UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Facoltà di Ingegneria

APPUNTI PER LE LEZIONI DI

I M P I A N T I E L E T T R I C I

Del Corso di

Laurea triennale in Ingegneria Industriale curr. Meccanica
Laurea triennale in Ingegneria Navale
Laurea specialistica in Ingegneria Chimica e di processo
Laurea specialistica in Ingegneria Meccanica
Laurea specialistica in Ingegneria Navale

DOCENTE : Gian Franco LADINI

Anno Accademico 2008/09

Capitolo I

RETI DI DISTRIBUZIONE IN MEDIA E BASSA TENSIONE

1.1.0 Generalità

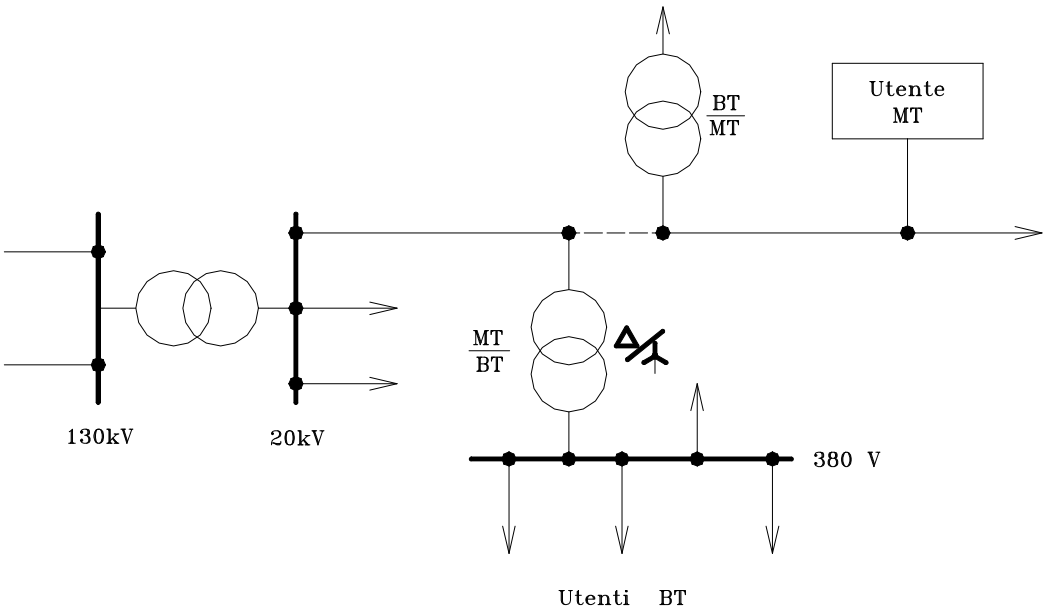
La distribuzione dell'energia elettrica agli utenti avviene per mezzo delle linee a media e bassa tensione che collegano le stazioni di trasformazione, poste in determinati punti della zona, alle varie utenze.-

Le linee a media tensione, che venivano generalmente alimentate a tensioni comprese tra i 3 e 30 kV, oggi risultano normalizzate alla tensione di 20kV; esistono ancora vecchie linee a tensioni diverse, in via di graduale sostituzione.- Il valore più elevato della tensione è giustificato dalla maggior capacità di trasporto dell'energia a parità di sezione e quindi di costi.-

La fornitura dell'energia agli utenti può essere fatta o direttamente in media tensione a 20kV o in bassa tensione a 220 – 380 V: il primo caso riguarda le forniture a stabilimenti industriali, ospedali, grandi alberghi, ecc. cioè ad utenze con assorbimenti di potenze di 100 ÷ 1000 kW ed oltre, aventi una propria cabina di trasformazione MT/BT; il secondo, ossia la distribuzione in bassa tensione riguarda la fornitura di forza motrice a piccole utenze artigianali e d'energia elettrica per illuminazione ed usi domestici alle abitazioni private ed uffici.-

Le reti di distribuzione in media e bassa tensione possono essere aeree o in cavo; in via generale si osserva nelle città una distribuzione in cavo con la graduale sostituzione delle vecchie linee aeree con cavi interrati su tracciati che seguono preferibilmente le sedi stradali esistenti.-

Le reti a media tensione vengono alimentate da stazioni di trasformazione Alta Tensione / Media Tensione nelle quali la potenza installata è condizionata dalla necessità di realizzare il miglior compromesso tra il costo degli impianti e le esigenze di mantenere entro limiti tollerabili la caduta di tensione e le perdite d'energia in linea: maggiore è il numero delle cabine di trasformazione, *minore è la lunghezza* delle linee di distribuzione e quindi miglior rendimento e minori cadute ma maggiori costi d'installazione.-



Le reti di distribuzione in bassa tensione fanno invece capo a stazioni di trasformazione Media Tensione / Bassa tensione nelle quali la **potenza installata** dipende dal tipo d'utenze e dalla loro densità distributiva; in generale in tali cabine difficilmente si superano i 650 kVA che

comportano, alla tensione di 380 V, correnti dell'ordine del migliaio di ampere e quindi conduttori alle sbarre d'uscita dei trasformatori di sezione pari almeno a 500 mm^2.

Zone di utenza	Potenze installate (kVA)	Distanze tra cabine (m)
Zone urbane	250÷650	100÷300
Zone suburbane	100÷400	500÷1000
Zone rurali	50÷100	1000÷5000

La distribuzione a bassa tensione viene attuata normalmente mediante linee in cavo a quattro conduttori allo scopo di poter alimentare sia le utenze trifasi che le monofasi: a 380 V con la tensione concatenata e a 220 V con quella di fase.-

1.2.0 Dimensionamento delle reti di distribuzione

La scelta dei conduttori per le linee di distribuzione si riduce al calcolo della *sezione dei conduttori* stessi in funzione del valore massimo del carico previsto e alla lunghezza della linea, in relazione alla caduta di tensione percentuale e al rendimento ammessi.-

Per garantire anche agli utenti più distanti, nelle varie condizioni di carico e quindi di caduta in rete, una variazione di tensione percentuale entro i limiti contrattuali, i trasformatori delle stazioni di trasformazioni sono del tipo a rapporto variabile sotto carico sul lato ad alta tensione con 20 gradini pari all'1,5% della tensione nominale.-

Nella valutazione delle cadute di tensione per linee in media e bassa tensione, sia aeree sia in cavo, vista la loro ridotta lunghezza, si fa riferimento soltanto ai loro parametri longitudinali: resistenza R_L e reattanza X_L, trascurando gli effetti delle capacità e conduttanze trasversali.-

Nelle linee in corrente alternata, le cadute di tensione sono legate sia ai parametri di linea (lunghezza, sezione e distanza dei conduttori), sia alla natura del carico (corrente assorbita e cos φ dell'utilizzatore).-

La resistenza di ciascun filo di linea si ricava dalla relazione:

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = L \cdot \rho \frac{1}{S} = L \cdot R'$$

essendo L la lunghezza della linea e R' la resistenza per chilometro, che viene normalmente fornita dai costruttori, in funzione della sezione S dei conduttori.-

La reattanza di ciascun conduttore di una linea, sia monofase che trifase, alla frequenza unificata di 50 Hz, è espresso dalla relazione:

$$X_L = 0{,}314 \cdot (\, 0{,}46 \, log \frac{2D}{d} + 0{,}05 \,) \cdot L = L \cdot X'$$

essendo X' la reattanza chilometrica, D la distanza tra gli assi dei conduttori e d il loro diametro, espressi nella stessa unità di misura.-

La caduta di tensione percentuale di una linea trifase può essere valutata con buona approssimazione mediante l'espressione:

$$\Delta V\,\% = 100 \frac{\sqrt{3} I_L \,(R_L \cos\varphi + X_L \operatorname{sen}\varphi)}{V} = 100 \frac{I_L L}{V} \sqrt{3} \,(R' \cos\varphi + X' \operatorname{sen}\varphi) = 100 \frac{I_L L \cdot \Delta V'}{V}$$

essendo $\Delta V'$ la caduta di tensione unitaria, fornita dalle tabelle in funzione delle sezioni dei conduttori e del $cos\ \varphi$ del carico.-

La caduta di tensione percentuale può essere espressa anche in altro modo:

$$\Delta V\% = 100\frac{I_L L}{V}\sqrt{3}R'\cos\varphi(1+\frac{X'}{R'}\tan\varphi) = 100\frac{L}{V}\sqrt{3}R'\cos\varphi(1+\frac{X'}{R'}\tan\varphi)\cdot\frac{P}{\sqrt{3}V\cos\varphi}$$

$$\Delta V\% = 100\frac{R'\cdot L\cdot P}{V^2}(1+\frac{X'}{R'}\tan\varphi)$$

Le perdite di potenza in una linea trifase possono essere valutate in funzione della potenza trasmessa, mediante l'espressione:

$$\Delta P\% = 100\frac{3R_L I_L^2}{P} = 100\frac{3R'L}{P}\frac{P^2}{3V^2\cos^2\varphi} = 100\frac{R'\cdot L\cdot P}{V^2}\frac{1}{\cos^2\varphi}$$

Analizzando l'espressione delle perdite in linea, si osserva come, a parità di tensione e potenza trasmessa, le perdite varino in ragione inversa al quadrato del fattore di potenza del carico; da qui l'esigenza, in presenza di carichi induttivi, per contenere le perdite, di ridurre la resistenza chilometrica *R'* : ciò si può ottenere o aumentando la sezione dei conduttori o ripartendo il carico su più linee distinte funzionanti in parallelo. La seconda soluzione viene adottata quando risulta necessario mantenere le cadute di tensione entro limiti prestabiliti.-

Le considerazioni viste confermano l'esigenza, da parte dell'ente distributore, di stimolare, presso i vari utenti, il rifasamento dei carichi induttivi mediante condensatori.-

1.3.0 Caratteristiche dei conduttori per linee aeree e in cavo

I conduttori usati nella costruzione delle linee a media e bassa tensione sono in rame con purezza minima del 99,9 %; nelle linee aeree il *rame* è *crudo* addizionato a piccole quantità di *cadmio* per aumentarne il carico di rottura a trazione. Per i cavi viene invece impiegato rame crudo ricotto per aumentarne la duttilità.-

I parametri che definiscono le caratteristiche dei conduttori sono:

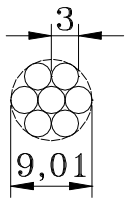
Resistività a 20° C:	ρ	espressa in [Ω.mm^2/km]
Coefficiente di temperatura:	α	espresso in [°C^{-1}]
Coefficiente di dilatazione termica lineare:	ε	espresso in [°C^{-1}]
Modulo di elasticità	**E**	espresso in [kg/mm^2]
Carico di rottura a trazione:	σ_R	espresso in [kg/mm^2]
Peso specifico:	γ	espresso in [kg/dm^3]

I calcoli relativi alla scelta dei conduttori da impiegarsi in un impianto vengono facilitati da tabelle ove sono riportate le caratteristiche elettriche di ciascun tipo per ogni sezione normalizzata in relazione al tipo di posa in opera.-

Linee aeree trifasi di rame con conduttori distanti 40 cm.

Sezione (mm^2)	**Diametro (mm)**	**Resistenza chilometrica R' a 40°C (Ω/km)**	**Reattanza chilometrica X' (Ω/km)**	**Caduta di tensione unitaria ΔV' a cosφ=0,8 (V/A.km)**	**Portata (A)**
25	6,42	0,777	0,318	1,407	140
35	7,56	0,56	0,308	1,096	180
50	9	0,395	0,297	0,856	220
70	10,7	0,289	0,286	0,698	280
95	12,6	0,197	0,276	0,56	340
120	14	0,168	0,269	0,513	370
150	16,1	0,129	0,261	0,45	470

In tabella la valutazione della sezione e del diametro fanno riferimento ai valori nominali: per esempio la sezione nominale di 50 mm^2 corrisponde ad una sezione effettiva di 49,48 mm^2 costituita da un trefolo formato da 7 fili aventi ognuno un diametro di 3,00 mm (7 x 3,00)



$7x1,5^2\ x3,14=49,48mm^2$

Linee trifasi in cavo

Sezione nominale	**Resistenza kilometrica a 80°C**	**Reattanza kilometrica**	**Caduta di tensione unitaria ΔV'**	
	R'	**X'**	**cos φ = 1**	**cos φ = 0,8**
mm^2	**Ω/km**	**Ω/km**	**V/A.km**	**V/A.km**
10	2,240	0,0861	3,940	2,340
16	1,140	0,0817	2,480	2,070
25	0,889	0,0813	1,570	1,340
35	0,641	0,0783	1,130	0,988
50	0,473	0,0779	0,838	0,750
70	0,328	0,0751	0,579	0,541
95	0,236	0,0762	0,419	0,412
120	0,188	0,0740	0,332	0,342
150	0,153	0,0745	0,272	0,295
185	0,123	0,0742	0,217	0,250
240	0,0943	0,0752	0,167	0,212

Per le portate di corrente nei cavi tripolari si fa riferimento alla tabella riportata nel capitolo Materiali e apparecchiature per impianti a bassa tensione.-

Esempio di dimensionamento di una linea in cavo

Un opificio necessita di una potenza di ***260 kW*** con fattore di potenza pari a ***0,9*** ad una tensione di ***380 V*** ; tale potenza deve essere prelevata, sempre alla tensione di 380 V, da una cabina di trasformazione distante ***220 m***.- Per il trasporto viene impiegato un *cavo aereo tripolare* di rame qualità G con temperatura d'esercizio di 80° C ; è richiesta sul cavo una caduta di tensione massima del ***5,5 %*** ed una perdita massima di potenza a pieno carico inferiore al ***6,5 %***.-

Determinare la sezione del cavo o dei cavi da usare.-

&&&&&&&&&&&&

In base alla relazione vista in precedenza: $$\Delta P\% = 100\frac{R' \cdot L \cdot P}{V^2}\frac{1}{\cos^2\varphi}$$

la resistenza chilometrica del cavo dovrà essere :

$$R' \le \frac{V^2 \cos^2\varphi}{100 \cdot L \cdot P} \cdot \Delta P\% \le \frac{380^2 \cdot 0,9^2}{100 \cdot 0,220 \cdot 260000} 6,5 \le 0,1329\ \Omega/km$$

Per ottenere una caduta di tensione inferiore al 5,5% dalla relazione: $\Delta V\% = 100\frac{R' \cdot L \cdot P}{V^2}(1+\frac{X'}{R'}tan\varphi)$ si ricava:

$$(1+\frac{X'}{R'}tan\varphi) \le \Delta V\% \frac{V^2}{100 \cdot R' \cdot L \cdot P} \le 5,5\frac{380^2}{100 \cdot 0,1329 \cdot 0,220 \cdot 260000} \le 1,0447$$

$$\frac{X'}{R'} \le \frac{1,0447-1}{tan\varphi} \le 0,09238$$

$$X' \le 0.09238 \cdot 0,1329 \le 0,012277\,\Omega/km$$

Per ottenere una resistenza chilometrica inferiore a 0,1329 Ω/km bisogna usare un cavo di sezione pari a *185 mm²* ; tale cavo ha una resistenza chilometrica di *0,123* Ω/km ed una reattanza chilometrica di *0,0742 Ω/km* quindi, pur essendo adatto dal punto di vista delle perdite di potenza, determinerà una caduta di tensione maggiore di quella prevista:

$$\Delta V\% = 100\frac{R' \cdot L \cdot P}{V^2}(1+\frac{X'}{R'}tan\varphi) = 100\frac{0,123 \cdot 0,220 \cdot 260000}{380^2}(1+\frac{0,0742}{0,123}0,4843) = 6,296\%$$

Per ridurre le cadute di tensione sarà necessario ridurre la reattanza, ferma restando la sezione risultante e cioè le perdite; ciò sarà possibile ripartendo la sezione totale tra due cavi uguali di sezione pari a 185 : 2 = 92,5 mm² , sezione commerciale più vicina: 95 mm² posti in parallelo aventi ognuno *R'= 0,236 Ω/km* e *X'=0,0762 Ω/km* .-

La resistenza e la reattanza chilometriche per fase dei due cavi trifasi da 95 mm², posti in parallelo sarà:

$$R' = \frac{0,236}{2} = 0,118\,\Omega/km \qquad X' = \frac{0,0762}{2} = 0,0381\,\Omega/km$$

La perdita di potenza risulterà:

$$\Delta P\% = 100\frac{R' \cdot L \cdot P}{V^2}\frac{1}{cos^2\varphi} = 100\frac{0,118 \cdot 0,220 \cdot 260000}{380^2} \cdot \frac{1}{0,9^2} = 5,77\%$$

La caduta di tensione sarà:

$$\Delta V\% = 100\frac{R' \cdot L \cdot P}{V^2}(1+\frac{X'}{R'}\tan\varphi) = 100\frac{0,118 \cdot 0,220 \cdot 260000}{380^2}(1+\frac{0,0381}{0,118}0,4843) = 5,4\%$$

La corrente totale assorbita dai carichi risulterà essere:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,V\cos\varphi} = \frac{260000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 439\,A$$

La corrente che attraverserà ciascuno dei due cavi posti in parallelo sarà ~220 A inferiore al valore massimo ammissibile (260 A) per cavi tripolari tipo G in aria con sezione di 95 mm².-

Capitolo II

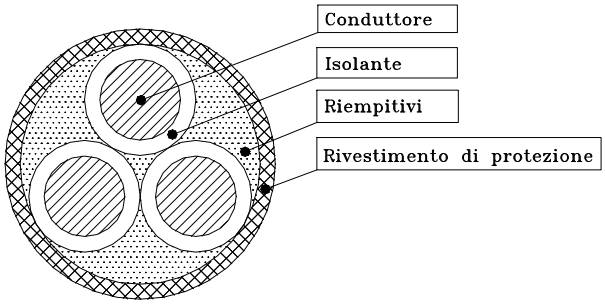
MATERIALI E APPARECCHIATURE PER IMPIANTI A BASSA TENSIONE

2.1.0 Cavi

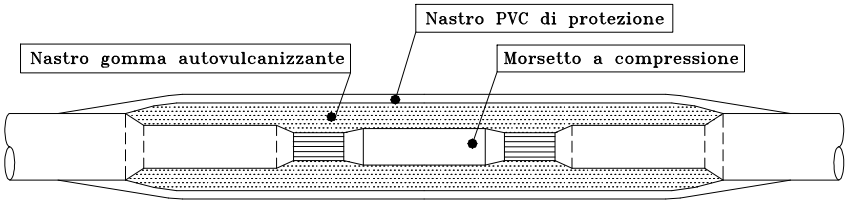
Attualmente la distribuzione dell'energia elettrica in bassa tensione viene fatta mediante cavi unipolari o multipolari il cui isolamento e rivestimento protettivo è ottenuto con *gomma sintetica* o *materiali termoplastici* in modo da risultare inalterabili agli agenti atmosferici e insensibili a variazioni di temperatura da –30°C ad oltre 100°C.- Comunemente i conduttori sono costituiti da *rame ricotto* o *semicrudo* con sezioni normalizzate che vanno da 0,5 a 600 mmq; l'isolamento è ottenuto applicando per estrusione dei materiali sintetici a base di PVC. Nel caso l'isolante sia costituito da gomma, viene applicato, tra gomma e rame, un separatore a base di carta o cellofan oppure il rame deve essere stagnato (per evitare che lo zolfo contenuto nella gomma possa intaccare il rame).-

La scelta della sezione del conduttore e strettamente legata alla corrente d'esercizio e al tipo di posa in opera, secondo tabelle previste dalle norme CEI (vedi pagina seguente).-

La posa in opera dei cavi di collegamento delle cabine di trasformazione Media/Bassa tensione con le varie utenze è fatta entro protezioni tubolari di cemento o PVC oppure in canalette rettangolari di cemento sempre poste ad una profondità di circa un metro.-



I cavi vengono normalmente forniti avvolti in bobine di lunghezza che può variare dai 250 ai 1000 metri secondo la loro sezione; nel caso di linee di maggior lunghezza o in presenza di derivazioni, i giunti devono garantire la continuità metallica dei conduttori (mediante manicotti applicati a pressione) e la conservazione dell'isolamento verso terra (mediante nastri adesivi di gomma o PVC oppure con resine autoindurenti a freddo iniettate in apposite muffole).-



Il collegamento dei terminali dei cavi alle apparecchiature alimentate avviene mediante morsetti e capicorda applicati a pressione e di forme diverse secondo il tipo di cablaggio che si deve eseguire.-

La rete di distribuzione all'interno degli edifici civili è fatta mediante gruppi di cavetti unipolari fatti passare entro tubi di PVC posti sotto malta mentre negli opifici è preferita una distribuzione mediante sbarre di rame poste entro involucri modulari sostenute e distanziate tra loro da appositi isolatori; tali sbarre sono costruite per portate fino a 4000 A e poste in involucri

modulari contenti quattro o cinque conduttori secondo il tipo di distribuzione con sistema TN o TT (vedi paragrafo 3.3.0).-

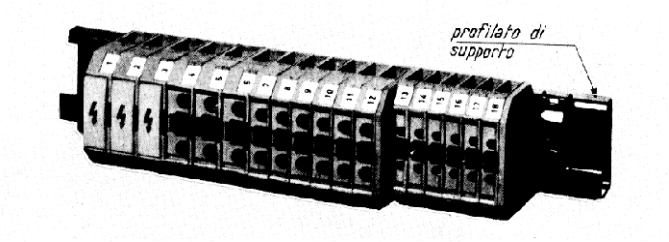
Portate dei cavi in Rame con isolamento in PVC o Gomma

Formazione del cavo →	Cavo tripolare (1)						Tre cavi unipolari a trifoglio (1)						Cavo bipolare (1)					
Tipo di posa →	In aria entro tubi o in cassette appoggiate a muro		In aria libera o appoggiati a muro		Diretta nel terreno		In aria entro tubi o in cassette appoggiate a muro		In aria libera o appoggiati a muro		Diretta nel terreno		In aria entro tubi o in cassette appoggiate a muro		In aria libera o appoggiati a muro		Diretta nel terreno	
Isolante →	G R	G2	G R	G2	R	G2	G R	G2	G R	G2	R	G2	G R	G2	G R	G2	R	G2
Sezione nominale (mm²) ↓	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
1	13	15	15	17	20	22	13	15	17	19	22	23	15	17	17	19	24	26
1,5	17	19	19	21	26	28	17	19	21	24	28	30	19	21	21	24	30	33
2,5	23	26	26	29	35	38	23	26	29	33	38	41	26	29	29	33	40	43
4	32	35	35	40	45	49	32	35	40	45	50	53	35	40	40	45	52	56
6	41	45	45	51	57	61	41	45	51	57	63	67	45	51	51	57	66	70
10	57	63	63	71	76	81	57	63	71	80	83	89	63	71	71	80	88	93
16	76	85	85	96	99	104	76	85	96	107	108	115	85	96	96	107	114	119
25	100	111	111	126	128	133	100	111	126	141	140	149	111	126	126	141	147	153
35	123	137	137	155	154	159	123	137	155	173	168	179	137	155	155	173	177	183
50	148	165	165	187	182	188	148	165	187	210	199	210	165	187	187	210	210	215
70	189	210	210	240	225	230	189	210	240	265	245	260	210	240	240	265	255	265
95	230	260	260	290	270	275	230	260	290	325	295	315	260	290	290	325	310	315
120	270	300	300	340	305	315	270	300	340	380	335	360	300	340	340	380	350	360
150	305	340	340	385	345	350	305	340	385	430	375	400	340	385	385	430	395	400
185	355	390	390	445	390	390	355	390	445	495	430	455	390	445	445	495	450	450
240	420	465	465	525	455	460	420	465	525	590	500	530	465	525	525	590	525	530

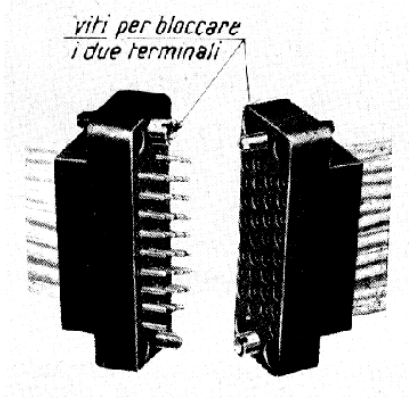
2.2.0 Materiali per installazioni

2.2.1 Morsetteria:

Nei pannelli di controllo e manovra delle installazioni i terminali dei cavi vengono fissati tra loro e alle apparecchiature mediante dei *morsetti combinabili* fissati a speciali profili di sostegno; i morsetti costituiscono dei ponti, elettricamente isolati dal supporto di sostegno, che mettono in contatto i terminali dei fili o cavi di collegamento che risultano fissati ai morsetti stessi mediante viti a pressione e quindi di impiego estremamente flessibile. Sono costruiti per conduttori con sezioni massime di 16 mmq.-



Per collegare cavi multifilari di piccola sezione sono normalmente usate *prese multicontatto ad innesto rapido*: sono normalmente costituite da due parti, maschio e femmina, che possono essere accoppiate e bloccate tra loro; sono sempre dotate di guide opportune per evitare inserzioni errate.-



2.2.2 Scatole e quadri:

Le *scatole*, o più in generale le cassette, hanno la funzione di contenere e proteggere al loro interno le morsetterie di collegamento o derivazione e delle semplici apparecchiature di manovra.-

I *quadri di comando* sono invece predisposti per contenere più pannelli o piastre sulle quali sono istallate tutte le apparecchiature di comando, controllo e manovra dai fusibili ai relè, agli interruttori, contattori, strumenti di misura, pulsanti di comando e lampade di segnalazione oltre a tutta la morsetteria di collegamento.-

2.3.0 Dispositivi di manovra, protezione e segnalazione

Ogni apparecchio utilizzatore deve essere munito d'opportuni dispositivi di manovra e protezione adeguati alle caratteristiche dell'apparecchio stesso.-

La manovra più semplice che si deve poter eseguire è quella di chiusura e apertura del circuito d'alimentazione in qualsiasi condizione di carico o sovraccarico: la manovra d'apertura del circuito può essere dipendente dall'operatore o avvenire automaticamente in particolari condizioni di mal funzionamento dell'impianto.-

Si definisce come *corrente nominale* la corrente massima assorbita dall'apparecchiatura durante il suo funzionamento normale per un tempo indefinito.-

Si definisce come *corrente di sovraccarico* una corrente che interessa un circuito elettricamente sano ma superiore alla sua corrente nominale.-

