppia resistente all'avviamento del carico. Inizialmente il rotore è fermo e lo statore non alimentato.

Quando si chiude l'interruttore che collega la linea al motore, questo si comporta come un trasformatore chiuso in cortocircuito e nel primo istante di avviamento, assorbe dalla linea la massima corrente, così elevata (4 ÷ 8 volte la corrente nominale) che può dar luogo a diversi inconvenienti, tra i quali un eccessivo riscaldamento degli avvolgimenti.

Se l'avviamento è lento, data la corrente elevata, lungo la linea si può verificare un'elevata caduta di tensione, con problemi agli utilizzatori se questi sono particolarmente sensibili alla tensione, e, se anche l'avviamento fosse rapido, un intempestivo intervento delle protezioni sulla linea.

Si accennerà ora agli accorgimenti usati per ovviare a questi inconvenienti.

Avviamento del motore con rotore avvolto: se il motore è a rotore avvolto, sarà dotato di anelli, spazzole e resistenze variabili sul circuito di rotore. Questa terna di resistenze è chiamata **reostato d'avviamento**, ed avviamento reostatico il tipo di avviamento per tali motori.

La presenza di una elevata resistenza rotorica all'atto dell'avviamento e con tensione di alimentazione costante, ha un duplice scopo: da un lato **diminuisce la corrente assorbita dal motore all'avviamento**, con diminuzione del calore sviluppato; dall'altro l'aumento della resistenza comporta una diminuzione dello sfasamento delle correnti rotoriche con conseguente **aumento del valore della coppia di avviamento** e quindi dell'accelerazione.

Comunque, anche diminuite, le correnti in gioco sono tali da sviluppare parecchio calore, che viene generalmente dissipato sulle resistenze rotoriche tramite sistemi ad olio o aria.

La figura seguente mostra tre curve distinte. Ognuna rappresenta l'andamento della coppia in funzione della velocità di rotazione del motore ( $\omega_0$  è la velocità a vuoto), ma rispettivamente con:

- reostato completamente inserito,
- reostato parzialmente inserito,
- reostato in cortocircuito.

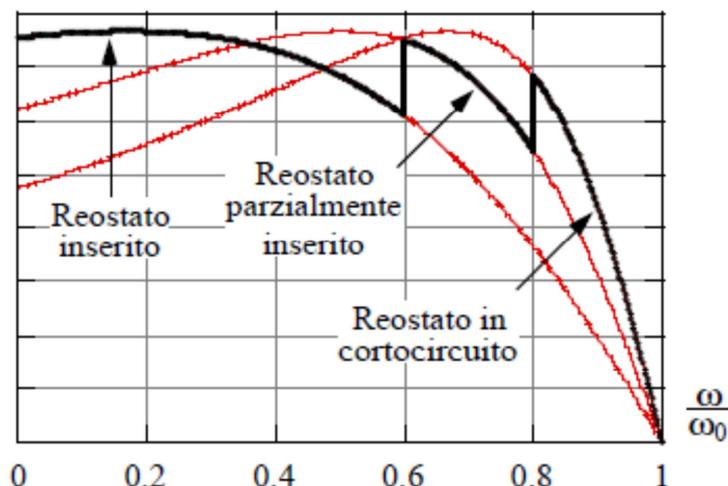


Figura 31 – Caratteristica coppia-velocità con reostato di avviamento

Come si può notare, con il reostato inserito, la coppia all'avviamento è più alta, ma diminuisce più in fretta all'aumentare dei giri. Di conseguenza il reostato, completamente inserito all'atto dell'avviamento, viene gradualmente disinserito man mano che la velocità aumenta, e verrà escluso completamente quando la velocità avrà raggiunto quasi il suo valore nominale (80% circa). Questo tipo di avviamento è tipico delle vecchie sciovie.

La coppia risultante al variare della velocità è rappresentata dalla linea nera.

Avviamento del motore con rotore a gabbia: in questo caso non è possibile inserire resistenze nei circuiti rotorici per cui, all'avviamento, le correnti di spunto sono elevate e la coppia motrice piuttosto piccola.

Nei motori di elevata potenza si utilizza l'**avviamento a tensione ridotta**. In questo metodo, non essendo possibile avere allo spunto correnti relativamente ridotte con coppie relativamente alte, si mira essenzialmente a limitare la corrente di spunto riducendo la tensione di alimentazione.

In questo modo, però, si riduce anche la coppia di spunto, per cui questo metodo può essere usato solo quando la coppia resistente all'avviamento presenta piccoli valori, oppure quando il motore possiede una coppia di spunto tanto elevata per cui la riduzione di tensione non pregiudica l'avviamento.

Vari possono essere i sistemi per ridurre la tensione di alimentazione all'avviamento, ma sugli impianti a fune, che presentano tali tipi di motori sulle parti accessorie (tenditori, pompe, azionamenti di recupero e soccorso ecc...) il più utilizzato è quello a **stella-triangolo**, che viene utilizzato per quei motori la cui tensione nominale, per ciascuno dei suoi avvolgimenti statorici, è uguale alla tensione concatenata della linea di alimentazione. All'avviamento le fasi del motore vengono collegate a stella (tensione tra le fasi 220 V), a triangolo durante la marcia normale (tensione tra le fasi 380 V).

L'alimentazione mediante regolatori elettronici di tensione (**inverter**) è attualmente il metodo più usato perché, come vedremo nei capitoli successivi, consente di controllare la coppia fornita dal motore a qualsiasi velocità di rotazione, controllando insieme la tensione di alimentazione e la frequenza.

### **Inversione di marcia**

Per invertire il senso di rotazione di un MAT basta invertire il senso di rotazione del campo rotante e, per far ciò, basta scambiare fra loro le correnti che alimentano due dei tre avvolgimenti.

Gli interruttori adoperati per la 'marcia avanti' e per la 'marcia indietro' devono però essere muniti di interblocco, sono utilizzabili sia per il collegamento a stella che per quello a triangolo e possono coesistere con quelli per la commutazione stella - triangolo.

Vale la pena ricordare che questa manovra va eseguita a rotore fermo per evitare un assorbimento di corrente anche maggiore di quella di spunto.

### **Regolazione della velocità**

Come abbiamo avuto modo di sottolineare, il MAT presenta innegabili vantaggi. Tuttavia presenta la caratteristica di conservare pressoché costante la velocità al variare del carico (pendenza elevata della curva caratteristica nel tratto stabile).

Per controllare la velocità si può variare:

- lo scorrimento (variando le resistenze rotoriche),
- la frequenza della linea di alimentazione.

Oltre a questi si possono citare anche la variazione della tensione di alimentazione e delle coppie polari, ma sono metodi che venivano utilizzati in passato sui motori a gabbia, prima dell'introduzione degli inverter per la regolazione della frequenza, per cui, dati gli inconvenienti di questi metodi, ad oggi non vengono più utilizzati.

Per modificare lo scorrimento si sfrutta l'effetto dell'inserzione di resistenze addizionali in serie a quelle rotoriche durante l'avviamento del motore. Le stesse resistenze possono essere efficacemente utilizzate per variare anche la velocità del motore.

Infatti, l'aggiunta di resistenze in serie al rotore comporta una diminuzione della velocità del motore, in quanto modifica la forma della caratteristica meccanica del motore, come indica la figura seguente.

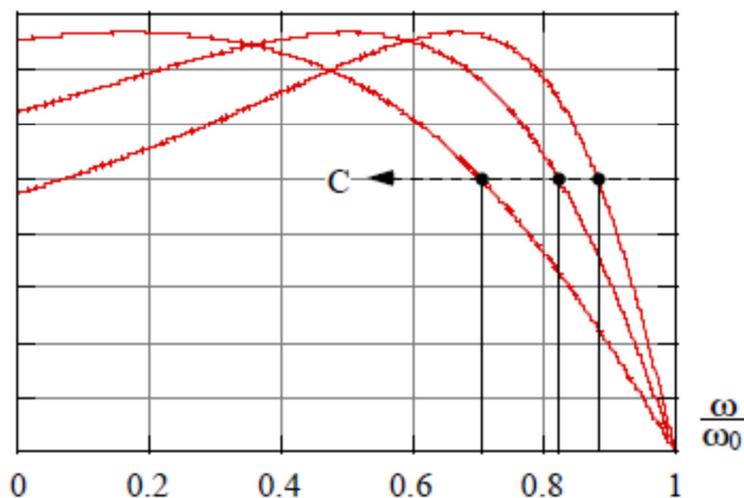


Figura 32 – Variazione della velocità con resistenze rotoriche

Si può notare che le variazioni di velocità, per una stessa resistenza, dipendono dal carico, cioè dalla coppia resistente: esse sono alte a carichi elevati, trascurabili a bassi carichi. Inoltre, qualunque diminuzione di velocità si traduce in un corrispondente aumento delle perdite, in calore, nelle resistenze addizionali con abbassamento del rendimento. Tutto questo rende tale metodo di variazione della velocità poco efficiente.

Il metodo migliore per variare la velocità è invece quello di variare la frequenza del campo magnetico rotante. Siccome la frequenza della linea di alimentazione è fissa, per avere una sorgente a frequenza variabile si ha la necessità di un convertitore di frequenza, realizzabile tramite un **inverter**.

Tuttavia la frequenza influisce sul flusso magnetico generato dallo statore. Il valore del flusso viene stabilito dal costruttore in fase di progettazione, e cambiare questo valore significa uscire dal funzionamento ottimale del motore stesso.

Per conservare inalterate le caratteristiche meccaniche del motore, è necessario perciò garantire che il flusso magnetico rimanga più vicino possibile al valore stabilito dal costruttore. Per fare questo è necessario variare la tensione di alimentazione  $V$  insieme alla sua frequenza  $f$ , cioè il rapporto:

$$V / f$$

deve essere mantenuto il più **costante** possibile, in modo da assicurare che nel motore il flusso magnetico si mantenga entro i valori ottimali.

In queste condizioni la curva caratteristica del motore varia come mostrato in figura.

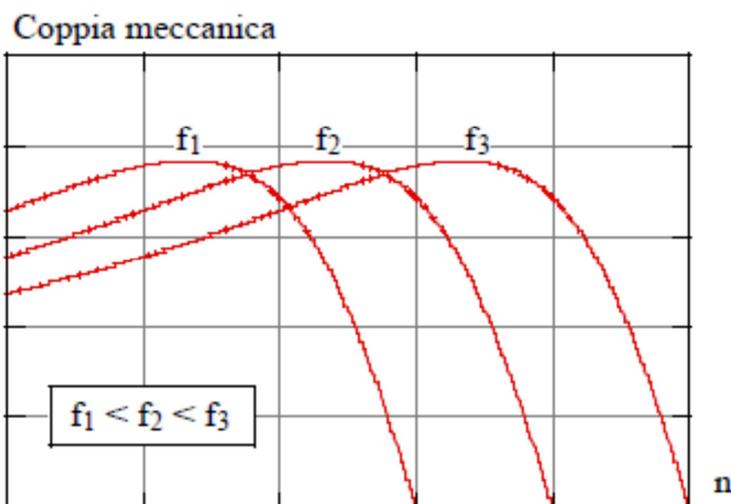


Figura 33 – Variazione della velocità con variazione di  $V/f$  (flusso costante)

Raggiunto il valore di tensione massimo sopportabile dal motore, per aumentare ulteriormente la velocità si può solo **aumentare la frequenza**. Tuttavia, come abbiamo già visto, variare la frequenza da sola significa uscire dalla caratteristica ottimale del motore. Infatti, aumentando la frequenza, la coppia diminuisce e la caratteristica del motore diventa la seguente:

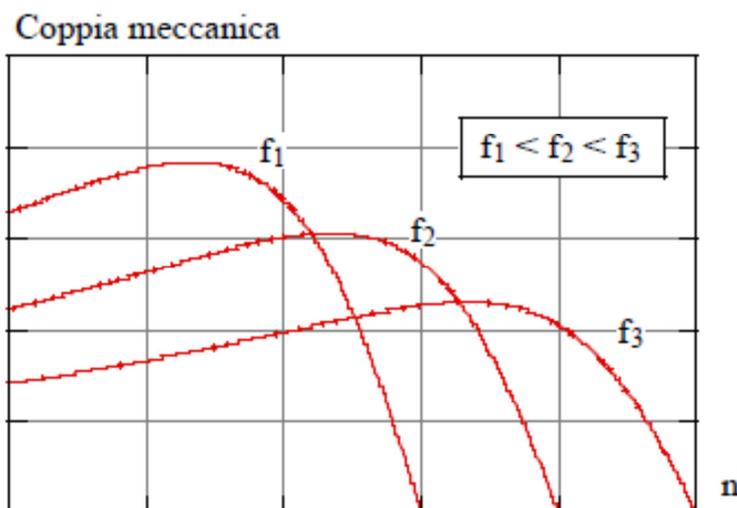


Figura 34 – Variazione della velocità con variazione di  $f$  (tensione costante)

Da notare che nel primo caso (**flusso costante**) la coppia massima e quella di avviamento rimangono praticamente costanti, per cui è il metodo migliore per la fase di avviamento, mentre nel secondo caso (**tensione costante**) diminuiscono.

È un meccanismo analogo al cosiddetto deflussaggio utilizzato per aumentare la velocità nei motori a corrente continua.

Tuttavia non è possibile aumentare il valore della frequenza in maniera indefinita, sia perché la coppia diminuisce, sia perché oltre certi livelli aumentano in maniera eccessiva le perdite nel materiale ferromagnetico.

## Funzionamento come generatore e freno

Il funzionamento come freno e come generatore del motore asincrono è analogo a quello descritto per il motore in c.c.. La differenza consiste nella diminuzione della velocità, che viene fatta diminuendo tensione e frequenza insieme, o solo la frequenza se si è in condizione di tensione massima, e nell'inversione del moto che si ottiene scambiando due dei tre morsetti della tensione di alimentazione.

### 4.2.6 Gruppo Ward Leonard

Questo sistema prende il nome dal suo inventore, ed è stato ampiamente utilizzato dalla fine dell'800 per migliorare il controllo di velocità ottenibile all'epoca sui motori in corrente continua, ottenendo un maggior campo di variabilità della velocità e rendendo più agevoli sia le operazioni di avviamento che di frenatura dei motori. E' un sistema complesso, ora non più realizzato, in quanto superato dai sistemi trifase alimentati a inverter (vedi paragrafo successivo).

Di seguito viene presentato uno schema del gruppo, formato da un motore trifase, il quale mette in rotazione una dinamo D. La dinamo fornisce la tensione  $V$  e la corrente  $I$  di armatura al motore in corrente continua M.

$V_e$  è la tensione di eccitazione del motore M.

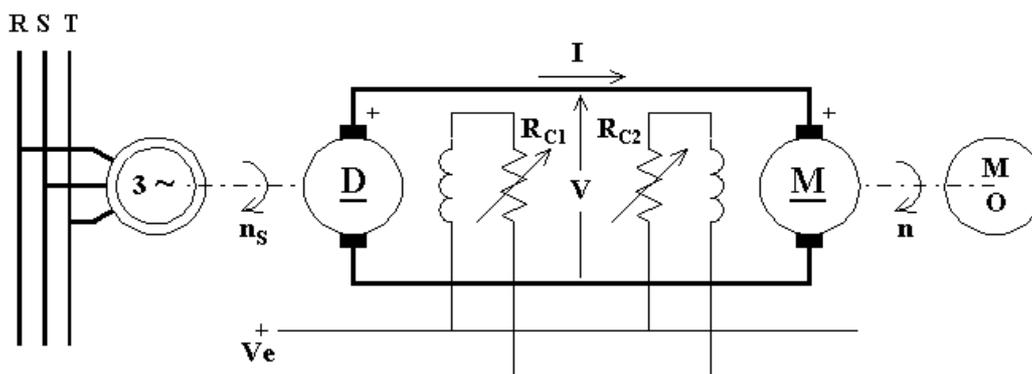


Figura 35 – Schema di principio di un gruppo Ward-Leonard

Le resistenze  $R_{C1}$  e  $R_{C2}$  sono utilizzate per controllare la velocità del motore M.

Per invertire il senso di marcia del motore si inverte la polarità dell'eccitazione della dinamo, infatti così facendo viene invertita la polarità della tensione applicata all'armatura del motore.

Riducendo bruscamente la corrente d'eccitazione della dinamo, è possibile la frenatura a recupero.

## 4.3 Elettronica di potenza – Raddrizzatori a ponte, chopper e inverter

L'energia elettrica è prodotta e distribuita in corrente alternata alla frequenza di 50 Hz, ma la maggior parte delle applicazioni usa energia a frequenza diversa o in corrente continua. Ad esempio abbiamo visto nei paragrafi precedenti, che per poter controllare la velocità di un motore trifase asincrono è necessario controllare sia la tensione sia la frequenza della corrente che lo alimenta.

Si ha quindi l'esigenza di convertire l'energia elettrica prelevata dalla rete, in energia elettrica con caratteristiche diverse.

I **convertitori statici** sono **dispositivi elettronici** che permettono il **trasferimento controllato** di energia elettrica da una sorgente ad un carico. Vale a dire che permettono di variare tensione e frequenza della corrente erogata al carico, controllandola tramite opportuni circuiti elettronici.

Sono detti **statici** per distinguerli da quelli **rotanti**, tra cui quello più noto è il gruppo Ward-Leonard, ormai non più realizzato in quanto i convertitori statici risultano più semplici, hanno un rendimento più alto, sono meno costosi, sono più affidabili e richiedono meno manutenzione.

I convertitori si possono distinguere nelle seguenti tipologie (AC = corrente alternata; DC = corrente continua):

- AC – DC: **raddrizzatori**,
- DC – AC: **inverter**,
- DC – DC: alimentatori o adattatori (modificano solo il livello della tensione continua),
- AC – AC: raddrizzatori + inverter (modificano sia livello di tensione che di frequenza).

Utilizzando i dispositivi di potenza a semiconduttore descritti nel paragrafo successivo è possibile realizzare varie tipologie di **convertitori statici** che permettono di controllare il moto dei motori elettrici, attraverso la trasformazione della generica tensione rigida di alimentazione disponibile, in una opportuna tensione flessibile.

Il tipo di convertitore usato dipende dal tipo di alimentazione disponibile e dalle caratteristiche del motore e della macchina operatrice azionata.

In particolare:

- per il controllo dei motori in corrente continua, si utilizzano convertitori statici (raddrizzatori, chopper, circuiti di pilotaggio, ecc.) in grado di fornire tensioni periodiche a valore medio regolabile, vale a dire tensioni variabili ma sempre dello stesso segno (non alternate);
- per il controllo dei motori asincroni e sincroni si utilizzano convertitori statici (inverter, parzializzatori di tensione) in grado di fornire sistemi trifasi di tensioni alternate di cui si può controllare il valore efficace della tensione e la sua frequenza.

Prima di analizzare più in dettaglio le diverse tipologie di convertitori, è quindi opportuno vedere in sintesi quali sono i componenti principali che li costituiscono.

### 4.3.1 Dispositivi di potenza a semiconduttore

Nei convertitori statici i componenti a semiconduttore vengono impiegati come **interruttori**, in quello che viene definito **regime di commutazione**: cioè passano alternativamente dallo stato aperto (**interdizione**: non circola corrente) a quello chiuso (**conduzione**: circola corrente) e viceversa.

Una suddivisione delle tipologie di semiconduttori impiegati nei convertitori statici può essere effettuata considerando le **modalità di comando** del passaggio da aperto a chiuso e viceversa, passaggio generalmente effettuato tramite un circuito di pilotaggio.

Si individuano le seguenti tre famiglie di componenti:

- componenti non controllati: **diodi**;
- componenti per cui è possibile comandare solo il passaggio da chiuso ad aperto: **tiristori**;
- componenti per cui è possibile comandare il passaggio da aperto a chiuso e viceversa: **transistor di potenza**.

#### 4.3.1.1 Diodi

I **diodi** sono **dispositivi a semiconduttore** che permettono la conduzione della corrente se questa scorre in un senso (**polarizzazione diretta**) e la impediscono se scorre nel senso opposto (**polarizzazione inversa**).

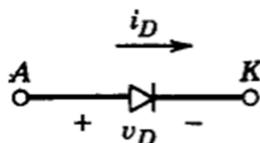


Figura 36 – Simbolo grafico del diodo

Nella figura precedente è mostrato il simbolo grafico del diodo, dove:

- A è l'anodo (in conduzione è polo positivo),
- K è il catodo (in conduzione è polo negativo),
- $i_D$  la corrente circolante nel diodo (in polarizzazione diretta),
- $v_D$  la tensione applicata ai capi del diodo.

Se il senso della corrente va da anodo a catodo, essa circola liberamente (il diodo è un **interruttore chiuso**) e il suo valore dipenderà dal resto del circuito collegato, mentre la tensione  $v_D$  è quasi nulla (0,4 – 0,6 V).

Se la corrente tende ad andare da catodo ad anodo, essa non circola più (il diodo è un **interruttore aperto**) e  $v_D$  assume il valore imposto dalle caratteristiche del circuito ad esso collegato.

Da queste si evince la caratteristica principale del diodo: lo stato di aperto o chiuso, **non è controllato direttamente**, ma dipende solo dalla direzione delle correnti circolanti (o dalla tensione applicata), cioè dallo stato del circuito cui è collegato.

Un limite importante, oltre al fatto che non è controllato, è il **tempo di ripristino**, cioè il tempo nel passaggio da chiuso ad aperto (corrente nulla): questo tempo non è mai nullo, per effetto delle cariche accumulate all'interno del componente e questo ne limita l'utilizzo ad alta frequenza e comporta delle perdite di corrente durante la commutazione.

I diodi possono essere di due tipi:

- a frequenza di rete: utilizzati in raddrizzatori non controllati a frequenze prossime ai 50 Hz e per potenze elevate (corrente dell'ordine dei kA e tensioni inverse dell'ordine dei kV);
- a ripristino veloce: utilizzati in convertitori che lavorano a frequenze elevate, e con correnti e tensioni al massimo dell'ordine delle centinaia di A e V.

#### 4.3.1.2 Tiristori

I **tiristori** sono dei **diodi semicontrollati**, vale a dire dei dispositivi per i quali è possibile pilotare il passaggio dallo stato chiuso ad aperto. Questo passaggio viene effettuato applicando un impulso di corrente  $i_G$  su quello che viene chiamato gate (G nella figura seguente), ed è possibile solo quando la corrente  $i_A$  è nel senso da anodo a catodo (polarizzazione diretta).