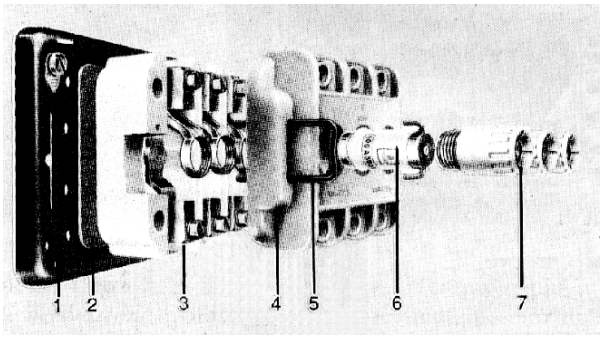
Si definisce come *corrente di corto circuito* la sovracorrente che si verifica in un circuito a seguito di un guasto avente impedenza trascurabile tra due punti fra i quali esiste la normale tensione d'esercizio.-

2.3.1 Fusibili:

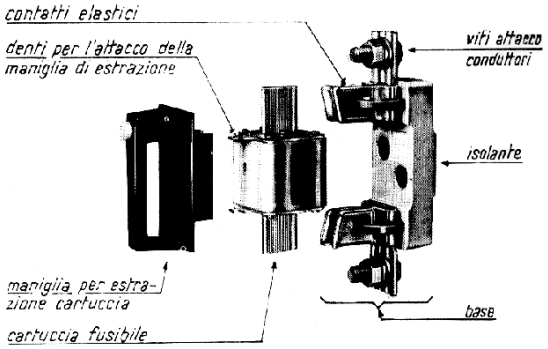
I fusibili sono dispositivi automatici d'interruzione delle sovracorrenti: sono costituiti da un conduttore di materiale e forma diversa, posto in serie al circuito che deve proteggere in modo che sia attraversato da tutta la corrente del carico; quando questa supera un determinato limite, il calore prodotto per effetto Joule sulla resistenza del filo stesso fa raggiungere al fusibile la temperatura di fusione determinando l'interruzione del circuito.-

La peculiarità dei fusibili è quella delle loro ridotte dimensioni, di un costo inferiore rispetto gli interruttori automatici e la loro rapidità d'intervento.-

Negli impianti a bassa tensione, i fusibili sono di due tipi: ***Fusibili cilindrici con porta cartuccia avvitato*** e ***Fusibili con attacchi a coltello.*** In entrambi l'elemento fusibile è costituito da un filo o nastro, di materiale particolare, saldato ai due estremi di testa del fusibile e immerso in sabbia di quarzo (con la funzione di spegni arco), il tutto racchiuso in un involucro ceramico.-



Fusibile a cartuccia



Fusibile a coltello

Ciascun fusibile ha una sua precisa corrente nominale di funzionamento mentre il suo tempo d'intervento risulta legato all'entità del rapporto della corrente di sovraccarico rispetto la corrente nominale: così per esempio un fusibile da 16 A nominali interverrà dopo 0,001 sec. con una corrente di 700 A, dopo 0,01 sec. con una corrente di 300 A, dopo 0,1 sec. con una corrente di 140 A, dopo 1 sec. con una corrente di 70 A, dopo 10 sec. con una corrente di 55 A, dopo 2 min. con una corrente di 30 A, dopo 6 ore con una corrente di 24 A, mai con una corrente di 16 A.-

La scelta del *tipo* di fusibile viene fatta basandosi sulle curve caratteristiche che forniscono il tempo di fusione in funzione della corrente di sovraccarico: in base alla pendenza di tali caratteristiche, i fusibili possono essere *ritardati* (protezione dei cavi, conduttori e impianti in genere), *rapidi e ultrarapidi* (protezione dei raddrizzatori a semiconduttori).-

Risulta sottinteso che il fusibile non è rigenerativo: dopo il suo intervento non può essere ripristinato ma bisogna sostituirlo con uno nuovo per ridare tensione al circuito.-

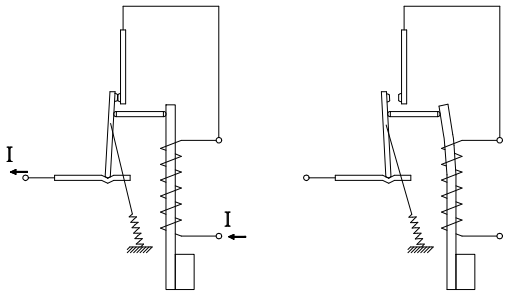
2.3.2 Relè di massima corrente:

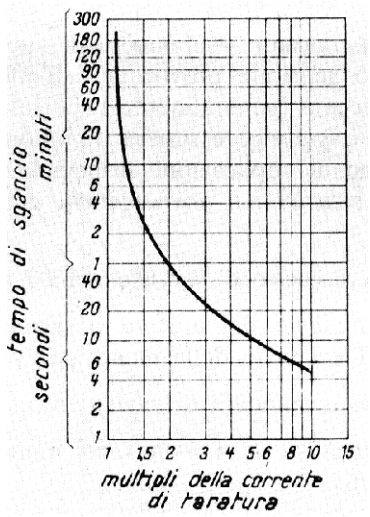
In alternativa o talvolta in aggiunta ai fusibili, i circuiti possono essere protetti, come si vedrà in seguito, da interruttori automatici comandati da relè di massima corrente.-

I relais di massima corrente controllano la corrente che fluisce nel circuito determinando, quando questa supera un valore prestabilito, l'intervento dell'*interruttore* o del *contattore* cui è devoluto il compito di interrompere il circuito: di solito il relè non interrompe direttamente il circuito di potenza.-

I relais normalmente impiegati negli impianti in bassa tensione sono di tipo *termico* o *elettromagnetico*, talvolta i due sono combinati in un relè *magnetotermico*.-

Relè Termici: Sono essenzialmente costituiti da una lamina bimetallica che per effetto dell'azione termica della corrente tenda a curvarsi fino a determinare, quando la corrente ha raggiunto un determinato valore di taratura, l'apertura di un contatto mobile. Le lamine bimetalliche possono essere riscaldate direttamente, se la corrente da controllare passa attraverso le lamine stesse, o indirettamente se la corrente percorre una resistenza riscaldante posta accanto alle lamine stesse.-





Il tempo di riscaldamento e quindi d'intervento sarà legato al valore della sovracorrente: maggiore la corrente, minore il tempo d'intervento.

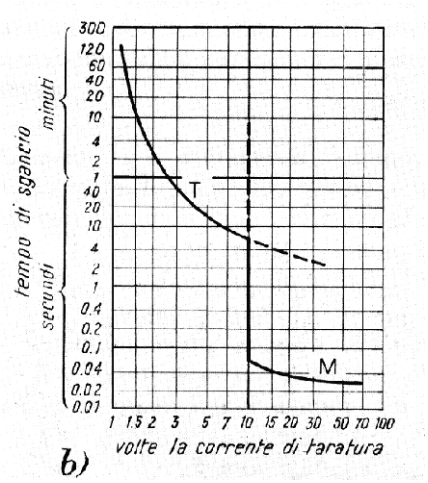
I relais termici non offrono alcuna protezione contro i cortocircuiti in quanto questi richiedono un intervento immediato, mentre risultano efficaci contro i sovraccarichi che possono essere sopportati dal circuito per un tempo che corrisponde a quello d'intervento del relais stesso: il campo d'applicazione e quello della protezione dei motori elettrici.-

Relè Magnetici: Sono essenzialmente composti da una bobina percorsa dalla corrente da controllare al cui interno e posta un'asta metallica mantenuta, da una molla di ritegno, in posizione tale da non determinare l'apertura dei contatti di lavoro; quando la corrente supera un certo valore di taratura, il campo magnetico generato all'interno della bobina è sufficiente a determinare sull'asta metallica una forza d'attrazione tale da vincere la molla di ritegno ed aprire così i contatti di lavoro.-

Il tempo d'intervento di questi relais è dell'ordine dei centesimi di secondo, quindi sono adatti a proteggere i circuiti in caso di cortocircuiti.-

Relè magnetotermici: Questi relais sono costituiti da un relè termico il cui elemento riscaldante è posto in serie alla bobina di sgancio del relais magnetico in modo che la medesima corrente comandi entrambi i dispositivi che vanno ad agire su un unico contatto di lavoro.-

La curva caratteristica di lavoro mostra come inizialmente per correnti di sovraccarico fino a circa 10 volta la corrente nominale intervenga la parte termica del relè in tempi inversamente proporzionali alla sovracorrente, mentre per correnti ancora superiori (cortocircuiti) il tempo d'intervento diventi estremamente inferiore.



2.3.3 Interruttori:

Gli interruttori sono quei dispositivi che servono a chiudere ed aprire il circuito d'alimentazione in tutte le possibili condizioni di funzionamento o mal funzionamento dei carichi.-

L'estinzione dell'arco d'apertura degli interruttori, in bassa tensione, avviene generalmente in aria.-

Ogni interruttore risulta caratterizzato dai seguenti dati:

Tensione nominale: E' la tensione d'esercizio alla quale è stato collaudato e alla quale può funzionare regolarmente.

Corrente nominale: E' la massima corrente di funzionamento permanente senza che intervengano dispositivi di sgancio

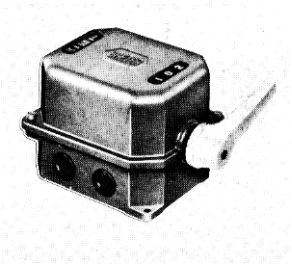
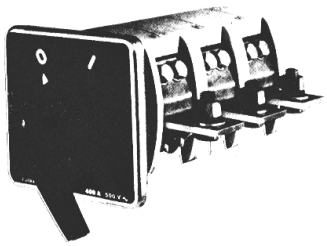
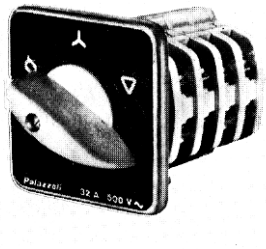
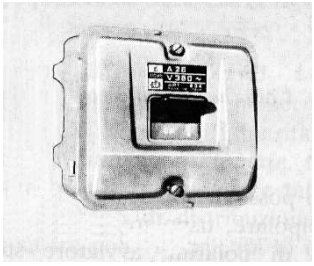
Potere di corto circuito: E' la massima corrente che l'interruttore è in grado di interrompere in presenza di una corrente di cortocircuito dell'impianto.-

Tempo d'interruzione: E' il tempo che intercorre tra l'istante di comando d'apertura e l'istante in cui si spegne l'arco tra i contatti dell'interruttore.-

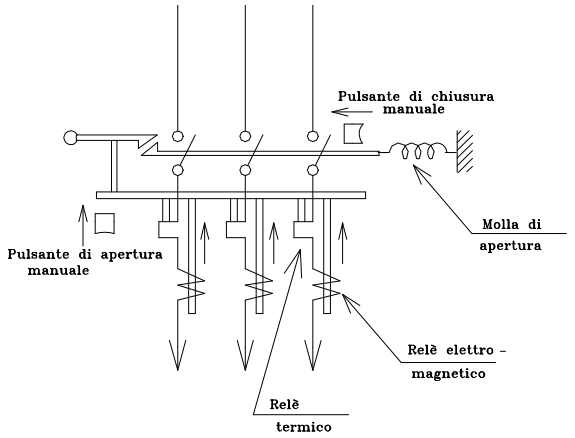
Negli impianti si incontrano due tipi d'interruttori: *di manovra e automatici*.-

Interruttori di manovra: sono costruiti per aprire e chiudere il circuito d'alimentazione in presenza di correnti che non superino di 5 volte la loro corrente nominale (non sono previsti per l'apertura in presenza di corto circuiti).-

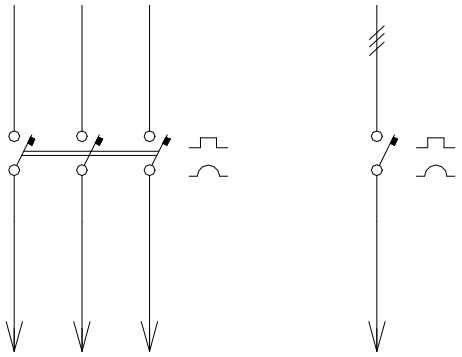
Vengono costruiti per correnti nominali unificate di 6 – 10 – 16 – 25 – 40 A; la loro manovra è fatta a mano e normalmente sono impiegati per il comando di motori sia a vuoto che a carico.-

<u>Interruttori automatici con relais di massima corrente</u>: sono interruttori costruiti per interrompere correnti molto superiori alle loro correnti nominali, come quelle di corto circuito.- Sono anche dotati d'opportuni sganciatori azionati da relè magnetotermici che ne determinano l'apertura automatica, ritardata o istantanea, quando la corrente supera determinati valori.-



Schema di principio



Rappresentazione simbolica

Quando l'interruttore viene chiuso, mediante il pulsante manuale, la molla d'apertura viene caricata in modo che sotto l'azione dei relè sganciatori o del pulsante d'apertura la molla esegua automaticamente l'apertura dell'interruttore.-

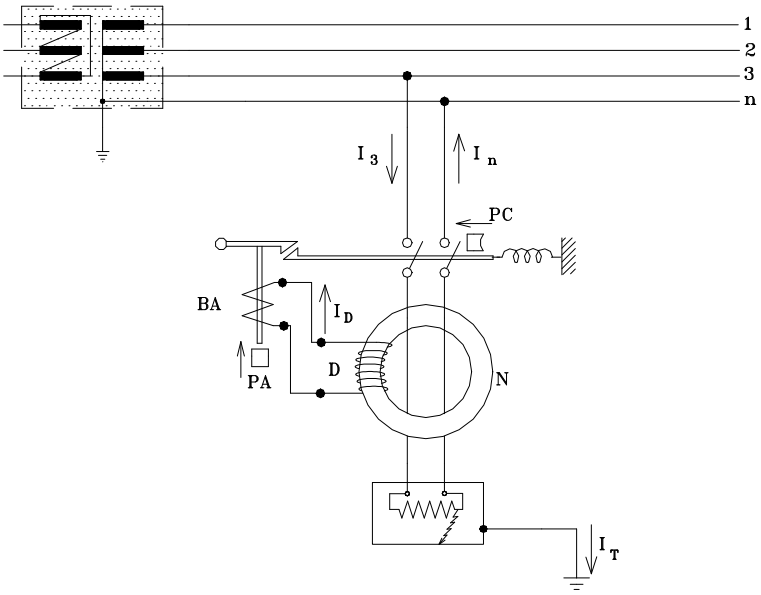
Gli interruttori automatici per bassa tensione vengono costruiti per correnti nominali che vanno da pochi ampere fino a miglia di ampere in versione unipolare, bipolare, tripolare o tetrapolare.-

In pratica, per ragioni di economia, l'interruttore automatico viene utilizzato anche come interruttore di manovra anche se tecnicamente sarebbe meglio disporre di due interruttori distinti posti in cascata: uno di manovra e l'altro di protezione.-

<u>Interruttori automatici con relè differenziali</u>: Nel caso in cui nella apparecchiatura si verifichi un guasto verso terra, la corrente di guasto spesso non assume valori sufficienti a far intervenire in tempo utile i fusibili o i relè di massima corrente dimensionati per le correnti di corto o le correnti di sovraccarico; questa funzione viene invece assolta ottimamente dai relè differenziali.-

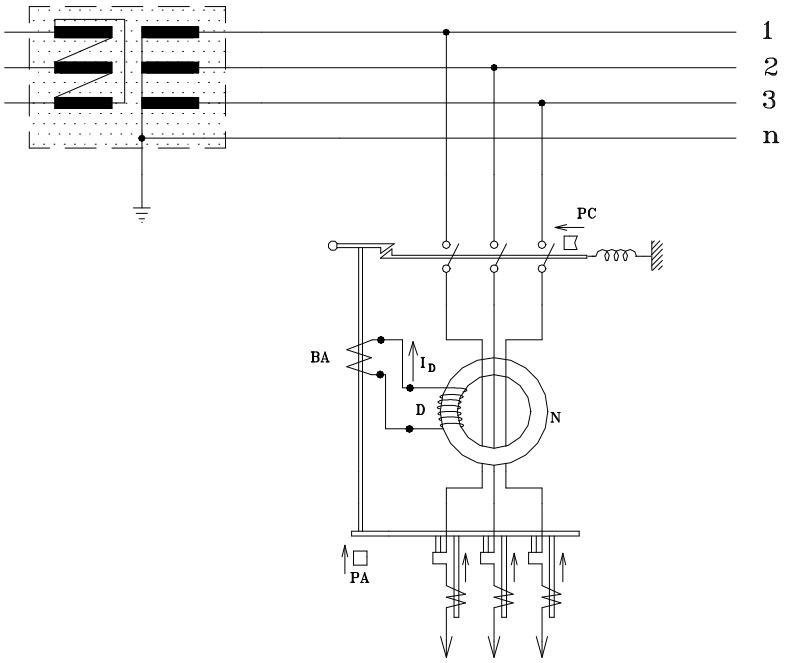
La parte sensibile di questo relè è costituita da un nucleo magnetico toroidale **N** al cui interno passano i conduttori del circuito di forza mentre una bobina **D** è avvolta attorno al nucleo stesso e risulta collegata alla bobina **BA** di apertura dell'interruttore.

Se le correnti alternate del carico I_3 e I_n sono uguali ed opposte esse non generano alcun flusso nel nucleo per cui la corrente I_D che percorre il circuito di sgancio risulterà nulla.-



Nel caso invece di un guasto verso terra la corrente $\dot{I}_n$ risulterà uguale alla differenza vettoriale ($\dot{I}_3 - \dot{I}_T$) in quanto la corrente di guasto $\dot{I}_T$ si chiude sul centro stella del trasformatore attraverso il terreno; in questa situazione la differenza delle correnti che passano per i conduttori al centro del nucleo ($\dot{I}_3 - \dot{I}_n$) risulta diversa da zero cioè pari a $\dot{I}_T$ per cui nel nucleo si genererà un flusso alternato che a sua volta indurrà una F.E.M. e quindi una corrente $\dot{I}_D$ nella bobina di apertura dell'interruttore determinando lo scatto del dispositivo di sgancio.-

Analogamente al relè differenziale monofase, funziona anche il trifase, non appena tutti i conduttori che vanno al carico sono fatti passare per il centro del nucleo ferromagnetico, in quanto. in assenza di guasto a terra, la somma vettoriale di tutte le correnti entranti nel carico dovrà essere sempre uguale a zero.-



Negli interruttori sia trifasi che monofasi, l'apertura automatica potrà essere asservita, oltre che al relè differenziale, anche a dei relè elettromagnetici in modo da proteggere il carico sia dai guasti a terra che dai cortocircuiti e dai sovraccarichi.-

Si definisce come <u>*sensibilità del relè differenziale*</u> la minima differenza vettoriale tra le correnti di linea (corrispondente alla corrente di guasto a terra) che determina lo scatto del dispositivo di sgancio.- Nei sistemi di distribuzione TT un relè differenziale avente una sensibilità di 0,03 A sarà efficace per la protezione dell'operatore se la terra avrà una resistenza inferiore a:

$$R_T \leq \frac{50}{I_T} = \frac{50}{0,03} = 1667\,\Omega$$

valore facilmente raggiungibile anche in normali impianti di terra domestici.-

<u>2.4.0 Contattori</u>

Sono dispositivi di manovra che, in posizione di riposo, risultano normalmente aperti ed il cui <u>*azionamento non è manuale*</u> bensì viene fatto attraverso un dispositivo elettromagnetico che agisce direttamente sull'asta di comando dei contatti. Nella condizione di riposo, una molla di richiamo mantiene aperti i contatti principali mentre nella posizione di lavoro un elettromagnete, eccitato da una corrente indipendente di comando, mantiene i contatti principali in posizione di chiusura: la posizione di riposo, apertura, risulta in tal modo sempre ottenuta per l'azione di molle che contrastano, in fase di chiusura, l'azione del dispositivo elettromagnetico di comando.- Oltre ai contatti principali, generalmente l'asta di comanda sposta anche dei contatti ausiliari che, in posizione di riposo possono, essere normalmente aperti o chiusi.-

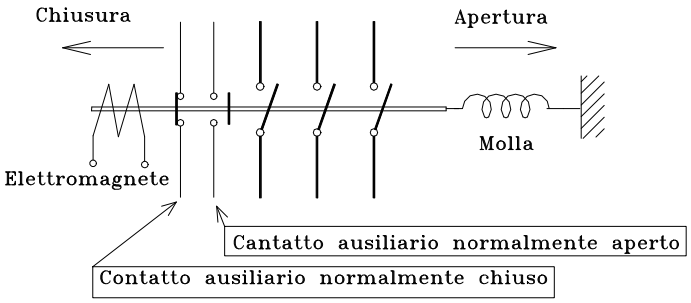
Questi dispositivi, chiamati anche **Teleruttori,** vengono dimensionati per un numero elevato di manovre; le grandezze che li caratterizzano sono la *tensione nominale* di lavoro, la *corrente nominale* ed il *potere d'interruzione*.-

Ogni contattore risulta formato da:

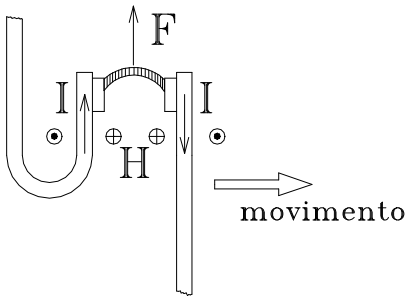
Elettromagnete d'azionamento costituito da un nucleo fisso sul quale è posta la bobina d'eccitazione e da un'ancora mobile che agisce sull'asta che sposta i contatti.

Contatti principali costituiti da una parte fissa e una mobile vincolata attraverso l'asta di manovra alla molla che, a bobina d'eccitazione non percorsa da corrente, mantiene i contatti stessi aperti (a riposo i contatti principali risultano aperti).-

Contatti ausiliari anch'essi costituiti da una parte fissa e una mobile, vincolata all'asta di comando, che possono però essere, in posizione di riposo, sia normalmente aperti sia chiusi. I contatti ausiliari, dovendo aprire o chiudere circuiti ausiliari con basse intensità di corrente, saranno dimensionalmente più piccoli.-



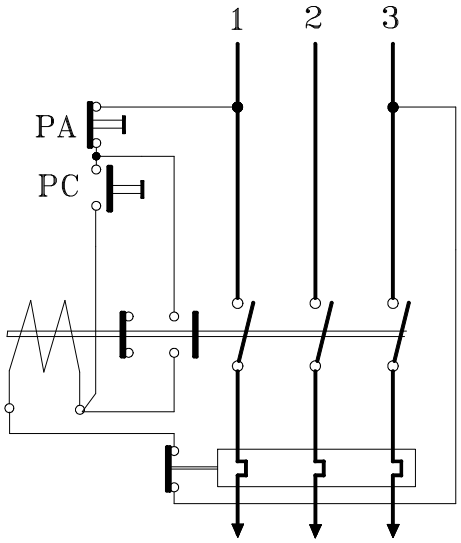
I contatti principali lavoreranno in presenza d'archi dovuti all'apertura di correnti di notevole intensità: per ridurre l'effetto di tali archi, i contatti sono formati da due staffe elastiche di rame legato e piegate ad U sulle cui estremità sono fissate due pastiglie argentate che realizzano le superfici di contatto. I tratti paralleli delle staffe, attraversati da correnti di verso opposto, generano nella zona d'apertura dei contatti stessi una forza elettromagnetica diretta verso l'esterno che tenda ad allungare l'arco fino a strapparlo (soffio magnetico dell'arco).-



La zona dei contatti è protetta da involucri isolanti, di opportune caratteristiche dielettriche e meccaniche, per proteggere il complesso dalle elevate temperature che si manifestano nella zona dell'arco.-

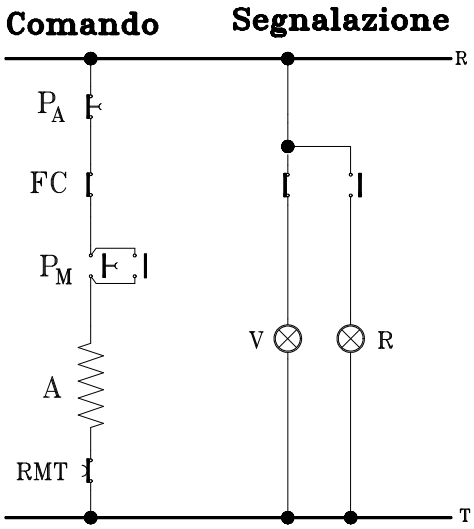
Nel caso venga a mancare la tensione di linea, l'elettromagnete non risulta più eccitato determinando in tal modo l'apertura del contattore con la conseguente disinserzione del carico; quando la tensione viene ripristinata, il contattore non si richiude automaticamente, lasciando il carico disinserito fino a quando l'operatore non preme il pulsante di chiusura: ciò costituisce una protezione del carico alimentato e degli operatori contro avviamenti intempestivi (da qui il nome di *salvamotore*).-

Di seguito sono indicati alcuni esempi di impiego di contattori mediante schemi funzionali e multifilari.-

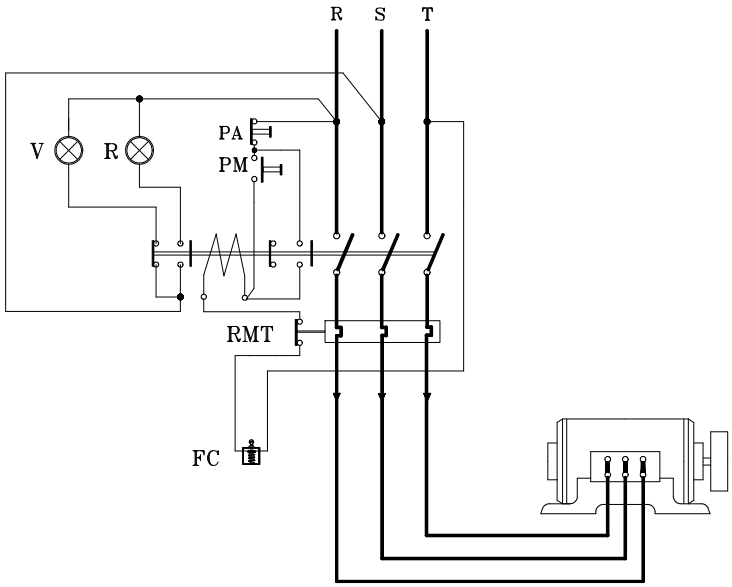


SCHEMA DI IMPIANTO PER IL COMANDO, MEDIANTE CONTATTORE, DI UN MOTORE TRIFASE CON PROTEZIONE DI MASSIMA CORRENTE, INTERRUTTORE DI FINE CORSA E LAMPADE DI SEGNALAZIONE MARCIA - ARRESTO