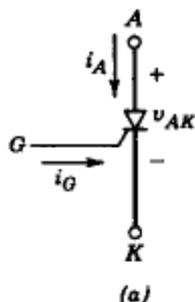


Figura 37 – Simbolo grafico del tiristore

Il passaggio inverso da aperto a chiuso, avviene come per il diodo normale, quando si inverte il senso della corrente.

Per questi dispositivi il tempo di ripristino è più lungo rispetto ai diodi normali, per cui sugli apparati ad alta frequenza non vengono utilizzati.

Inoltre la corrente  $i_G$  di pilotaggio non è mai nulla, con conseguenti perdite di potenza.

Più in generale con il termine tiristori si intende una famiglia di dispositivi, tra cui quello sopra descritto viene anche denominato **SCR** (Silicon Controlled Rectifier). Per completezza si citano gli altri dispositivi appartenenti alla stessa famiglia, di più recente realizzazione e con caratteristiche differenti:

- **Triac** (tiristore bidirezionale che può bloccare o lasciare passare la corrente in entrambe le direzioni),
- **GTO, ICGT, MCT** (hanno caratteristiche diverse tra loro, ma presentano tutti il vantaggio di poter controllare tramite gate sia l'istante di passaggio dallo stato chiuso a quello aperto, sia l'istante di passaggio inverso).

#### 4.3.1.3 Transistor di potenza

Per ovviare ai difetti di diodi e tiristori, spesso vengono utilizzati i **transistor di potenza**. A seconda delle caratteristiche richieste possono essere di vari tipi, **BJT, MOSFET** ecc. ma il più usato negli azionamenti dei motori elettrici è l'**IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor), di cui di seguito si riporta il simbolo grafico.

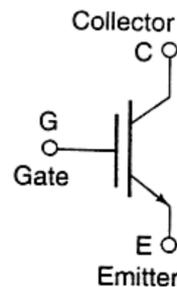


Figura 38 – Simbolo grafico del transistor IGBT

Tutti questi componenti si comportano come degli interruttori la cui chiusura e apertura è controllata dal valore della tensione di "gate". A seconda delle loro caratteristiche sono utilizzati in circuiti che richiedono correnti, tensioni e frequenze più o meno elevate.

#### 4.3.2 Raddrizzatori

I raddrizzatori sono dispositivi AC - DC, cioè che convertono la tensione alternata in tensione continua, e di base sono costituiti da diodi o tiristori.

Per capire il funzionamento dei raddrizzatori si può partire dal seguente circuito di base:

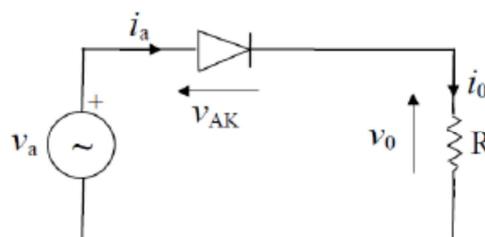
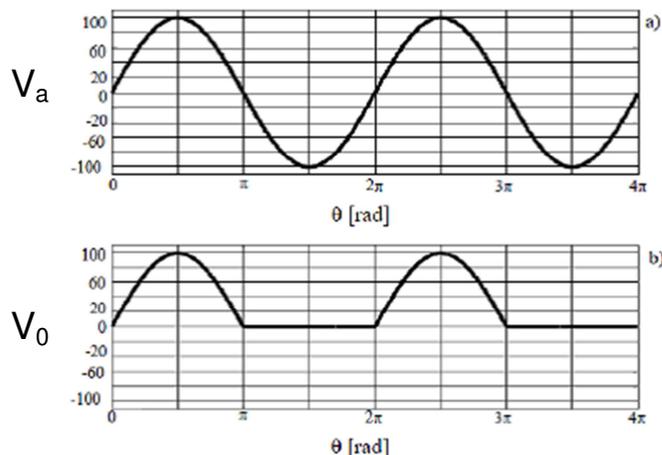


Figura 39 – Schema di raddrizzatore a una semionda

In questo circuito, supposto un generatore di tensione alternata monofase  $V_a$ , e ricordando che il diodo si comporta come un interruttore chiuso se la corrente scorre verso destra e aperto se cerca di scorrere verso sinistra, l'andamento della tensione  $V_0$  ai capi della resistenza  $R$  sarà come descritto nel grafico seguente:

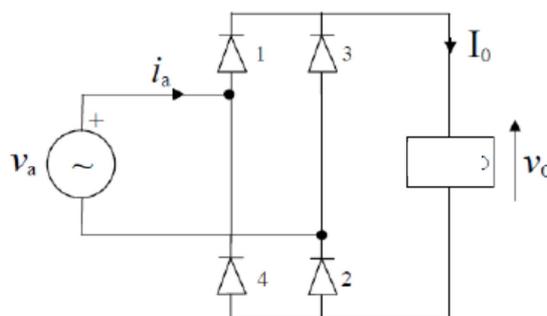


**Figura 40 – Diagramma delle tensioni nel raddrizzatore a una semionda**

Nota: per la nota legge di Ohm ( $V = R \times I$ ), quando la corrente non scorre (il diodo si comporta come un interruttore aperto) ed è quindi nulla, la tensione ai capi della resistenza  $R$  è nulla.

Questo circuito è detto **raddrizzatore a una via o a una semionda**, perché conduce solo quando  $V_a$  è positiva (singola semionda).

Un circuito più efficiente (a doppia semionda) è il cosiddetto **raddrizzatore a ponte di Graetz**.



**Figura 41 – Schema di raddrizzatore a ponte di Graetz**

Intuitivamente, avendo tutti i diodi lo stesso senso, la corrente  $I_0$  può scorrere solo in una direzione, anche quando la corrente  $i_a$  del generatore, essendo alternata, cambia direzione. Questo perché conducono alternativamente i diodi 1-2 (per la corrente  $i_a$  nel senso della freccia in figura) o 3-4 (per  $i_a$  in senso opposto). Di conseguenza gli andamenti delle tensioni  $V_a$  del generatore e  $V_0$  del carico diventano quelli indicati in figura:

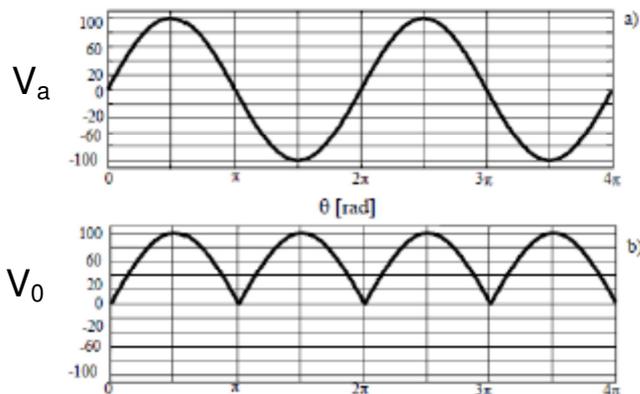


Figura 42 – Diagramma delle tensioni nel raddrizzatore a ponte

Inserendo un condensatore dopo il ponte a diodi e prima del carico, il circuito diventa il seguente:

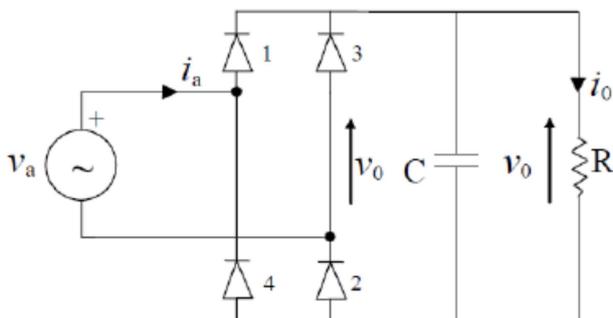


Figura 43 – Schema di raddrizzatore a ponte con condensatore di filtro

Il condensatore ha funzione di filtro, il quale livella il valore della tensione sul carico. Esso accumula cariche elettriche quando la tensione applicata ai suoi capi cresce e le rilascia quando questa decresce. Inoltre le cariche rilasciate dal condensatore possono andare solo verso il carico, a causa del comportamento dei diodi. Questo fa sì che il condensatore abbia l'effetto di "appiattire" la corrente sul carico e di conseguenza la tensione, come mostrato nei grafici seguenti.

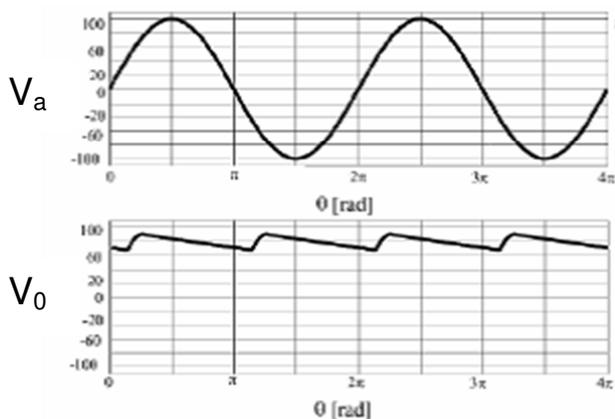


Figura 44 – Diagramma delle tensioni nel raddrizzatore a ponte con filtro

Questo circuito costituisce lo schema di base di tutti i raddrizzatori a diodi che richiedono tensioni continue monofase.

Con tensioni trifase il circuito diventa il seguente.

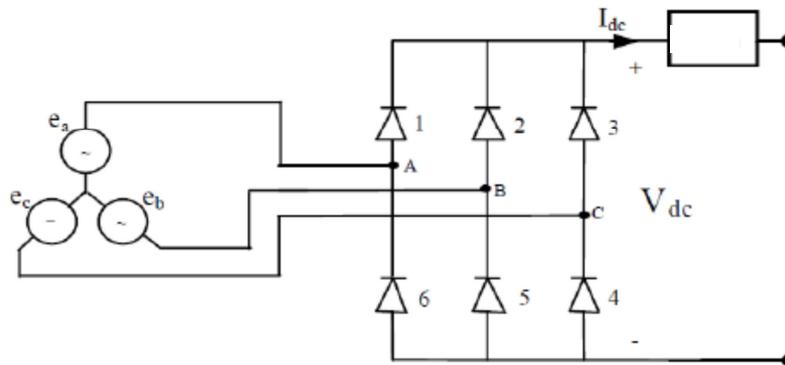


Figura 45 – Schema di raddrizzatore a ponte trifase

Mentre l'andamento della tensione sul carico è la seguente (curva più spessa).

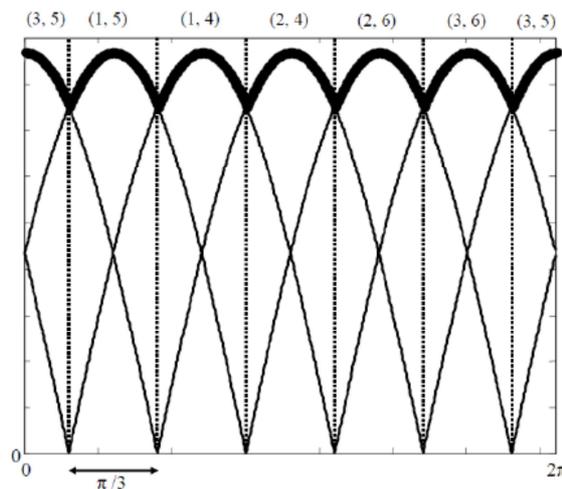
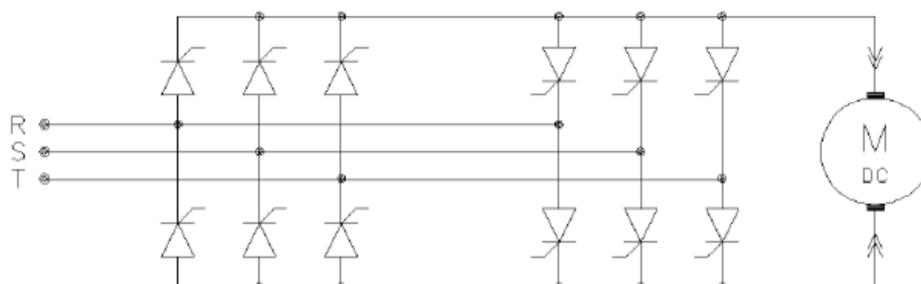


Figura 46 – Diagramma della tensione sul carico nel raddrizzatore trifase

I raddrizzatori a diodi non consentono di controllare il livello di tensione generata. Per fare questo sono necessari i **raddrizzatori a tiristori**. Questi dispositivi hanno lo stesso identico schema costruttivo di base dei raddrizzatori a diodi (nel circuito elettrico precedente basta sostituire ai diodi i tiristori) ma, potendo ritardare il momento in cui cominciano a condurre, il valore medio della tensione generata dai tiristori può essere controllato ad un valore inferiore rispetto a quello generato dai diodi.

Inoltre con questi dispositivi è possibile fare in modo che, in condizione di frenatura, la corrente possa circolare in senso contrario, ritornando verso la rete elettrica, ad esempio con un circuito mostrato nello schema seguente.



**Figura 47 – Schema di raddrizzatore a tiristori trifase con ponte di frenatura**

Questo è lo schema di un raddrizzatore a tiristori, in cui il ponte di sinistra alimenta il motore in condizioni di funzionamento normale, mentre il ponte di destra (data la configurazione dei tiristori si dice che è in **antiparallelo** rispetto a quello di sinistra) trasferisce alla rete la corrente generata dal motore in condizione di frenatura.

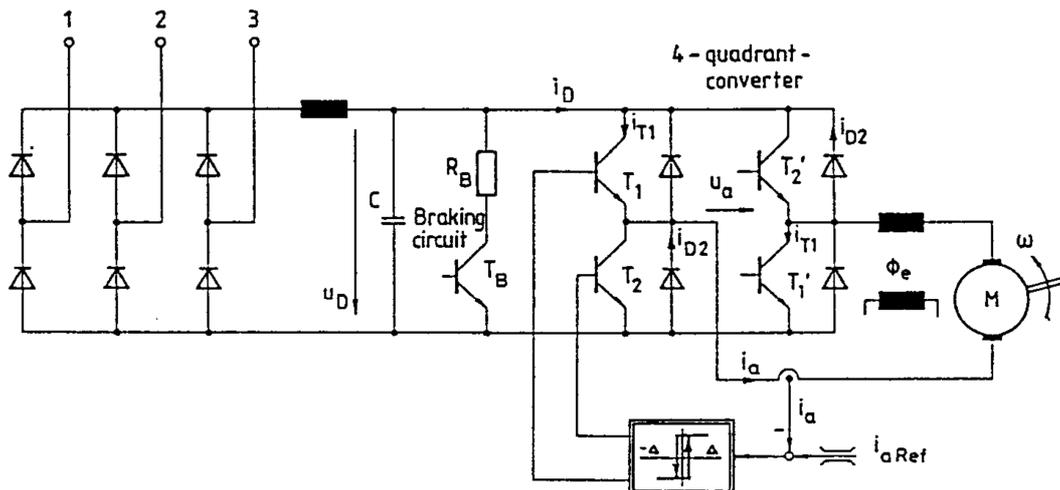
Il corretto funzionamento del dispositivo è garantito da un sistema di controllo che avrà il compito di pilotare l'apertura e la chiusura dei tiristori (vedi § 4.4).

### 4.3.3 Chopper

I chopper sono dei dispositivi DC – DC, cioè che permettono di **variare il valore della tensione continua** fornita in ingresso. Con opportuni accorgimenti circuitali è possibile non solo diminuire ma anche **aumentare** il valore della tensione fornita al carico.

Sono realizzati sia a transistor che a tiristori.

Sono dispositivi che vengono utilizzati in alternativa ai ponti a tiristori, nei casi in cui sia richiesto un migliore controllo della velocità, ma a discapito di una minore potenza fornita.



**Figura 48 – Schema di un chopper preceduto da un ponte a diodi**

Nella figura precedente viene mostrato lo schema di un circuito di alimentazione di un motore in continua in cui sono visibili da sinistra:

- ponte a diodi di raddrizzamento della tensione alternata trifase in ingresso;
- condensatore C di livellamento della tensione;
- resistenza  $R_B$  (con transistor  $T_B$  con funzioni di interruttore) di assorbimento della corrente generata dal motore in fase di frenatura (il ponte a diodi non può restituire la corrente generata dal motore in fase di frenatura, per cui deve essere dissipata da resistenze);
- transistor  $T_1$ - $T_2$ - $T_1'$ - $T_2'$  che costituiscono il circuito chopper (i diodi in parallelo ai transistor permettono alla corrente di circolare in condizioni di frenatura);
- motore M con circuito di eccitazione  $F_e$ .

Nella parte bassa della figura è rappresentato il sistema di controllo che pilota l'apertura e la chiusura dei transistor in funzione della corrente di armatura richiesta  $i_a$ .

#### 4.3.4 Inverter

L'inverter è un dispositivo che ha cambiato radicalmente l'automazione nell'industria, introducendo la possibilità di regolare la velocità dei motori trifase asincroni con costi molto contenuti sia di installazione che di esercizio.

La regolazione di velocità viene oggi implementata anche nelle applicazioni dove la sostituzione del motore in corrente continua in passato era impensabile e soprattutto antieconomica, rendendo questo dispositivo di fatto obsoleto e in fase di progressivo abbandono.

L'inverter è un dispositivo elettronico DC – AC, cioè ha il compito di **generare una corrente alternata a partire da una corrente continua**; talvolta viene anche detto "convertitore statico di frequenza".

In linea di massima si individuano due tipi di inverter: a frequenza costante ed a frequenza variabile.

L'inverter a **frequenza costante** più diffuso è quello interno ai gruppi di continuità (**UPS**), la cui funzione principale è di alimentare i dispositivi ad esso collegati in caso di black-out.

Nel gruppo di continuità la tensione di rete viene raddrizzata in corrente continua a livello compatibile con una batteria interna, e quindi viene riconvertita dall'inverter in corrente alternata a valori standard 230V / 50 Hz.

Nel caso manchi l'alimentazione, l'inverter continua ad alimentare il carico prelevando l'energia dalla batteria fino alla sua completa scarica.

Di seguito viene rappresentato uno schema a blocchi di un UPS.

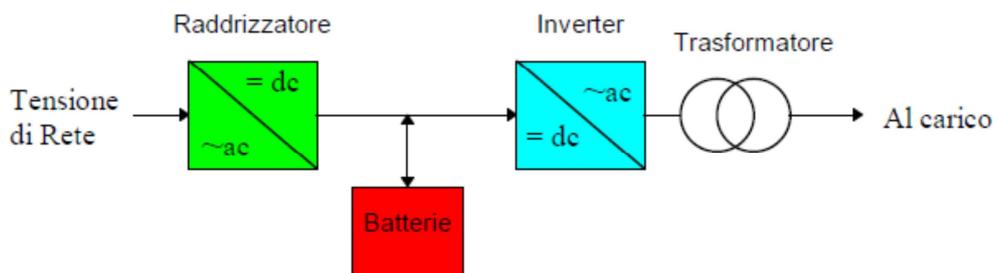


Figura 49 – Schema di un UPS (frequenza costante)

Questo tipo di apparecchio spazia da potenze molto piccole (200-300 W per alimentare un PC) fino ad arrivare a 20-30 kW ed oltre.

Un altro utilizzo degli inverter è quello di convertire l'energia elettrica in corrente continua prodotta dai pannelli fotovoltaici, in corrente alternata a 50 Hz, affinché sia riversata nella rete pubblica o verso le utenze tradizionali a 230 V.

L'inverter a **frequenza variabile** è utilizzato, tra i vari utilizzi possibili, nei sistemi di alimentazione per motori trifase, dove si rende necessario regolare la velocità. Infatti in questi motori la velocità di rotazione è strettamente connessa con la frequenza della tensione con cui lo si alimenta.

In questi sistemi, prima dell'inverter la tensione alternata della rete (trifase o monofase) viene raddrizzata in corrente continua e quindi viene riconvertita in corrente alternata trifase a frequenza variabile per alimentare il motore.

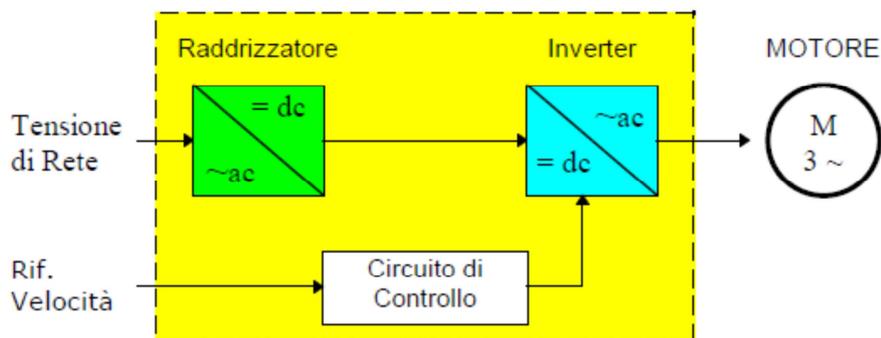


Figura 50 – Schema di un inverter (frequenza variabile)

Il valore della frequenza in uscita può essere scelto a piacere dall'utilizzatore a seconda della velocità di funzionamento che si vuole far raggiungere al motore.

Sul mercato sono disponibili taglie che vanno da potenze minime di 500 W fino a oltre 500 kW con la tensione industriale di 400 V (Bassa Tensione), ed addirittura a 10 MW con gli inverter a 6000 V (in media tensione).

Sia gli UPS che gli inverter per motori asincroni trifasi hanno il vantaggio di assorbire corrente dalla rete di alimentazione praticamente in fase con la tensione ( $\cos \phi = 0.95$ ).

In pratica il  $\cos \phi$  del carico non si riflette sulla corrente assorbita, e quindi non deve essere rifasato.

Questa è una caratteristica intrinseca dello stadio raddrizzatore di ingresso, che per contro ha un assorbimento di corrente non proprio lineare (per basse tensioni necessita di più corrente rispetto alle alte tensioni, con conseguenti perdite di potenza).

Uno degli aspetti negativi degli inverter a frequenza variabile per la regolazione della velocità dei motori, è il fatto che sono dei veri e propri generatori di disturbi elettromagnetici. Questi disturbi vanno verso il carico, verso la rete di alimentazione, e verso l'ambiente circostante.

I costruttori forniscono comunque dei dispositivi, da installare assieme all'inverter, adatti a contenere questi problemi, e forniscono inoltre i consigli adatti per ottenere un'installazione che rispetti le Norme EN e la Direttiva sulla compatibilità elettromagnetica (EMC).