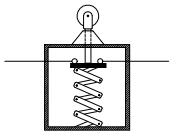
Schema Funzionale:



Schema Multifilare:

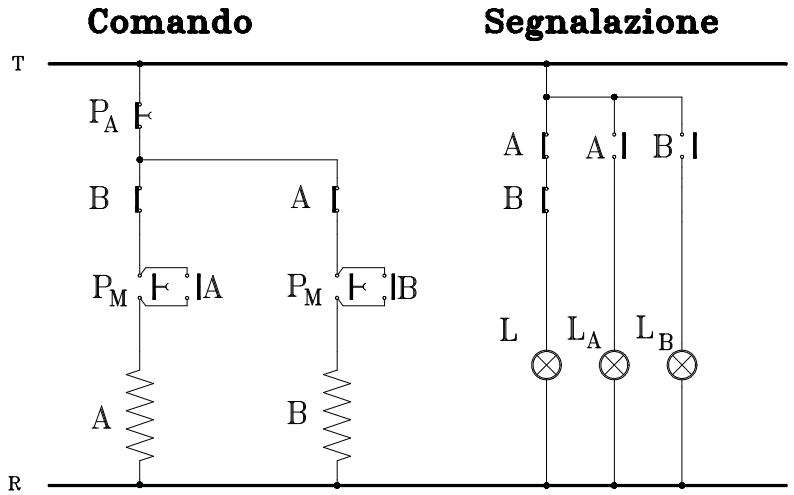


Pulsante di Fine Corsa

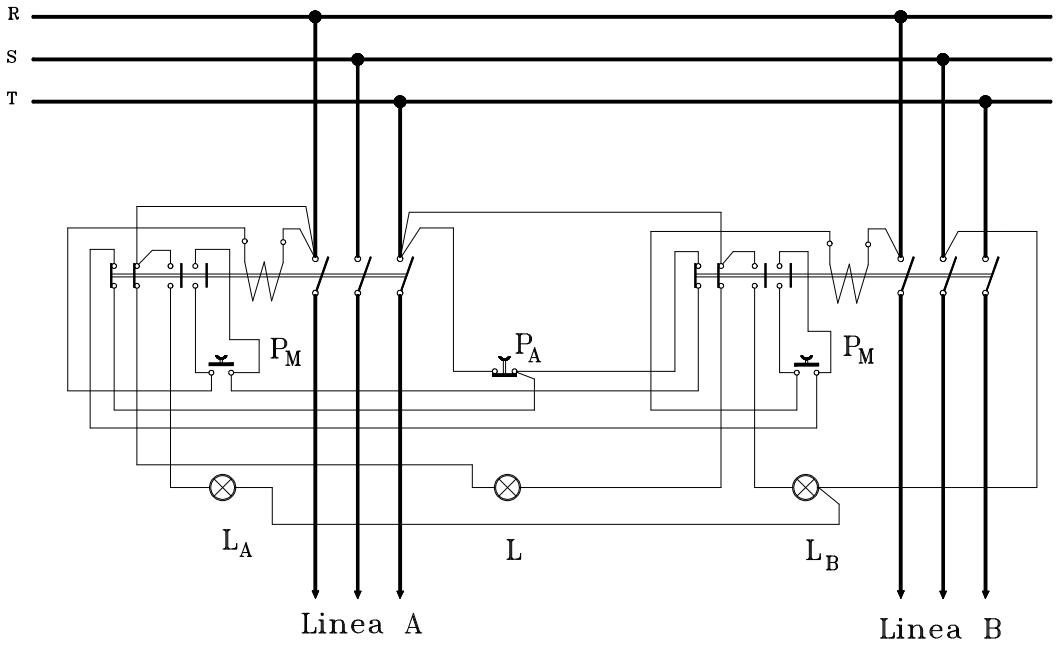


SCHEMA DI ALIMENTAZIONE DI DUE LINEE A e B CON CHIUSURA INDIPENDENTE CHE ESCLUDA LA POSSIBILITÀ DI INSERIRE A QUANDO RISULTA ALIMENTATA B E VICEVERSA – APERTURA DI A e B DA UN UNICO PUNTO – LAMPADE DI SEGNALAZIONE

Schema Funzionale:

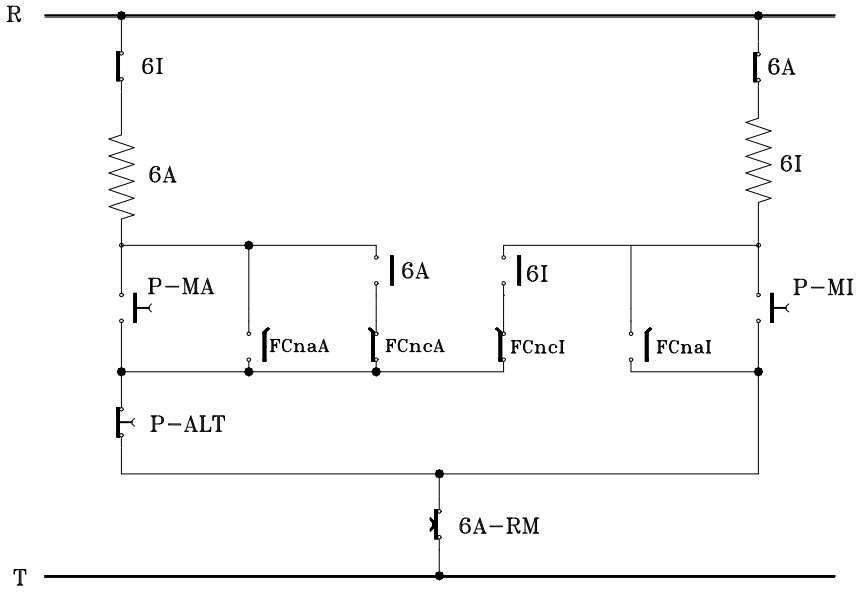


Schema multifilare:

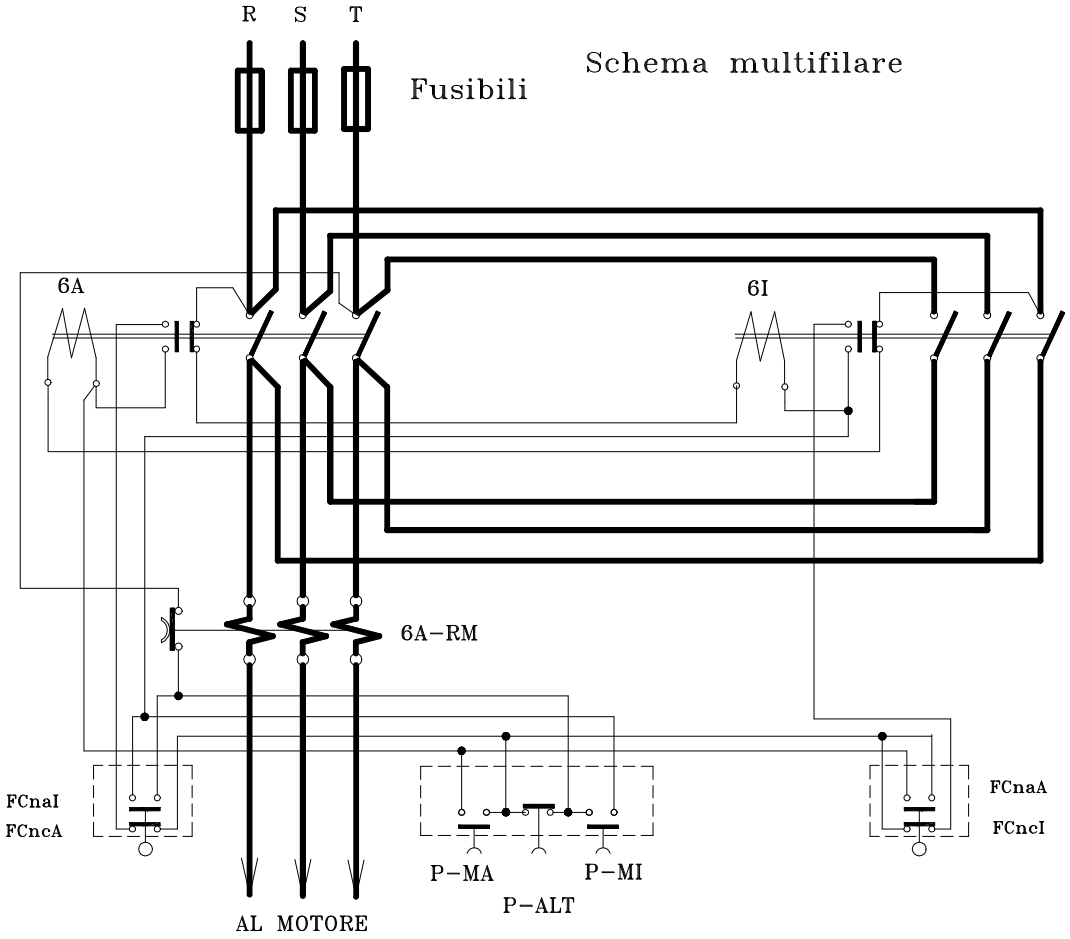


CONTATTORI PER INVERSIONE ISTANTANEA E AUTOMATICA DI FINE CORSA CON PROTEZIONE DI MASSIMA CORRENTE

Schema Funzionale:



Schema multifilare:



Capitolo III

IMPIANTI DI MESSA A TERRA

3.1.0 Generalità

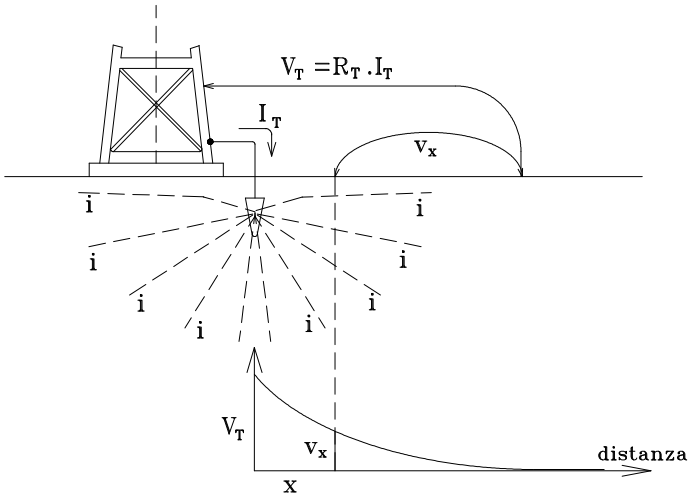
Al fine di proteggere gli operatori, le norme antinfortunistiche prescrivono che tutte le parti metalliche degli impianti elettrici che possano essere in qualche modo accessibili alle persone, non possano mai assumere, rispetto al terreno, potenziale elettrici maggiori a poche decine di volt.-

Per prevenire la possibilità di contatto delle parti in tensione con la struttura metallica di supporto e contenimento, si isolano i conduttori normalmente in tensione e/o si interpongono opportuni distanziatori; poiché a causa di un guasto, tali conduttori potrebbero venire accidentalmente a contatto con le parti metalliche, per evitare che queste assumano potenziali pericolosi è necessario collegare tutte le parti metalliche normalmente non in tensione ad un opportuno *impianto di messa a terra* avente una certa resistenza $\mathbf{R_T}$; si definisce *tensione verso terra* $\mathbf{V_T}$ il prodotto:

$$V_T = R_T \cdot I_T$$

ove $\mathbf{I_T}$ è la massima corrente di terra che può fluire attraverso tali collegamenti verso l'impianto di terra.-

La resistenza di terra $\mathbf{R_T}$ è data dalla somma della resistenza dei conduttori di collegamento dei corpi metallici con i *dispersori* infissi nel terreno, dei dispersori stessi e, in parte preponderante, dalla resistenza del terreno nel quale si disperde la corrente.-



Per ridurre la resistenza di terra, in modo da rendere minima la tensione verso terra, sarà necessario aumentare la superficie del dispersore, interrarlo a sufficiente profondità, o sostituirlo con più elementi distinti, tra loro collegati per mezzo di conduttori metallici, anch'essi interrati e costituenti nel loro insieme *l'impianto di terra*.-

Attorno alla presa di terra il potenziale varia come indicato nel diagramma di figura.-

Si definisce come *tensione di passo* $\mathbf{V_P}$ la differenza di potenziale esistente sul terreno, quando l'impianto di terra è in funzione, tra due punti distanti 1 metro (è massima in prossimità dei dispersori).-

Si definisce come *tensione di contatto* $\mathbf{V_C}$ la tensione cui è sottoposto il corpo umano quando, piedi a terra, entra con una parte del corpo in contatto con le parti metalliche delle apparecchiature che, per un guasto, siano in tensione.-

Le norme C.E.I. fissano dei limiti ben precisi sia per le tensioni di passo che di contatto.

3.2.0 La sicurezza elettrica

Il concetto di sicurezza, relativo ad un impianto d'utilizzazione dell'energia elettrica, è fondamentalmente legato a due elementi: il primo è il pericolo *d'incendio* conseguente a surriscaldamento dovuto a sovraccarichi o scintillii e scariche legate a cortocircuiti; il secondo quello di *folgorazione*, cioè il pericolo connesso al passaggio della corrente elettrica attraverso il corpo umano in conseguenza all'applicazione di una differenza di potenziale (tensione di contatto) tra due punti del corpo stesso.-

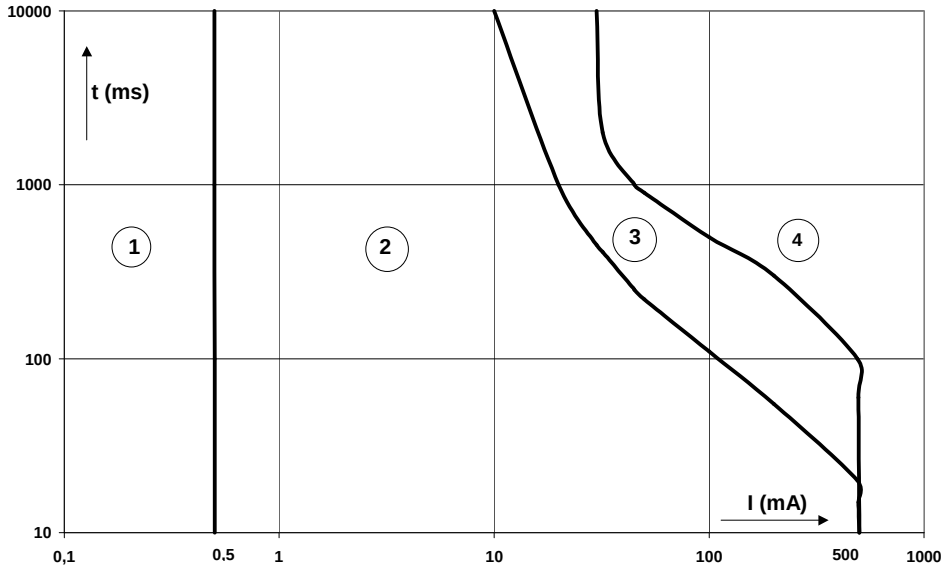
Il valore minimo della corrente che viene normalmente percepito (soglia di percezione), senza lasciare conseguenze al corpo umano, dipende dall'area di contatto e dalle condizioni di umidità; in generale si può ritenere che un valore inferiore a 0,5 mA, indipendentemente dalla durata del contatto, non costituisca pericolo (zona 1 di figura).-

Per valori superiori ai 0,5 mA, ma inferiori ai 20÷500 mA ,in funzione anche della durata del passaggio della corrente, la scarica è fastidiosa senza per altro provocare effetti fisiologici pericolosi (zona 2 di figura); valori superiori possono determinare i seguenti effetti dannosi o addirittura mortali:

Tetanizzazione: per basse intensità di corrente (zona 3 di figura) si ha una perdita di controllo dei muscoli che tendono a contrarsi spasmodicamente.

Asfissia: La tetanizzazione coinvolge i muscoli respiratori provocando svenimenti e morte se non si viene immediatamente aiutati con la respirazione artificiale (zona 3 di figura).

Fibrillazione ventricolare: funzionamento irregolare del cuore di cui viene alterato il ritmo in quanto ai propri impulsi elettrici si sovrappongono le contrazioni dovute al passaggio della corrente; se non si interviene entro pochi minuti con un defibrillatore si ha la morte (zona 4 di figura).-



Per raggiungere le indispensabili condizioni di sicurezza in un impianto elettrico, sarà necessario agire sia a livello di *installazione* delle apparecchiature costituenti l'impianto stesso che di *impiego* dell'impianto da parte dell'utente finale in conformità alle prestazioni per le quali è stato progettato e prevedere in fine un'opportuna *manutenzione* periodica per verificarne lo stato.-

La legge prescrive che nella progettazione ed esecuzione d'impianti elettrici di vario impiego vengano seguite le prescrizioni indicate dal Comitato Elettrotecnico Italiano (C.E.I.) rilevabili nei fascicoli 11, 44, 64 e 81 e che la loro esecuzione venga affidata a ditte specializzate che possano al termine dei lavori, rilasciare un certificato di conformità secondo quanto previsto dalla legge stessa.-

3.3.0 Sicurezza negli impianti a bassa tensione

3.3.1 Messa a terra del neutro e delle masse conduttrici:

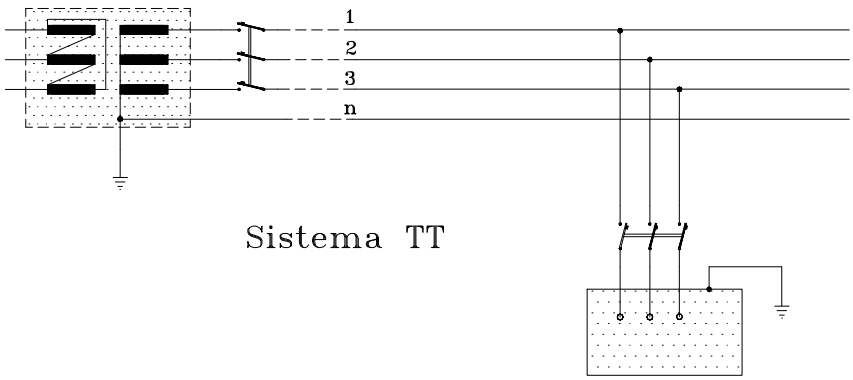
Gli impianti di distribuzione a bassa tensione prevedono:

La messa a terra del centro stella del trasformatore riduttore nella distribuzione a quattro fili (con neutro) così da sfruttare il terreno come conduttore: *Terra di funzionamento*

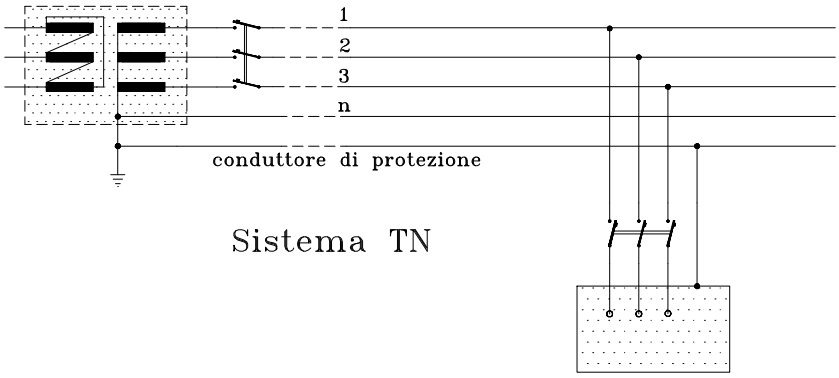
La messa a terra delle masse metalliche conduttrici di tutti gli utilizzatori e di tutte le parti degli impianti che normalmente non sono in tensione. La messa a terra consiste in una serie di accorgimenti idonei ad assicurare alle masse elettriche lo stesso potenziale della terra, evitando che le stesse possono venire a trovarsi in tensione. Infatti, i cavi in tensione assumono un determinato potenziale rispetto al terreno, che per gli impianti delle civili abitazioni è di 220 V o 380 V. A seguito di un guasto si possono creare situazioni di pericolo quando parti dell'impianto elettrico che normalmente non sono in tensione, come le carcasse degli elettrodomestici, acquisiscono una differenza di potenziale verso il terreno. La presenza della messa a terra di protezione mira a proteggere le persone dal rischio di folgorazione. Essa consiste in un dispersore collocato nel terreno (detto anch'esso *messa a terra)* al quale vengono collegate tutte le carcasse e le masse metalliche degli elettrodomestici. Lo scopo della messa a terra è quindi assicurare che le masse viste siano allo stesso potenziale del terreno. La messa a terra, inoltre, facilita l'intervento automatico dell'interruttore differenziale: *Terra di protezione.-*

In base alla modalità di collegamento a terra, gli impianti vengono classificati medianti l'impiego di due lettere: la prima con riferimento al collegamento a terra del sistema elettrico, la seconda relativamente alle masse metalliche. I sistemi normalmente impiegati sono:

Sistema TT : Il centro stella del sistema elettrico (trasformatore con secondario a stella con neutro) è collegato a terra come pure tutte le masse metalliche degli utilizzatori; in tal modo, in caso di guasto verso terra di un apparecchio, si crea una corrente di ritorno attraverso terra che provoca lo scatto degli interruttori differenziali di protezione. Questo sistema è obbligatorio in Italia per tutte le utenze in Bassa Tensione.-



Sistema TN : Il centro stella del sistema elettrico (trasformatore con secondario a stella con neutro) è collegato a terra mentre le masse metalliche degli utilizzatori sono collegate, mediante un conduttore di protezione, all'impianto di terra del sistema elettrico; esiste cioè un unico impianto di terra che funge sia da terra di protezione sia di funzionamento.-



3.3.2 Formazione della tensione di contatto negli impianti a bassa tensione:

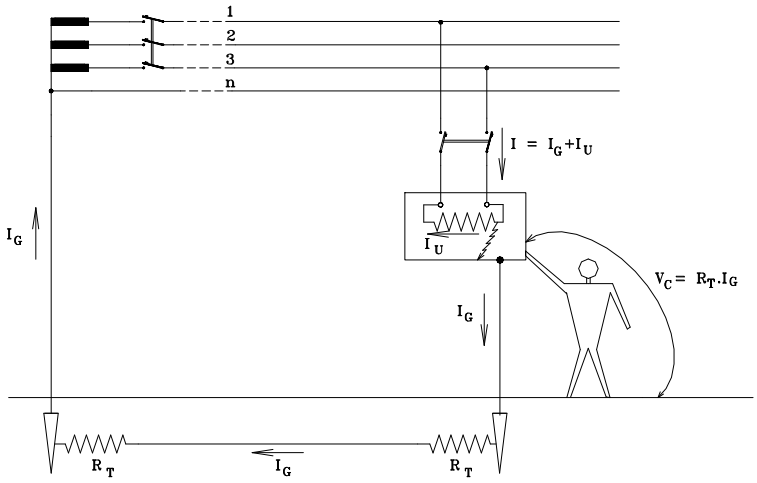
La tensione di contatto nei **sistemi TT** è determinata dalla corrente di guasto $\mathbf{I_G}$ che dalla massa metallica, andata in tensione a causa del guasto, passa attraverso i conduttori di terra e si disperde nel terreno incontrando una resistenza totale pari a $\mathbf{R_T}$**:**

$$V_C = R_T \cdot I_G$$

La protezione della persona risulta essere legata sia alla presenza dell'interruttore automatico il cui relè di massima corrente deve intervenire entro 5 secondi per una corrente **I** legata al valore della resistenza di terra dalla relazione:

$$R_T \leq \frac{50}{I}$$

in modo che nelle condizioni più sfavorevoli la massima tensione di contatto risulti inferiore a 50 V, sia al fatto che il corpo della persona presenta una resistenza molto più elevata del collegamento di terra al quale si trova in parallelo.-

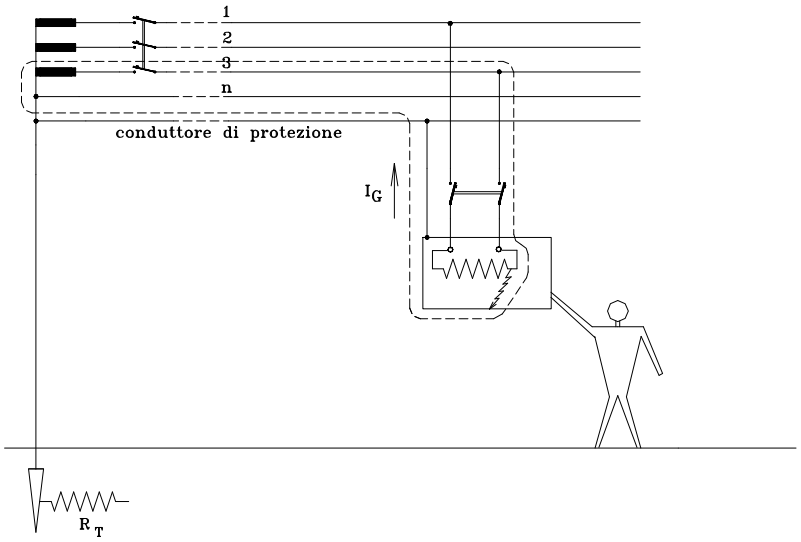


Nei **sistemi TN** la corrente di guasto a terra di un utilizzatore si richiude attraverso il conduttore di protezione direttamente sul neutro del trasformatore non interessando l'impianto di terra.-

La protezione della apparecchiatura è così devoluta all'interruttore con relè di massima corrente che deve poter intervenire con una corrente:

$$I \leq \frac{V_S}{Z_G}$$

ove V_S è la tensione stellata dell'impianto e Z_G l'impedenza dell'anello di guasto.-



3.3.3 Dispositivi di protezione contro i guasti a terra:

In entrambi i sistemi TT e TN, l'apparecchiatura dovrà avere a monte un interruttore che determini, in presenza di un guasto versa terra, l'immediata separazione della stessa dall'impianto: tale interruttore automatico dovrà essere pilotato o da un relè di massima corrente o da un relè differenziale.-

Il *relè di massima corrente*, con funzione anche di protezione contro i corto circuiti, potrà essere usato soltanto se la corrente di guasto a terra sommata a quella di carico normale sarà dell'ordine di grandezza della corrente di corto circuito: ciò si può verificare se la resistenza di terra $\mathbf{R_T}$ e impedenze dell'anello di guasto $\mathbf{Z_G}$ risultano molto piccole.-

Il *relè differenziale* trova invece impiego nel caso di $\mathbf{R_T}$ e $\mathbf{Z_G}$ di valore più elevato di modo che la corrente di guasto $\mathbf{I_G}$ non sia un sovraccarico sufficiente a far intervenire il relè di massima corrente: il relè differenziale, essendo sensibile alla somma vettoriale delle correnti che entrano nell'utilizzatore, interverrà non appena la corrente dispersa verso terra supererà la sua soglia d'intervento (normalmente dell'ordine delle decine di milliampere).-

Capitolo IV

MOTORI ELETTRICI

4.1.0 Criteri di scelta dei motori elettrici:

All'inizio della tecnica degli azionamenti mediante motori elettrici la tendenza era quella di concentrare gli impianti installando un solo motore di grande potenza che, mediante opportune trasmissioni meccaniche, forniva la potenza a tutte le macchine dell'opificio in modo da ridurre al minimo l'estensione degli impianti elettrici considerati allora poco sicuri.-

Il rapido perfezionamento delle costruzioni elettromeccaniche, sia in fatto di sicurezza che d'affidabilità, e lo sviluppo di motori con caratteristiche funzionali molto varie, ha portato alla situazione odierna ove la tendenza è quella di ridurre al minimo le trasmissioni meccaniche aumentando il numero di motori elettrici, assegnando così a ciascuna macchina operatrice il suo motore elettrico scelto con le caratteristiche più appropriate per il tipo d'azionamento che deve svolgere.-

I criteri che guidano la scelta di un motore elettrico necessario per un azionamento sono:

- Potenza richiesta
- Velocità e suo campo di regolazione
- Tipo di servizio (Continuo o intermittente)
- Condizioni d'impiego (posizionamento, ambientali)
- Avviamento
- Frenatura (a recupero d'energia o dissipativa elettrica o meccanica)
- Costi

1. Potenza richiesta:

La potenza del motore deve essere scelta in modo da uguagliare o meglio essere leggermente superiore alla potenza massima richiesta dall'utenza.-

2. Velocità:

Per quanto concerne la velocità, l'azionamento può essere:

A - Azionamento a velocità non regolata - la relazione tra velocità e coppia frenante dipende soltanto dalle caratteristiche proprie del motore e può essere con:

a. Velocità leggermente decrescente da vuoto a pieno carico
b. Velocità perfettamente costante da vuoto a pieno carico
c. Velocità fortemente decrescente da vuoto a pieno carico

B - Azionamento a velocità regolabile - a gradini o con continuità indipendentemente dalla variazione del carico eseguibile con opportune manovre sull'alimentazione del motore:

a. A bassa dinamica con rapporto tra n_{min} ed n_{max} inferiori a 10 volte
b. Ad alta dinamica con rapporto tra n_{min} ed n_{max} inferiori a 100 volte

I tipi di motori che possono essere scelti, in base al tipo d'azionamento richiesto, saranno valutati nel paragrafo successivo.-

3. Tipo di servizio:

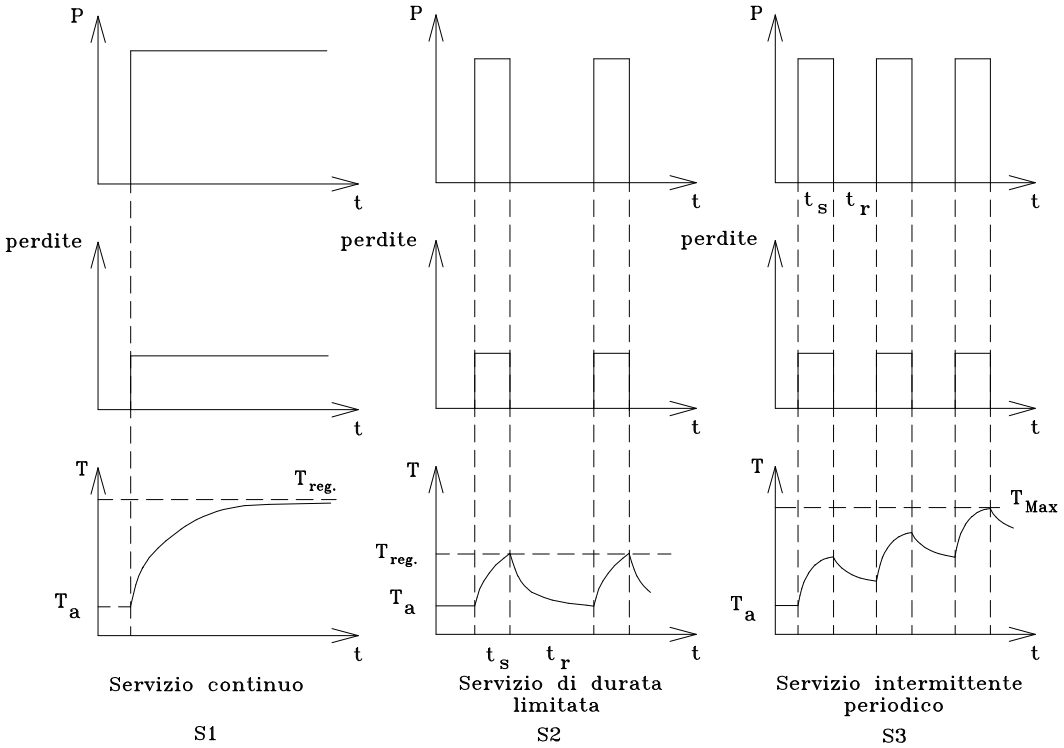
In base alla durata del servizio, le norme C.E.I. prevedono:

A: Servizio continuo (S 1) con una durata di funzionamento sufficiente affinché la macchina raggiunga la temperatura di regime.

B: Servizio di durata limitata (S 2) la macchina funzione per un intervallo di tempo t_s minore di quello necessario a raggiungere la temperatura di regime seguito da un intervallo di riposo t_r sufficiente a che la macchina ritorni alla temperatura ambiente.

C: Servizio intermittente periodico (S 3) come il tipo B ma con intervallo di riposo t_r minore. Si definisce il Rapporto d'intermittenza come:

$$R_i\ \% = 100\frac{t_s}{t_s + t_r} = 15\%\ ;\ 25\%\ ;\ 40\%\ ;\ 60\%$$



4. Condizioni di impiego:

Le condizioni d'impiego riguardano:

A - Posizionamento che può essere:
a. Orizzontale
b. Verticale
c. Inclinato

da cui segue le Caratteristiche del fissaggio (piedi o flange), le modalità di Lubrificazione, i tipi di Cuscinetti, l'Accoppiamento che può essere diretto (con giunto rigido o elastico) o indiretto (con cinghia o catena).

B - Protezione secondo l'ambiente in cui il motore è chiamata ad operare (protetto contro la penetrazione di corpi estranei di diametri vari, polvere, acqua a pioggia, immersione).-

Ad indicare il grado di protezione di una macchina elettrica, le norme C.E.I. prescrivono una sigla del tipo **I P ab** ove **a** e **b** sono due numeri scelti in base alla seguente tabella:

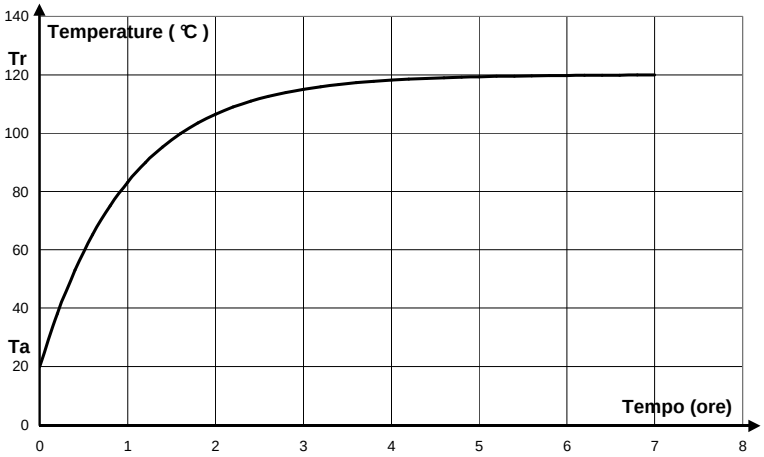
	a	b
	Macchina protetta contro corpi solidi di dimensioni massima	Macchina protetta contro le cadute di
1	***50 mm***	***Gocce verticali***
2	***12 mm***	***Gocce inclinate di 15°***
3	***2,5 mm***	***Pioggia***
4	***1 mm***	***Spruzzi d'acqua***
5	***polvere***	***Getti d'acqua***
7		***Stagne all'immersione***

Es.: Protezione **IP44** Macchina protetta contro la penetrazione di corpi aventi dimensione superiore a 1 mm. e contro gli spruzzi d'acqua.-

C - Raffreddamento può essere:

a. Circuito di raffreddamento aperto con ventole sull'asse che forzano la circolazione dell'aria ambiente all'interno del motore
b. Circuito di raffreddamento chiuso con ventole sull'asse che forzano l'aria della macchina, chiusa ermeticamente, a lambire l'involucro interno al quale cede il calore; l'involucro a sua volta cede il calore all'ambiente esterno
c. Circuito di raffreddamento indipendente nel quale un motoventilatore preleva l'aria all'esterno dell'ambiente di lavoro per forzarla dentro la macchina (ermetica) dalla quale poi esce trasportando all'esterno dell'ambiente stesso il calore prelevato.

La necessità del raffreddamento della macchina elettrica deriva dalle seguenti considerazioni:
La macchina a regime, funzionando con un certo rendimento, ha delle perdite di potenza; queste si trasformano in una certa quantità di calore $\Delta \mathbf{Q}$ costante nel tempo, se la macchina rimane a regime.



Poiché la quantità di calore che può essere ceduta al fluido refrigerante è proporzionale alla differenza di temperatura $\Delta \mathbf{T}$ tra macchina ed il fluido stesso, negli istanti iniziali di funzionamento, essendo la macchina a temperatura ambiente $\mathbf{T_a}$, non cederà alcun calore, per cui tutto il calore prodotto, rimanendo all'interno, determinando un rapido innalzamento della temperatura della macchina.-

A mano a mano che la temperatura della macchina aumenta, il calore prodotto viene ceduto, sempre in maggior quantità, al fluido refrigerante che lo porta all'esterno, per cui l'innalzamento della temperatura della macchina avviene sempre più lentamente, tendendo asintoticamente al valore di regime $\mathbf{T_r}$ al quale il salto termico $\Delta \mathbf{T} = \mathbf{T_r} - \mathbf{T_a}$ è sufficiente a far si che tutto il calore prodotto venga ceduto al fluido refrigerante.-

Da tali considerazioni segue che, a regime, la macchina funzionerà ad una temperatura $\mathbf{T_r} = \mathbf{T_a} + \Delta\mathbf{T}$ ove $\Delta\mathbf{T}$ è legato al tipo di macchina ed ai suoi parametri di funzionamento.-

$\mathbf{T_r}$ sarà quindi la temperatura alla quale i vari materiali isolanti saranno chiamati a svolgere la loro funzione.- Da questo punto di vista tali materiali vengono raggruppati dalle norme CEI in diverse classi d'isolamento secondo quanto indicato nella tabella seguente:

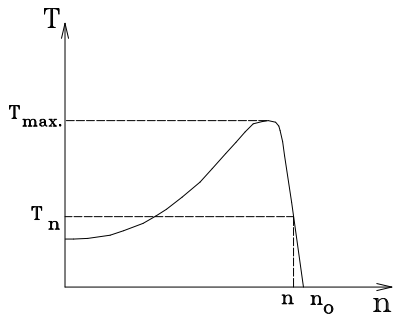
Classi di isolamento	***Temperatura limite di funzionamento (Tr)***	***Tipi di materiali***
Y	***90°C***	Seta, cotone, legni non impregnati ecc.
A	***105°C***	Seta, cotone, legno impregnati con vernici naturali ecc.
E	***120°C***	Smalti con resine epossidiche ecc.
B	***130°C***	Fibre di vetro, mica impregnati di resine epossidiche ecc.
F	***155°C***	Fibre di vetro, mica impregnati di resine poliesteri ecc.
H	***180°C***	Fibre di vetro, mica impregnati di resine siliconiche ecc.
C	***>180°C***	Porcellana ecc.

4.2.0 Azionamenti a velocità non controllata

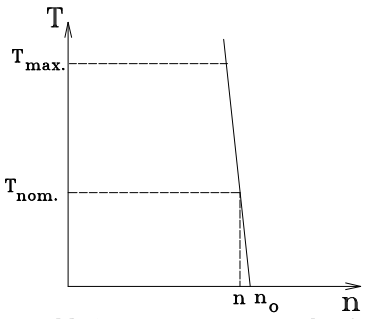
4.2.1 Azionamento a velocità leggermente decrescente da vuoto a carico:

Questo tipo d'azionamento trova impiego con macchine operatrici che ammettono una minima diminuzione percentuale di velocità da vuoto a carico (Elettrodomestici, Macchine utensili ordinarie, Pompe, Ventilatori, Compressori)

- Viene impiegato per utenze che vanno da piccolissime potenze fino a grandi potenze
- I motori impiegati sono: MOTORI ASINCRONI TRIFASI E MONOFASI - MOTORI A C.C. con eccitazione in derivazione



Motore asincrono



Motore c.c. ecc. deriv.

n_o = velocità a vuoto con $T = 0$ $\qquad$ T_n = Coppia nominale

n = velocità a pieno carico con $T = T_n$ $\qquad$ T_M = Coppia massima istantanea di sovracarico

$$T_M \approx (2 - 3)\, T_n \qquad\qquad P_n = \frac{2\pi\, n}{60} T_n$$

$$\Delta n\% = 100 \frac{n_o - n}{n_o} \qquad\qquad \Delta n\% = (1-5)\%$$

Il costo del motore, a parità di potenza, aumenta alle basse velocità in quanto aumenta il numero dei poli e quindi le dimensioni.-

Per piccole e medie potenze fino alle centinaia di kilowatt, le velocità da pochi giri al minuto sino a qualche centinaio (10g/' < n < 500 g/') si ottengono con motori a 4 poli (1500 g/min.) muniti di un riduttore ad ingranaggi posto entro la stessa carcassa del motore.-

Per grandi potenze e basso numero di giri si usa invece un motore ad elevato numero di poli.-

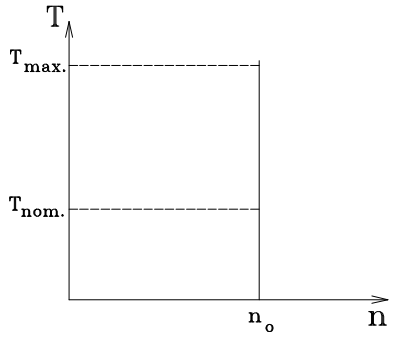
Il Motore Asincrono è preferito al Motore in c.c. con eccitazione in derivazione in quanto può essere alimentato direttamente in c.a. dalla rete e non ha il collettore a lamelle che necessita di maggior manutenzione e lo rende più costoso, a parità di potenza.-

4.2.2 Azionamento a velocità costante a tutti i carichi:

Questi tipo d'azionamento trova impiego con macchine operatrici che richiedono una velocità rigorosamente costante al variare del carico (Industrie tessili, Cartiere, Corderie, ove le caratteristiche del prodotto sono legate alla costanza della velocità della macchina).-

Il motore impiegato è il MOTORE SINCRONO trifase o il MOTORE ASINCRONO SINCRONIZZATO e per piccole potenze il Motore sincrono monofase a riluttanza variabile e il Motore sincrono a magneti permanenti.-

Il motore sincrono trifase offre dei vantaggi collaterali in quanto, in regime sovreccitato, funziona contemporaneamente da condensatore rotante rifasatore ed ha un rendimento maggiore del corrispondente Motore asincrono.-



Nel caso d'impiego del motore sincrono, la difficoltà che s'incontra e quella dell'avviamento che deve essere eseguito con un motore di lancio.-

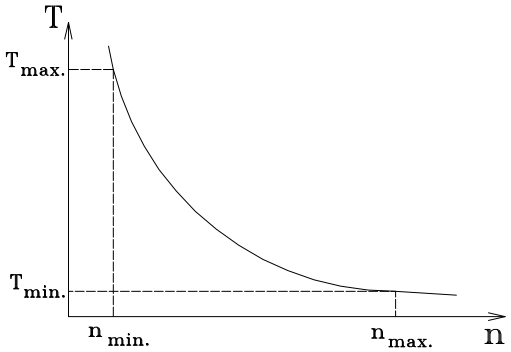
$n = n_o$ a tutti i regimi

$$P_n = \frac{2\pi\, n}{60} T_n$$

4.2.3 Azionamento a velocità fortemente decrescente con il carico:

Questo tipo d'azionamento trova impiego con macchine operatrici che richiedono una coppia motrice fortemente variabile: elevata alle basse velocità (allo spunto) e minore a velocità più alte. In tal modo la potenza richiesta al motore rimane costante in quanto all'aumentare della velocità (n) si riduce la coppia (T) (Montacarichi, Gru, Trazione elettrica).-

Il motore impiegato è il MOTORE A C.C. con eccitazione serie.-



$$P = \frac{2\pi n}{60} T$$

4.3.0 Azionamenti a velocità controlla

4.3.1 A bassa dinamica:

Sono azionamenti nei quali la velocità viene regolata con opportune manovre o comandi sui circuiti d'alimentazione del motore elettrico in modo da variare la velocità del gruppo indipendentemente dalla coppia frenante richiesta dalla macchina azionata entro i limiti di:

$$1 < \frac{n_{Max}}{n_{min}} < 10$$

-- Per le grandi potenze si usano MOTORI ASINCRONI alimentati a frequenza e tensione variabile ottenuta dalla rete a frequenza e tensione costante mediante raddrizzatori controllati ed inverter.-

-- Per le piccole potenze si usano MOTORI IN C.C. alimentati a tensione variabile ottenuta dall'alternata mediante raddrizzatori controllati a tiristori.-

-- Questo tipo d'azionamento trova impiego nelle Lavorazioni in campo metallurgico, Lavorazione della plastica, Trattamento dei fluidi, Macchine per stampa, Macchine per imballaggi con potenze che arrivano a centinaia di Kilowatt.-

4.3.2 Ad alta dinamica:

Sono azionamenti nei quali il campo di variazione della velocità risulta molto ampio:

$$1 < \frac{n_{Max}}{n_{min}} < 100$$

e che devono potersi avviare, variare la velocità e fermarsi molto rapidamente.-

-- Per le grandi potenze si usano MOTORI SINCRONI alimentati a frequenza variabile ottenuta dalla rete a frequenza e tensione costante mediante raddrizzatori ed inverter .-

-- Per piccole e medie potenze si usano MOTORI ASINCRONI (che tendono a sostituire i Motori a corrente continua) e MOTORI SINCRONI A MAGNETI PERMANENTI alimentati a frequenza variabile ottenuta mediante raddrizzatori ed inverter.-

-- Questo tipo d'azionamento trova impiega nelle Catene cinematiche per robotica, Sistemi di controllo tiro, nelle Motorizzazioni di assi e mandrini nelle macchine utensili.-

4.4.0 Protezione dei motori elettrici

La protezione dei motori elettrici in relazione alle possibili sovracorrenti ha la funzione di salvaguardare il motore stesso e le apparecchiature elettriche ad esso connesse, dagli effetti termici e meccanici conseguenti gli eccessi di corrente che si possono verificare in conseguenza di sovraccarichi o cortocircuiti.-

Per garantire il buon funzionamento di un azionamento elettrico è indispensabile, per ciascun motore, disporre di un'apparecchiatura di protezione contro il surriscaldamento dovuto a sovraccarichi prolungati nel tempo o, nel caso di motori asincroni trifasi, dalla possibilità di funzionamento monofase dovuto all'interruzione di una fase per guasto; tale protezione, atta ad interrompere il circuito di alimentazione in presenza di una delle condizioni viste sopra, protegge oltre al motore anche i conduttori di linea e i contattori o interruttori; i dispositivi usati allo scopo sono i *relè termici* in combinazione a interruttori automatici o contattori.-

La protezione delle apparecchiature in presenza di cortocircuiti viene invece affidata ai *fusibili o ai relè magnetici* in combinazione con interruttori automatici o contattori.-

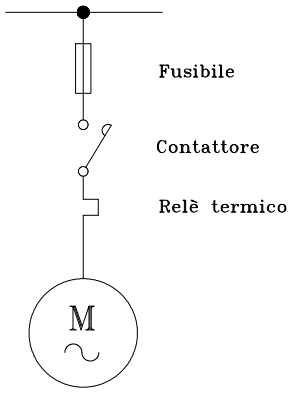
I due tipi di dispositivi visti, hanno tempi e correnti d'intervento diversi in modo da:

1. Consentire il passaggio della corrente nominale d'esercizio continuo.-
2. Sopportare senza intervenire i sovraccarichi di breve durata.-

3. Sopportare le correnti di spunto e d'avviamento del motore per la durata prevista per il tipo d'avviamento adoperato.-
4. Determinare l'apertura del circuito d'alimentazione in presenza di sovracorrenti maggiori di quelle indicate nei punti precedenti e di durata superiore a quella permessa.-

Le possibili soluzioni normalmente adottate sono le seguenti:

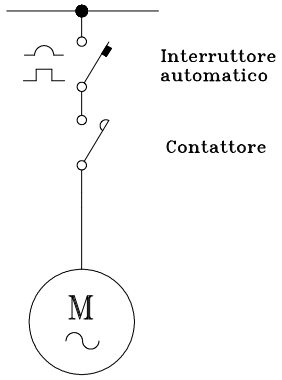
a. Il dispositivo di manovra è costituito da un contattore che funge anche da protezione contro i sovraccarichi in quanto associato ad un relè termico avente in serie dei fusibili per i cortocircuiti; il grado d'efficienza e di sicurezza di questo tipo di protezione è legato al corretto coordinamento dei tempi d'intervento del relè termico per le correnti di sovraccarico e dei fusibili per le correnti di cortocircuito: il tempo d'intervento del relè termico deve essere di poco superiore al tempo d'avviamento del motore.-



Questo sistema trova vasto impiego per il minor costo legato all'impiego dei fusibili e per la possibilità di manovra a distanza del contattore anche in presenza di una catena di automatismi: il sistema è applicabile per qualsiasi potenza fino alla massima che s'incontra con motori di serie (circa 500 kW).-

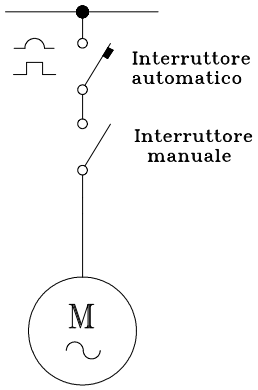
b. La funzione del fusibile e del relè termico vengono svolte da un interruttore automatico con relè magnetotermico, mentre l'organo di manovra rimane sempre il contattore che può essere anche comandato a distanza.-

Questo sistema ha le medesime caratteristiche d'impiego del precedente per qualsiasi valore di potenza, viene però meno usato per il maggior costo dell'interruttore automatico rispetta ai fusibili ed il relè termico.-



c. Con questo sistema la funzione di protezione contro le sovracorrenti ed i cortocircuiti rimane sempre affidata ad un interruttore automatico con relè magnetotermico mentre il dispositivo di manovra diventa un interruttore ad azionamento manuale.-

Questo metodo viene usato per il comando locale (non a distanza) di motori di piccola e media potenza.-

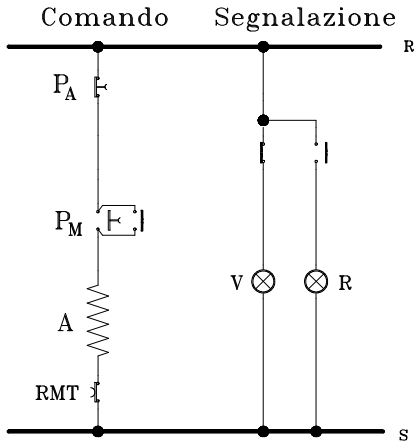


Nel caso di motori di piccola potenza, quali quelli per azionamenti di piccoli utensili elettrici (trapani, levigatrici, ecc.) o elettrodomestici, la protezione contro i cortocircuiti è affidata ai dispositivi installati in partenza della linea di alimentazione dell'impianto mentre quella relativa ai sovraccarichi di esercizio a dei relè termici a riarmo automatico installati all'interno dell'apparecchiatura.-

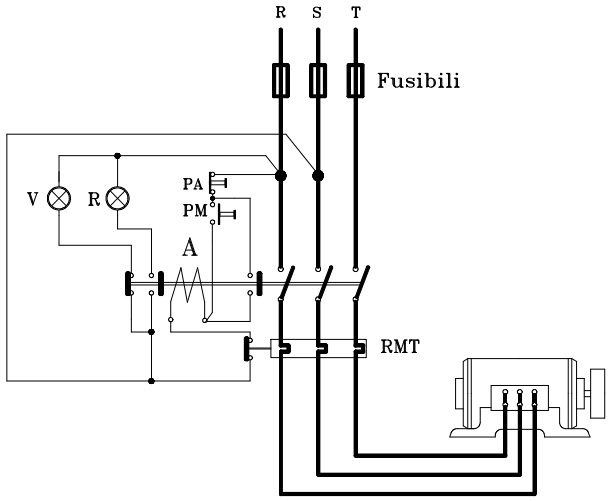
4.5.0 Schemi di comando per motori asincroni trifasi

L'avviamento dei motori asincroni può essere eseguito manualmente mediante un comune *interruttore di manovra* oppure asservito ad una serie di manovre legate a particolari tipi di avviamento o di coordinamento con altre apparecchiature nel qual caso viene eseguito mediante un contatto ausiliario ed un *contattore*.-

Lo schema di inserzione che prevede l'uso di un contattore con relè termico di protezione contro i sovraccarichi, lampade di segnalazione di marcia e arresto e fusibili di protezione contro i cortocircuiti è quello seguente, fornito sia nella versione di schema funzionale che quello multifilare.-