Di seguito è schematizzato un **sistema di alimentazione di un motore trifase** le cui componenti sono:

- il **raddrizzatore**, in questo caso costituito da diodi;
- un **filtro**, schematizzato in un condensatore e un induttore, per livellare la tensione continua il più possibile;
- l'**inverter**, costituito principalmente da transistor con diodi in parallelo.

Non è disegnato per semplicità il circuito con le resistenze di assorbimento della corrente generata durante le frenature, necessaria perché i diodi non possono far circolare la corrente in senso contrario verso la rete elettrica.

È una configurazione analoga al chopper per l'alimentazione dei motori in corrente continua.

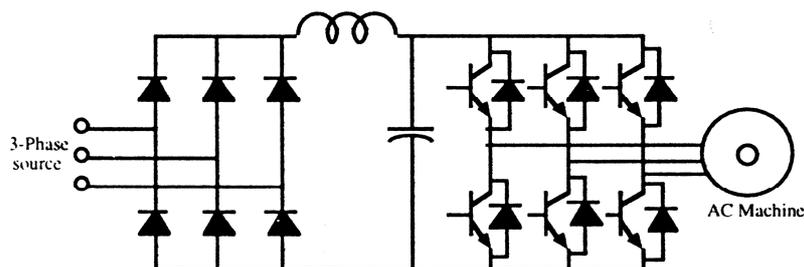


Figura 51 – Schema di un inverter preceduto da un raddrizzatore a diodi

Per quanto riguarda il **raddrizzatore**, al fine di controllare in maniera più efficace la tensione continua generata, invece dei diodi possono essere utilizzati chopper o tiristori, i quali, in determinate configurazioni, possono anche far tornare verso la rete elettrica la corrente generata in frenatura senza dovere utilizzare resistenze di assorbimento. Ma le versioni più moderne utilizzano un ponte a transistor (generalmente **IGBT**), denominato spesso **AFE** (Active Front End: stadio di ingresso attivo).

Per quanto riguarda l'**inverter**, ci sono vari metodi per generare la tensione alternata trifase a partire dalla tensione continua fornita dal raddrizzatore, che prevedono l'utilizzo di diverse tecniche di controllo delle fasi di apertura e chiusura dei transistor, mentre lo schema di principio rimane sempre lo stesso mostrato precedentemente.

I metodi più usati fino a qualche anno fa sono definiti **six-step** e **twelve-step** (6 passi o 12 passi), definiti così perché tante sono le fasi di apertura e chiusura dei transistor per ogni ciclo della tensione generata.

Il metodo più recente e ormai il più utilizzato è il cosiddetto **PWM**: Pulse Width Modulation (Modulazione a larghezza di impulsi), un metodo che prevede l'apertura e la chiusura dei transistor ad elevata frequenza. Con questa tecnica, controllando con precisione i tempi di apertura e chiusura, si può controllare con precisione il valore medio della tensione generata e conseguentemente la corrente fornita al motore.

Di seguito è schematizzato questo principio: nello primo schema il tempo di apertura del transistor è stretto (il livello alto ha durata piccola), mentre nel secondo schema il tempo di apertura del transistor è più largo (il livello alto ha durata maggiore) e l'ampiezza della tensione sinusoidale generata risulta più elevata.

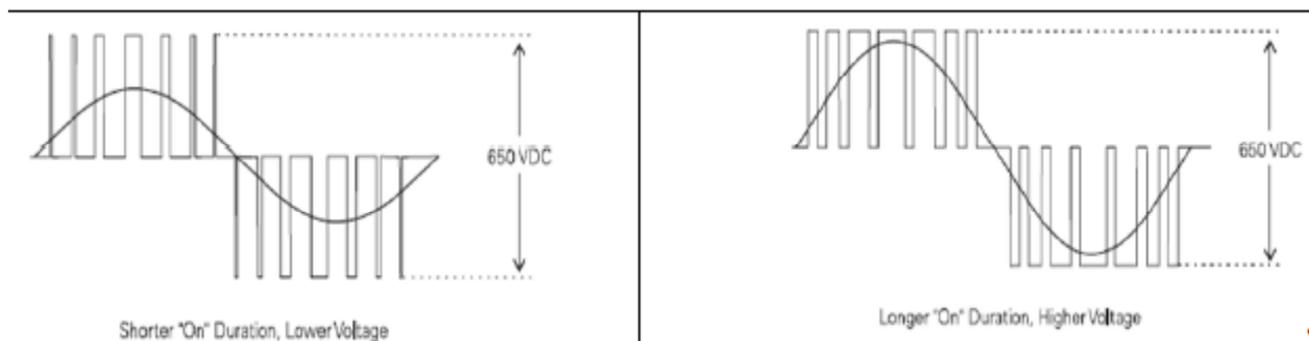
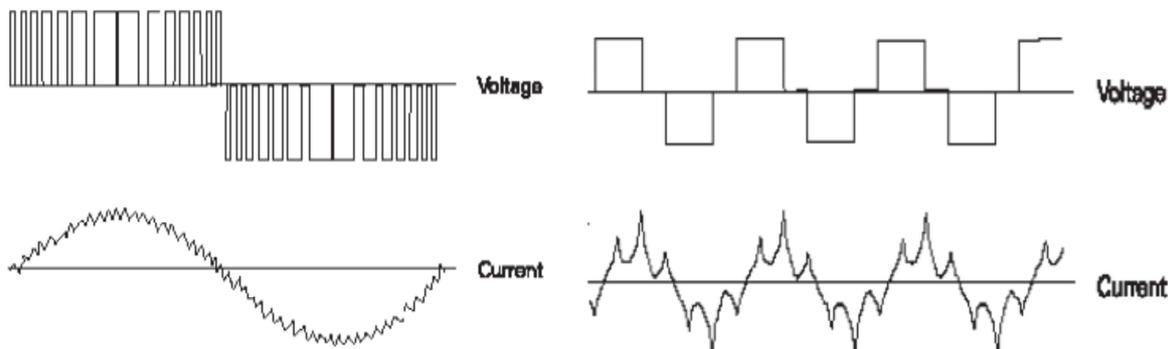


Figura 52 – Diagramma della tensione generata da un inverter

Gli azionamenti con inverter PWM presentano, rispetto a quelli con inverter six o twelve step, molteplici vantaggi (che dipendono dal numero e dalla posizione delle commutazioni, cioè dal tipo di componenti usati e dalla tecnica di modulazione scelta).

Di grande importanza è il fatto che la corrente generata, il cui andamento è più importante dell'andamento della tensione perché è quella effettivamente utilizzata dal motore per generare la coppia motrice, è molto meno distorta con il metodo PWM, e genera molte meno armoniche di frequenza superiore che non sono utili per il funzionamento del motore, migliorando sensibilmente l'efficienza dell'intero sistema.

Di seguito viene schematizzato l'andamento della tensione e della corrente alternata (per semplicità si evidenzia una sola fase) generata da un inverter PWM (a sinistra) e da un six step (a destra), in cui si evidenzia l'elevata distorsione della corrente generata con il metodo six step.



**Figura 53 – Confronto tensioni e correnti tra inverter PWM e six-step**

Altre importanti caratteristiche dei PWM sono:

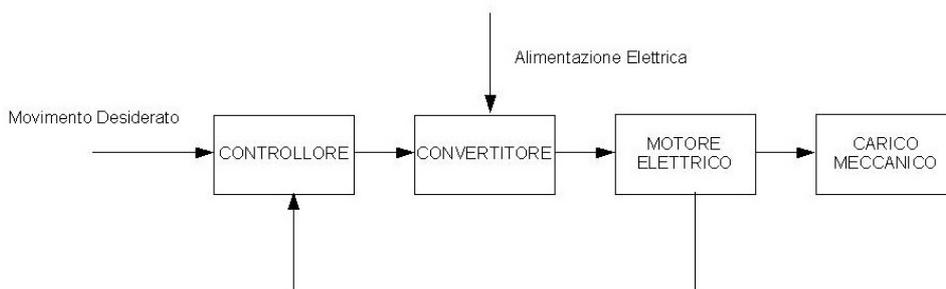
- migliori prestazioni dinamiche (variazioni di velocità più rapide e precise);
- funzionamento dolce alle basse velocità, praticamente senza ondulazioni di coppia;
- fattore di potenza praticamente unitario e indipendente dalla velocità;
- minore inquinamento in rete;
- filtro del circuito intermedio più piccolo;
- maggiore rendimento del motore;
- semplificazione e minore costo della sezione di potenza.

Tali vantaggi sono ottenuti a spese di un circuito di controllo più complesso, di più alte perdite di commutazione e di un maggior rumore acustico. Inoltre l'elevata frequenza di lavoro degli elementi di potenza pone dei limiti alla massima potenza erogabile dall'azionamento.

## 4.4 Gli azionamenti elettrici

L'azionamento elettrico può essere definito come **l'insieme composto da un motore elettrico e dagli apparati di alimentazione, comando e controllo, avente come scopo la regolazione della coppia, della velocità o della posizione di un albero di trasmissione cui è collegato un carico meccanico**. In ambito funiviario il carico meccanico è costituito dall'insieme degli organi in movimento: puleggie, rulli, fune, veicoli, passeggeri.

Lo schema a blocchi seguente illustra meglio i componenti e le funzioni di un azionamento elettrico.



### Figura 54 – Schema logico di un azionamento elettrico

I componenti fondamentali di un azionamento sono:

- il **motore elettrico** (ad esempio un motore trifase asincrono)
- il **convertitore** statico di potenza (ad esempio un inverter)
- il **dispositivo di controllo o controllore** (ad esempio i circuiti dell'azionamento di un impianto funiviario)

A questi elementi ne va aggiunto un quarto, il **carico meccanico**, il quale, pur concettualmente distinto dall'azionamento, ne determina il funzionamento mediante le proprie caratteristiche meccaniche (masse in movimento, inerzie, attriti, ecc.).

Con riferimento alla figura precedente, il **movimento desiderato**, che corrisponde ad esempio alle caratteristiche di coppia e velocità che si vuole applicare al carico in ogni istante, entra nel controllore. Il controllore a sua volta confronta il movimento desiderato con i valori di coppia e velocità istantanea che vengono misurati sul motore elettrico e riportati al controllore (questo meccanismo di confronto si definisce **retroazione**). Se i due segnali, movimento desiderato e **segnale retroazionato**, differiscono, il controllore elabora una adeguata **azione di controllo**, tale da far seguire al motore elettrico il movimento desiderato. Il segnale di controllo in uscita dal controllore entra così al convertitore, il quale fornisce la corrente che serve per alimentare il motore elettrico in maniera che corregga l'errore e segua il movimento desiderato.

I segnali che entrano nel controllore e che vanno a formare il segnale retroazionato, sono il risultato di misure effettuate in genere sul motore elettrico. Le misure sono di tipo elettrico, a monte del motore, o meccaniche, a valle del motore. Generalmente come grandezze elettriche vengono misurate la **tensione di alimentazione** del motore e la **corrente assorbita** dallo stesso. Come grandezze meccaniche vengono misurate la **velocità di rotazione** ed eventualmente la posizione dell'albero del motore. Le misure sono effettuate tramite elementi chiamati **trasduttori** che rendono i segnali misurati compatibili con il controllore (voltmetri, amperometri, dinamo tachimetriche, encoder, ecc.).

Il **dispositivo di controllo** è l'elemento fondamentale degli azionamenti elettrici, ed è costituito dai seguenti componenti:

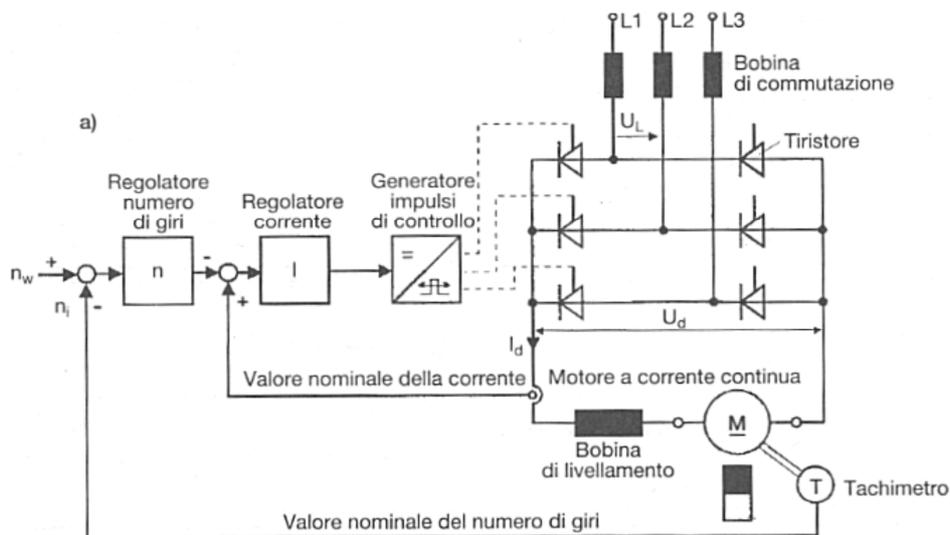
- gli organi di **riferimento** che forniscono i valori della grandezza di riferimento desiderato, vale a dire la velocità e la coppia motore desiderata in ogni istante. Nel caso più semplice può essere un **potenziometro, cioè una resistenza variabile** azionata manualmente, inserita in un semplice circuito elettrico. Nei casi più complessi si tratta di un sistema elettronico, come ad esempio quelle componenti del **sistema di sorveglianza degli impianti funiviari**, le quali determinano la velocità desiderata dell'impianto a seconda delle condizioni di funzionamento (ad esempio secondo una determinata rampa di velocità durante una frenatura elettrica/elettromeccanica). In questi circuiti però, la funzione di organo di riferimento dell'azionamento, deve essere vista come una parte delle tante funzioni svolte da questi circuiti, la cui funzione primaria è la sorveglianza dell'intero impianto;
- gli organi di **misura** (sensori / trasduttori) che convertono le grandezze fisiche del sistema in segnali elettrici (generalmente tensioni continue); i più comuni organi di misura sono i sensori di corrente (shunt), di velocità (dinamo tachimetrica) e di posizione (encoder);
- i **regolatori**, cioè dei circuiti elettronici che producono i segnali da inviare agli organi di comando, secondo determinate regole. Essi determinano la stabilità, la dinamica e la precisione del sistema, cioè come il sistema reagisce alle variazioni di velocità richieste;
- gli organi di **comando** che pilotano lo stato dei circuiti dei convertitori secondo quanto stabilito dai regolatori. Generalmente sono dei circuiti elettronici che comandano la chiusura e l'apertura dei tiristori o dei transistor di potenza dei ponti convertitori.

#### 4.4.1 Azionamenti in corrente continua

Gli azionamenti in corrente continua sono stati i primi ad essere sviluppati e sono tuttora molto diffusi per la semplicità ed economicità del controllo e per le ottime prestazioni dinamiche del motore in corrente

continua. La presenza del commutatore meccanico (spazzole del motore) comporta però manutenzioni periodiche, limiti di velocità, limiti ambientali e maggiore costo ed inerzia del motore.

Nella figura seguente è riportato un possibile schema di azionamento in corrente continua con regolazione in cascata per il controllo della velocità. Tale azionamento è costituito da un raddrizzatore a ponte trifase a tiristori, da un motore in corrente continua ad eccitazione separata e da sensori di corrente e velocità (tachimetro).



**Figura 55 – Schema di funzionamento un azionamento elettrico**

Secondo tale schema, il regolatore del numero dei giri confronta il valore di riferimento con il valore nominale fornito dal tachimetro, e fornisce al regolatore di corrente il riferimento da confrontare con la corrente di armatura del motore.

Il regolatore di corrente rileva la corrente di armatura misurata dal trasduttore, e fornisce al generatore di impulsi (organo di comando) le informazioni necessarie per aprire i tiristori con la frequenza opportuna, in maniera che la tensione di armatura sia quella adatta a raggiungere la coppia \ velocità richieste.

Questo sistema a doppia regolazione permette di suddividere il controllo in due fasi distinte, rendendo più efficace l'intero sistema: il primo regolatore verifica a quale velocità deve andare il motore e dice quale corrente di armatura è necessaria per garantire tale velocità, il secondo verifica la corrente di armatura e dice a quale frequenza si devono aprire i tiristori per avere la tensione di armatura necessaria.

#### 4.4.1.1 Controllo di velocità

Con il circuito sopra schematizzato, è possibile ottenere il controllo della velocità di un motore in corrente continua, regolando la tensione di armatura. Raggiunta la tensione massima, la velocità può essere aumentata diminuendo la corrente di eccitazione e quindi il flusso (deflussaggio: vedi capitolo 4.2.3). Questa componente dell'azionamento non è disegnata nello schema precedente, è può essere visto come un ulteriore organo di comando, pilotato dal regolatore di corrente.

Un ulteriore metodo di controllo della velocità consiste nella variazione della resistenza di armatura, la quale comporta la variazione della corrente di armatura (a parità di tensione di armatura e flusso di eccitazione). Questo tipo di controllo è semplice e di basso costo ma comporta bassi rendimenti e campi di variazione della velocità limitati e dipendenti dal carico, per cui è ormai poco usato.

#### 4.4.1.2 Inversione del moto.

L'inversione della velocità si può realizzare invertendo la tensione di armatura o quella di eccitazione. Generalmente si utilizza la prima strategia in quanto, essendo la costante di tempo elettrica del circuito di armatura molto minore di quella del circuito di eccitazione, si ottiene una migliore dinamica.

#### 4.4.1.3 Frenatura elettrica.

In molte applicazioni è importante poter effettuare in modo sicuro, preciso e rapido delle fermate. Sebbene la frenatura meccanica sia molto affidabile e consenta di bloccare il carico in modo rapido ed efficiente e di fornire una coppia di mantenimento all'arresto, negli azionamenti elettrici nel caso di frequenti frenature, per limitare il costo della manutenzione e dei periodici ricambi e/o per recuperare una parte dell'energia di frenatura, si ricorre spesso all'uso combinato della frenatura elettrica con quella meccanica. La frenatura elettrica viene in genere usata per rallentare la macchina fino ad un certo valore, al di sotto del quale interviene il freno meccanico

Negli azionamenti elettrici in corrente continua si distinguono tre tipi di frenatura elettrica: reostatica, in controcorrente, a recupero. Qualsiasi sia il tipo di frenatura elettrica adottata la coppia frenante sviluppata deve essere sempre controllata (ad esempio: per mantenere il motore entro i limiti di un corretto funzionamento, per ottenere una elevata dinamica o, nel caso della trazione, una decelerazione costante per il confort dei viaggiatori).

**Frenatura reostatica.** Si realizza disconnettendo il circuito di armatura dalla sua alimentazione e chiudendolo su un reostato la cui resistenza deve essere di valore tale da mantenere sempre la corrente entro i limiti di sicurezza.

Per frenature rapide il valore della resistenza deve essere gradualmente ridotto al diminuire della velocità in modo tale da mantenere la coppia frenante costantemente uguale al valore massimo ammissibile.

Tale tipo di frenatura dal punto di vista energetico è un metodo inefficiente in quanto si ottiene dissipando sulla resistenza una quota dell'energia cinetica immagazzinata nell'inerzia del sistema.

**Frenatura a tensione invertita o in controcorrente.** Si realizza invertendo i morsetti di armatura. Questo necessita l'inserimento in serie al circuito di armatura una resistenza tale da mantenere la corrente entro i limiti di sicurezza.

Tale metodo, che consente l'inversione del moto, e consente frenature molto rapide, dal punto di vista energetico è altamente inefficiente in quanto nella resistenza di frenatura viene dissipata sia l'energia cinetica del sistema sia l'energia elettrica assorbita dalla rete di alimentazione.

**Frenatura a recupero.** Se, senza modificare le connessioni del motore con l'alimentazione, si diminuisce la tensione di armatura, la macchina in corrente continua che stava funzionando da motore funziona da generatore, frenando il carico, e trasforma l'energia cinetica immagazzinata nelle parti in movimento in energia elettrica, che viene rinviata alla sorgente o dissipata su resistenze.

Il metodo è potenzialmente **efficiente** dal punto di vista energetico in quanto, se il convertitore di alimentazione consente l'inversione della corrente (ad esempio doppio ponte a tiristori) e la rete è in grado di assorbire energia, una parte dell'energia cinetica del sistema può essere recuperata; inoltre i rallentamenti e le inversioni di marcia sono completamente automatici e rapidi.

Tale metodo di frenatura, che consente di recuperare fino al 40% dell'energia cinetica accumulata è più **costoso** degli altri, pertanto viene utilizzato solo nel caso di frenature molto frequenti e potenze elevate, o nel caso in cui il recupero dell'energia assume un'importanza primaria (ad esempio per l'autonomia dei veicoli elettrici su strada).

Regolando opportunamente la tensione di alimentazione del motore si può ottenere la massima coppia frenante ammissibile durante tutto il periodo di decelerazione.

#### 4.4.2 Azionamenti in corrente alternata.

L'evoluzione dell'elettronica di potenza e della microelettronica, in termini sia di prestazioni che di costi, e l'individuazione di nuove strategie di controllo sono stati i principali fattori che hanno consentito agli azionamenti in corrente alternata con motori asincroni di ampliare sempre più il loro spazio applicativo a spese degli azionamenti in corrente continua.

Il principale motivo di tale tendenza è costituito dai **vantaggi** connessi alla sostituzione di un motore a corrente continua con un motore asincrono ed in particolare:

- **maggiore robustezza e affidabilità;**
- **minore manutenzione, costo, vincoli ambientali e funzionali e inerzia.**

**I sistemi di conversione statica e di controllo sono però più complessi e costosi**, soprattutto nel caso in cui si richiedano all'azionamento elevate prestazioni dinamiche, cioè variazioni di velocità molto ampie e rapide.

Un azionamento asincrono trifase può essere schematizzato in maniera analoga a quello in corrente continua visto nel capitolo precedente, ma con una **coppia raddrizzatore/inverter al posto del ponte a tiristori** e con un **motore asincrono trifase invece di un motore in continua**.

#### 4.4.2.1 **Controllo di velocità**

L'azionamento sopra descritto consente di pilotare solo il valore efficace della tensione statorica. E' un azionamento semplice e di basso costo ma caratterizzato da scadenti prestazioni, limitato campo di variazione della velocità, bassa coppia di spunto e notevole inquinamento della rete di alimentazione; le applicazioni più comuni riguardano gli azionamenti per pompe e ventilatori

Gli azionamenti con **controllo sia in frequenza che in tensione** (o corrente) sono quelli di gran lunga più diffusi. Il controllo della frequenza consente infatti di ottenere campi di variazione della velocità ampi, elevati rendimenti anche per bassi valori della velocità, alte coppie di spunto e buona dinamica.

Infatti se al variare della frequenza si varia anche il valore efficace della tensione (o della corrente) di alimentazione, si ottiene, a regime stazionario e per velocità inferiori alla nominale, un flusso magnetico pari a quello nominale, quindi si ottiene piena potenzialità di coppia per qualsiasi velocità e ottimo sfruttamento del motore.

Per velocità maggiori della nominale, il valore efficace della tensione (o della corrente) di alimentazione viene mantenuto costante e pari a quello nominale, e viene fatto **variare il flusso** e quindi la coppia in modo inversamente proporzionale alla velocità.

Nei motori a rotore avvolto, la velocità può essere controllata variando la resistenza degli avvolgimenti rotorici, i quali sono connessi, mediante anelli e spazzole, ad una serie di **resistenze variabili**. I principali pregi di tale tipo di controllo sono: basso costo, buon fattore di potenza ed elevata coppia di spunto. Gli inconvenienti: necessità di utilizzare motori con rotore avvolto, campo di variazione della velocità limitato e dipendente dal carico, basso rendimento e bassa dinamica.

#### 4.4.2.2 **Inversione del moto**

L'inversione della velocità si può realizzare scambiando le connessioni tra due dei tre morsetti di macchina, ottenendo una nuova caratteristica meccanica disposta simmetricamente rispetto a quella di partenza.

#### 4.4.2.3 **Frenatura elettrica.**

Esaminiamo alcune modalità mediante le quali è possibile effettuare la frenatura elettrica dei motori trifasi ad induzione.

##### **Frenatura rigenerativa.**

Se durante il funzionamento da motore si diminuisce bruscamente il valore della velocità di riferimento in modo da ottenere una frequenza statorica a cui corrisponda una velocità di sincronismo minore della attuale velocità di rotazione, la macchina asincrona commuta il suo funzionamento da motore a **generatore**. Sotto l'influenza della conseguente coppia frenante elettrica oltre che della coppia resistente del carico il sistema decelera.

Questo metodo permette il **recupero dell'energia** di frenatura nella rete di alimentazione, tuttavia comporta una maggiore complessità del sistema di conversione statica, e si utilizza in pratica solo nel caso di azionamenti di elevata potenza (trazione elettrica a guida vincolata), o nei quali il risparmio energetico è particolarmente importante, oppure in applicazioni caratterizzate da cicli di lavoro nei quali le frenature si ripetono frequentemente. In tutti gli altri casi per motivi di costo conviene dissipare l'energia cinetica su una opportuna **resistenza** connessa in parallelo al condensatore posto tra il raddrizzatore e l'inverter, che viene connesso al circuito tramite un interruttore solo in fase di frenatura.

I principali vantaggi di tale tipo di frenatura, che è molto utilizzato, sono la semplicità, l'affidabilità e la dinamica accettabilmente veloce. Gli inconvenienti sono costituiti dalla complessità del sistema per realizzare il recupero dell'energia di frenatura oppure, nel caso in cui l'energia di frenatura venga dissipata, dalla necessità di spazi e costi addizionali per la resistenza e il relativo sistema di raffreddamento.

### Frenatura in controcorrente

Se durante il funzionamento da motore si scambiano le connessioni tra due dei tre morsetti di macchina si ottiene una nuova caratteristica meccanica disposta simmetricamente rispetto a quella di partenza e il punto di funzionamento si sposta bruscamente dal primo al quarto quadrante e la macchina funziona da **freno**.

Tale tipo di frenatura è molto inefficiente dal punto di vista energetico, in quanto nelle resistenze dei circuiti del motore è dissipata non solo l'energia inerziale del sistema ma anche quella fornita dall'alimentazione. Inoltre i motori asincroni a gabbia assorbono correnti molto alte e sviluppano coppie frenanti non molto elevate (le cose migliorano nel caso di motori con rotore avvolto) ed è pertanto opportuno utilizzare sempre dei sensori di temperatura per proteggere gli avvolgimenti dalla maggiore quantità di calore sviluppata nel motore.

Tale tipo di frenatura non perde però efficacia alle basse velocità e consente l'inversione del senso di rotazione.

### 4.4.3 I regolatori

I **regolatori**, spesso definiti anche **controllori**, in base alle informazioni ricevute dall'organo di riferimento (o dal regolatore dell'anello immediatamente più esterno) e dall'organo di misura, forniscono dei segnali utili a correggere qualsiasi allontanamento della variabile controllata (ad esempio la velocità del motore o la corrente di armatura) dal suo valore di riferimento.

Il loro scopo è infatti fare in modo che il sistema **retroazionato**, oltre ad essere **stabile**, sia caratterizzato nel funzionamento a regime stazionario da una piccolissima deviazione della variabile controllata dal valore desiderato e nei transitori da un comportamento dinamico tale da consentire un **rapido** raggiungimento della nuova condizione di regime; fare in modo cioè che la variabile controllata segua più strettamente possibile il suo valore di riferimento indipendentemente dalla presenza o meno di disturbi.

Per comprendere meglio questo sistema si può fare l'analogia con un caso pratico: la regolazione manuale dell'acqua calda da un rubinetto. Il regolatore/controllore è il nostro cervello che, ricevute dal corpo (organo di misura) le informazioni relative temperatura reale dell'acqua, confrontandola con la temperatura desiderata, comanda la mano (organo di comando) di muovere il rubinetto in modo che cambi il flusso di acqua calda e quindi raggiunga la temperatura desiderata nella maniera più rapida possibile.

In un comportamento ideale la variabile controllata dovrebbe rimanere inalterata in presenza di un disturbo e seguire prontamente e senza oscillazioni qualsiasi cambiamento della variabile di comando con errore nullo a regime. Nella realtà il sistema risponde sempre con un leggero ritardo, e questo ostacola il comportamento ideale.

Il regolatore è seguito spesso da un **limitatore**, per evitare interventi troppo brutali quando si verificano fenomeni transitori di notevole entità, e da un **filtro** per ridurre l'ondulazione del segnale di uscita.

I controllori standard largamente utilizzati in campo industriale sono caratterizzati da una rete di retroazione che ha una struttura fissa, costituita da una combinazione di tre parametri:

- **P: proporzionale.** Questo controllore è proporzionale al valore dell'errore.
- **I: Integrativo.** Questo controllore tiene conto di quanto tempo l'errore continua a persistere: è proporzionale al valore medio dell'errore.
- **D: derivativo.** Questo controllore è proporzionale alla variazione dell'errore.

A seconda della combinazione di questi tre parametri, i regolatori vengono denominati di tipo P, I, PI, PD, PID.

Generalmente negli impianti funiviari vengono usati dei regolatori PID, in cui i tre parametri, dimensionati per una certa condizione di lavoro, restano fissi durante il funzionamento. La regolazione è dunque relativa ad

una determinata condizione di funzionamento; pertanto se il sistema si allontana sensibilmente da tale condizione si possono verificare smorzamenti non più soddisfacenti e anche instabilità.

## 4.5 I sistemi di controllo a logica cablata e i PLC

### 4.5.1 Generalità

In linea generale, i **sistemi di controllo**, sono dei sistemi che, nell'ambito **dell'automazione industriale**, gestiscono macchine e processi, in assenza o con forte riduzione dell'intervento umano, al fine di eseguire operazioni ripetitive, o dove sia richiesta maggiore sicurezza o precisione nelle azioni.

Essi operano modificando il comportamento del sistema da controllare (ovvero le sue uscite) attraverso la manipolazione delle grandezze d'ingresso.

Rispetto ai **sistemi di azionamento elettrico** visti nel capitolo precedente, non bisogna confondere il sistema di controllo con i regolatori o controllori dell'azionamento. Questi ultimi fanno in modo che il motore si muova alla velocità desiderata nella maniera migliore. **Il sistema di controllo fornisce la velocità desiderata** all'azionamento, in base ai segnali provenienti da sensori o da comandi manuali, elaborati secondo una programmazione prestabilita.

In ambito funiviario l'intero **sistema di sorveglianza dell'impianto** costituisce il sistema di controllo automatico, in quanto esegue le seguenti funzioni

- **riceve** i segnali provenienti dai **sensori** disposti su tutto l'impianto e i comandi imposti dal macchinista tramite i **pulsanti** del pulpito di comando;
- **elabora** i segnali ricevuti in base alla **programmazione** dei propri circuiti;
- **agisce** sui dispositivi attivi dell'impianto in base ai risultati dell'elaborazione.

Quest'ultimo punto viene effettuato con le seguenti modalità:

- fornendo **comandi** (accensione / spegnimento) o variando le **grandezze** (riferimento di velocità) fornite all'azionamento del motore dell'impianto;
- controllando la corrente di eccitazione dei cosiddetti **relè finali**, i quali possono:
  - aprire/chiedere l'alimentazione elettrica di alcuni dispositivi dell'impianto, ad esempio i freni elettromagnetici, i motorini dei cancelletti di imbarco, ecc.;
  - fornire i comandi a degli attuatori, ad esempio le elettrovalvole che operano sui dispositivi come i freni o i tenditori pneumatici.

Inizialmente questi sistemi sono stati realizzati con dispositivi detti a **logica cablata**, cioè mediante collegamento fisico (**hardware**) via cavo di dispositivi diversi: relè, sensori, contattori, pulsanti, ecc.

Tuttavia fin dai primi anni '70 sono stati introdotti i **controllori a logica programmabile o PLC** (acronimo di Programmable Logic Controller), dispositivi elettronici che possono essere utilizzati per far funzionare una macchina a seconda di un programma (**software**) prestabilito.

Questi apparecchi non sono altro che dei micro computer che sulla base di un programma fanno compiere alla macchina una determinata sequenza di operazioni allo scopo di realizzare il prodotto desiderato.

Con il passare degli anni, questi prodotti sono diventati sempre più efficienti ed economici, al punto da essere utilizzati in tutti i casi sia richiesto un controllo automatico di motori o impianti, anche di piccole dimensioni e dalle caratteristiche particolari come gli impianti funiviari, per i quali, fino a pochi anni fa, era ancora conveniente realizzare i circuiti di controllo tramite la cosiddetta logica cablata.

### 4.5.2 Sistemi di controllo a logica cablata

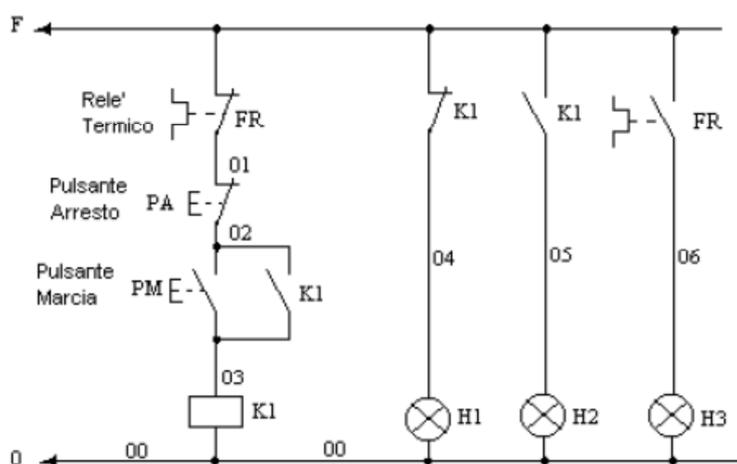
Per realizzare un comando a distanza o tramite automatismo di un qualunque utilizzatore di potenza, è generalmente necessario realizzare un circuito di comando.

Il circuito di comando, oltre a mantenere lontano dall'operatore le parti elettriche di potenza, gli permette di usare manipolatori di piccole dimensioni anche se effettua il comando di motori di notevole potenza.

Un piccolo pulsante, infatti, può avviare indifferentemente un'elettropompa da 5 kW oppure da 500kW, senza che l'operatore possa avvertirne la differenza.

Il circuito di comando, inoltre, permette di ottenere delle logiche di sicurezza che impediscono di eseguire manovre errate o pericolose: un pannello comandi diventa in questo modo "a prova di stupido", in quanto qualunque manovra venga compiuta, questa non potrà mai essere pericolosa.

Il classico esempio di circuito a logica cablata è quello per l'avviamento di un motore tramite due pulsanti start-stop ed il contatto del relè termico, che è rappresentato nello schema funzionale nella figura seguente.



**Figura 56 – Esempio di circuito a logica cablata**

Questo sistema concettualmente rappresenta una funzione logica di tipo set-reset (accendi-spegni), nella quale vi sono segnali entranti (i comandi dell'operatore e il consenso di sicurezza) ed un segnale in uscita (il comando del motore).

La funzione logica viene realizzata tramite dei cablaggi che interconnettono la bobina con i pulsanti, i contatti e le spie luminose.

Con il progredire del mondo industriale, soprattutto nel campo delle macchine automatiche, si è avuto il conseguente aumento nell'utilizzo dei circuiti elettrici di comando, per i quali si sono iniziati ad intravedere i limiti.

Le logiche cablate hanno infatti alcuni **svantaggi**, ed in particolare :

- La complessità di un quadro a logica cablata aumenta in modo esponenziale con il numero di utilizzatori da esso asserviti;
- La logica presenta un alto numero di cablaggi interni e di relè ausiliari che ne diminuiscono di fatto l'affidabilità;
- La ricerca di un qualunque guasto è lunga e laboriosa;
- Il numero di contatti messi a disposizione da ciascun relè è limitato a 2 o 3, per cui in molti casi risulta necessario installare più relè in parallelo;
- Ogni relè o temporizzatore aggiunto necessita di maggiore spazio nel quadro;
- Nel caso siano necessarie modifiche o ampliamenti, si presentano lunghi tempi di fermo impianto sia per studiare che per realizzare le modifiche.

Si era quindi manifestata la necessità di sostituire le logiche cablate con un sistema più efficiente nel funzionamento e più pratico sia nella realizzazione che nella modifica.

### 4.5.3 Sistemi di controllo a logica programmabile - PLC

Proprio al fine di semplificare la costruzione di circuiti per il controllo di macchine ed impianti, sono stati ideati i PLC, “controllori a logica programmabile”, dispositivi nei quali la vecchia logica cablata viene invece programmata all'interno di un microprocessore.

Sono anche denominati sistemi di controllo a **logica statica**.

La loro caratteristica fondamentale sta nel fatto che pur essendo dispositivi elettronici, e quindi funzionanti a bassissima tensione, si adattano a funzionare negli ambienti industriali con notevoli disturbi ed elevate correnti elettriche.

Al loro interno, infatti, si trova un microprocessore di tipo semplice ma di elevata affidabilità e dotato di particolari interfacce di ingresso/uscita che lo possono connettere direttamente a segnali elettrici di impianti e macchinari.

Il funzionamento di un PLC è piuttosto semplice :

- In una prima fase le interfacce di “ingresso” (chiamate semplicemente **ingressi**) **acquisiscono** lo stato dei segnali provenienti da pulsanti, sensori e contatti;
- In una seconda fase il **microprocessore elabora** il programma sulla base degli ingressi e dei dati interni, **e produce** dei segnali che vengono inviati alle interfacce di uscita (chiamate semplicemente **uscite**);
- Nella terza fase i segnali di uscita sono **trasmessi agli attuatori** (motori, elettrovalvole, consensi, ecc.) che mettono in moto la macchina.

Queste elaborazioni vengono eseguite in un **ciclo** che dura tipicamente da 1 a 5 ms (millisecondi) ed è continuamente ripetuto, in maniera da dare l'impressione che tutte le operazioni vengano eseguite istantaneamente senza alcuna interruzione.

Se per qualsiasi motivo il processore non riesce a completare le operazioni previste entro un tempo predeterminato in fase di programmazione (tempo massimo ma in alcuni casi anche tempo minimo), la funzione di “**watchdog**” termina il ciclo ed esegue le operazioni previste in caso di errore (generalmente avvia la sequenza di arresto dell'impianto).

Il programma caricato nel PLC deve essere realizzato dall'utente a seconda del funzionamento che deve ottenere nella propria macchina o nel proprio impianto.

Oggi tipicamente per programmare un PLC si utilizzano software su Personal Computer con sistema operativo standardizzato, per il cui utilizzo non sono necessarie particolari cognizioni di informatica.

#### 4.5.3.1 Vantaggi del PLC

Utilizzare un PLC per realizzare un impianto di automazione comporta una serie di **vantaggi** sia per chi lo installa che per chi lo utilizza.

In particolare si evidenzia che :

- il cablaggio di un quadro di automazione diventa elementare in quanto basta portare ciascun segnale individualmente sulla morsettiera del PLC;
- è semplice controllare eventuali anomalie o scoprire guasti;
- è possibile “programmare” centinaia di relè ausiliari, temporizzatori e contattori senza aumentare lo spazio occupato nel quadro.
- è possibile, tramite il software di programmazione, modificare il funzionamento dell'automatismo anche mentre questo è in funzione o con pause di pochi istanti
- è possibile adattare il funzionamento alle esigenze di produzione (ad es. per un cambio formato), sostituendo il programma;
- alta affidabilità del prodotto : i casi di guasto sono rarissimi, e tipicamente avvengono nei primi giorni di funzionamento per difetti di produzione, o errori di montaggio/cablaggio.

### 4.5.3.2 Caratteristiche

I PLC si differenziano tra loro per il numero di segnali digitali che possono gestire fisicamente, ovvero che possono essere connessi, cosicché è consuetudine, per riconoscere la “taglia” di un PLC, indicare quanti segnali di ingresso ed uscita ha a disposizione nei suoi morsetti.

Nel mercato sono reperibili varie taglie di PLC a partire da modelli che gestiscono 10 segnali digitali fino ad arrivare a modelli da oltre 1.000 Ingressi / Uscite.

**Le unità di acquisizione** dei dati più semplici possono accettare in ingresso segnali di tipo alto/basso, si/no, aperto/chiuso. Ma sono anche disponibili moduli di acquisizione di dati analogici, cioè di grandezze in ingresso che variano in maniera continua. Questi moduli trasformano il segnale in forma numerica prima di trasferirli al microprocessore, e la frequenza con cui effettuano questa conversione dipende dalla velocità con cui il segnale in ingresso può variare, per cui possono essere moduli anche molto complessi e costosi.

**Le unità di controllo** sono le unità di elaborazione che contengono il microprocessore e le unità di memoria dove viene caricato il programma che il sistema deve eseguire. Sono chiamate anche **coordinatori**.

L'offerta che oggi viene proposta dai produttori di PLC nel mercato è molto ampia, ed ognuno nel proprio catalogo ha vari modelli a disposizione che possono adattarsi ad infinite situazioni e configurazioni.

### 4.5.3.3 Conclusioni

Il PLC ha soppiantato ampiamente la vecchia maniera di fare i quadri elettrici di automazione, introducendo il concetto di programma nel controllo di macchine ed impianti.

La regola pratica che se ne ricava è che quando un circuito elettrico ha più di 4-5 relè, è già conveniente installare un PLC.

Si può comunque dire che il termine PLC oggi, non ha più nulla a che vedere con i dispositivi nati con questa sigla vent'anni fa, con i quali si possono realizzare delle applicazioni che a quel tempo erano impensabili.

Si deve comunque tenere conto che **per le funzioni di sicurezza degli impianti funiviari è sempre necessario utilizzare anche una logica cablata** (Norma EN60204-1 art. 11.3.4), a meno che non si utilizzino particolari PLC in commercio progettati per le sole funzioni di sicurezza. Infatti negli impianti funiviari sono previsti due coordinatori a logica statica e uno a relè, il cosiddetto **canale C**.

## 4.6 Concetti generali sugli impianti elettrici

### 4.6.1 Caratteristiche principali

L'impianto elettrico indica, nel campo dell'ingegneria elettrica, l'insieme di apparecchiature elettriche, meccaniche e fisiche atte alla trasmissione e all'utilizzo di energia elettrica.

E' anche definito come il complesso di componenti elettrici, anche a tensioni nominali d'esercizio **diverse**, destinato ad una determinata funzione.

Esistono due grandi categorie di impianti elettrici: **impianti civili** e **impianti industriali**. I primi si utilizzano nelle abitazioni private e nei luoghi di pubblico accesso come scuole e ospedali; i secondi si utilizzano nei luoghi di lavoro e di produzione e sono spesso utilizzati per movimentare e automatizzare le "macchine" nelle industrie.

Si definisce **Sistema Elettrico** la parte di un impianto elettrico costituita dall'insieme delle apparecchiature, delle macchine, delle sbarre e delle linee aventi una **determinata tensione** nominale.

In base al valore di quest'ultima i sistemi elettrici sono classificati in sistemi di:

- CATEGORIA 0: tensione nominale inferiore o uguale a 50 V c.a – 75 Vc.c;
- CATEGORIA 1: tensione nominale da 51 V a 1000 V c.a. e da 76 a 1500 c.c;
- CATEGORIA 2: tensione nominale da 1001 V a 30 kV c.a e da 1501 V a 30 kV c.c;

- CATEGORIA 3: tensione nominale maggiore di 30 kV sia in c.a che c.c.

Un impianto elettrico è costituito dai seguenti **componenti principali**:

- Quadro elettrico
- Tubi e cavi
- Prese a spina
- Apparecchi di manovra e comando
- Lampade
- Sistemi e Apparecchi di Protezione

In ogni impianto elettrico, a valle del contatore, si trova un quadro di distribuzione costituito da materiale plastico autoestinguento a doppio isolamento, nel caso di piccole dimensioni, e da materiale metallico negli altri casi.

Nel **quadro elettrico** vi sono degli interruttori che hanno principalmente due funzioni:

- protezione;
- sezionamento.

I **tubi** servono per proteggere meccanicamente i cavi elettrici e possono essere posati a vista, sotto intonaco o sotto pavimento. Possono essere di tipo flessibile in Polivinile, di tipo rigido in PVC, o in acciaio zincato.

I **cavi** servono per raggiungere con la corrente elettrica i vari punti dell'impianto. Nei cavi si possono distinguere i seguenti componenti:

- Conduttore (la parte metallica percorsa da corrente);
- Isolante (parte che circonda il conduttore in PVC o gomma);
- Anima (insieme di conduttore e isolante);
- Guaina (rivestimento protettivo esterno).