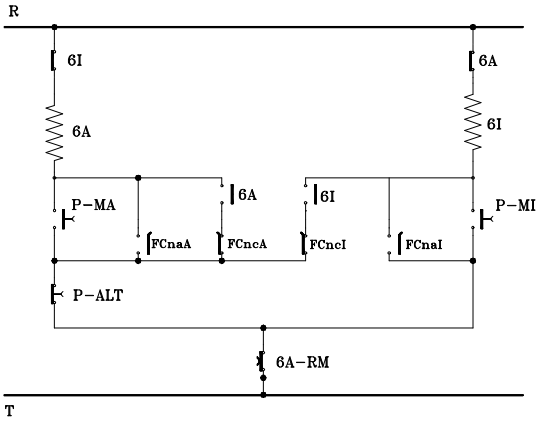
Schema funzionale



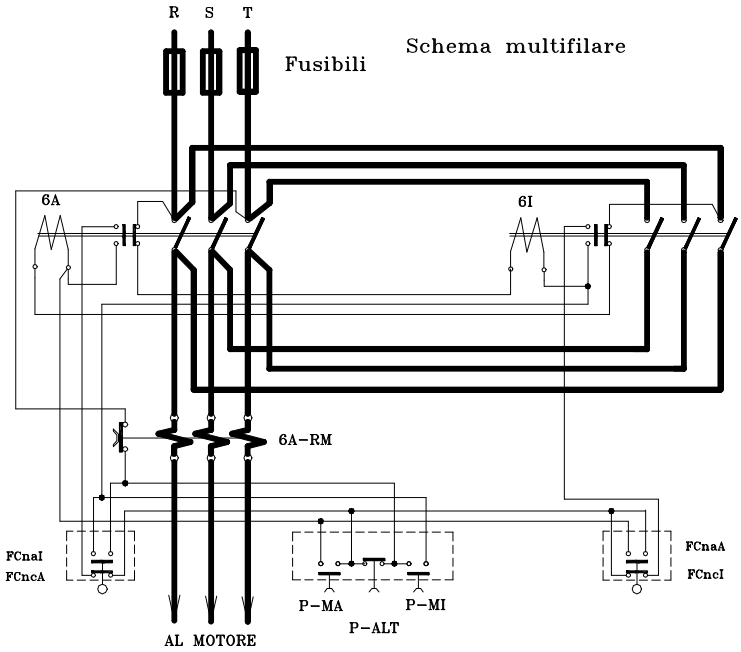
Schema multifilare

Uno schema più complesso è il seguente che prevede l'impiego di due contattori per la realizzazione di un teleinvertitore del senso di marcia, con protezioni per i sovraccarichi ed i cortocircuiti, comandato a distanza sia manualmente sia automaticamente da fine – corsa.-

Schema funzionale



Schema multifilare



Capitolo V

IMPIANTI DI RIFASAMENTO

5.1.0 Il rifasamento degli impianti utilizzatori

Negli impianti utilizzatori funzionanti in corrente alternata i singoli carichi sono normalmente di tipo ohmico-induttivo (trasformatori, motori asincroni, saldatrici, forni ad induzione, elettromagneti, lampade a scarica nei gas) o puramente ohmico (lampade ad incandescenza, forni a resistenza ed in generale gli apparecchi termici per riscaldamento); per questo l'impianto utilizzatore nel suo complesso è visto dalla rete di distribuzione come un carico equivalente di tipo ohmico-induttivo.-

La *potenza attiva* assorbita dall'impianto sarà quindi sempre accompagnata da uno scambio di *potenza reattiva* la cui entità è legata al valore del fattore di potenza dell'impianto stesso; poiché la corrente di linea è legata agli altri parametri dell'impianto dalla relazione:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,V \cos\varphi}$$

un utilizzatore che funzioni con un basso fattore di potenza (**P***ower* **F***actor*: P.F.) determina i seguenti effetti negativi:

a.) A parità di potenza assorbita la corrente di linea è tanto maggiore quanto più basso è il P.F.

b.) Una maggior corrente in linea determina una maggiore perdita per effetto Joule nei conduttori di linea e negli avvolgimenti dei trasformatori e dei generatori oltre a maggiori cadute di tensione, maggiori perdite non contabilizzate dai contatori d'energia posti all'ingresso dell'utenza.-

c.) Per limitare le perdite in linea e le cadute di tensione, le aziende distributrici sono costrette ad aumentare le sezioni dei conduttori di linea o talvolta a suddividere il carico tra più linee in parallelo (vedi esempio numerico svolto nel capitolo "Reti di distribuzione in media e bassa tensione").-

d.) Le centrali di generazione e le stazioni di trasformazione devono essere dimensionate per una potenza apparente (kVA) maggiore essendo:

$$A = \frac{P}{\cos\varphi}$$

La conseguenza diretta di quanto visto sopra è che la società distributrice dell'energia elettrica è costretta a sopportare oneri tanto maggiori quanto minore è il P.F. delle utenze, sempre a parità di potenza ed energia attiva fornite.-

Per questo motivo le norme attualmente vigenti prevedono dei limiti al P.F. delle forniture (generalmente pari allo 0,9) al di sotto del quale viene applicato un sovrapprezzo all'energia assorbita calcolato in vari modi, ma in ogni caso tanto maggiore quanto minore è il P.F. In particolare per le utenze con potenza installata superiore ai 15 kW:

con $\cos\varphi > 0{,}9$ non è richiesto alcun rifasamento

con $0{,}7 < \cos\varphi < 0{,}9$ conviene rifasare per evitare un sovraprezzo nel costo del kWh

con $\cos\varphi < 0{,}7$ è obbligatorio il rifasamento

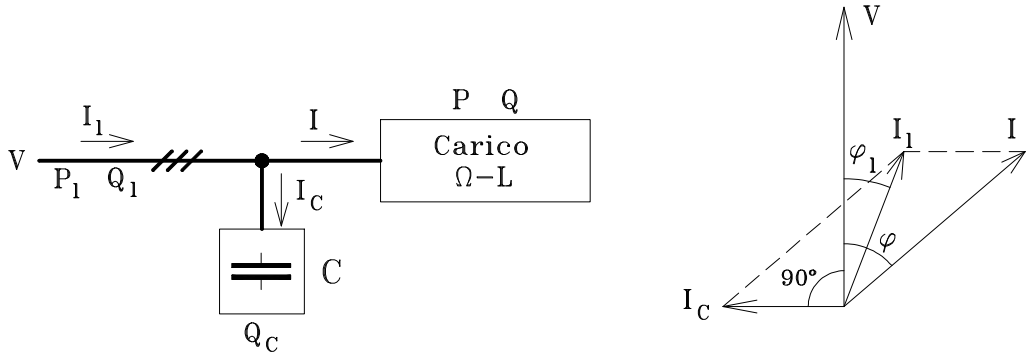
Queste considerazioni portano alla conclusione che il costo dell'energia elettrica assorbita da un utente può diventare molto rilevante se il prelievo viene eseguito con fattore di potenza inferiore a limite contrattuale previsto.-

Ecco quindi l'esigenza di *Rifasare gli impianti utilizzatori* cioè di aumentare il P.F. all'ingresso dell'impianto in modo da rendere minima, a parità di potenza attiva assorbita, la corrente di linea.-

Poiché rifasare un impianto significa ridurre l'angolo di sfasamento tra la tensione e la corrente assorbita, risulta chiara la via da seguire per l'utente: se il carico è di tipo ohmico-induttivo basta porre in parallelo al carico stesso una batteria di condensatori di opportuna capacità; tale batteria di condensatori non aumenterà la potenza reale assorbita ma renderà il carico equivalente meno reattivo in quanto la reattanza capacitiva compenserà in parte quella induttiva.-

5.2.0 Determinazione della capacità di rifasamento

Si consideri il tipo d'installazione indicata in figura, ove la batteria di condensatori **C** viene posta in parallelo al carico ohmico induttivo: la linea d'alimentazione dovrà fornire invece della corrente **I** assorbita dal carico (molto sfasata rispetto la tensione d'alimentazione) una corrente $\mathbf{I_l}$ inferiore in modulo e meno sfasata rispetto la tensione.



Per calcolare il valore di Q_C necessario a rifasare il carico, si applica il teorema di Boucherot, in modo da valutare le potenze attive e reattive totali di linea:

$$P_l = P \qquad\qquad Q_l = Q - Q_C = P\tan\varphi - Q_C$$

La fase della linea risulterà:

$$\tan\varphi_l = \frac{Q_l}{P_l} = \frac{P\tan\varphi - Q_C}{P} \qquad \text{da cui:}$$

$$Q_C = P(\tan\varphi - \tan\varphi_l)$$

Se la batteria di condensatori è costituita da tre capacità uguali collegate a stella:

$$Q_C = 3\cdot\omega C_\lambda V_f^2 = 3\cdot\omega C_\lambda \left(\frac{V_C}{\sqrt{3}}\right)^2 = \omega C_\lambda V_C^2 \qquad \text{e sostituendo:}$$

$$C_\lambda = \frac{P\cdot(\tan\varphi - \tan\varphi_l)}{\omega V_C^2}$$

Se la batteria di condensatori è costituita da tre capacità uguali collegate a triangolo:

$$Q_C = 3\cdot\omega C_\Delta V_f^2 = 3\cdot\omega C_\Delta V_C{}^2 \qquad \text{e sostituendo:}$$

$$C_\Delta = \frac{P\cdot(\tan\varphi - \tan\varphi_l)}{3\cdot\omega V_C^2}$$

Nel caso del collegamento a triangolo, a parità di potenza, sono sufficienti tre condensatori di capacità pari ad un terzo di quella necessaria per il collegamento a stella, ma i primi dovranno essere costruiti per una tensione d'esercizio $\sqrt{3}$ superiore: il rifasamento degli impianti in bassa

tensione viene normalmente fatto con condensatori trifasi aventi connessione interna a triangolo che richiede una minor capacità e quindi è nettamente più economica.-

5.3.0 Schemi di installazione dei condensatori di rifasamento

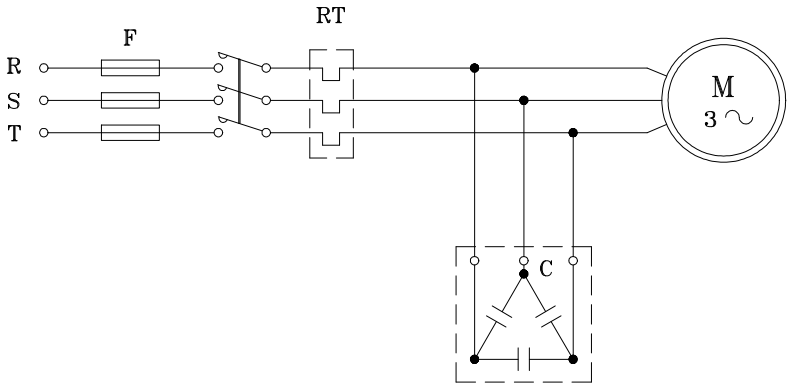
L'installazione delle batterie di condensatori per il rifasamento può essere fatta secondo tre sistemi diversi:

1. Rifasamento diretto di ciascun utilizzatore
2. Rifasamento per gruppi di utilizzatori omogenei
3. Rifasamento centralizzato di tutto l'impianto

In generale la scelta del sistema sarà legata sia a fattori funzionali, relativi alle ubicazioni dei carichi da rifasare e alla loro contemporaneità di funzionamento, sia a fattori di costo che dovranno essere valutati caso per caso.-

5.3.1 Rifasamento diretto di ciascun utilizzatore:

Questo sistema prevede il rifasamento di ciascun utilizzatore applicando direttamente in parallelo ad ogni carico da rifasare un'opportuna batterie di condensatori senza l'interposizione di alcun fusibile od interruttore di protezione, in modo tale che l'insieme carico - condensatori di rifasamento venga manovrato contemporaneamente da un unico dispositivo di comando, secondo lo schema di figura.-



In tal modo il rifasamento è eseguito nel medesimo punto d'utilizzazione, quindi le linee d'alimentazione funzionano con alti valori di cos φ e quindi correnti ridotte ai valori minimi indispensabili per trasportare la potenza attiva utilizzata dai carichi (Vantaggi nella scelta delle sezioni dei conduttori).-

Il rifasamento ci ciascun utilizzatore è consigliato con carichi di potenza inferiore ai 5 kW che rimangano in servizio per molte ore al giorno ed alimentati da linee singole piuttosto lunghe.-

Dal punto di vista dei costi si ottiene un risparmio poichè non sono necessarie apparecchiature di manovra e protezione dei condensatori in quanto sono sufficienti quelle già esistenti per la manovra del carico, carico che, permanentemente collegato ai condensatori, funziona anche da dispositivo di scarica dei condensatori stessi all'atto del distacco dalla rete di alimentazione; il risparmio cosi ottenuto viene però parzialmente ridotto dal fatto che il costo di n condensatori di capacità C è sempre superiore a quello di un singolo condensatore di capacità nC.-

Normalmente la potenza reattiva della batteria di condensatori di rifasamento per un motore asincrono trifase di piccola – media potenza viene indicata dai costruttori e si aggira su valori di circa:

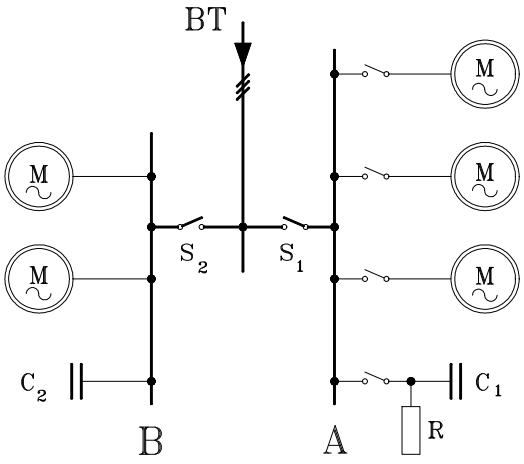
$$Q_C \approx (0,5 \div 0,35) \cdot P$$ dai più piccoli ai più grandi.-

Il rifasamento singolo viene anche di norma applicato alle lampade a scarica nei gas, che, per stabilizzare l'arco, necessitano di una reattanza induttiva che porterebbe, in assenza del condensatore, il P.F. a valori dello 0,4 ÷ 0,6.-

5.3.2 Rifasamento per gruppi di utilizzatori:

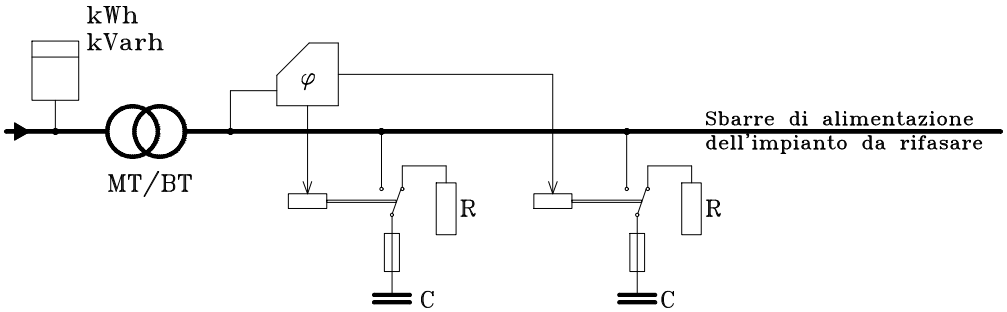
In questo sistema, gli utilizzatori sono riuniti in gruppi omogenei dal punto di vista del funzionamento e ciascun gruppo viene rifasato per proprio conto.-

Nell'esempio di figura il trasformatore MT/BT alimenta due sistemi di sbarre: il primo, **A**, alimenta un certo numero di utilizzatori omogenei con funzionamento intermittente che risultano rifasati attraverso il condensatore $\mathbf{C_1}$ dotato di resistenza **R** di scarica in quanto viene inserito, secondo necessità, attraverso un suo interruttore; il secondo, **B** , alimenta un certo numero di utilizzatori omogenei che funzionano contemporaneamente, dotati di condensatore di rifasamento $\mathbf{C_2}$ permanentemente collegato ai carichi e che utilizza i carichi stessi come resistenze di scarica quando il sistema viene disinserito attraverso l'interruttore $\mathbf{S_2}$.-



5.3.3 Rifasamento centralizzato:

Questo metodo di rifasamento degli impianti prevede l'installazione di un'unica batteria di condensatori avente potenza adeguata: tale potenza sarà sempre inferiore alla somma delle potenze che si dovrebbero installare per rifasare singolarmente tutti i carichi in quanto questi normalmente hanno un funzionamento intermittente quindi il carico medio risulta inferiore alla somma vettoriale dei singoli carichi.-



Se lo stabilimento è dotato di proprio trasformatore MT/AT , l'impianto di rifasamento può essere installato sia sul lato media sia bassa tensione; nel primo caso i condensatori, a parità di potenza, avranno una capacità (legata al quadrato della tensione) inferiore ma dovranno essere isolati per una tensione ben maggiore e necessiteranno d'apparecchiature di controllo e comando più costose: la scelta verrà fatta caso per caso in base ad un'analisi dei costi specifici.-

Nel caso l'impianto richieda durante il funzionamento una potenza di rifasamento molto variabile la capacità totale richiesta sarà suddivisa in più parti che un dispositivo automatico, sensibile al P.F. dell'impianto, inserirà a gradini secondo le esigenze.-

5.4.0 Apparecchiature di manovra e protezione

5.4.1 Apparecchiature di manovra:

Nel caso di *condensatori direttamente e permanentemente allacciati al carico*, il dispositivo di manovra s'identifica con l'elemento di comando dell'utilizzatore che potrà essere, secondo i casi, un contattore, un interruttore automatico o di manovra.-

Negli altri casi e cioè per *condensatori collegati alla rete in modo autonomo* si usano interruttori automatici o di manovra se le inserzioni e disinserzioni sono saltuarie altrimenti, nel caso di manovre frequenti come negli impianti a regolazione automatica, si preferiscono i contattori che permettono un numero di manovre maggiori.-

5.4.2 Apparecchiature di protezione:

I condensatori di rifasamento sono costruiti normalmente per sopportare delle *correnti permanenti di sovraccarico* pari a 1,3 volte la loro corrente nominale. All'atto dell'inserzione però si generano delle correnti transitorie di valore notevolmente superiore, legate alle caratteristiche ohmiche ed induttive della rete cui vengono connessi; tali correnti possono assumere un andamento oscillatorio smorzato o aperiodico smorzato: in entrambi i casi, a transitorio concluso, la corrente si stabilisce al valore di regime a frequenza industriale, legato alla tensione d'alimentazione e dalla capacità.- Poiché le correnti transitorie possono assumere anche valori elevatissimi e tali da creare problemi per le sollecitazioni elettrodinamiche che si generano, per ridurle a limiti accettabili, vengono talvolta poste in serie ai singoli condensatori delle opportune reattanze in aria.-

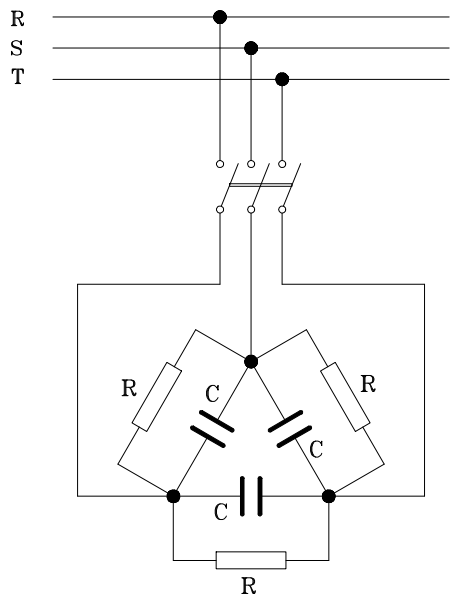
Un'ulteriore protezione contro le sovracorrenti s'ottiene ponendo in serie all'interruttore di manovra degli opportuni fusibili.-

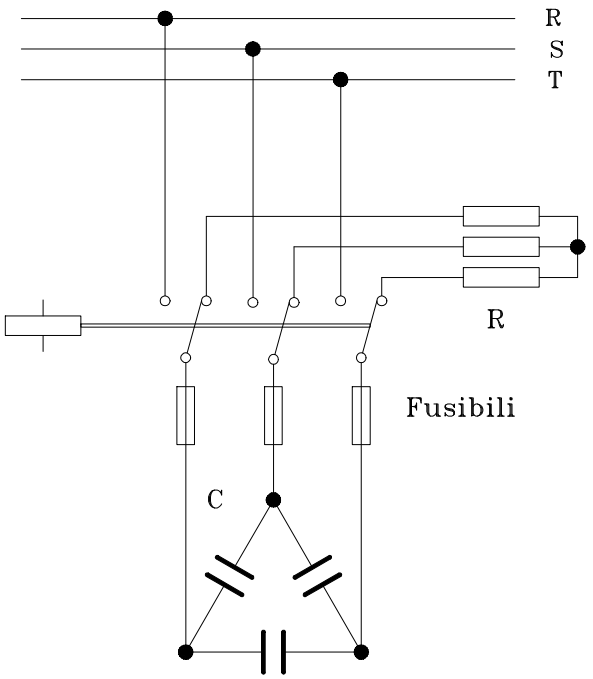
5.4.3 Dispositivi di scarica:

Le norme C.E.I. prescrivono che la tensione residua, misurata ai morsetti del condensatore di rifasamento, deve ridursi ad un valore massimo di 50 V dopo un minuto dal suo distacco dalla rete (nel caso di reti a tensione nominale massima di 1000 V) o dopo cinque minuti (nel caso di reti a tensione maggiore).-

Nel caso di rifasamento diretto del carico, il dispositivo di scarica è costituito dai circuiti interni dal carico stesso che risultano permanentemente collegati ai condensatori.-

Negli altri casi, si predispongono delle resistenze che possono essere permanentemente collegate in parallelo ai singoli condensatori (nel qual caso sono sempre di valore abbastanza elevato in modo da ridurre le perdite Joule) o venire inserite soltanto al momento del distacco del condensatore dalla rete (in questo caso possono essere di valore più basso per ridurre il tempo di scarica).-





Esempio di dimensionamento di un impianto di rifasamento centralizzato

Si consideri una piccola officina che lavori mediamente 160 ore il mese con un consumo d'energia attiva, rilevato sui contatori all'ingresso, pari a 12.800 kWh e d'energia reattiva pari a 12.640 kVARh; per evitare penali per consumi a basso fattore di potenza si vuole rifasare l'impianto mediante un'unica batteria trifase centralizzata. Sapendo che la tensione d'alimentazione dell'impianto è di 380 V, calcolare il valore della capacità e delle resistenze di scarica necessarie a portare il cos φ medio dell'impianto al valore di 0,9.-

La potenza media dell'impianto durante le 160 ore mensili di funzionamento è:

$$P = \frac{Energia}{Tempo} = \frac{12.800}{160} = 80\,kW$$

Analogamente per la potenza reattiva:

$$Q = \frac{12.640}{160} = 79\,kVar$$

Il fattore di potenza medio:

$$tan\,\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{79.000}{80.000} = 0,9875 \qquad \Rightarrow \qquad cos\,\varphi = 0,711$$

Per portare il fattore di potenza dell'impianto al valore richiesto di 0,9 (cui corrisponde un tan φ = 0,4843) si dovrà impiegare una batteria di condensatori avente potenza reattiva pari a:

$$Q_C = P(tan\,\varphi - tan\,\varphi_L) = 80(0,9875 - 0,4843) = 40,254 \;\; kVar$$

costituita da tre condensatori collegati a triangoli aventi capacità:

$$C_\Delta = \frac{Q_C}{3 \cdot \omega V_C^2} = \frac{40254}{3 \cdot 314 \cdot 380^2} = 296 \cdot 10^{-6} \;\; F = 296\,\mu F$$

Quando i condensatori vengono disinseriti, la tensione ai loro morsetti assume un andamento nel tempo fornito dalla relazione:

$$v = Ve^{-t/RC}$$

In base alle norme C.E.I. tale tensione deve raggiungere il valore di 50 V dopo 60 sec. dalla disinserzione, essendo V il valore massimo della tensione nominale dell'impianto.-
Nel caso in esame risulterà:

$$50 = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot e^{-\frac{60}{RC}} \qquad \Rightarrow \qquad e^{-\frac{60}{RC}} = 0,09304 \qquad \Rightarrow \qquad -\frac{60}{RC} = ln\,0,09304$$

$$RC = 25,266 \text{ sec} \qquad \Rightarrow \qquad R = \frac{25,266}{296 \cdot 10^{-6}} = 85,36\,k\Omega$$

Scegliendo un valore di R = 85 kΩ la potenza dissipata sulle tre resistenze di scarica risulterà:

$$P_J = 3\frac{380^2}{85000} = 5,1\,W$$

valore del tutto trascurabile ai fini del rendimento dell'impianto quindi tali resistenze potranno rimanere permanentemente collegate in parallelo alle singole capacità.-

Capitolo VI

IMPIANTI DI CONTINUITÀ ELETTRICA

6.1.0 Generalità

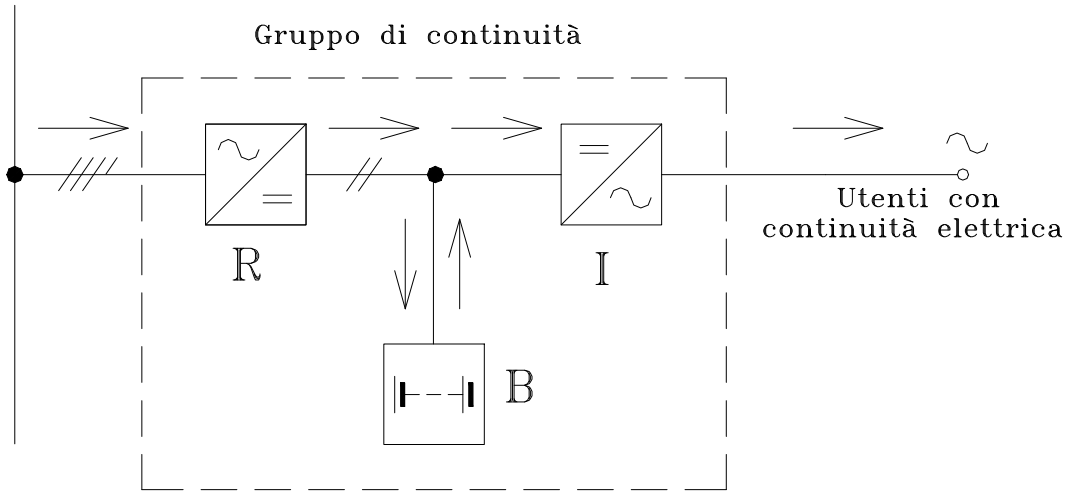
Gli impianti di **continuità elettrica** e gli **impianti d'emergenza** vengono installati presso tutte quelle utenze che, per le loro caratteristiche ed esigenze, necessitano che sia garantita l'alimentazione elettrica in tutte le situazioni, anche nel caso d'interruzione della linea esterna.-