I cavi sono contraddistinti da un idoneo colore:

- GIALLO-VERDE per la terra
- BLU CHIARO per il neutro
- DIVERSI COLORI per la fase

I cavi possono essere classificati in funzione del comportamento nei confronti del fuoco:

- non propaganti fiamma;
- non propaganti l'incendio;
- non propaganti l'incendio e a ridotta emissione di fumo e gas tossici,
- resistenti al fuoco e per ambienti ad elevate temperature.

I cavi sono contraddistinti da una tensione di isolamento indicata da due parametri:

- $U_0$  = indica la tensione massima che l'isolamento del cavo può sopportare verso terra
- $U$  = indica la tensione massima che l'isolamento può sopportare rispetto ad un cavo a stretto contatto.

Sul mercato sono presenti differenti tipologie di **prese a spina** in funzione della massima intensità di corrente da cui una presa può essere attraversata, cui equivale una certa potenza massima che può sopportare.

Per evitare contatti accidentali con le parti in tensione sono da preferire prese con alveoli protetti, che si aprono solo inserendo la giusta spina.

Di seguito sono elencate le più comuni tipologie di prese a spina utilizzate in Italia

TIPOLOGIA	DENOMINAZIONE	CARATTERISTICHE
 A	TIPO A – Standard italiano (Passo piccolo)	$I < 10 A$
 B	TIPO B – Standard italiano (Passo grande)	$I < 16 A$
 C	TIPO C – Presa bivalente (Passo piccolo e grande)	$I < 16 A$
 D	TIPO A – Standard tedesco (Tipo Siemens)	$I < 16 A$

Figura 57 – Tipologie di prese a spina

Gli **apparecchi di comando** sono quegli organi di un circuito elettrico che consentono di aprire o chiudere un circuito o di isolare parte dello stesso.

Tali apparecchi si dividono essenzialmente in:

- interruttori = servono per stabilire o interrompere la corrente di esercizio in qualunque condizione di carico o di eventuale sovraccarico.
- sezionatori = devono essere manovrati a vuoto e servono per avere un'ampia interruzione della continuità dei conduttori e vengono impiegati generalmente in sistemi elettrici di seconda e terza categoria.

### Le lampade

In una buona illuminazione devono essere presenti tutte le lunghezze d'onda visibili.

Per le lampade esiste l'INDICE di RESA CROMATICA (IRC) che indica la bontà dell'illuminazione e ha un valore massimo di 100.

Per le sorgenti luminose si prende in considerazione anche la temperatura di colore misurata in gradi Kelvin.

### Sistemi e Apparecchi di Protezione

Servono per limitare gli effetti dannosi

- per l'integrità del sistema;
- per la sicurezza delle persone in caso di eventuali anomalie dell'impianto elettrico.

## 4.6.2 La distribuzione dell'energia negli impianti elettrici

In Italia la produzione di energia elettrica è regolata dalla legge 6 dicembre 1962 n. 1643, e dal D.P.R. 18 marzo 1965, n. 342 che demandano all'ENEL la produzione e la distribuzione dell'energia stessa (fanno eccezione a tale monopolio le Aziende Municipalizzate già produttrici).

Le tensioni di fornitura dell'energia da parte dell'ENEL o dell'Azienda Municipalizzata locale sono :

- La bassa tensione, BT (380 -220 V) per piccole utilizzazioni ( fino a circa 100 kW ) Fornitura
- La media tensione, MT (30-20-15-10-6-5,3 kV) per medie utilizzazioni ( fino a circa 4 -5 MW )
- L'alta tensione, AT (220,150 o 132 kV) per grandi utilizzazioni

La cosiddetta **tariffa binomia**, applicata agli utilizzatori tiene conto di due fattori:

- la potenza impiegata (€/kW);
- l'energia consumata (€/kWh)

Viene inoltre applicata una penale per consumi a fattore di potenza < 0,9.

Spesso i grandi utilizzatori hanno anche un sistema di produzione autonomo dell'energia elettrica. I sistemi di **autoproduzione** sono finalizzati ai seguenti scopi :

- alimentazione dei sistemi essenziali dello stabilimento, in caso di interruzione della fornitura;
- risparmio energetico e minor costo dell'energia elettrica;
- riduzione delle punte di carico.

Se l'energia elettrica viene fornita o prodotta a tensione maggiore di quella di utilizzazione, si deve provvedere alla trasformazione prima di alimentare le utenze: ciò avviene nelle **cabine di trasformazione**. Di seguito viene descritto uno schema di principio di una cabina di trasformazione con i principali componenti e la corrispondenza con l'armadio contenente i circuiti:

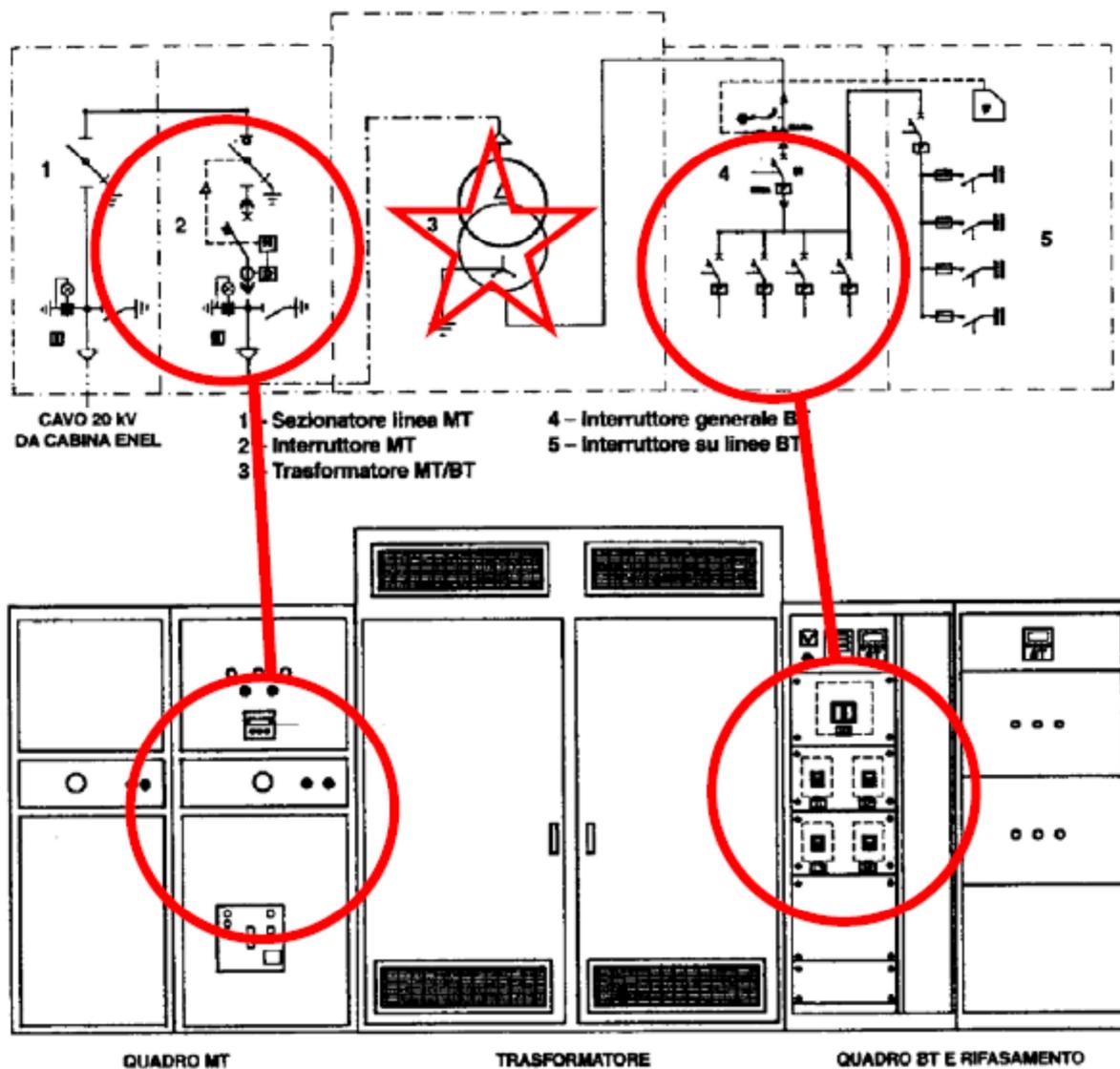
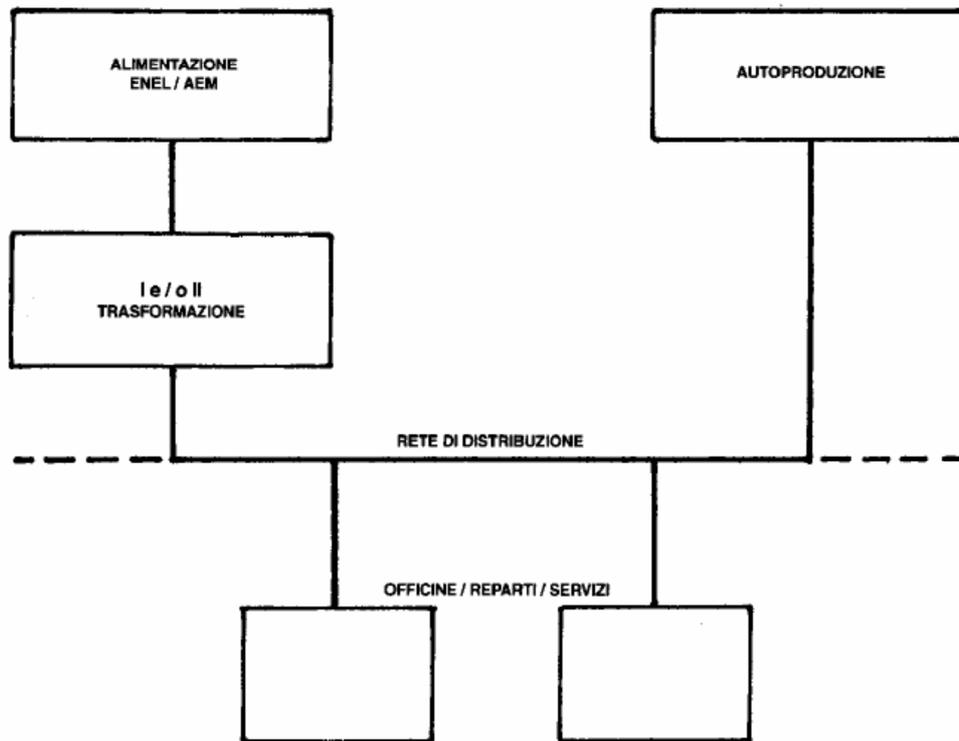


Figura 58 – Schema di una cabina di trasformazione

Dopo la trasformazione oppure nei casi in cui la corrente ha già la tensione richiesta alle utenze, si deve alimentare queste ultime mediante appositi **sistemi di distribuzione**.

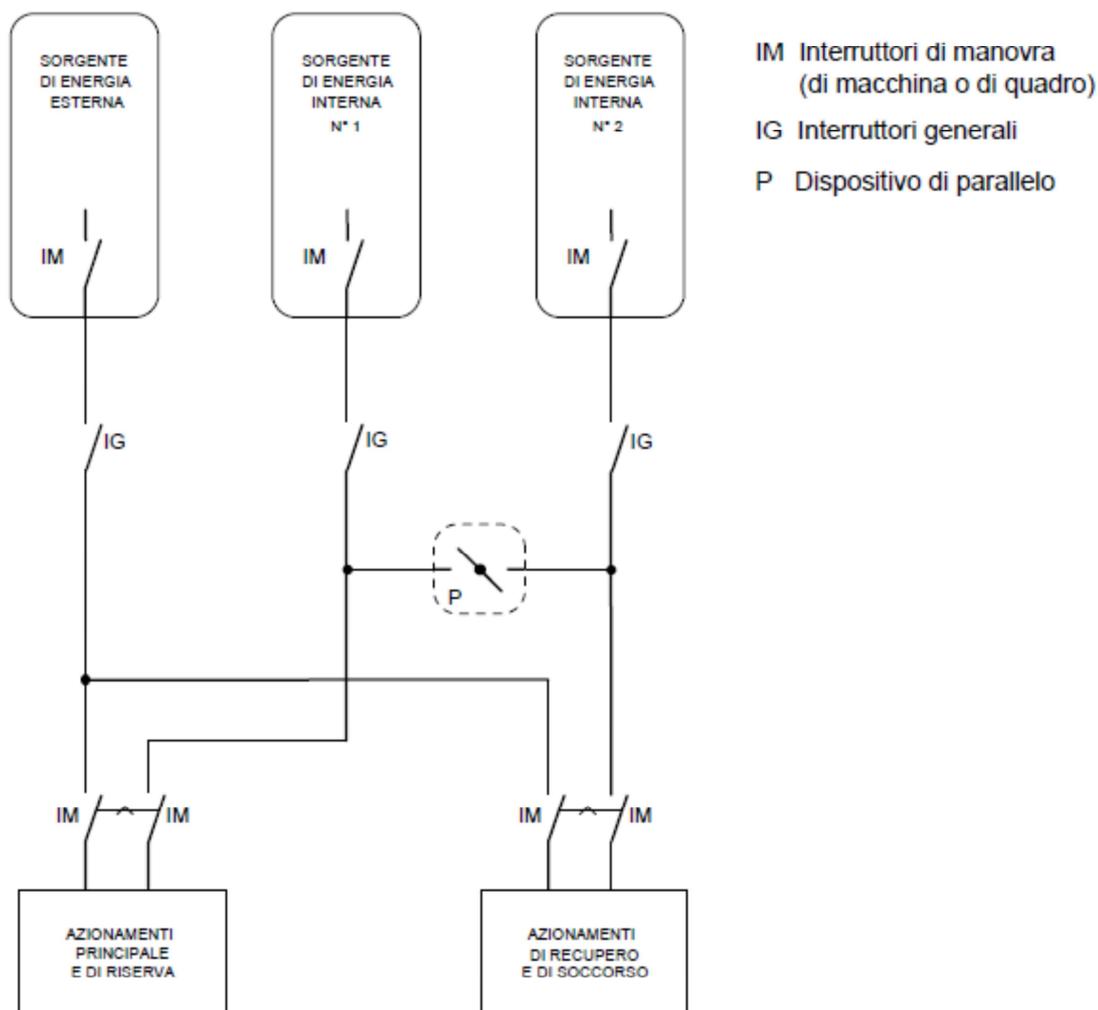
Di seguito viene presentato lo schema di principio di un sistema di distribuzione.



**Figura 59 – Schema di principio di un sistema di distribuzione**

Di seguito sono presentati alcuni schemi di principio di sistemi di distribuzione elettrica previsti dalla normativa PTS IE per gli impianti a fune.

Nel primo caso si tratta di un sistema con doppia sorgente di energia interna.



**Figura 60 – Sistema di distribuzione con doppia sorgente interna**

Nel secondo caso si tratta di un sistema centralizzato con più sorgenti interne che alimentano gli azionamenti di impianti diversi:

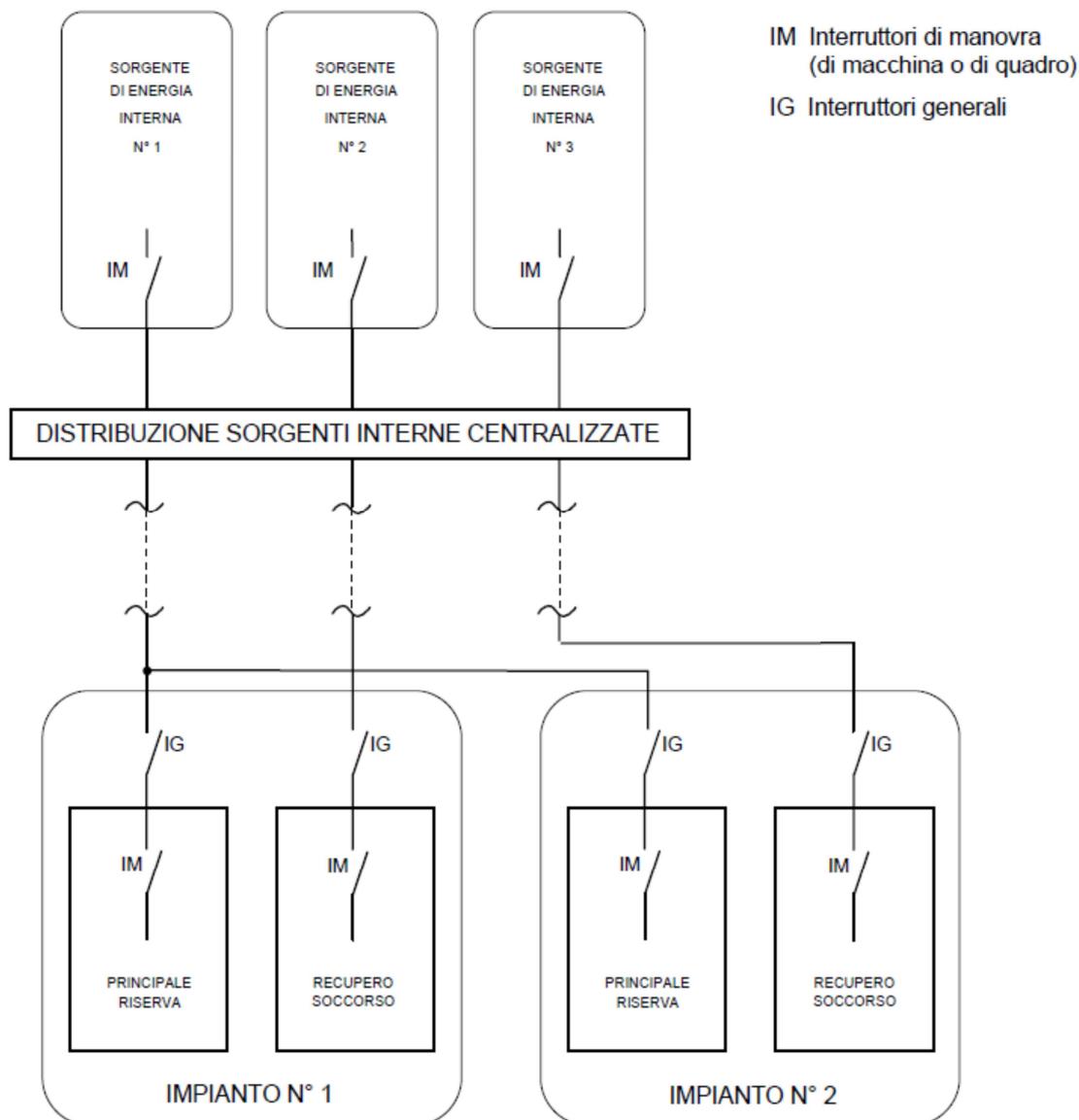


Figura 61 – Schema di distribuzione con più sorgenti interne che alimentano più impianti

## 4.7 La sicurezza negli impianti elettrici

### 4.7.1 Tipologie di guasto e dispositivi di protezione

Negli impianti elettrici possono verificarsi guasti o malfunzionamenti. Le principali situazioni anomale in cui un impianto elettrico si può trovare sono:

- **cortocircuito:** problema dovuto a un difetto d'isolamento (impianto guasto) tra due conduttori attivi dell'impianto (quelli in cui scorre normalmente la corrente di impianto), che provoca generalmente un innalzamento incontrollato della cosiddetta corrente di guasto e quindi può danneggiare le apparecchiature e indirettamente le persone;
- **dispersione elettrica:** problema dovuto a un difetto d'isolamento (impianto guasto) tra un conduttore attivo e le masse o la terra del sistema. Siccome l'isolamento non è mai perfetto, anche a impianto sano una minima dispersione è sempre presente e entro certi limiti accettabile, ma se si

verifica un guasto questa diventa pericolosa per le persone, in quanto possono venire a contatto con masse erroneamente sotto tensione;

- **sovraccarico:** problema dovuto a un dimensionamento sbagliato dei conduttori o a carichi troppo elevati (impianto sano). In questo caso la corrente troppo elevata per un tempo lungo può danneggiare gli isolamenti dei conduttori attivi dell'impianto, e quindi provocare cortocircuiti e dispersioni con conseguente danneggiamento delle apparecchiature e rischio per le persone;
- **sovratensione:** problema dovuto a un fulmine o a un altro effetto fisico indesiderato (impianto sano), che danneggia le apparecchiature.

Per evitare che questi eventi producano danni alle persone o alle cose, devono essere installati appositi dispositivi di protezione. I principali dispositivi sono:

- **interruttore magnetotermico:** è un dispositivo per la protezione dell'impianto, che integra sia una protezione magnetica per i cortocircuiti, sia una protezione termica per i sovraccarichi;
- **interruttore differenziale** (generalmente noto come "salvavita"): è un dispositivo per la protezione delle persone, che protegge dalle dispersioni elettriche;
- **interruttore magnetotermico differenziale:** è un dispositivo per la protezione di impianto e persone, che integra tutt'e tre le protezioni magnetica, termica e differenziale;
- **fusibile:** è un dispositivo per la protezione contro le sovracorrenti, negli impianti domestici è utilizzato quasi esclusivamente per la protezione di piccoli utilizzatori come alimentatori per impianti citofonici o trasformatori per campanelli, in ambito industriale trova impiego comune nella protezione dei motori contro i cortocircuiti; dev'essere sostituito ogni volta che interviene;
- **scaricatore:** è un dispositivo per la protezione dell'impianto, che protegge dalle sovratensioni.
- **salvatore:** è un interruttore magnetotermico specifico per la protezione dei motori contro sovraccarichi e cortocircuiti, con soglia d'intervento termico tarabile; spesso è sostituito da un interruttore termico per motori abbinato a fusibili.

Inoltre, perché gli interruttori differenziali possano funzionare adeguatamente devono essere coordinati con un impianto di messa a terra, ma il loro utilizzo è indispensabile (oltre che obbligatorio) in alcuni casi anche negli impianti che ne sono privi.

## 4.7.2 Effetti della corrente nel corpo umano

I pericoli derivanti dal contatto di una persona con una parte in tensione derivano dal conseguente passaggio della corrente nel corpo umano.

Tali effetti possono così riassumersi:

- tetanizzazione: contrazione dei muscoli interessati al passaggio della corrente e difficoltà a staccarsi dalla parte in tensione;
- arresto respiratorio;
- fibrillazione ventricolare;
- ustioni.

Le norme forniscono una guida sugli effetti della corrente attraverso il corpo umano, da utilizzare nella definizione dei requisiti per la sicurezza elettrica.