I **Gruppi di Emergenza,** costituiti da un Motore Diesel che trascina un Generatore Sincrono avente caratteristiche tali da fornire una tensione alternata d'uguale valore e frequenza di quella di rete, vengono impiegati presso tutte quelle utenze che tollerano brevi interruzioni nell'alimentazione dell'energia elettrica (dell'ordine della decina di secondi o di minuti) necessarie all'avviamento del gruppo Diesel – Generatore.- Esempi di utilizzazione di tali gruppi possono essere: illuminazione di sicurezza nelle industrie, impianti di trasporto persone (funivie, metropolitane), rialimentazione degli impianti di continuità, apparecchiature di monitoraggio di particolari processi produttivi.-

I **Gruppi di Continuità** vengono invece installati quando è indispensabile la perfetta continuità d'esercizio dell'impianto (sono previsti tempi d'intervento inferiori al millesimo di secondo); il loro funzionamento si basa sul principio di *immagazzinare energia* durante la presenza della tensione di rete e *restituirla* quando questa viene a mancare.- Le soluzioni adottate sono di due tipi: impiego di gruppi statici o di gruppi rotanti con uso di dispositivi sia elettrici sia elettronici.- Esempi d'utilizzazione di tali gruppi possono essere: centri d'elaborazione dati, alcuni impianti di telecomunicazioni, alcuni ambienti ospedalieri, impianti di sicurezza ed installazioni militari.-

6.2.0 Gruppi statici di continuità

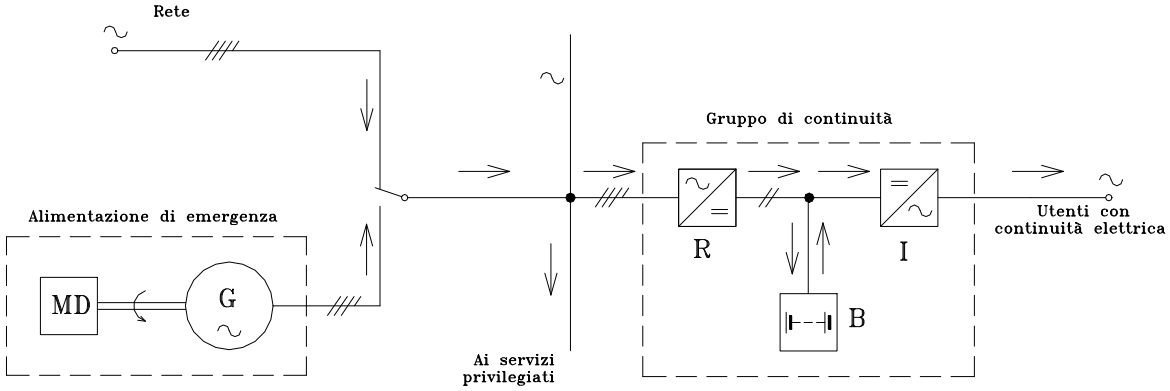
Lo schema di principio di tali impianti è indicato in figura:



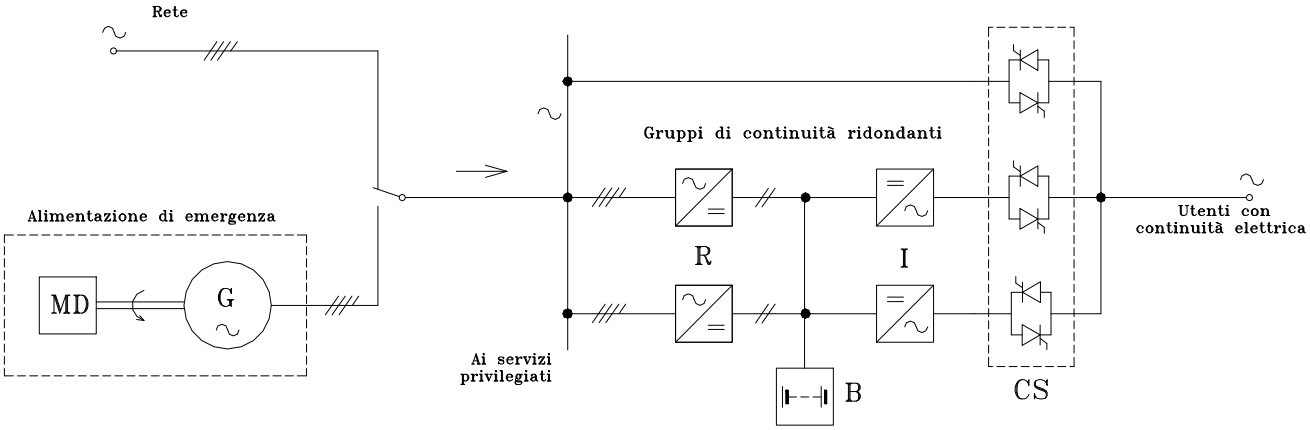
All'ingresso del gruppo, un blocco raddrizzatore **R** converte la tensione alternata di rete in una tensione continua che va a caricare una batteria d'accumulatori **B** che immagazzina l'energia elettrica; contemporaneamente il raddrizzatore alimenta in gruppo invertitore **I** che riconverte la tensione continua in alternata per inviarla agli utenti privilegiati che richiedono la continuità di servizio. Quando la rete d'alimentazione cade, automaticamente la batteria d'accumulatori passa dalla fase di carica a quella di scarica alimentando lei l'invertitore che continua ad erogare energia alle utenze.-

L'inverter sarà dotato di controlli automatici del valore della tensione e frequenza in uscita in modo da mantenerle costanti in presenza di variazioni dei parametri in ingresso.-

Poiché la capacità della batteria non può permettere l'alimentazione dei carichi per tempi molto lunghi, ove sia prevista un'interruzione prolungata dell'alimentazione da rete, si tende ad installare anche un gruppo d'emergenza:

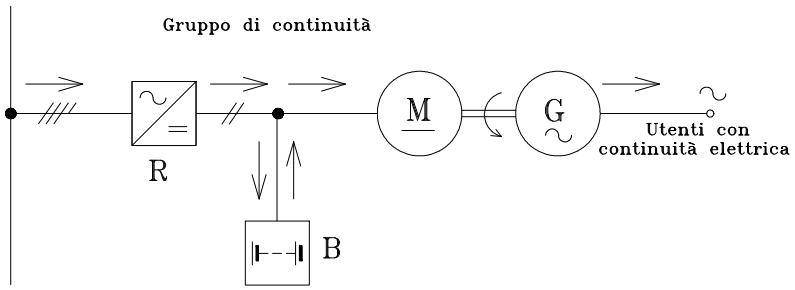


Un notevolissimo incremento all'affidabilità del sistema, si ottiene inserendo nel sistema una ridondanza sia del raddrizzatore sia dell'inverter con l'ulteriore possibilità di commutazione sulla rete di distribuzione interna dei servizi privilegiati in modo da usufruire automaticamente della tensione fornita dal generatore ausiliario: le commutazioni sono ottenute mediante *commutatori statici elettronici* **(CS)**.-

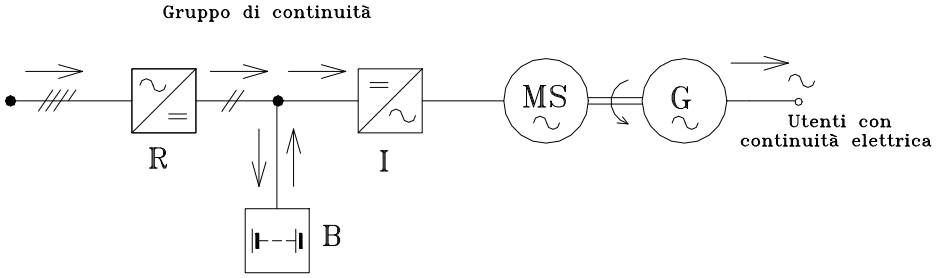


6.3.0 Gruppi rotanti di continuità

In questi gruppi di continuità, la tensione alternata d'alimentazione delle utenze protette è fornita da un generatore sincrono azionato o da un motore in corrente continua, a sua volta alimentato dalla batteria d'accumulatori o da un motore sincrono alimentato dall'Inverter.-



I gruppi di continuità rotanti presentano il vantaggio di fornire forme d'onda perfettamente sinusoidali prive di armoniche, con una notevole possibilità di sovraccarico e una grande corrente di corto circuito che facilita la predisposizione di protezioni selettive.-



Di contro sono più costosi, molto rumorosi e lavorano con rendimenti più bassi dei gruppi statici.-

6.4.0 Accumulatori elettrici

In via del tutto generale si può affermare che un accumulatore è costituito da due elettrodi metallici, di natura diversa, immersi in un'opportuna soluzione elettrolitica: applicando agli elettrodi una tensione continua, la corrente ionica che attraversa la soluzione determina sugli elettrodi un deposito di cationi ed anioni e la conseguente formazione di uno strato di materia la cui natura e legata al tipo d'elettrodi e alla soluzione impiegata; tali trasformazioni chimiche, di tipo **reversibile**, avvengono a spese dell'energia elettrica inviata nell'accumulatore, energia che determina la separazione sugli elettrodi dei composti chimici presenti nella soluzione elettrolitica dell'accumulatore stesso.- Al termine di questa prima **fase di carica** durante la quale l'accumulatore incamera l'energia elettrica che gli viene fornita, trasformandola in energia potenziale chimica, il dispositivo viene separato dalla sorgente d'alimentazione. La catena d'elementi costituita dagli elettrodi, dalle sostanze su di loro depositate durante la fase di carica e la soluzione elettrolitica, in base ai loro potenziali chimici, genera ai suoi estremi, cioè agli elettrodi, una forza elettromotrice il cui valore dipende dagli elementi impiegati; applicando tale F.E.M. ad un carico si attua la **fase di scarica** durante la quale la corrente erogata, circolando all'interno in senso inverso a quello della fase di carica, supporta una reazione chimica inversa a quella generatasi nella precedente fase di carica, determinando la ritrasformazione degli elementi chimici che si erano depositati sugli elettrodi: l'energia elettrica, che viene così erogata sul carico, corrisponde all'energia potenziale chimica che si era accumulata nella fase di carica.-

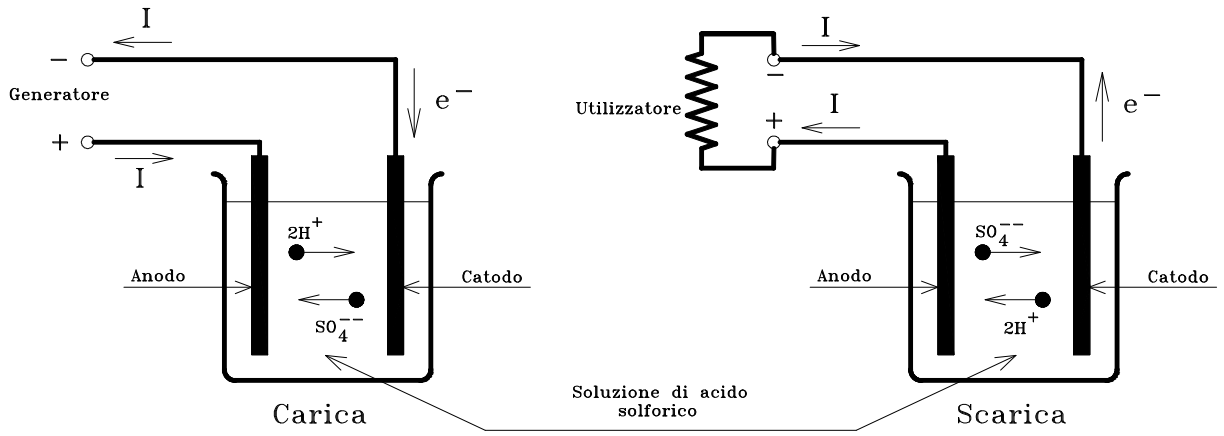
Gli accumulatori sono classificati in tre tipi principali in base al tipo d'elettrolito usato: accumulatori acidi ed accumulatori alcalini ed accumulatori al litio.-

Spesso si ricorre ad una batteria di elementi collegati in serie (per aumentare la f.e.m.) o in parallelo (per aumentare l'intensità di corrente erogabile).-

6.4.1 Accumulatori acidi al piombo

Nelle applicazioni pratiche l'**accumulatore** che trova maggior impiego e quello **al piombo** nel quale i due elettrodi sono costituiti da **piastre di piombo** immerse in una soluzione d'**acido solforico in acqua** (da cui il loro nome di accumulatori al **piombo-acido**).- Durante la fase di carica

la piastra che costituisce l'elettrodo positivo tende a ricoprirsi di **biossido di piombo** e la negativa di **piombo metallico** mentre la soluzione aumenta di densità (si forma acido solforico a scapito dell'acqua); durante la fase di scarica invece entrambe piastre tendono a ricoprirsi di **solfato di piombo** e la soluzione diminuisce di densità.-



In fase di carica le reazioni chimiche agli elettrodi sono:

Anodo: $SO_4^{--} + PbSO_4 + 2\,H_2O \rightarrow PbO_2 + 2\,H_2SO_4 + 2e$

Catodo: $2H^+ + PbSO_4 \rightarrow Pb + H_2SO_4 - 2e$

In fase di scarica le reazioni chimiche agli elettrodi diventano:

Anodo: $PbO_2 + 2\,H^+ + H_2SO_4 \rightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O - 2e$

Catodo: $P_b + SO_4^{--} \rightarrow PbSO_4 + 2e$

Si definisce come **Capacità di un accumulatore** la massima quantità d'energia elettrica che esso può fornire durante la fase di scarica, a partire dallo stato di carica completa, generalmente riferita ad un regime di scarica nominale di cinque ore e si misura in Amperora (Ah).- A parità di altre condizioni, l'energia che un dato accumulatore può erogare nella sua fase di scarica dipende dall'intensità di corrente che viene chiamato ad erogare: così per esempio un accumulatore avente capacità di **50 Ah** fornirà una corrente di **10 A** per un tempo di **cinque ore** (scarica nominale corrispondente alla capacità di 10 x 5 = 50Ah), ma lo stesso potrà erogare una corrente di **3,12A** per un tempo di **20 ore** (capacità utilizzata pari a 3,12 x 20 = 62,4 Ah) oppure una corrente di **32,5A** per **un'ora** (capacità utilizzata pari a 32,5 x 1 = 32,5 Ah).-

La capacità di un elemento di accumulatore dipende essenzialmente dallo sviluppo delle superfici attive delle piastre, perciò, a parità di spessore delle stesse, dal peso dell'accumulatore stesso; si definisce coma **capacità specifica** il valore della capacità riferita al peso dell'unita: per gli accumulatori al piombo tale capacità specifica varia dai **4 amperora/Kg** negli elementi stazionari ai **10 amperora/Kg** negli elementi più leggeri ad ossidi riportati.-

Ciascun elemento dell'accumulatore al piombo carico, fornisce a vuoto una tensione ai morsetti da **2,05** a **2,15 Volt** in base al peso specifico dell'elettrolito; per ottenere tensioni maggiori bisognerà usare più elementi posti in serie in modo da costituire una *batteria d'accumulatori*.-

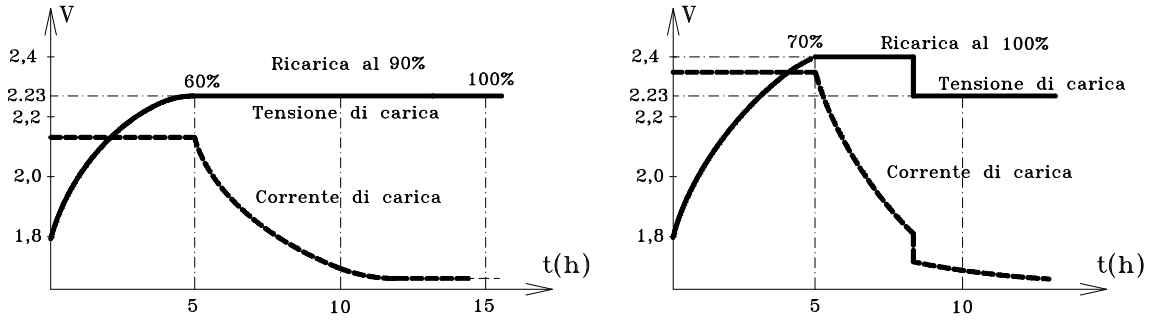
Modalità di carica degli accumulatori al piombo:

La tensione V_C che bisogna applicare ai morsetti di un accumulatore per poterlo caricare dovrà essere tale da poter vincere, in questa fase, la sua F.C.E.M. più la caduta dovuta alla resistenza interna:

$$V_C = E + R_i I_C$$

Variando il valore della V_C si ottengono valori di correnti di carica I_C diversi: normalmente viene consigliato di non superare valori pari al 10 ÷ 16 % della capacità in Ah della batteria

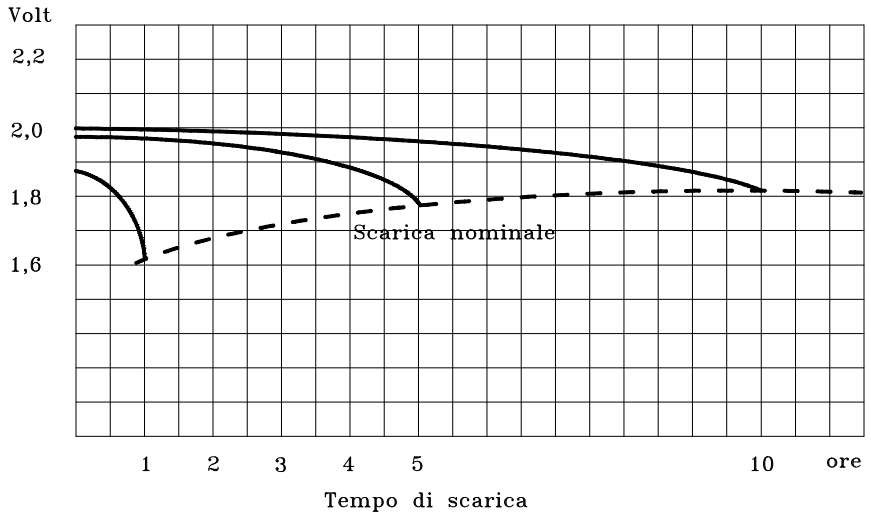
d'accumulatori (per un accumulatore avente capacità di 50 Ah è opportuna una corrente di carica di 5 ÷ 8 A).- Poiché a mano a mano che procede la carica, la F.C.E.M. dell'elemento aumenta, se si desidera eseguire una carica a corrente costante, bisognerà aumentare gradatamente la tensione applicata (carica a corrente costante); in caso contrario, mantenendo la tensione costante, la corrente di carica diminuirà gradualmente (carica a tensione costante).- In figura sono indicati l'andamento della tensione e della corrente di carica nei due casi di carica lenta o rapida, che combinano la carica iniziale a corrente costante (fino al 60÷70% del valore finale) e la carica a tensione costante per la parte rimanente.-



A carica terminata, interrompendo il circuito d'alimentazione, la tensione ai morsetti dell'elemento scende immediatamente a circa 2,1V.- Collegando quindi il carico, la tensione di scarica risulta essere:

$$V_S = E - R_i I_S$$

Durante la scarica, la forza elettromotrice E, e quindi la tensione ai morsetti, tende a diminuire gradualmente con velocità diversa in base alla corrente erogata, cioè del tempo di scarica, secondo il diagramma di figura:



6.4.2. Accumulatori alcalini al ferro-nichel (Fe-Ni);

Gli accumulatori di tipo alcalino sono quelli in cui l'energia elettrica è convertita in un'azione chimica attraverso una soluzione alcalina. Ci sono diversi tipi di tali accumulatori: al ferro-nichel, al nichel-cadmio, a ioni litio.

L'accumulatore ferro-nichel, noto anche come accumulatore Edison, ha l'elettrodo positivo costituito da un ossido superiore o idrossido di Nichel; il materiale attivo negativo è ferro elementare sotto forma di polvere sottile. L'elettrolito è una soluzione di idrossido di potassio (potassa caustica) in acqua avente peso specifico di 1,20, Generalmente alla potassa si addiziona una piccola quantità di idrossido di litio in quanto aumenta la tensione, la capacità e la durata della batteria.

La carica e la scarica possono essere rappresentate dall'equazione:

Carica $2NiO + 2KOH + FeO \implies Ni_2 0_3 + 2K0H + Fe$

Scarica $Ni_2 0_3 + 2K0H + Fe \implies 2NiO + 2KOH + FeO$

Questa equazione non può essere considerata una rappresentazione esatta di quanto avviene durante i processi di carica e di scarica; in ogni modo la sola differenza che sì riscontra nelle molte equazioni proposte è rappresentata dalla natura degli ossidi di nichel che compaiono nel corso dei processi di carica e di scarica e dalla natura dell'ossido di ferro che si forma all'atto della scarica.

Una batteria carica di fresco può avere una f.e.m. di 1,48 V che diminuisce in pochi giorni fino a stabilizzarsi su 1,35 V.-

L'elettrolito — la soluzione di KOH — ha la sola funzione di fornire ioni in modo da rendere conduttore il mezzo, senza entrare nella reazione della cella, Il suo peso specifico infatti rimane immutato durante l'attività della batteria e pertanto non può dare, a differenza del caso dell'accumulatore al piombo, indicazioni sullo stato di carica. Questo può essere valutato dal voltaggio quando si scarichi la batteria rapidamente attraverso una resistenza tarata.

L'accumulatore Edison può essere caricato con forte intensità di corrente; questa nella carica non deve essere inferiore alla metà del suo valore normale, il rendimento è inferiore a quello della batteria Pb-acido. Non si deve superare la temperatura di 46 °C né scendere al di sotto di 10°C in quanto a temperature più basse il rendimento cala rapidamente. La batteria ferro-nichel ha trovato estese applicazioni negli autocarri industriali, nell'illuminazione di veicoli, nei banchi di prova, come fonte d'emergenza o di riserva.-

6.4.3 Accumulatori alcalini al nichel-cadmio (Ni-Cd):

Gli accumulatori Ni-Cd sono costituiti da un elettrodo di idrossido di nichel (catodo), l'elettrolito è una soluzione acquosa di idrossido di potassio (KOH al 32%), mentre l'anodo è costituito da cadmio.-

Un po' di storia...

L'elettrodo al nichel e la cella alcalina seguono lo sviluppo dell'accumulatore al piombo acido di circa 30 anni. Nel 1890 gli esperimenti di Edison portarono alla prima batteria ricaricabile a sistema alcalino. Essa era costituita da un elettrodo positivo di nichel accoppiato ad un elettrodo negativo di ferro, separati da un elettrolito basico.-

Nel 1910 venne presentato il primo accumulatore commerciale nichel-ferro, rivolto al mercato automobilistico. Negli stessi anni Waldmar Jungner, uno svedese, sviluppò un accumulatore al nichel-cadmio.-

Dalla necessità, in ambito militare, di una batteria leggera e ad alta capacità energetica, negli anni della seconda guerra mondiale la Germania perfezionò un accumulatore nichel-cadmio con piastre immerse nell'elettrolito, che è essenzialmente identica a quella attualmente utilizzata negli aerei militari e commerciali.-

La prima batteria portatile fu progettata negli anni '50 ed è la base delle moderne batterie ricaricabili.-

Accumulatori aperti e chiusi

La cella degli accumulatori nichel-cadmio può essere aperta oppure a struttura ermetica.-

Per gli accumulatori di tipo aperto, la norma d'esercizio più importante e gravosa è rappresentata dal controllo dell'elettrolito che deve essere totalmente sostituito quando la quantità di carbonato di potassio (prodotto per effetto dell'anidride carbonica dell'atmosfera) supera determinati limiti. Inoltre, è possibile che durante la fase di scarica, l'acqua dell'elettrolito subisca una reazione di elettrolisi, con conseguente formazione di ossigeno e idrogeno gassoso. In questo caso, è necessario provvedere al rabbocco di acqua. Per gli accumulatori di tipo chiuso, la struttura della cella è ermetica e non c'è fuoriuscita di gas. In questo caso è necessario evitare il più possibile la formazione di gas e adottare particolari elettrodi, per esempio di dimensioni diverse.-

Applicazioni

Gli accumulatori Ni-Cd vengono utilizzati principalmente per piccole apparecchiature quali cellulari e computer portatili e predominano nelle applicazioni combinate spina-batteria (rasoi elettrici, registratori, telecamere, radioricevitori ecc.). Solitamente la loro capacità non supera i 5Ah.

Per le applicazioni industriali (accumulatori stazionari) o per l'illuminazione di alcuni tipi di vetture ferroviarie o di metropolitane, vengono impiegate piastre positive formate da sottili tubetti di nichel, perforati, contenenti idrossido di nichel. Le piastre negative utilizzano una matrice di nichel sinterizzato. L'energia specifica degli accumulatori di questo tipo può raggiungere i 50 Wh/kg (riferiti alla scarica in 5 h) e la potenza anche i 200 W/kg (riferiti alla scarica in 5 h). La durata di vita ai cicli di scarica profonda può raggiungere il migliaio di cicli. La maggiore energia specifica degli accumulatori nichel-cadmio rispetto agli accumulatori al piombo li renderebbe interessanti, soprattutto per le applicazioni di trazione, se il loro costo non fosse più che triplo.-

Al termine della loro vita utile è prescritto dalle norme europee un rigoroso sistema di smaltimento e riciclaggio, analogo a quello applicato agli accumulatori al piombo. Infatti il cadmio è bandito dalla legislazione ecologica e potrebbe contaminare gravemente l'ambiente se le batterie esauste, eliminate dalle abitazioni assieme agli altri rifiuti, venissero sottoposte agli usuali processi d'incenerimento.

La richiesta, per gli apparecchi portatili, di accumulatori con durata di scarica sempre maggiore e la necessità di evitare l'uso del cadmio per ragioni ecologiche, ha quindi spinto recentemente allo sviluppo industriale d'altre soluzioni quali gli accumulatori agli ioni litio che si vedranno di seguito.-

Reazioni elettrochimiche degli accumulatori al nichel- cadmio

Il voltaggio dei vari tipi di celle è determinato dalle reazioni che avvengono al loro interno, e quindi dai materiali utilizzati. Il voltaggio totale della cella equivale alla differenza del potenziale di ossidazione dell'anodo e del potenziale di riduzione del catodo.

Le reazioni principali che avvengono in un accumulatore nichel-cadmio sono le seguenti:

$$2NiOOH + 2H_20 + Cd \leftrightarrow 2Ni(0H)_2 + Cd(OH)_2$$

I potenziali d'ossidoriduzione, riferiti alle condizioni standard, possono variare leggermente in fase di utilizzo della batteria, forniscono comunque una f.e.m. di 1,29 V.-

Le reazioni sono reversibili: la reazione da sinistra a destra è quella di scarica, quella da destra a sinistra e di carica.

La *fase di scarica* avviene in 3 fasi:

- caduta della tensione fino a circa 1,2 V/elemento
- lungo plateau a tensione costante (la durata di questa fase è funzione della corrente erogata)
- brusca caduta della tensione fino a 1V/elemento, valore sotto il quale non bisogna mai scendere per evitare il danneggiamento della batteria.

Per una scarica ottimale è necessario far riferimento alle indicazioni fornite dai costruttori, in funzione del tipo di accumulatore.

Fase di carica: Esistono diversi tipi di carica, che si differenziano per la quantità di corrente che viene fornita:

Carica normale: I = l/l0 In

durata: 14 ore se la batteria era completamente scarica

Durante la carica la tensione della batteria aumenta dapprima rapidamente, poi più lentamente fino a raggiungere il valore massimo di 1,4 V/elemento. Una volta arrivati a questo valore, se la batteria resta alimentata con la stessa corrente, si verifica il fenomeno della sovraccarica: la tensione si abbassa, la batteria non accumula più energia e la corrente che l'attraversa si trasforma in calore, provocando un surriscaldamento dell'accumulatore. E in questa fase che si ha la formazione di idrogeno e ossigeno. È importante quindi individuare con precisione il termine della carica, valutando il valore di –dV/dt cioè il momento in cui la curva della tensione raggiunge il massimo e poi inizia a scendere.

Carica accelerata: I = 1/5 In

durata: 6-7 ore È importante evitare una sovraccarica che duri più di 40 minuti.

Carica rapida: I = In

durata: 1 ora È importante evitare la sovraccarica.-

Carica permanente: I = 1/20 In

durata: indeterminata (la batteria si carica ma non si surriscalda una volta raggiunta la tensione massima perché la corrente è debole).

Corrente di mantenimento

Si può applicare una corrente I = 1/100 In indefinitamente per mantenere lo stato di carica e compensare le perdite naturali che si hanno per la presenza di reazioni chimiche secondarie che avvengono all'interno dell'accumulatore.-

Effetto memoria

È un problema che caratterizza gli accumulatori al Ni-Cd ed è legato ad un cattivo uso da parte dell'utilizzatore. Si manifesta quando vengono effettuate ricariche troppo frequenti a bassa intensità di corrente prima che la batteria sia completamente scarica. Questo fa sì che sugli elettrodi interni si formino dei piccoli cristalli, che provocano una diminuzione anche del 90% della durata della batteria perché aumenta la resistenza interna; di conseguenza la tensione scende rapidamente quando la batteria è sotto carica.-

Sarà quindi consigliabile utilizzare la batteria fino a scaricarla completamente e ricaricarla correttamente con il caricabatteria opportuno.-

Per allungare il più possibile la vita di un accumulatore è opportuno conservarlo ed utilizzano in modo adeguato.-

Solitamente dopo 500 cicli di carica/scarica si verifica una perdita della capacità del 20% circa, perdita che aumenta al 40% dopo 1000 cicli. Di solito la capacità si conserva per 3-5 anni, poi cala per le reazioni chimiche secondarie che avvengono all'interno della cella.-

In conclusione gli accumulatori al Ni-Cd presentano i seguenti vantaggi:

- costo/prestazioni a livello competitivo
- resiste fino a 1000 cicli di carica/scarica
- tensione costante per tempi prolungati, ma poi drastica caduta

e i seguenti svantaggi:

- effetto memoria, per il quale cicli incompleti di carica e scarica influenzano negativamente l'efficienza di una batteria
- molto sensibile alle basse temperature (evitare di scendere sotto i -5^{0}C)
- presenza di Cadmio: si tratta di un elemento pericoloso sia per l'ambiente (quindi ci sono problemi di smaltimento) sia per l'uomo, essendo cancerogeno. Per questi motivi una direttiva europea ha interdetto, a partire dall'1 luglio 2006 la commercializzazione del Cd negli accumulatori.-

La comunità europea ha vietato la produzione e commercializzazione degli accumulatori al Nichel- Cadmio a partire dal giugno 2006.-

6.4.4 Accumulatori alcalini al Nichel-Metalidruri (Ni-MH):

Introduzione

La richiesta, per gli apparecchi portatili, di accumulatori con durata di scarica sempre maggiore e la necessità di evitare l'uso del cadmio per ragioni ecologiche, ha spinto recentemente allo sviluppo industriale di a!tre soluzioni. In questo ambito hanno ottenuto notevole successo le leghe ad assorbimento di idrogeno, a base di metalli di transizione, preparate per fusione sotto vuoto in forno a induzione con successiva ricottura e macinazione finale; la polvere così ottenuta, miscelata con opportuni leganti polimerici, viene fissata su un conduttore che può essere costituito da una rete o da un lamierino forato. In un progetto del CNR sono stati utilizzati due tipi principali di leghe: una a base di lantanio e nichel, l'altra a base di titanio, nichel e ferro.-

Gli accumulatori Ni-MH utilizzano tecnologie analoghe a quelle degli accumulatori a nichel-cadmio. Essi sono caratterizzati da una capacità più elevata di circa il 30% e da una durata di vita superiore del 40% a quella degli accumulatori Ni-Cd (a parità di massa e di volume). Per le loro caratteristiche, gli accumulatori Ni-MH hanno avuto finora ampia diffusione nell'ambito della telefonia cellulare e dei computer "notebook", ma potrebbero trovare applicazione anche nei veicoli elettrici, se il loro costo non resterà proibitivo.-

Reazioni elettrochimiche degli accumulatori nichel-idruri metallici

Le reazioni principali che avvengono in un accumulatore nichel-idruri metallici, analoghe a quelle di un accumulatore nichel-cadmio, sono le seguenti:

catodo

$$NiOOH + H_2O + e^- <--> Ni(OH)_2 + OH^-$$

anodo

$$MH_{ass} + OH^- <--> M + H_2O + e^-$$

reazione globale

$$NiOOH + MH_{ass} <--> Ni(OH)_2 + M$$

Le reazioni sono reversibili: la reazione da sinistra a destra è quella di scarica, quella da destra a sinistra è di carica.-

Fase di scarica

La fase di scarica prevede 3 *fasi:*

- caduta della tensione fino a circa 1,2 V/elemento
- lungo plateau a tensione costante (la durata di questa fase è funzione della corrente erogata)
- brusca caduta della tensione fino a 1V/elemento, valore sotto il quale non bisogna mai scendere per evitare il danneggiamento della batteria.

Per una scarica ottimale è necessario far riferimento alle indicazioni fornite dai costruttori, in funzione del tipo di accumulatore.

Fase di carica

La carica avviene a corrente costante con la differenza, rispetto agli accumulatori al Ni-Cd, che la variazione di tensione è molto meno evidente e risulta quindi difficile determinare il momento di fine carica.-

E stato consigliato dai costruttori un metodo di carica particolare:

- carica rapida, che permette, malgrado tutto, di rilevare il punto di massimo
- carica con I=1/30 In per terminare l'operazione.

La differenza tra le curve di carica di questi accumulatori e di quelli al Ni-Cd implica che non si possano utilizzare per i due tipi di batterie lo stesso caricatore, in quanto per quelli Ni-MH è necessario un caricabatteria molto più sensibile per determinare prontamente l'istante di fine carica ed evitare la sovraccarica.-

Oggi, per risolvere il problema, si producono caricabatteria dotati di un commutatore per il funzionamento con i due tipi di accumulatori.-

Effetto memoria

È un problema che caratterizza gli accumulatori Ni-Cd ed è legato a un cattivo uso da parte dell'utilizzatore. Si manifesta quando vengono effettuate ricariche troppo frequenti prima di aver completamente scaricato le batterie. Questo fa si che sugli elettrodi interni si formino dei piccoli cristalli, che provocano una diminuzione della durata della batteria perché ne aumenta la resistenza interna.-

Questo fenomeno si manifesta in modo molto meno evidente nelle batterie Ni-MH e viene chiamato "lazy battery".

Consigli:

- utilizzare la batteria fino a scaricarla
- ricaricarla correttamente con il caricabatteria opportuno

Condizioni di utilizzo

Per allungare il più possibile la vita di un accumulatore è opportuno conservarlo ed utilizzarlo in modo adeguato.

Solitamente dopo 500 cicli di caricalscarica si verifica una perdita delia capacità del 20% circa, perdita che aumenta al 40% dopo 1000 cicli. Di solito la capacità si conserva per *3-5* anni, poi cala per le reazioni chimiche secondarie che avvengono ail'intemo delia celia.

Conclusioni

Si può riassumere tutto quanto visto sopra analizzando vantaggi e svantaggi dell'accumulatore Ni-MH

Vantaggi:

- è poco soggetto all'effetto memoria
- alta densità energetica
- resiste fino a 1000 cicli di carica/scarica
- ecologicamente è accettabile
- tensione costante per tempi prolungati, ma poi drastica caduta

Svantaggi:

- costo elevato
- sensibile alle basse temperature
- necessità di un caricabatteria apposito

6.4.4. Accumulatori al Litio-ione(Lt-ione):

Sono le celle più promettenti sia dal punto di vista scientifico che commerciale soprattutto per quanto riguarda il mercato dei pc portatili e dei telefoni cellulari. Questo accumulatore sfrutta l'eccezionale combinazione di proprietà del litio:

- forte tendenza a cedere elettroni (E° = 3,6V)
- basso peso specifico

Come gli altri accumulatori, è formato da un catodo, un anodo e contiene un elettrolito che è presente all'interno di uno strato poroso che separa i due elettrodi e che permette il passaggio degli ioni:

ANODO: all'inizio veniva utilizzato il litio metallico ma poiché questo si è dimostrato troppo reattivo (rischio d'esplosioni) ora si preferiscono composti d'intercalazione di litio e grafite.-

CATODO: si usano composti che presentino strutture di intercalazione con strati in grado di accettare ioni Li^+ e che abbiano valenza mista in grado sia di accettare che di cedere elettroni. All'inizio si utilizzava il solfuro di Titanio (TiS_2) ora si preferisce un composto di litio e cobalto, il $LiCoO_2$, che è formato da strati alternati di Li^+ e Co^{3+}.-

ELETTROLITA: si usano solventi non acquosi come il polietilenossido all'interno del quale sono disciolti sali di litio come il perclorato di litio ($LiClO_4$).

Entrambi gli elettrodi risultano in tal modo essere come dei cristalli che presentano una struttura a strati e che sono in grado di scambiarsi gli ioni di Li^+ nelle due fasi di carica e scarica, attraverso l'elettrolito.-

Le reazioni chimiche che avvengono nelle fasi di carica e scarica sono le seguenti:

Fase di Carica

CATODO (-) : $LiCoO_2 \text{ ---> } Li_{1-X}Co\,O_2 + xLi^+ + x.e^-$

ANODO (+) : $C + xLi^+ + xe^- \text{ ---> } CLi_X$

Fase di Scarica

ANODO (-) : $CLi_X \text{ ---> } C + xLi^+ + xe^-$

CATODO (+) : $Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^- \text{ ---> } LiCoO_2$

Come si vede dalle equazioni, il passaggio di corrente non comporta (come nel caso degli accumulatori al piombo) il formarsi sugli elettrodi di composti intermedi, che possono dare problemi in caso di distacco, ma l'unico fenomeno che avviene è lo scambio di ioni Li^+ tra i due elettrodi. Ciò è possibile, come detto, grazie alla presenza della struttura cristallina stratificata di anodo e catodo.-

VANTAGGI

- Ha un'altissima densità d'energia, definita come quantità di energia erogata per unità di massa. Il valore è di circa 150 Wh/kg ed è molto maggiore di quello riscontrabile per le pile alcaline. Ciò comporta che a parità d'energia emessa l'accumulatore al lido è molto più leggero rispetto agli altri.
- Ha un alto voltaggio, pari a circa 3.7V
- Molto longevo, dopo 3000 cicli mantiene ancora un'efficienza dell' 80%
- Non presenta l'effetto memoria: se si ricarica senza che sia prima avvenuta una scarica completa, la capacità di scarica dell'accumulatore non diminuisce. Questo è un fenomeno che limita moltissimo gli altri accumulatori.
- Presenta un potenziale di scarica molto piatto permettendo una stabile erogazione d'energia durante il transitorio di scarica.
- Presenta tempi di ricarica molto brevi (circa 3 ore).
- È praticamente insensibile ad escursioni termiche.
- Il litio è un materiale non tossico a differenza di nichel, piombo e cadmio.

SVANTAGGI

- Elevato costo, compreso tra i 400 e i 600 € per kWh.
- Rischi di danni in caso di scarica totale.

Tabella comparativa dei differenti tipi di accumulatori

Tipo	Densità di energia	Tensione	Durata	Auto scarica mensile
Piombo	30-50 Wh/kg	2,10 V	200-300 cicli	5%
Ni-MH	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500 cicli	>30%
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,70 V	500-1000 cicli	10%

Capitolo VII

ILLUMINAZIONE ELETTRICA

7.1.0 Generalità

Uno degli impieghi più diffusi dell'energia elettrica è quello della sua trasformazione in energia luminosa impiegata per l'illuminazione degli ambienti chiusi e degli spazi aperti, ognuno dei quali con esigenze d'illuminamento diverse.-

La luce che viene percepita dall'occhio umano è costituita dall'energia radiante delle onde elettromagnetiche comprese nella gamma di lunghezza d'onda compresa fra 380 e 780 nanometri (10^{-9} m); tali onde forniscono al nervo ottico la sensazione che viene tradotta, dal nostro cervello, in colori che vanno dal violetto al rosso, man a mano che aumenta la lunghezza d'onda.-

I corpi che emettono tali radiazioni vengono chiamati *sorgenti luminose*; le sorgenti artificiali alimentate ad energia elettrica sono le *lampade* di vario tipo quali le Lampade a vapori di sodio, a vapori di mercurio, fluorescenti, ad incandescenza, ad arco.-

L'intervallo delle lunghezze d'onda visibili è soltanto una piccola parte di tutto lo spettro continuo costituito dalle onde elettromagnetiche che, emesse da opportune sorgenti, si propagano nello spazio con una velocità pari al prodotto della loro lunghezza d'onda per la relativa frequenza: $v = f \cdot \lambda$ velocità che nel vuoto vale 300.000 $km/\sec$.-

Si definisce come *luce bianca* la luce diurna in presenza d'atmosfera limpida: essa risulta costituita dalla sovrapposizione di tutte le radiazioni visibili con lunghezze d'onda diverse.-

7.2.0 Grandezze fotometriche fondamentali

7.2.1 Flusso luminoso Φ:

Il flusso luminoso esprime la quantità di luce emessa da una sorgente luminosa nell'unità di tempo; tale flusso è legato non solo alla quantità d'energia (Watt.sec) emessa dalla sorgente ma anche al suo fattore di visibilità che raggiunge il valore massimo per il colore giallo-verde (λ = 550 nm.) e tende ad annullarsi in corrispondenza all'ultravioletto e all'infrarosso.- L'unità di misura del flusso luminoso è il **Lumen (lm)** e corrisponde alla ***quantità di luce prodotta in un secondo dalla radiazione elettromagnetica avente lunghezza d'onda λ = 550 nm. e flusso energetico di $^1/_{680}$ Watt.-***

7.2.2 Efficienza luminosa:

I vari tipi di lampade si differenziano, oltre che per caratteristiche di funzionamento, durata, potenza, colore della luce emessa, anche per la loro ***efficienza luminosa*** intesa come rapporto tra il flusso luminoso prodotto e la quantità d'energia elettrica impiegata.-

SORGENTE	Efficienza (lm/W)
Lampade a vapori di sodio	130 ÷ 180
Lampade a vapori di mercurio	40 ÷ 70
Lampade fluorescenti	40 ÷ 80
Lampade a incandescenza	10 ÷ 20
Lampade ad arco	10 ÷15

Lampade fluorescenti con accensione a starter	
Potenza (W)	Flusso (Lm)
20	1.200
40	3.200
65	5.000

7.2.3 Illuminamento delle superfici E:

L'illuminamento esprime la densità del flusso luminoso che investe perpendicolarmente una superficie.- La sua unità di misura è il **Lux (lx)** e corrisponde all'illuminamento di una superficie di 1 m^2 investita perpendicolarmente ed uniformemente dal flusso luminoso di 1 lm.-

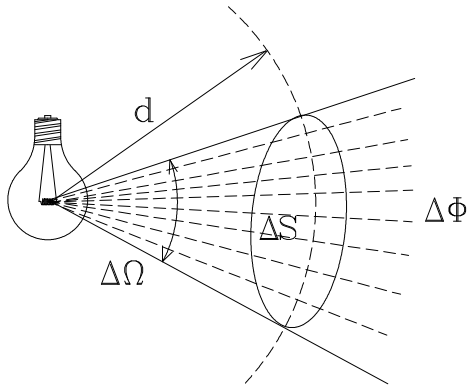
I livelli d'illuminamento entro i quali è possibile la visione, in virtù della capacità d'adattamento dell'occhio umano, variano da qualche frazione di Lux durante la notte a migliaia di Lux in pieno sole.-

Normalmente la visibilità varia con il logaritmo dell'illuminamento per cui per raddoppiare la visibilità bisogna decuplicare l'illuminamento: variazioni del 30 – 40 % dell'illuminamento non sono percepibili dall'occhio umano.-

Valori di illuminamento raccomandati		
Compito visivo	Esempio ambiente	Illuminamento (Lux)
Visione generale	Scale, corridoi	70 ÷ 100
Lavori manuali grossolani	Magazzini	100 ÷ 200
Lettura, scrittura	Uffici	200 ÷ 400
Studio e lavori particolari	Scuole	300 ÷ 500
Disegno e lavori di precisione	Laboratori, uffici tecnici	oltre 500

7.2.4 Intensità luminosa I:

L'intensità luminosa esprime la quantità di luce emessa da una sorgente luminosa in una determinata direzione.- La sua unità di misura è la **Candela (cd)** che corrisponde all'intensità luminosa di una sorgente sferica ad emissione uniforme in tutte le direzioni, che emette un flusso totale di 12,56 lumen ($12{,}56 = 4\pi$); matematicamente, l'intensità luminosa di una sorgente in una certa direzione, si definisce come il rapporto tra il flusso emesso entro un cono d'apertura infinitesima e l'angolo solido del cono stesso:



$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \qquad \text{ove:} \quad \Delta\Omega = \frac{\Delta S}{d^2}$$

Essendo per definizione: $$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$$

risulterà: $$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega \cdot d^2} = \frac{I}{d^2}$$

cioè: L'illuminamento di una superficie è proporzionale all'intensità luminosa della sorgente e inversamente proporzionale al quadrato della sua distanza dalla sorgente stessa.-

7.3.0 Composizione cromatica della luce

I colori corrispondono ad una valutazione soggettiva che fa l'occhio umano in base alla lunghezza d'onda della radiazione che lo colpisce.- La sovrapposizione di tutte le lunghezze d'onda viene percepita come colore bianco; la mancanza di radiazioni percepibili viene intesa come colore nero.-

I colori, percepiti per lunghezze d'onda delle radiazioni crescenti dai 380 nm ai 780 nm, sono il violetto, indaco, azzurro, verde, giallo, arancione e rosso.-

Gli oggetti, colpiti dalle radiazioni luminose emettono a loro volta, per trasparenza o per riflessione, una parte delle radiazioni che li colpiscono fornendo all'occhio un'informazione cromatica relativa soltanto alle radiazioni riflesse e non a quelle incidenti: il colore così percepito viene assunto come colore proprio dell'oggetto.- Risulta chiaro che i colori, così come vengono percepiti, possono risultare profondamente alterati se gli oggetti vengono illuminati da una luce colorata e non bianca avente cioè una composizione cromatica differente dalla luce naturale bianca.-

Dalle osservazioni fatte si deduce che nella scelta dei corpi illuminanti di un ambiente bisognerà tenere conto non soltanto del flusso luminoso necessario per ottenere l'illuminamento richiesto, bensì anche della composizione cromatica della sorgente che dovrà avvicinarsi il più possibile alla luce bianca.-

La composizione cromatica della luce viene valutata in gradi Kelvin (°K) corrispondenti alla temperatura che deve assumere il corpo nero per fornire una radiazione luminosa qualitativamente simile: si parla così della ***temperatura di colore*** T_C *della luce emessa da una sorgente.-*

7.4.0 Lampade elettriche

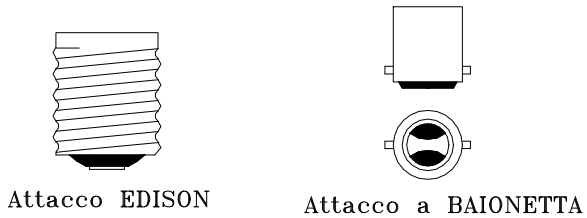
7.4.1 Lampade elettriche ad incandescenza:

Le lampade ad incandescenza sono costituite da un sottile filamento racchiuso in un'ampolla di vetro a tenuta stagna, dotata esternamente di due contatti metallici che permettono il collegamento con i due terminali del filamento stesso; la sua sezione e proporzionata alla *corrente nominale* $\mathbf{I_n}$ della lampada che attraversando il filamento stesso lo riscalderà per effetto Joule portandolo alla *temperatura di incandescenza*; la lunghezza è invece proporzionata alla *tensione nominale* $\mathbf{V_n}$ della lampada, risultando tanto più lungo quanto maggiore è la tensione stessa, per cui la potenza elettrica nominale risulterà:

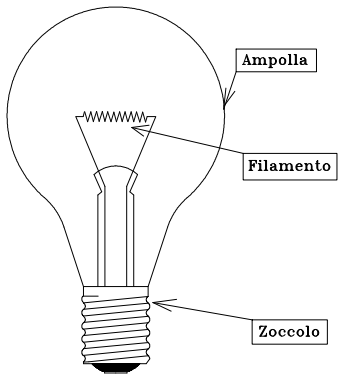
$$P_n = V_n \cdot I_n$$

Il materiale impiegato per la costruzione del filamento è il *Tungsteno trafilato* che ha una temperatura di fusione di 3400 °C e una temperatura di incandescenza, tale da fornire una luce di opportuna composizione cromatica, intorno ai 2000 ÷ 2500 °C.-

Lo **zoccolo metallico** che sostiene il bulbo di vetro e porta i contatti di collegamento del filamento, ha forme diverse ma unificate: *attacco Edison*, normale o mignon del tipo a vite, *attacco a baionetta* con terminali in testa o nella ghiera cilindrica.-



L'**ampolla di vetro** contiene al suo interno il filamento sostenuta da un peduncolo anche in vetro; è ermetica per evitare che il filamento vada a contatto con qualche agente ossidante ed è riempita di gas inerte onde ridurre la volatilizzazione del filamento; esistono in commercio lampade con ampolle di forma e finitura diverse per soddisfare le più svariate esigenze, anche estetiche.-



Il **filamento** radiante, mantenuto sospeso al centro del bulbo, può avere forme, sezioni e lunghezze diverse a seconda della tensione di lavoro e della potenza della lampada.-

Le lampade vengono costruite per potenze che vanno da alcuni Watt fino a potenze di 1000W; la loro efficienza varia tra 10 e 20 lm/W con valori crescenti all'aumentare della potenza della lampada: questi valori sono così bassi in quanto gran parte (~85%) dell'energia elettrica assorbita si trasforma in calore che si disperde nell'ambiente (per il buon funzionamento bisogna garantire una certa circolazione d'aria che lambisca il bulbo e asporti il calore prodotto).-

Un particolare tipo di lampade ad incandescenza sono le **Lampade con alogeni** nelle quali al gas inerte dell'ampolla (argo o azoto) sono aggiunti degli allogeni (bromo o iodio) che innescano un particolare processo ciclico per cui le particelle di tungsteno del filamento che si volatilizzano non si depositano sul bulbo ma tendono a ridepositarsi sul filamento stesso evitando il decadimento e l'annerimento del bulbo che, date le alte temperature di funzionamento, è fatto di quarzo; tali lampade presentano un'efficienza superiore di circa il 50% rispetto a quelle normali.-

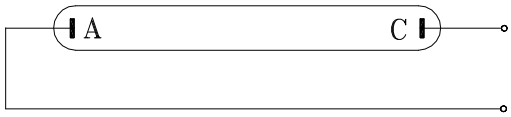
7.4.2 Lampade a scarica nei gas:

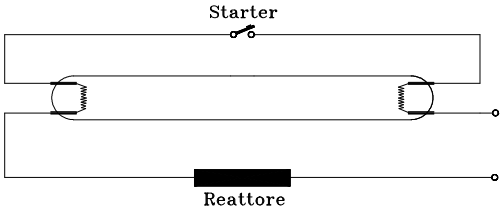
Questo tipo di lampade comprendono tutte quelle sorgenti luminose che sfruttano le radiazione nel campo del visibile emesse da sostanze gassose, contenute in un involucro tubolare di vetro, eccitate dal passaggio della corrente elettrica.-

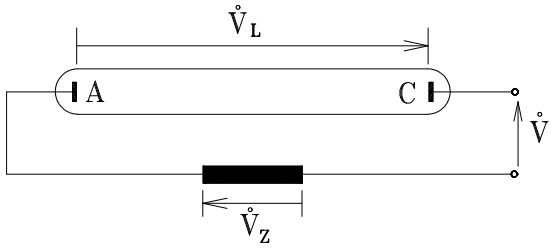
Le parti fondamentali di queste lampade sono:

L' **Involucro tubolare** a tenuta stagna che contiene un'opportuna sostanza gassosa o facilmente resa gassosa.-

Due **Elettrodi** costituenti l'*anodo* ed il *catodo* realizzati in modo da risultare perfettamente simmetrici rispetto ai due possibili sensi di circolazione della corrente: infatti anodo e catodo si scambialo la loro funzione ad ogni inversione della corrente alternata di alimentazione.-