La norma identifica graficamente quattro zone con le quali sono stati distinti gli effetti fisiologici in relazione all'entità della corrente alternata che attraversa il corpo umano.

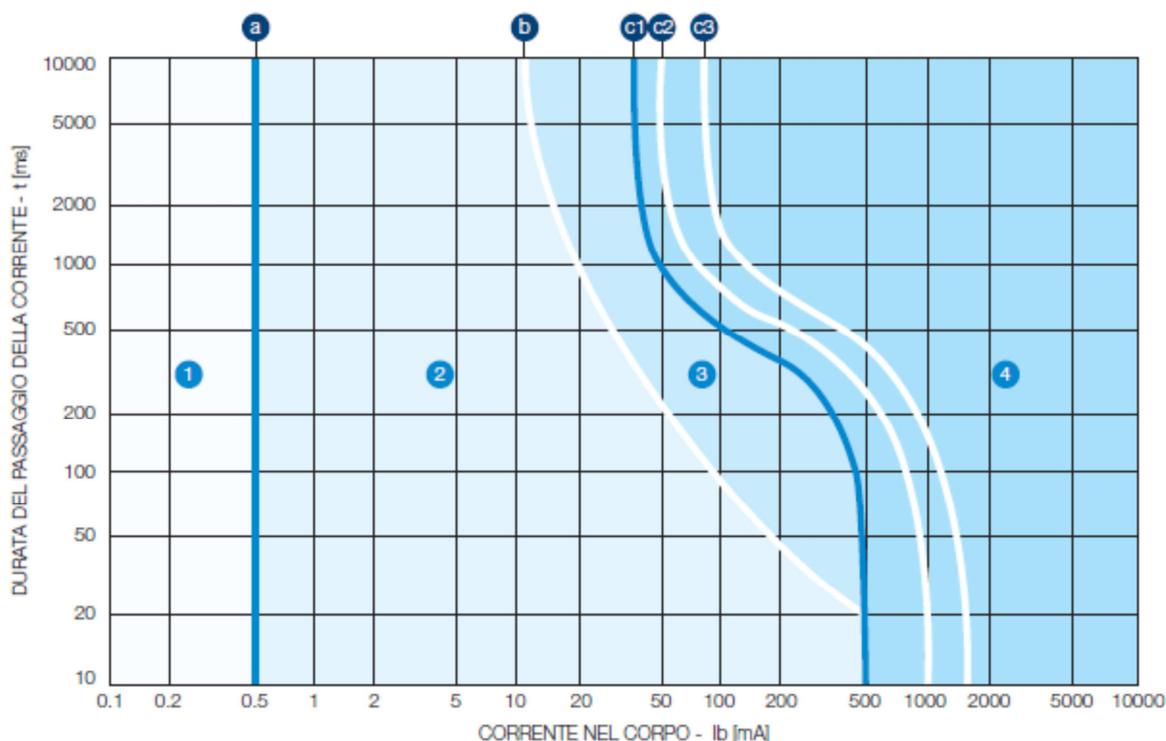


Figura 62 – Zone di pericolosità della corrente in relazione alla durata e all'intensità

Zona	Effetti
1	Abitualmente nessuna reazione
2	Abitualmente nessun effetto fisiologicamente pericoloso
3	Abitualmente nessun danno organico. Probabilità di contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria; disturbi reversibili nella formazione e conduzione di impulsi nel cuore, inclusi fibrillazione atriale e arresto cardiaco provvisorio senza fibrillazione ventricolare, che aumentano con l'intensità della corrente e il tempo
4	In aggiunta agli effetti della zona 3, la probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta fino a circa il 5% (curva c2), al 50% (curva c3), oltre il 50% al di là della curva c3. Effetti patofisiologici come arresto cardiaco, arresto respiratorio, gravi ustioni possono presentarsi con l'aumentare dell'intensità della corrente e del tempo

Figura 63 – Effetti della corrente nel corpo umano

Il fenomeno meglio conosciuto come “scossa” elettrica, viene propriamente detto elettrocuzione, cioè condizione di contatto tra corpo umano ed elementi in tensione con attraversamento del corpo da parte della corrente.

La gravità delle conseguenze dell'elettrocuzione dipende dall'intensità della corrente che attraversa l'organismo, dalla durata di tale evento, dagli organi coinvolti nel percorso e dalle condizioni del soggetto.

Il corpo umano è un conduttore che consente il passaggio della corrente offrendo, nel contempo, una certa resistenza a tale passaggio. Minore è la resistenza, maggiore risulta la quantità di corrente che lo attraversa.

Detta resistenza non è quantificabile in quanto varia da soggetto a soggetto, anche in funzione delle differenti condizioni in cui il medesimo soggetto si può trovare al momento del contatto. Molteplici sono i fattori che concorrono a definirla e che in sostanza non consentono di creare un parametro di riferimento comune che risulti attendibile.

Condizione necessaria perché avvenga l'elettrocuzione è che la corrente abbia, rispetto al corpo, un punto di entrata e un punto di uscita. Il punto di entrata è di norma la zona di contatto con la parte in tensione. Il punto di uscita è la zona del corpo che entra in contatto con altri conduttori consentendo la circolazione della corrente all'interno dell'organismo seguendo un dato percorso.

La Curva C1 della figura precedente mostra che quando una corrente maggiore di **30 mA** passa per un tempo maggiore di 5 secondi circa attraverso un corpo umano dalla mano al piede (è il caso più frequente), la persona rischia di essere uccisa, a meno che la corrente non venga interrotta in un tempo relativamente breve.

Data la resistenza media di un corpo umano dalla mano al piede, a 30 mA corrispondono circa **50 V**. Di seguito si vedrà che tale tensione viene indicata come tensione minima ammessa (**tensione minima di contatto**) dalle parti conduttrici dei dispositivi di un impianto elettrico che possono venire in contatto con i conduttori sotto tensione in caso di guasto.

La protezione delle persone contro le scosse elettriche in impianti di bassa tensione devono essere fornite in conformità con adeguate norme e disposizioni di legge, codici di condotta, guide ufficiali, ecc. Le norme più rilevanti includono la CEI 64-8, CEI EN 61008, CEI EN 61009, CEI EN 60947-2 e CEI EN 62423.

### 4.7.3 Contatti diretti e indiretti

La scossa elettrica è generata quando il corpo umano viene a contatto con superfici conduttive **di diverso potenziale**. Esistono due tipi di contatti che causano la scossa elettrica:

- **Contatto diretto**
- **Contatto indiretto**

**Contatto diretto:** si ha quando una persona tocca accidentalmente una parte attiva o conduttori che sono normalmente attivi. In questa situazione, la persona diventa parte del circuito elettrico per mezzo della resistenza del corpo e della resistenza di terra.

**Contatto indiretto:** si ha quando una persona entra in contatto con una massa in tensione per guasto. In questa evenienza, all'interno del suo corpo fluisce una corrente dovuta alla tensione di contatto. Può verificarsi in mancanza di una appropriata manutenzione o per il deterioramento dell'isolamento.

Nota: con il termine **massa** si intende una qualsiasi parte conduttrice, facente parte dell'impianto elettrico, che può essere toccata e che non è in tensione in condizioni ordinarie di isolamento, ma che può andare in tensione in caso di un cedimento dell'isolamento principale.

#### Protezione dal contatto diretto

Per prevenire il contatto diretto si può procedere nei seguenti modi:

- isolare le parti attive. Questo è considerato il metodo standard ;
- utilizzare involucri con adeguato grado di protezione IP per prevenire il contatto;
- barriere per impedire l'accesso alle parti pericolose. Questa protezione è riservata in luoghi dove l'accesso è consentito solo a personale esperto.
- Usare un interruttore differenziale, con corrente differenziale nominale d'intervento inferiore o uguale a 30 mA. Questo è riconosciuto come **protezione aggiuntiva** contro i contatti diretti in caso di insuccesso delle altre misure di protezione o di incuria da parte degli utilizzatori.

### Protezione dal contatto indiretto

Per assicurare la protezione dai contatti indiretti in caso di guasto, si devono prevedere adeguati provvedimenti che prevengano l'insorgere di tensioni di contatto pericolose. Per prevenire il contatto indiretto esistono diverse modalità di protezione:

- Con interruzione automatica del circuito (interruttori magnetotermici, interruttori differenziali, ecc...),
- Senza interruzione automatica del circuito (doppio isolamento, separazione elettrica,...),
- Bassissima tensione di alimentazione.

### 4.7.4 Classificazione dei sistemi di distribuzione elettrica

L'entità del guasto a terra e le conseguenze che derivano dal contatto con masse in tensione sono legate in modo determinante allo stato del neutro del sistema di alimentazione e alla modalità di connessione delle masse verso terra.

Per scegliere opportunamente il dispositivo di protezione contro i guasti a terra occorre quindi conoscere il sistema di distribuzione dell'impianto. La norma italiana CEI 64-8/3 classifica i sistemi elettrici con la combinazione di due lettere.

La prima lettera indica la situazione del sistema di alimentazione verso terra:

- T = collegamento diretto a terra di un punto, in c.a., in genere il neutro;
- I = isolamento da terra, oppure collegamento a terra di un punto, generalmente il neutro, tramite un'impedenza.

La seconda lettera indica la situazione delle masse dell'impianto elettrico rispetto a terra:

- T = masse collegate direttamente a terra;
- N = masse collegate al punto messo a terra del sistema di alimentazione

Eventuali lettere successive indicano la disposizione dei conduttori di neutro e di protezione:

- S = funzioni di neutro e protezione svolte da conduttori separati;
- C = funzioni di neutro e protezione svolte da un unico conduttore (conduttore PEN).

Con riferimento a queste definizioni di seguito sono illustrati i principali sistemi di distribuzione

#### 4.7.4.1 Sistema TT

Nel sistema TT il neutro e le masse sono collegati a due impianti di terra elettricamente indipendenti (figura seguente).

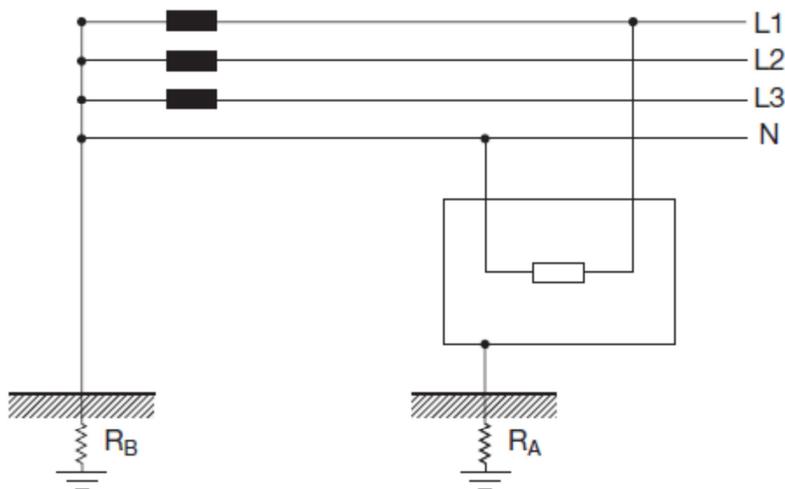


Figura 64: Schema di un sistema TT

In impianti di questo tipo il neutro viene normalmente distribuito e la sua funzione è quella di rendere disponibile la tensione di fase (es. 230 V), utile per l'alimentazione dei carichi monofase degli impianti civili.

#### 4.7.4.2 Sistema TN

Nel sistema TN il neutro è connesso direttamente a terra mentre le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro.

Il sistema elettrico TN si distingue in tre tipi a seconda che i conduttori di neutro e di protezione siano separati o meno:

1. TN-S: il conduttore di neutro N e di protezione PE sono separati

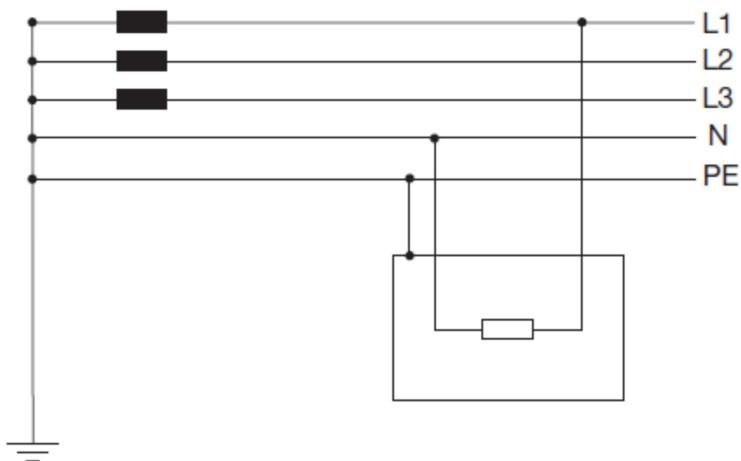
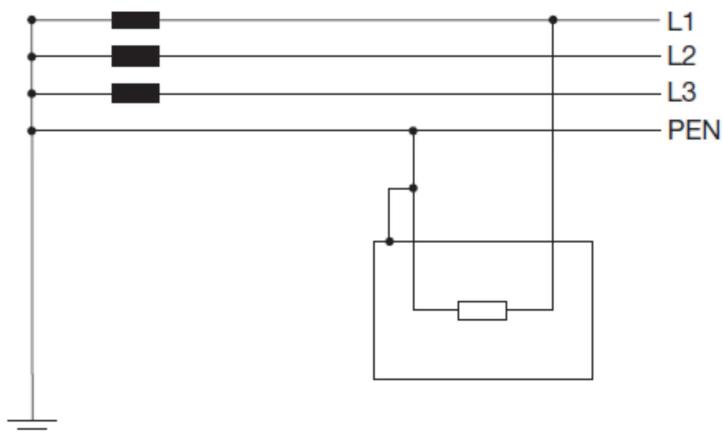


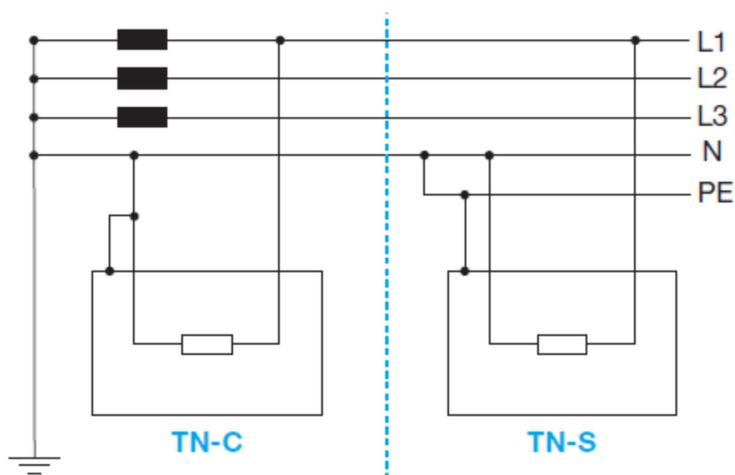
Figura 65: Schema di un sistema TN-S

2. 1.TN-C: le funzioni di neutro e di protezione sono combinate in un unico conduttore definito PEN



**Figura 66: Schema di un sistema TN-C**

3. TN-C-S: le funzioni di neutro e di protezione sono in parte combinate in un solo conduttore PEN ed in parte separate PE + N.



**Figura 67: Schema di un sistema TN-C**

### 4.7.4.3 Sistema IT

Il sistema elettrico IT non ha parti attive collegate direttamente a terra ma può avere parti attive collegate a terra tramite un'impedenza di valore elevato. Tutte le masse, singolarmente o in gruppo, sono connesse ad un impianto di terra indipendente.

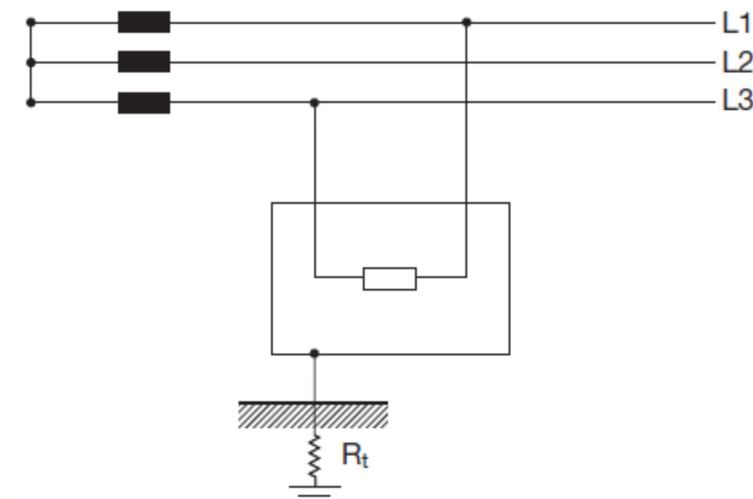


Figura 68: Schema di un sistema IT

La corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso l'impianto di terra delle masse  $R_t$  e le capacità verso terra dei conduttori di linea.

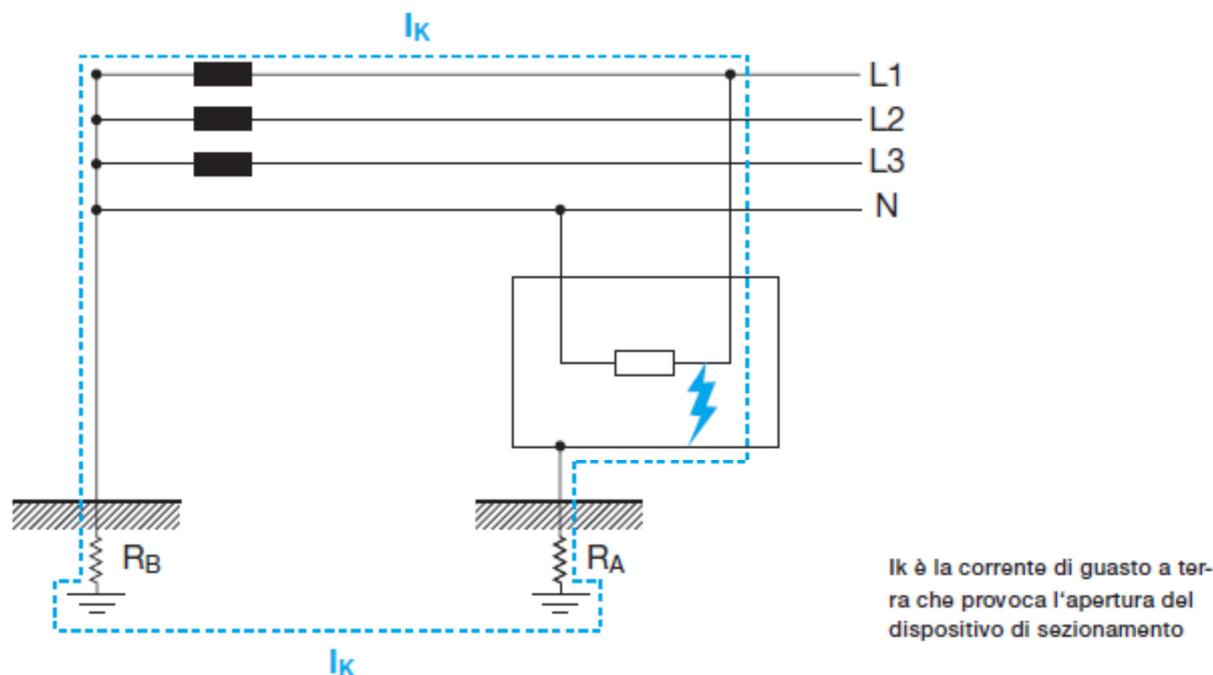
### 4.7.5 Protezione con i differenziali

#### Sistemi TT

Il sistema TT differisce dal sistema TN-C-S in cui non vi è alcuna connessione tra il conduttore di protezione (PE) e la protezione del neutro, e invece si basa sul collegamento a terra locale.

Impedenze risultanti nel percorso di ritorno a terra tra il carico e l'origine della fornitura può impedire il funzionamento di dispositivi di protezione in caso di sovracorrente per un guasto a terra. Ciò può portare la struttura metallica a raggiungere tensioni di contatto pericolose e anche dare luogo a rischi di incendio a causa del flusso sostenuto di correnti di guasto a terra se il dispositivo di protezione da sovracorrente non funziona.

**L'utilizzo di interruttori differenziali nei sistemi TT per la protezione di terra sono quindi obbligatori in tutti i casi. Interruttori differenziali sono utilizzati per fornire protezione contro i contatti diretti e contatti indiretti in sistemi TT.**



**Figura 69: Corrente di guasto in un sistema TT**

Dalla norma CEI 64-8 si ricava che la taratura dell'interruttore differenziale (corrente differenziale di intervento e ritardo di intervento), deve essere tale da garantire che la tensione delle masse in caso di guasto non superi i 50V. Tale valore dipende dalla resistenza dei dispersori di terra  $T_A$  e  $T_B$ .

Questo significa che, se opportunamente scelta la resistenza del dispersore di terra, in caso di guasto, bisogna scegliere il differenziale con una corrente di intervento tale che la massa dell'apparecchio non superi i 50V entro il tempo di intervento di 1 secondo (per le abitazioni civili corrisponde a 30 mA).

I 50V sono convenzionalmente stabiliti come la massima tensione che il corpo umano in generale può mantenere per un tempo indefinito (in pratica 5 secondi), e che quindi la massa di un apparecchio sotto tensione in caso di guasto può mantenere per un tempo indefinito.

Questo è giustificato dal fatto che, vista la resistenza mano-piedi che il corpo umano della maggioranza della popolazione presenta in condizioni ordinarie, vista la resistenza di contatto piedi-terreno, ai 30mA di corrente definiti nel capitolo 4.7.3 come massima corrente sopportabile dal corpo umano, corrispondono circa 50V.

Quindi questo valore è stato preso come limite di tensione che le masse degli apparecchi di un impianto elettrico possono assumere in caso di guasto. Se lo superano, deve scattare un sistema di protezione automatico entro un tempo prestabilito.

Per forniture temporanee (cantieri, ...) e locali agricoli e ortofrutticoli, il valore di 50 V è sostituito da 25 V.

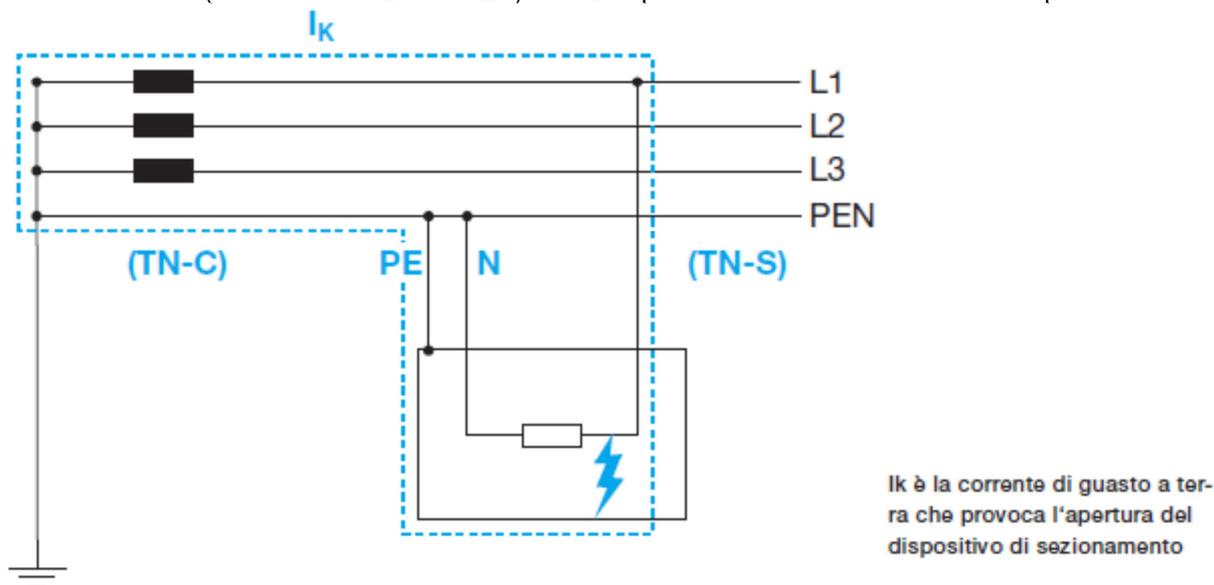
L'utilizzo di interruttori differenziali nei sistemi TT per la protezione di terra sono quindi obbligatori in tutti i casi. Interruttori differenziali in questo caso sono utilizzati per fornire protezione contro i contatti diretti e contatti indiretti.

I tempi di intervento degli interruttori differenziali di tipo generale (non ritardati) e di tipo selettivo (tipo S) sono inferiori a quelli richiesti per la protezione dai contatti indiretti, valutando il tempo di intervento per una corrente di guasto pari a  $5 I_{\Delta n}$  (valore tipicamente considerato come corrente presunta di guasto).

La norma specifica che per ottenere selettività con i dispositivi di protezione a corrente differenziale nei circuiti di distribuzione è ammesso un tempo di interruzione non superiore a 1 s.

## Sistema TN

Nei sistemi TN la corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso un collegamento metallico diretto (conduttore PE o PEN) senza praticamente interessare il dispersore di terra.



**Figura 70: Corrente di guasto in un sistema TN**

Generalmente si utilizzano interruttori magnetotermici, ma gli Interruttori differenziali sono utilizzati principalmente contro i contatti diretti e forniscono in alcuni casi protezione contro i contatti indiretti. La sensibilità nominale di funzionamento degli interruttori differenziali destinati per la protezione contro i contatti diretti non deve essere superiore a 30 mA.

Gli interruttori differenziali sono raccomandati nei sistemi TN per circuiti molto lunghi e all'esterno degli edifici.

Per realizzare una corretta protezione contro i contatti indiretti in un sistema TN tramite la disconnessione automatica del circuito in accordo alla norma CEI 64-8, è necessario rispettare la seguente relazione:

$$Z_s \times I_a \leq U_0$$

Dove:

- $Z_s$  è l'impedenza dell'anello di guasto che comprende la sorgente, il conduttore attivo fino al punto di guasto e il conduttore di protezione tra il guasto e la sorgente [ $\Omega$ ];
- $U_0$  è la tensione nominale verso terra [V] (corrisponde in linea generale alla tensione di alimentazione fornita dalla rete di distribuzione elettrica)
- $I_a$  è la corrente che provoca l'interruzione automatica del dispositivo di protezione, entro il tempo definito in tabella in funzione della tensione nominale  $U_0$  per i circuiti terminali con correnti non superiori a 32 A ed entro un tempo convenzionale non superiore a 5 s; se si usa un interruttore differenziale  $I_a$  è la corrente differenziale nominale di intervento.

$U_0$ [V]	T [s]
$50 < U_0 \leq 120$	0,8
$120 < U_0 \leq 230$	0,4
$230 < U_0 \leq 400$	0,2
$U_0 > 400$	0,1

Questo comporta che, data la tensione di alimentazione dell'impianto, data l'impedenza dei linee di alimentazione della rete elettrica, bisogna scegliere in generale dei dispositivi, interruttori magnetotermici o differenziali, in grado di interrompere il circuito entro i tempi indicati in tabella, quando scorre la corrente di guasto.

Questo sistema garantisce la sicurezza, a condizione che tutte le masse dell'impianto siano collegate correttamente al neutro tramite il conduttore equipotenziale PE (**equipotenzialità delle masse**). In questo modo, fino al momento in cui scatta l'interruttore automatico, la corrente di guasto non potrà portare la massa in guasto ad una tensione pericolosa, rispetto al resto dell'impianto (la differenza di potenziale tra la massa in guasto e il resto dell'impianto collegato al neutro, non sarà mai superiore ai 50V), anche se la corrente di guasto è di centinaia di ampère.

### Sistemi IT

Generalmente è utilizzato dove è richiesta la continuità di servizio. L'uso dei sistemi IT si limita ad applicazioni speciali quali sale operatorie di un ospedale, teatri, miniere, ecc, dove la continuità della fornitura in una prima condizione di guasto a terra e di fondamentale importanza.

I sistemi IT sono caratterizzati dall'assenza di un collegamento diretto dell'alimentazione a terra o collegamento a terra tramite un'impedenza relativamente alta che nega l'uso di interruttori differenziali su tale sistemi.

Nel sistema IT il primo guasto a terra non dovrebbe causare alcuno sgancio, mentre al secondo guasto deve intervenire rapidamente una disconnessione. Gli interruttori differenziali sono adatti per lo sgancio in caso di secondo guasto.

E' una tipologia di impianto non utilizzata negli impianti funiviari, per cui non viene trattata nel dettaglio.

## 4.8 Dispositivi di interruzione della corrente

### 4.8.1 Interruttori, deviatori, sezionatori

L'**interruttore** è un dispositivo elettrico o anche un dispositivo elettronico in grado di interrompere un circuito elettrico. Un particolare tipo di interruttore è il relè. Infatti le tipologie dell'interruttore sono analoghe a quelle definiti per i relè nel capitolo precedente.

Simbolo grafico dell'interruttore a singolo polo e bipolare.



Figura 71 – Simbolo grafico degli interruttori

Quando l'interruttore è configurato in modo da consentire il passaggio di corrente si definisce chiuso quando invece il passaggio è interdetto si definisce aperto (è l'opposto della terminologia usata in idraulica).

Esiste una varietà immensa di interruttori. Nella forma più elementare l'interruttore è costituito da due contatti metallici che possono essere mossi per entrare in contatto o per essere separati. Dispositivi più

complessi possono agire contemporaneamente su più circuiti, per esempio per interrompere contemporaneamente le tre linee nel sistema trifase.

Ogni contatto di un circuito separato è chiamato **polo**. Alcuni interruttori hanno una configurazione complessa di contatti, in cui per esempio quando un contatto viene aperto viene chiuso in contemporanea (con la stessa manovra) un altro circuito. In questo caso si ha un deviatore o un commutatore.

Un particolare tipo di interruttore, è il cosiddetto **interruttore a consenso**, chiamato così perché, una volta azionato, non torna automatica mente alla condizione di riposo, ma solo se viene premuto un pulsante di consenso.

Il **deviatore**, in elettrotecnica, è un particolare interruttore che al posto di interrompere il flusso di corrente di un cavo elettrico (come invece fa l'interruttore), devia questo su di un altro cavo. La versione più semplice è definito a una via. Esistono versioni multivia adatti a deviare più fili contemporaneamente.

Simbolo grafico del deviatore a singola via

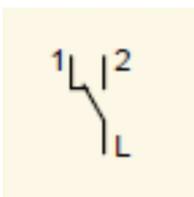


Figura 72 – Simbolo grafico di un deviatore

Il **sezionatore** è un dispositivo elettrico in grado di aprire un circuito in modo certo e visibile.

Sezionare significa separare due punti elettricamente connessi, in modo che non ci sia più continuità metallica tra essi. Lo scopo del sezionatore è quello di garantire la sicurezza dell'impianto e soprattutto delle persone, poiché interrompe fisicamente e visivamente il tronco di linee su cui si lavora, assicurandosi tra l'altro contro le richiuse involontarie, ed il suo stato è visibile dagli addetti ai lavori.

Questo non avviene negli interruttori, i cui elettrodi sono generalmente racchiusi in contenitori (per assicurare la rapida estinzione dell'arco elettrico) e quindi non visibili dall'esterno. L'apertura di un sezionatore assicura che il circuito, la linea o la macchina elettrica che si trovano a valle dello stesso siano elettricamente isolati dal circuito a monte. Questa condizione è necessaria qualora si debba intervenire su un componente della rete, per esempio in caso di manutenzione.

La caratteristica principale dei sezionatori è che, a differenza degli interruttori, essi non hanno un potere di interruzione, ma solo una capacità massima di resistere chiusi al passaggio della corrente di cortocircuito. Non sono dunque progettati per l'interruzione della corrente nominale del circuito, né sono a maggior ragione concepiti per aprire un circuito in condizioni di guasto (sovraccarichi o cortocircuiti), ma solamente per l'apertura del circuito e quindi la messa in sicurezza del circuito stesso. Esistono però alcune varianti del sezionatore, come il sezionatore di manovra, dispositivo avente le stesse caratteristiche e impieghi del sezionatore, ma capace anche di estinguere archi elettrici, quindi di interrompere le correnti nominali circolanti.

Il **pulsante** svolge la stessa funzione dell'interruttore con la differenza che ha una sola posizione stabile; al termine della pressione del dito dell'operatore un sistema a molle richiama alla posizione di partenza i contatti ed il tasto di comando.

Nell'impiantistica è utilizzabile ogni qualvolta si debba comandare un apparecchio con funzionamento ad impulsi; il caso più noto è il comando di una suoneria, ma si realizzano con pulsanti anche l'azionamento di una elettroserratura od applicazioni con attuatori come i relè, di cui si parlerà nelle pagine successive.

Il pulsante ha poi innumerevoli impieghi sulle apparecchiature elettroniche; sono pulsanti i tasti telefonici, quelli dei telecomandi, della tastiera di un computer, ecc.

Elettricamente esistono due versioni fondamentali del pulsante, la più utilizzata è definita di tipo NO (normally open), significa cioè che il contatto è normalmente aperto.

L'altra versione è la NC (normaly closed) cioè un pulsante con contatto normalmente chiuso.



Figura 73 – Simboli grafici di pulsanti NO e NC

Di seguito altri esempi di pulsanti particolari:

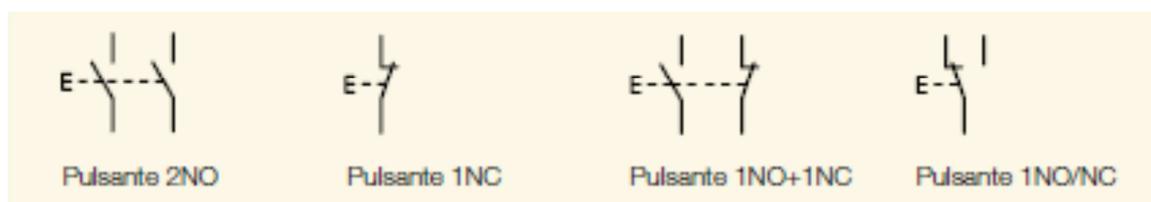


Figura 74 – Simboli grafici di alcuni tipi di pulsanti

## 4.8.2 Fusibili

Il fusibile è un semplice dispositivo elettrico in grado di proteggere da eventuali cortocircuiti, in grado di interrompere il flusso di corrente se questa supera una soglia prefissata.

Sono costituiti da un contenitore generalmente cilindrico, in vetro oppure porcellana, al cui interno è presente un filo metallico che unisce due terminali di contatto. Il filo è dimensionato in modo tale da fondere (a causa del calore prodotto per effetto Joule) se la corrente che lo attraversa supera un valore limite. Nei modelli per correnti elevate il filo è immerso in sabbia, che ha lo scopo di spegnere rapidamente l'arco elettrico che può formarsi all'apertura del circuito, ed inoltre il contenitore è generalmente ceramico, per maggiore solidità.

L'insieme costituito dall'elemento fusibile, dal contenitore e dai contatti si definisce **cartuccia** e costituisce la parte che deve essere rimossa per la sostituzione dopo l'intervento protettivo. Le parti fisse per il collegamento al circuito esterno costituiscono la **base**; in talune soluzioni costruttive può anche essere presente un **portacartuccia**, che costituisce una parte amovibile del fusibile prevista per mantenere nella sua sede la cartuccia.

Se nei piccoli fusibili in vetro si può osservare in trasparenza l'integrità del filo, nelle cartucce opache è spesso presente un elemento mobile su un contatto, trattenuto dal filo interno. Se questo si interrompe, l'elemento indicatore si stacca o comunque segnala l'evento.

Oltre che dalla **soglia di corrente** in Ampere ed il **tipo di cartuccia**, la scelta di un fusibile è determinata anche dal **potere di interruzione** e dalla **rapidità di intervento**. I modelli per la protezione di impianti elettrici sono in genere lenti, per sopportare le brevissime ma intense sovracorrenti prodotte dall'avviamento di motori elettrici. Modelli ultraveloci vengono invece impiegati per salvaguardare i delicati circuiti a transistor. Ogni fusibile presenta una sua curva caratteristica, in cui il tempo di intervento è funzione della corrente.



Figura 75 – Foto di diverse tipologie di fusibili

### 4.8.3 Relé e contattori

I relè e contattori (o teleruttori) sono degli interruttori non comandati manualmente, ma per mezzo di opportune tensioni e correnti. Questi dispositivi sono l'anello di collegamento tra circuiti di comando e circuiti di potenza.

Molti costruttori identificano anche i relè sotto un'unica voce "contattore", mentre per altri la differenza tra un relè ed un contattore sta nelle correnti di contatto. Per correnti di contatto s'intende il valore massimo (espresso in "A" ampere) sopportabile dagli elementi interni che svolgono la funzione d'interruttore. Nei relè tale valore non è mai superiore a 16°, quindi sono utilizzati in circuiti a bassa potenza, mentre i contattori possono essere definiti degli interruttori di potenza. Possono essere differenti dai contattori anche per il loro aspetto fisico o per i diversi sistemi di fissaggio.

I relè e contattori più utilizzati hanno un solo stato stabile e sono anche definiti **monostabili**. I contattori inoltre possono avere dei contatti supplementari meccanicamente ed elettricamente più piccoli dei principali che possono essere usati come comando e segnalazione.

Il relè rappresentato in figura è ad un solo contatto e tale contatto è **normalmente aperto** (NO: Normally Open), cioè il passaggio della corrente nella bobina fa chiudere il contatto.

L'inverso è il **normalmente chiuso** (NC: Normally Closed).

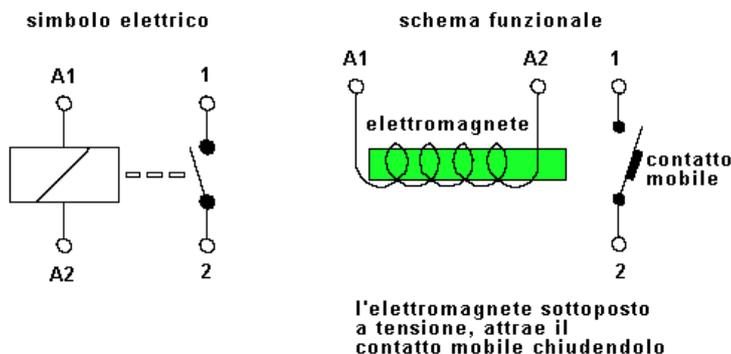


Figura 76 – Schema di principio di un relé

Il principio di funzionamento è basato sull'elettromagnetismo, cioè il campo magnetico che la corrente è in grado di creare se percorre un lungo conduttore avvolto a spirale (bobina).

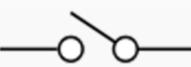
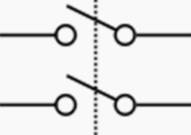
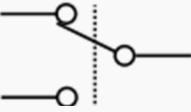
Si sfrutta l'effetto calamita della bobina per attirare un'ancora metallica la quale determinerà il movimento di uno o più contatti; al cessare della corrente, il ritorno dell'ancora nella posizione di partenza è dato da una molla.

Applicando tensione alla bobina di un relè, si ottiene una variazione dello stato del contatto, da "0" a "1". Al cessare della tensione applicata ai capi della bobina, il contatto si riporta allo stato iniziale, da "1" a "0".

Oltre alla tensione di funzionamento della bobina è importante conoscere altri parametri, come la tensione d'isolamento dei contatti e la corrente che essi possono sopportare.

La tensione d'isolamento, deve essere sempre maggiore della tensione di funzionamento del circuito di potenza. La corrente di contatto, deve risultare maggiore del valore della corrente di lavoro del circuito di potenza e maggiore dell'eventuale corrente di picco del circuito stesso.

A seconda del numero di contatti possono essere classificati nella maniera seguente:

Sigla ed abbreviazioni	Significato della sigla	Descrizione	Simbolo
<b>SPST</b>	Singolo polo, singolo contatto (Single pole, single throw)	È un semplice interruttore on-off: agendo sull'interruttore i due contatti possono essere connessi e disconnessi tra di loro.	
<b>SPDT</b>	Singolo polo, doppio contatto (Single pole, double throw)	Semplice deviatore con un contatto (COM, Common) che può essere connesso o con L1 o con L2.	
<b>SPCO SPTT, c.o.</b>	Deviatore con posizione centrale stabile (Single pole, centre off or Single Pole, Triple Throw)	Simile al SPDT. Il contatto SPCO/SPTT presenta un'altra posizione stabile centrale non collegata agli altri due terminali	
<b>DPST</b>	Doppio polo, singolo contatto (Double pole, single throw)	Questo interruttore equivale a due SPST controllati da un singolo meccanismo.	
<b>DPDT</b>	Doppio polo, doppio contatto (Double pole, double throw)	Equivalentente a due SPDT controllati da un solo meccanismo.	

DPCO	Deviatore con posizione centrale stabile (Single pole, centre off or Single Pole, Triple Throw)	Equivale a due DPDT. Presenta un'altra posizione stabile centrale non collegata.	
------	---	--	--

Altri tipi di relè sono quelli **bistabili**, i quali cambiano il loro stato, cioè si aprono o si chiudono solo al passaggio di una corrente sulla bobina, ma mantengono lo stato anche se la corrente si annulla. Caratteristiche di questi modelli sono l'assenza di consumo energetico per mantenere la posizione e persistenza dello stato anche dopo lo spegnimento dell'apparecchiatura che li impiega. Si dice che le apparecchiature appartenenti a questa categoria siano dotate di memoria, in quanto memorizzano il segnale che le attiva (eccitando la bobina).

Alcuni relè sono **temporizzati**, cioè sono in grado di eccitarsi con un ritardo rispetto all'istante nel quale vengono alimentati (ritardo alla eccitazione) o in grado di diseccitarsi con ritardo rispetto al momento dell'interruzione dell'alimentazione (ritardo alla diseccitazione).

#### 4.8.4 Interruttori magnetotermici e differenziali

Per **interruttore differenziale** si intende un dispositivo in grado di riconoscere l'eventuale dispersione di corrente. Nelle condizioni normali di funzionamento le correnti entranti dall'interruttore differenziale devono essere uguali alle correnti uscenti (corrente nel conduttore di fase uguale a quella nel neutro).

Nel caso di contatto diretto nel corpo umano, che fa da conduttore elettrico non isolato, si crea un passaggio di corrente, fra il circuito e la terra, che non ritorna attraverso l'interruttore differenziale. La corrente che attraversa il corpo umano e di fatto una dispersione.

Ogni volta che viene meno la condizione di uguaglianza tra le correnti entranti e uscenti, l'interruttore differenziale interviene aprendo il circuito e interrompendo l'alimentazione nel più breve tempo possibile, per evitare gli effetti dannosi del passaggio di corrente attraverso il corpo umano.

Secondo la norma CEI 64-8, la protezione addizionale per mezzo di interruttori differenziali ad alta sensibilità ( $I_{\Delta n} \leq 30$  mA) deve essere prevista nei locali ad uso abitativo per circuiti che alimentano prese con corrente nominale  $\leq 20$  A e per i circuiti che alimentano dispositivi mobili con una corrente nominale  $\leq 32$  A per l'uso all'aperto.

Questa protezione è necessaria in alcuni Paesi per i circuiti che alimentano prese nei cantieri con corrente nominale fino a 32 A e ancora più elevate se il locale è umido e / o temporaneo (come ad esempio i cantieri).

Perché si utilizza il differenziale con  $I_{\Delta n}=30$ mA? Gli interruttori differenziali ad alta sensibilità offrono la protezione contro i rischi di contatto indiretto e la protezione aggiuntiva contro i pericoli di contatto diretto. Garantiscono perciò una protezione completa.

Gli **interruttori magnetotermici** sono dispositivi che interrompono il passaggio quando questa supera un valore determinato, al fine di realizzare le seguenti funzioni:

- protezione contro i **sovraccarichi** (aumento lento della corrente oltre il limite consentito, in condizioni normali di funzionamento dell'impianto);
- protezione contro i **cortocircuiti** (aumento rapido della corrente oltre il limite consentito, in condizioni degradate dell'impianto);
- protezione contro i **contatti indiretti** (analogo al cortocircuito, ma in condizioni di guasto dell'impianto).

La protezione contro i sovraccarichi è attuata tramite lo sganciatore termico con una curva di intervento a tempo dipendente ossia con intervento tanto più rapido quanto più grande è la corrente di sovraccarico.

La protezione contro i cortocircuiti è attuata tramite lo sganciatore magnetico con una curva di intervento a tempo indipendente ossia con tempo di intervento indipendente dalla corrente di cortocircuito.

La protezione contro i contatti indiretti può essere attuata sia tramite lo sganciatore termico sia tramite lo sganciatore magnetico in quanto la corrente di guasto a terra interessa almeno una fase; se tale corrente è sufficientemente elevata può provocare lo sgancio dell'interruttore.

In questo caso, occorre coordinare il dispositivo di protezione con il sistema di distribuzione e il modo di collegamento delle masse a terra in modo da intervenire in tempi tali da limitare la durata di permanenza delle tensioni di contatto pericolose presenti nelle masse in seguito al guasto.

Gli interruttori differenziali e magnetotermici possono essere installati separatamente oppure possono essere parte di un unico dispositivo. Dagli schemi elettrici è possibile identificare questi dispositivi e come sono costituiti in base alla simbologia riportata nello schema seguente.

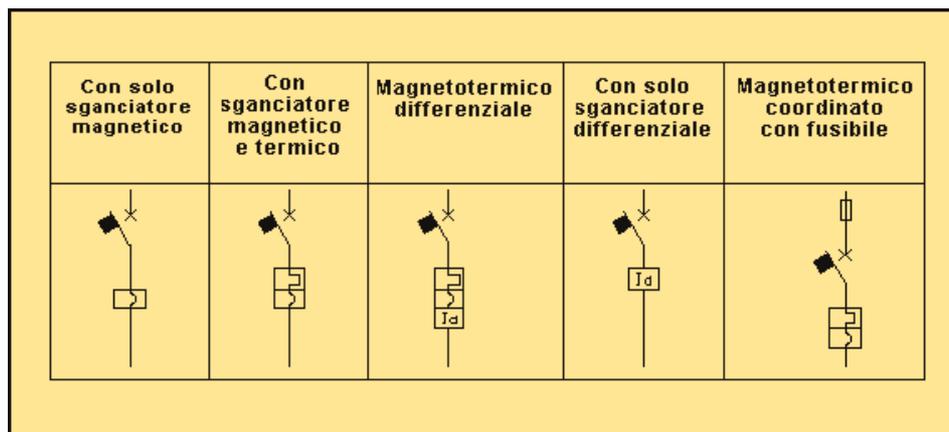


Figura 77 – Simboli grafici di interruttori magnetotermici e differenziali

## 4.9 Strumenti di misura, sensori e trasduttori

### 4.9.1 Strumenti di misura delle grandezze elettriche

#### 4.9.1.1 Amperometri e galvanometri

Sono strumenti che misurano l'intensità della corrente che passa in un conduttore. Il principio che li governa è lo stesso.

I galvanometri sono amperometri destinati a misure di piccole intensità di corrente tipiche di un laboratorio. Sono più delicati, perché caratterizzati da una meccanica più fine e di precisione.

I galvanometri più sensibili riescono a misurare intensità di corrente dell'ordine dei 10-12 A. Entrambi gli strumenti devono essere attraversati da tutta l'intensità di corrente da misurare, quindi devono essere in serie agli elementi del ramo di circuito in esame.

La loro meccanica determina una resistenza interna, da sommare in serie alla resistenza del ramo di circuito, che altera il valore della intensità di corrente da misurare. In generale, a parità di sensibilità, un amperometro (o un galvanometro) è tanto migliore, quanto più è bassa la sua resistenza interna.

In realtà oggi giorno esistono degli strumenti universali (i tester o multimetri) che permettono di misurare l'intensità di corrente, la tensione e la resistenza;



Figura 78: multimetro analogico

Essi possono essere sia analogici (figura sopra) oppure digitali (figura sotto):



Figura 79: multimetro digitale

Le funzioni di un tester vengono selezionate mediante un commutatore, oppure utilizzando le diverse prese presenti nell'apparecchio.

#### 4.9.1.2 Voltmetri

Misurano differenze di potenziale. Tipicamente è un amperometro (capace di misurare correnti dell'ordine dei mA o dei  $\mu\text{A}$ ) o addirittura un galvanometro, con internamente collegata in serie una grossa resistenza  $R$ . Se  $r$  è la resistenza interna dell'amperometro, la differenza di potenziale cercata è

$$\Delta V = (r + R) \times I$$

A parità di sensibilità, un voltmetro è tanto migliore quanto maggiore è la resistenza  $(r + R)$ . La  $R$  è necessaria perché la sola resistenza interna dello strumento, di fronte ad una elevata intensità di corrente entrante, produrrebbe forti variazioni della differenza di potenziale da misurare. Occorre allora una elevata resistenza dello strumento, ottenuta sommando in serie  $R + r$ , affinché lo strumento sia attraversato da una piccola intensità di corrente, tale inoltre da non alterare l'equilibrio ohmico del circuito.

Questo si traduce nel fatto che un voltmetro deve essere collegato in parallelo al circuito tra i due punti di cui si vuole la misura della differenza di potenziale.

#### 4.9.1.3 Altri strumenti

Altri strumenti di misura di grandezze elettriche sono i seguenti:

- **Ohmetri:** misurano la resistenza in Ohm
- **Wattmetri:** misurano la potenza attiva in Watt
- **Varmetri:** misurano la potenza reattiva in VoltAmpere

- **Frequenzimetri:** misurano la frequenza in Hertz
- **Fasometri o Cosfimetri:** misurano lo sfasamento tra corrente e tensione in gradi o numeri puri.

## 4.9.2 Sensori negli azionamenti dei motori elettrici

Il termine sensore e trasduttore vengono spesso usati alla stessa maniera per indicare dispositivi la cui funzione è convertire una generica grandezza fisica in ingresso, in una diversa in uscita.

Dal punto di vista strettamente metrologico, i due termini indicano dispositivi differenti, ma per semplicità si parlerà genericamente di **sensori**.

Per i nostri scopi si descrivono solo i sensori la cui funzione è convertire una generica grandezza fisica in ingresso, in un **segnale elettrico in uscita** (ad esempio una tensione continua) interfacciabile con i sistemi di controllo degli azionamenti elettrici o dei circuiti di sorveglianza degli impianti funiviari.

I sensori si dividono in assoluti e incrementali, in analogici e digitali, in intelligenti (se interagiscono con un computer di controllo per la manipolazione dei dati) e non intelligenti (se forniscono al computer dei semplici dati).

Di seguito sono riportati i principali dispositivi utilizzati per le misure di grandezze utilizzate negli azionamenti elettrici degli impianti funiviari. Ne esistono di altri tipi, per scopi diversi, ma non vengono qui elencati.

### 4.9.2.1 Sensori di corrente.

Il valore massimo della grandezza fisica che un amperometro può ancora apprezzare, con un errore ragionevolmente piccolo, è la portata dello strumento ed è indicato dal valore di fondo scala. Se un amperometro ha fondo scala di 1A, la misura di correnti superiori, oltre che inattendibile, rischia di danneggiare irreparabilmente lo strumento.

Per misurare correnti molto elevate, come quelle assorbite dai motori elettrici, si possono usare diversi strumenti. Generalmente questi strumenti vengono chiamati semplicemente "amperometri". In realtà gli strumenti sono più complessi, e l'amperometro vero e proprio ne costituisce solo una parte.

#### Shunt

Con opportuni accorgimenti si può "aumentare il valore di fondo scala", ovvero misurare grandezze superiori al valore massimo apprezzabile dallo strumento. Questa operazione, detta di **shunt** o **deviazione**, consiste nell'inserire resistenze opportune in parallelo allo strumento.

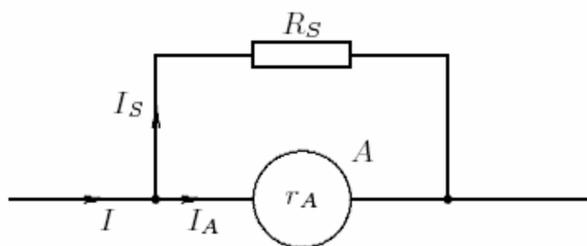


Figura 80: circuito di shunt

Tuttavia, per misurare correttamente la corrente  $I$  deve essere noto il rapporto tra la resistenza interna e quella dello shunt. Nella pratica si preferisce usare un voltmetro al posto dell'amperometro, in quanto al suo interno la resistenza  $R$  è molto elevata, e quindi si può considerare che tutta la corrente  $I$  scorra nella resistenza  $R_s$ . Di conseguenza la misura di corrente  $I$  viene ricavata dalla misura di tensione  $V_s$  ai capi della resistenza  $R_s$  tramite la legge di Ohm:

$$I_s = V_s / R_s$$

Lo shunt, opportunamente dimensionato, può essere impiegato per misurare correnti di intensità arbitrariamente alta, tenendo conto del surriscaldamento prodotto per effetto Joule, che può alterare il valore della resistenza stessa dello shunt.

Un problema presentato dallo shunt per correnti elevate è dato dalle resistenze parassite presenti nei morsetti di collegamento tra i cavi e lo shunt stesso. I valori in Ohm di queste resistenze sono aleatori e instabili, dipendendo da quanto sono stretti i bulloni, dallo stato di ossidazione ecc. Per ovviare al problema si usa la tecnica di "collegamento a quattro fili". Due morsetti alle estremità dello shunt, detti amperometrici, costituiscono il passaggio della corrente da misurare. Altri due morsetti detti voltmetrici, indipendenti e più piccoli, in quanto soggetti a correnti minime, prelevano la tensione di misura più internamente nello shunt. La resistenza presente tra i due punti voltmetrici è nota con precisione, ed è assolutamente indipendente dai morsetti amperometrici.



Figura 81: Shunt a 4 morsetti

### Riduttore di corrente (TA)

E' usato per misurare **correnti alternate**. E' costituito da un trasformatore toroidale su cui è disposto un avvolgimento (secondario del trasformatore di corrente) e all'interno di tale nucleo passa il cavo su cui compiere la misura (primario del trasformatore di corrente). Viene usato quando si devono misurare correnti elevate, o correnti in circuiti a tensione elevata. Il secondario deve essere sempre chiuso su un amperometro. Dato che l'amperometro è praticamente un cortocircuito, il trasformatore lavora in cortocircuito e il rapporto tra corrente primaria e corrente secondaria coincide praticamente con l'inverso del rapporto spire.

Tale trasformatore, che non deve mai funzionare a vuoto per evitare la formazione di tensioni pericolosamente elevate, è usato nei sensori delle **pinze amperometriche**.

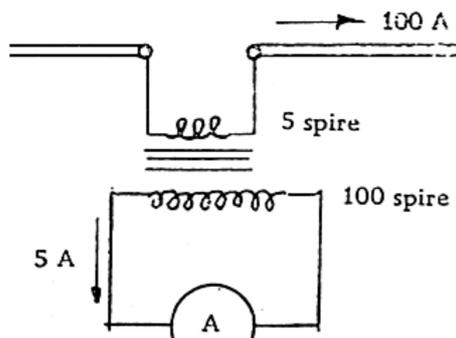


Figura 82: Riduttore di corrente

### Sensori ad effetto Hall

E' il sensore più usato per il rilievo della **corrente continua**, in quanto è caratterizzato da **separazione galvanica**, eccellente velocità di risposta, elevata precisione, contenute dimensioni e permette di rilevare qualsiasi andamento di corrente.

Tale dispositivo rileva la corrente da misurare sfruttando lo spostamento delle cariche elettriche circolanti in un conduttore in presenza del campo magnetico. Se il campo magnetico varia in funzione della corrente da

misurare, lo spostamento delle cariche varia in maniera proporzionale al campo. Quindi misurando questo spostamento con opportuni circuiti elettrici, è possibile risalire alla corrente da misurare.

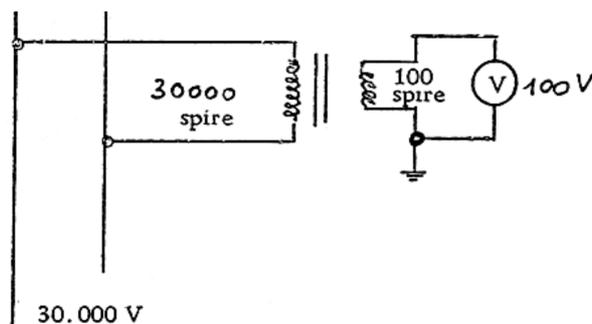
#### 4.9.2.2 Sensori di tensione

##### Partitore resistivo

Analogo allo shunt, presenta una buona risposta in frequenza e un basso costo, ma comporta un legame galvanico tra circuito di potenza e circuito di controllo.

##### Riduttore di tensione (TV)

Se si devono misurare tensioni elevate, per motivi di sicurezza non si collega direttamente il voltmetro alla rete ad alta tensione, ma si inserisce un apposito trasformatore tra rete e voltmetro. Dato che il voltmetro è praticamente un circuito aperto, il trasformatore lavora a vuoto e il rapporto di trasformazione tra tensione primaria e secondaria coincide praticamente con il rapporto spire.



**Figura 83: Riduttore di tensione**

##### Trasformatore di tensione continua ad effetto Hall

Sfrutta lo stesso principio del sensore ad effetto Hall descritto nel capitolo precedente. Tale sensore è caratterizzato da separazione galvanica, eccellente velocità di risposta, elevata precisione e contenute dimensioni.

#### 4.9.2.3 Sensori di velocità

##### Dinamo tachimetrica

E' usata per misurare la velocità del motore. E' una piccola macchina in corrente continua a magneti permanenti con momento di inerzia molto basso e trascurabile attrito che, portata in rotazione, fornisce ai morsetti di armatura una tensione continua proporzionale alla velocità e la cui polarità indica il senso di rotazione.

##### Encoder

Ne esistono di vari tipi. Quello più utilizzato è di tipo cosiddetto **incrementale**.

E' un dispositivo elettromeccanico che rileva uno spostamento e lo trasforma in un segnale elettrico digitale. Attualmente l'encoder incrementale di tipo ottico, il cui funzionamento è basato su interruzione o riflessione di uno o più fasci di luce infrarossa, è di gran lunga più diffuso rispetto a quelli magnetico e a spazzole.

Esso, nel caso più comune in cui si debba rilevare posizione e velocità angolare, è costituito da un disco metallico, con cave uniformemente distribuite su una corona circolare lungo la sua periferia, calettato ad esempio sull'albero di un motore, da un accoppiamento fotoelettronico montato sul telaio, costituito da una sorgente luminosa (led ad infrarossi, fotodiodo) e da un dispositivo sensibile alla luce (fototransistor ricevitore), e da della logica (vedi figura seguente).

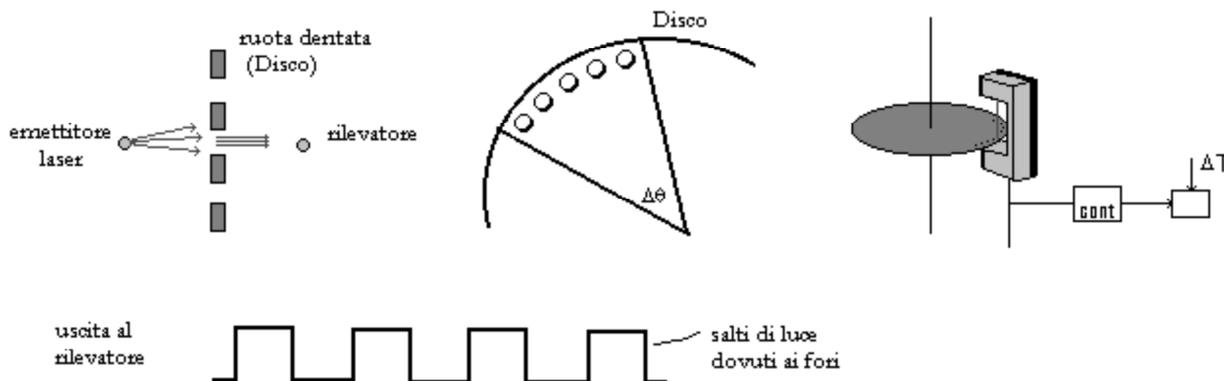


Figura 84: Schema di funzionamento dell'encoder

Ad ogni rotazione dell'albero pari alla distanza tra due cave successive il fototransistor trasforma l'impulso luminoso da cui viene colpito in un impulso elettrico. Si ottiene quindi un segnale logico costituito da un treno di impulsi rettangolari, dal cui conteggio si può determinare l'angolo di cui è ruotato l'albero.

Caratteristiche salienti dell'encoder incrementale (che è il sensore di posizione/velocità standard industriale) sono: semplicità, buona precisione, costo relativamente basso. Esso deve però essere inizializzato all'accensione, in quanto l'informazione che fornisce rappresenta una misura di rotazione incrementale, inoltre è vulnerabile ai disturbi elettrici (perde l'informazione di posizione in assenza di alimentazione) e non presenta un funzionamento ottimale in ampi campi di velocità.

Gli encoder incrementali possono essere usati come sensori digitali di velocità, valore fornito dal numero di conteggi in un dato piccolo periodo di tempo. Essi però non presentano un funzionamento ottimale in ampi campi di velocità (se, per ottenere grande precisione alle basse velocità, si utilizzano dischi con numerose tacche, alle alte velocità, in relazione alla risposta dinamica dei fototransistor, possono verificarsi dei problemi di lettura e quindi possibili errori di misura).

Un tipo di encoder più sofisticato è quello **assoluto**. Questo encoder non richiede né inizializzazioni, né decodificatori, né contatori, mantiene l'informazione di posizione anche in assenza dell'alimentazione ed è praticamente immune da qualsiasi disturbo elettrico, però per aumentare la risoluzione si deve aumentare il numero di piste dell'encoder e quindi i canali di lettura, la circuiteria, le dimensioni ed il costo.

### 4.9.3 Sensori nei sistemi di sorveglianza degli impianti funiviari

Oltre ai sensori utilizzati negli azionamenti e descritti nel capitolo precedente, sono utilizzati i seguenti sensori:

#### 4.9.3.1 Sensori di posizione

In generale vengono usati su azionamenti che richiedono un controllo molto preciso sulla posizione del motore durante la rotazione. Nel caso degli impianti funiviari non vengono utilizzati per questo scopo, ma piuttosto per realizzare le funzioni di sorveglianza dell'impianto. Tra questi si possono citare:

##### Encoder

Usati ad esempio per misurare i metri fune. Sono gli stessi descritti nel paragrafo precedente.

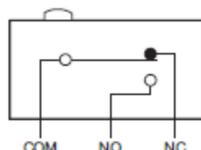
##### Microinterruttori

Per rilevare ad esempio la fine corsa del carrello del tenditore o la posizione delle sagome che rilevano la posizione della fune o dei veicoli.

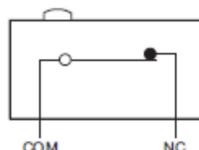
Sono concettualmente dei pulsanti che vengono premuti o meno a seconda della posizione dell'oggetto di cui devono verificare la posizione. Il pulsante è collegato ad un contatto elettrico che viene aperto se l'interruttore è di tipo **normalmente chiuso** (NC: Normally Closed), o chiuso se di tipo **normalmente aperto** (NO: Normally Open), quando il pulsante viene premuto.

I precedenti sono a due fili, ma possono essere anche a tre fili, uno per il contatto NO e uno per il contatto NC, come mostrato nella figura 1 dello schema seguente. In questo caso si parla di dispositivi **singolo polo, doppio contatto** (SPDT: Single Pole Double Throw), cioè dei **deviatori**. I caso 2 e 3 sono di tipo **singolo polo singolo contatto** (SPST: Single Pole Single Throw), cioè dei semplici **interruttori**.

1. SPDT



2. SPST-NC (wire leads type only)



3. SPST-NO (wire leads type only)

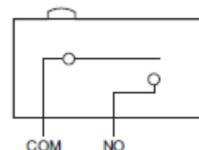


Figura 85: Schemi di alcuni tipi di microinterruttori

#### 4.9.3.2 Altri sensori

##### Sensori di prossimità (proximity)

Ne esistono di vari tipi, ma il più usato in ambito funiviario è il sensore induttivo, in cui un solenoide, percorso da una corrente variabile prodotta da un oscillatore, produce un campo magnetico che viene alterato dalla presenza nelle vicinanze di un oggetto metallico. La variazione del campo magnetico genera una variazione della corrente nel solenoide che, opportunamente trattata da un circuito elettronico, produce un segnale logico (passaggio da alto a basso o viceversa).

Ad esempio, se il proximity è posizione lungo la trave di lancio o di rallentamento di una seggiovia ad ammortamento temporaneo, il passaggio della morsa (oggetto metallico) di una seggiola vicino al sensore, produce un impulso di corrente che viene inviato al sistema di sorveglianza dell'impianto, il quale effettuerà le opportune valutazioni.

##### Sensori di pressione (pressostati)

Per tutti i sistemi idraulici dell'impianto (ad esempio freni, tenditore, motore di recupero). Trasmettono un segnale elettrico al raggiungimento di una determinata pressione (massima o minima) nell'impianto.

##### Sensori di portata (flussostati)

Sono dispositivi che trasmettono un segnale elettrico al raggiungimento di un determinato valore di portata (massima o minima) del fluido presente nei sistemi idraulici dell'impianto.

##### Sensori di forza (estensimetri o dinamometri)

Utilizzato nei sistemi di tensionamento delle funi, o nelle cosiddette celle di carico, che rilevano la forza con cui le morse dei veicoli si chiudono sulla fune traente o portante-traente. Con tale sensore la misura di una forza (o di una coppia) è ricondotta al rilievo della variazione di resistenza di un suo elemento strutturale (metallico o semiconduttore) conseguente alla deformazione elastica subita a seguito della sollecitazione applicata all'elemento su è stato incollato.

##### Sensori di velocità del vento (anemometri)

Gli anemometri sono dispositivi utilizzati per misurare la velocità e la direzione del vento e sono installati generalmente lungo la linea degli impianti funiviari, nei punti in cui il vento presenta le maggiori criticità per la sicurezza dei passeggeri.

##### Sensori di flusso d'aria (anemostati)

In generale con il termine anemostati si identificano i dispositivi che trasmettono un segnale elettrico in presenza di un flusso d'aria, ma non ne misurano l'entità. Sono utilizzati per rilevare il funzionamento delle ventole presenti nei sistemi di raffreddamento dei vari motori presenti nell'impianto.

## 4.10 Unità di misura delle principali grandezze elettriche

- Tensione                      Volt    (V)
- Corrente                     Ampere (A)
- Potenza reattiva            Volt-Ampere (VA)
- Potenza apparente        Volt-Ampere (VA)
- Potenza attiva             Watt    (W)
- Energia                      Wattora(Wh)
- Resistenza elettrica      Ohm    ( $\Omega$ )
- Capacità                    Farad   (F)
- Induttanza                 Henry   (H)