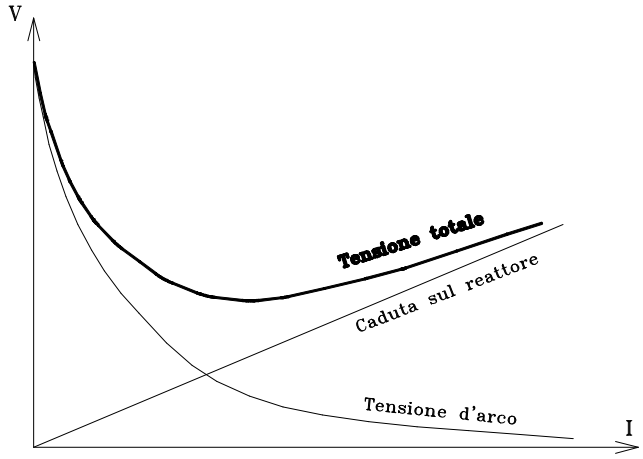






In queste lampade la conduzione, prevalentemente ionica, deve essere innescata; deve cioè essere presente uno **starter** che, all'atto dell'accensione, sia in grado di determinare uno stato di ionizzazione del gas, presente all'interno del tubo, tale da permettere l'innesco iniziale dell'arco; in seguito la tensione applicata tra i due elettrodi A e C è sufficiente a mantenere acceso l'arco che da solo produce il grado di ionizzazione del gas sufficiente al suo auto mantenimento.-

A mano a mano che la ionizzazione aumenta, la caduta di tensione tra i due elettrodi $\mathbf{V_L}$ tende a diminuire come indica la caratteristica discendente della tensione d'arco indicata in figura; in tal modo la corrente, essendo la tensione applicata costante, tenderebbe ad aumentare fino a valori inaccettabili; si pone perciò in serie un'*impedenza ausiliaria,* normalmente una grossa induttanza con nucleo ferromagnetico, chiamata **reattore** con la funzione di determinare ai suoi capi una caduta di tensione $\mathbf{V_Z}$ crescente con la corrente in modo che la tensione totale applicata:



$\dot{V} = \dot{V}_L + \dot{V}_Z$ determini una circolazione di corrente del valore voluto.-

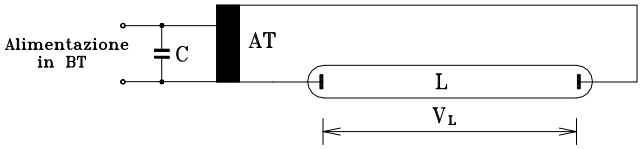
La presenza del reattore fa si che queste lampade costituiscano per la linea di alimentazione un carico fortemente induttivo per cui risulterà indispensabile installare anche un opportuno condensatore di rifasamento.-

In base al tipo di gas contenuto nel tubo, il colore della luce emessa varierà notevolmente fornendo spettri luminosi molto diversi: si distinguono così : *Lampade a vapori di Sodio – Lampade a vapori di Mercurio – Lampade al Neon – Lampade fluorescenti.-*

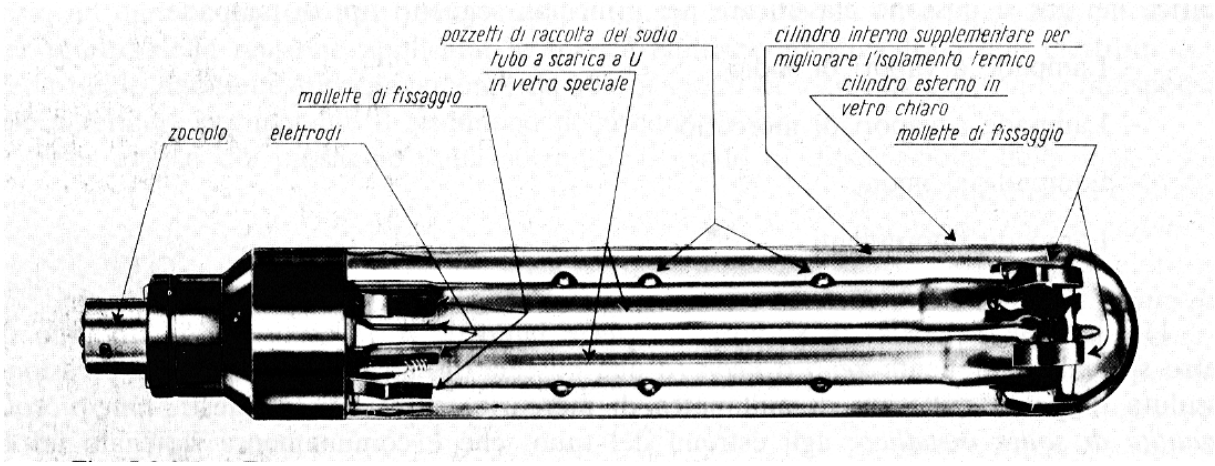
7.4.3 Lampade a vapori di sodio:

Queste lampade hanno normalmente il bulbo costituito da un tubo allungato e piegato a U con le due parti molto avvicinate, contenente una miscela di Xeno e Neon alla pressione di qualche millibar assieme ad una piccola quantità di sodio metallico; alle due estremità sono applicati i due elettrodi di alimentazione, alimentazione che viene eseguita attraverso un autotrasformatore elevatore alimentato al primario dalla bassa tensione della rete di distribuzione e che fornisce al secondario un'alta tensione sufficiente a far innescare, all'istante di accensione, l'arco tra gli elettrodi attraverso la colonna gassosa a bassa pressione della miscela di neon e xeno.-

Non appena l'arco s'innesca la corrente tende ad aumentare (vedi la caratteristica d'arco) determinando una caduta di tensione sulla grande reattanza di dispersione dell'autotrasformatore che funge così anche da reattore in serie.-



In questa fase di avviamento, che può durare anche alcuni minuti, la lampada funziona a vapori di xeno e neon emettendo una debole luminescenza rossastra; il riscaldamento dell'ampolla dovuto a tale scarica determinerà la vaporizzazione del sodio metallico contenuto nell'ampolla: gli atomi di sodio inizieranno cosi a partecipare alla ionizzazione e alla formazione dell'arco fino a divenire preponderanti dando così origine ad una *radiazione luminosa monocromatica di colore giallo-arancione* ad altissima efficienza (130 ÷180 lm/W).-



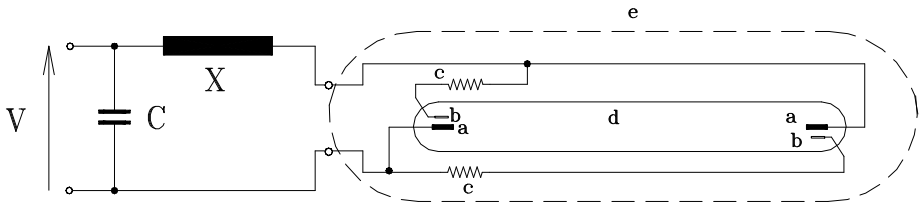
In pratica il tubo di vetro piegato ad U è contenuto in una doppia ampolla di vetro con intercapedine per ridurre gli scambi di energia termica con l'esterno.-

Queste lampade trovano vasto impiega nell'illuminazione stradale.-

7.4.4 Lampade a vapori di mercurio:

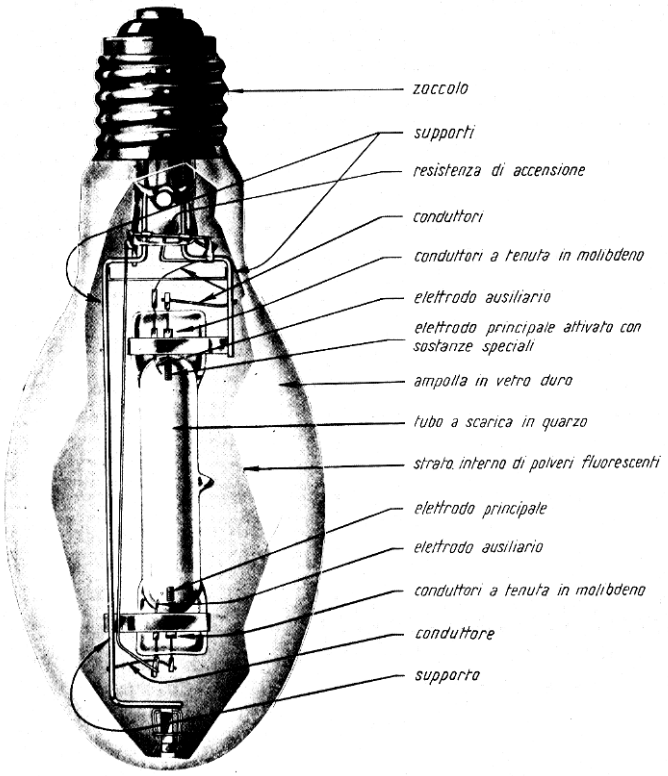
Le lampade a vapori di mercurio funzionano in modo simile a quelle a vapori di sodio: entro un'ampolla di vetro **(e),** avente funzioni protettive, è disposto un tubo di quarzo **(d),** adatto a sopportare temperature e pressioni elevate, contenete Argon e piccole quantità di mercurio.-

Nell'interno del tubo di quarzo sono fissati i due elettrodi principali **(a)** e due secondari **(b),** mentre i conduttori, che collegano questi alla linea, passano nell'intercapedine.-



Tra ciascun elettrodo ausiliario e il prospiciente elettrodo principale è applicata la tensione di alimentazione con in serie una resistenza limitatrice, mentre tra gli elettrodi principali è applicata direttamente la tensione di alimentazione stessa.-

Quando viene applicata la tensione, gli elettrodi principali, molto distanti, non riescono a adescarsi; l'innesco avviene soltanto rispetto gli elettrodi ausiliari, molto più vicini; in tal modo si formano degli archi, con corrente limitata dalle resistenze (c), che riscaldano il gas Argon.-



Successivamente, aumentando la temperatura, si stabilirà tra gli elettrodi principali una scarica, la cui corrente verrà limitata dal reattore X, ma sufficiente a far evaporare il mercurio contenuto in d: gli atomi di mercurio inizieranno cosi a partecipare alla ionizzazione e alla formazione dell'arco fino a divenire preponderanti dando così origine ad una radiazione luminosa di lunghezza d'onda compresa nel campo del visibile e dell'ultravioletto il cui valore e quindi colore dipenderà dalla pressione raggiunta dai vapori di mercurio; vengono normalmente costruite, con opportuni dosaggi del mercurio, lampade con pressione di esercizio che vanno da 1 atmosfera fino a 10÷20 Atmosfere.-

Come quelle al sodio, anche queste lampade richiedono un tempo di avviamento di alcuni minuti; vista la presenza del reattore, il fattore di potenza risulta basso per cui si necessita del condensatore di rifasamento.- L'efficienza del complesso raggiunge valori di circa 40 ÷ 70 lm/W.-

7.4.5 Lampade al Neon:

Sono realizzate con tubi di vetro dal diametro di circa 2 cm e dalla lunghezza variabile, ma che può arrivare fino a 3 metri, sagomati in varie forme (insegne) e contenenti un gas a bassa pressione; agli estremi vengono posti i due elettrodi che necessitano di una tensione d'innesco che va dai 600 Volt per i tubi a catodo freddi ai 100 Volt per quelle a catodo caldo.- La corrente di scarica è dell'ordine dei 20 mA; la stabilizzazione dell'arco è ottenuta ponendo in serie un reattore

o sfruttando, nel caso di tubi a catodo freddo, la reattanza di dispersione dell'autotrasformatore di alimentazione.- Queste lampade hanno un flusso luminoso molto basso (circa 30÷40 lm) per cui non sono adatte per l'illuminazione bensì per formare insegne pubblicitarie; A seconda del gas usato (neon, argon, elio e loro miscele) assumono colori diversi che possono essere ulteriormente variati con la colorazione del tubo di vetro.-

7.4.6 Lampade fluorescenti:

Le lampade fluorescenti sono lampade a vapori di mercurio a bassissima pressione, dell'ordine di 10^{-4} Atm., che sfruttano la proprietà di alcune sostanze fluorescenti di emettere radiazioni luminose quando vengono colpite da radiazioni ultraviolette.-

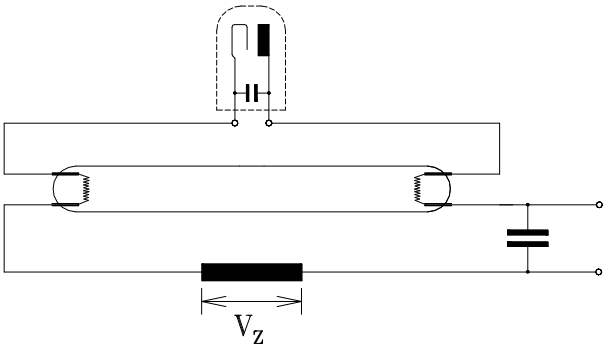
Sono costituite da un tubo di vetro, internamente rivestito da uno strato di opportune sostanze fluorescenti, riempito di Argon e Neon, a bassissima pressione, ed una piccola quantità di Mercurio; agli estremi sono posti i due elettrodi che devono venir opportunamente alimentati.-

Le problematiche inerenti all'accensione della lampada, cioè all'innesco dell'arco e alla stabilizzazione dell'arco stesso con la relativa limitazione della quantità di corrente assorbita, sono legate al tipo di alimentazione impiegata.-

Esistono due categorie di alimentatori: elettromagnetici ed elettronici.-

Alimentatore elettromagnetico: L'alimentatore tradizionale è quello elettromagnetico (reattore induttivo), che è un componente passivo che svolge due diverse funzioni: I°: durante la fase di accensione, in combinazione con uno starter, consente di ottenere una sovratensione sufficiente ad innescare la scarica nel gas contenuto nel tubo; II°: nel funzionamento a regime esso funge da limitatore di corrente, ciò è importante perché, a scarica innescata, il tubo diventa un percorso a bassissima impedenza che potrebbe causare eccessivi assorbimenti di corrente con la conseguente distruzione del tubo stesso.

I due elettrodi sono costituiti da un filamento di tungsteno che viene preriscaldato sfruttando la presenza di uno **Starter**.-



E' questo un tubetto di vetro contente gas inerte a bassa pressione e due elettrodi, uno fisso e l'altro costituito da una lamina bimetallica, normalmente aperti ed aventi in parallelo un piccolo condensatore antidisturbo.- All'accensione della lampada, tutta la tensione di rete risulta applicata tra i due contatti dello starter ed è sufficiente ad innescare un arco che riscalda il bimetallo determinando, dopo 1÷2 secondi, la chiusura dei contatti; a questo punto gli elettrodi principali risultano collegati un serie ed alimentati dalla tensione di rete che farà passare una corrente sufficiente a preriscaldarli; all'apertura dei contatti dello starter (dovuta al raffreddamento del bimetallo) si determina una sovratensione che innesca la scarica tra gli elettrodi del tubo; durante il funzionamento la caduta di tensione sul reattore è maggiore rispetto a quella sul tubo, per cui quest'ultima, che risulta applicata ai capi dello starter, non è sufficiente a reinnescare la scarica nello starter stesso.-

La scarica nel tubo determina la vaporizzazione del mercurio; l'arco che così si forma emette radiazioni soltanto in piccola parte luminose ed in maggior parte nel campo dell'ultravioletto; queste ultime, colpendo le sostanze fluorescenti depositate sulle pareti del tubo, le eccitano facendolo divenire luminose in modo da restituire l'energia elettromagnetica assorbita nel campo dell'ultravioletto sotto forma di radiazioni luminose.-

A seconda del tipo e del dosaggio delle sostanze fluorescenti impiegate il colore della luce ottenuto varia di gradazione: commercialmente si distinguono lampade *bianco caldo, bianco*

Il tubo emette in totale:

<table>
<tr><td colspan="4">Energia elettrica assorbita dal tubo 40 W</td></tr>
<tr><td colspan="4">L’arco la trasforma in:</td></tr>
<tr><td>Luce
1 W</td><td colspan="2">Raggi ultravioletti
24 W</td><td>Calore
15 W</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">Le sostanze fosforescenti convertono in:</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Luce
7 W</td><td>Calore
17 W</td></tr>
<tr><td>Luce 8W
20%</td><td colspan="3">Calore 32 W
80%</td></tr>
</table>

dorato, bianco, bianco freddo e solare.- Per usi diversi dall’illuminazione degli ambienti si producono lampade colorate dall’azzurro al rosso e verde.-

L’efficienza luminosa, tenendo conto anche delle perdite del reattore, variano tra i 25 e 50 lm/W; la loro durata è dell’ordine delle 8.000 ore.-

Alimentatore elettronico a componenti integrati: Questo alimentatore utilizza circuiti integrati (compreso un oscillatore programmabile) per il controllo della lampada. Basandosi sul fatto che una lampada fluorescente richiede una tensione alternata con duty cycle *50%* e il circuito di pilotaggio è un circuito risonante (L, C), è semplice generare una forma d’onda quadrata in ingresso a questo circuito. Il circuito risonante la trasforma in un’onda dall’andamento sinusoidale. Poiché un circuito costituito da una L e una C ha un picco di risonanza ad una frequenza ben definita, risulta chiaro che variando la frequenza della forma d’onda quadra creata ci si può avvicinare al picco di risonanza e pilotare la lampada con una tensione sempre più alta. Inoltre lavorando ad alte frequenze è possibile far scorrere negli elettrodi della lampada una corrente abbastanza bassa da non far accendere la lampada ma sufficiente per preriscaldare i filamenti ed evitare che si danneggino all’accensione, aumentando così il tempo di vita della lampada.

In definitiva una lampada con circuito di controllo elettronico funziona nel seguente modo: inizialmente la lampada viene alimentata con una forma d’onda sinusoidale (grazie al circuito risonante che riceve un’onda quadra in ingresso) ad alta frequenza (es. 70kHz) e una piccola corrente scalda i filamenti per circa 1 secondo. Poi la frequenza viene abbassata *(35kHz)* in un tempo pari a qualche decina di millisecondi finché non si arriva molto vicino al picco di risonanza dove la tensione raggiunge qualche kV. La scarica nel gas presente nella lampada la fa accendere: la curva di risonanza si modifica, perché la lampada accesa costituisce un carico diverso, e la tensione si stabilizza intorno ai 100V. A questo punto si può facilmente variare l’intensità luminosa aumentando la frequenza della forma d’onda di controllo. Generalmente tutto questo viene ottenuto con un circuito integrato che può essere nascosto facilmente nella base delle lampade compatte, le cosiddette **CFL** (**C**ompact **F**luorescent **L**amp).-

Le lampade fluorescenti hanno una vita media molto maggiore rispetto a quelle a incandescenza, ma la loro durata può essere fortemente influenzata dal numero di accensioni e spegnimenti, a meno che non si usi un pilotaggio elettronico: ognuna di queste operazioni, infatti, riduce la vita della lampada, a causa dell’usura subita dagli elettrodi. Il valore che viene fornito dalle aziende produttrici è generalmente calcolato con cicli di accensione di 8 ore, e va dalle 12-15000 ore delle lampade tubolari alle 5-6.000 ore delle lampade compatte.-

II pilotaggio elettronico, invece, grazie al preriscaldo dei catodi (elettrodi), che ne evita il danneggiamento, consentono un numero di accensioni praticamente infinito (oltre 60.000) e la precisione del controllo ne estende la vita ad almeno 10.000 ore. A differenza delle lampade a incandescenza, queste lampade perdono leggermente in quantità di flusso luminoso emesso nel corso del tempo, inoltre per i modelli meno recenti (generalmente senza preriscaldo) di lampade compatte possono impiegare generalmente qualche minuto per arrivare al massimo di emissione possibile dopo l’accensione.-

7.5.0 Apparecchi di illuminazione

Gli apparecchi di illuminazione hanno la funzione di contenere le lampade elettriche e supportare i vari dispositivi necessari a indirizzare correttamente la luce oltre a fornire all'insieme una veste adatta dal punto di vista estetico.-

Riflettori: costruiti normalmente in vetro argentato, allumino anodizzato o acciaio smaltato, servono, con la loro forma parabolica, a modificare la direzione del flusso luminoso della lampada in modo da ottenere fasci di luce paralleli.-

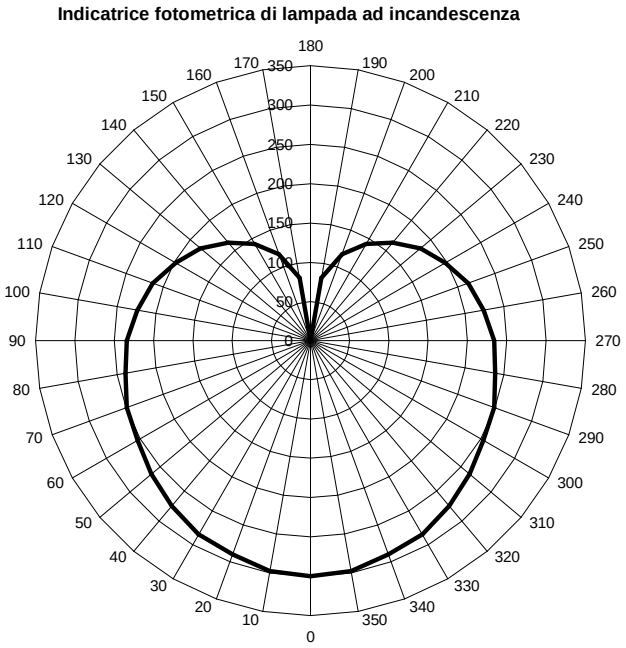
Rifrattori: costruiti in vetro prismatico o in materiale acrilico, hanno la funzione di deviare i raggi luminosi per indirizzarli in una data direzione o diffonderli in tutte le direzioni.-

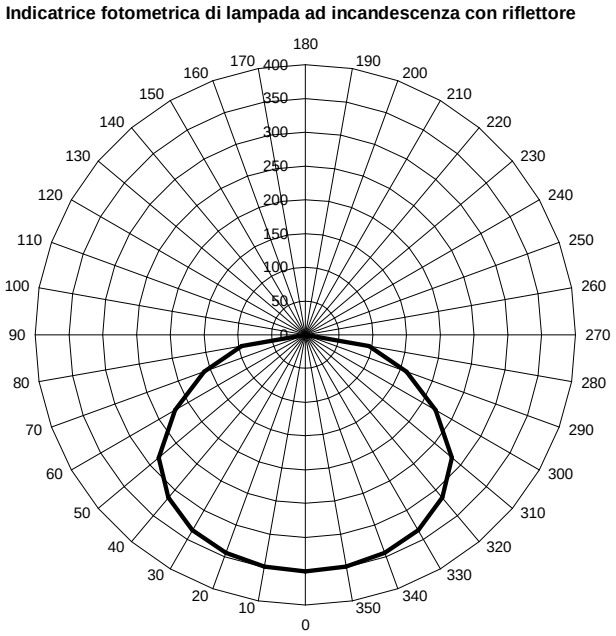
Diffusori: costruiti in vetro smerigliato, opalino o con resine trasparenti, hanno il compito di rendere uniforme la distribuzione del flusso luminoso in tutte le direzioni, diminuendone l'intensità e attenuando l'abbagliamento.-

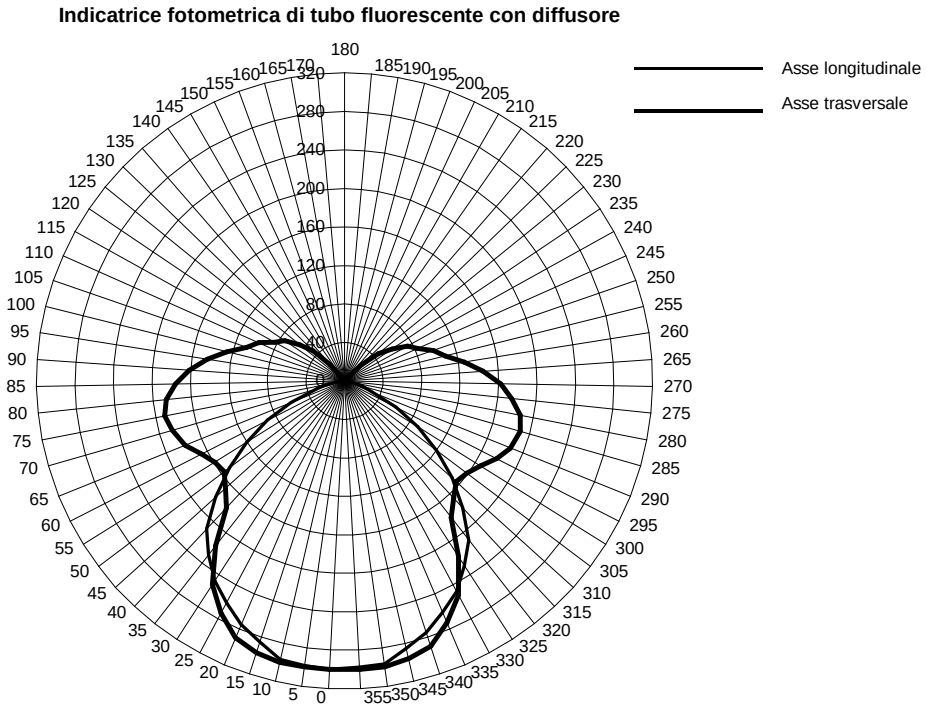
Proiettori: costruiti come i riflettori, hanno la lampada posta nel fuoco in modo da fornire un fascio luminoso con cono di apertura di appena 10 °.-

Indicatrice fotometrica: Per valutare come l'intensità luminosa di una sorgente si propaga in tutte le direzione in base anche al tipo di apparecchio luminoso nel quale è inserita, si costruisce la sua indicatrice fotometrica: essa è il diagramma polare delle intensità luminose in tutte le direzioni su un piano verticale passante par l'apparecchio illuminante; nel caso di sorgenti simmetriche, la curva è unica, altrimenti si forniscono due curve: una relativa all'asse longitudinale, l'altra per lasse trasversale.- Normalmente i valori vengono espressi in cd/1000 lumen (candele per ogni 1000 lumen installati).-

Nelle figure seguenti sono fornite le indicatrici fotometriche di una lampada ad incandescenza, di una lampada ad incandescenza munita di riflettore e di un tubo fluorescente posto entro un plafoniera munita di diffusore prismatico.-







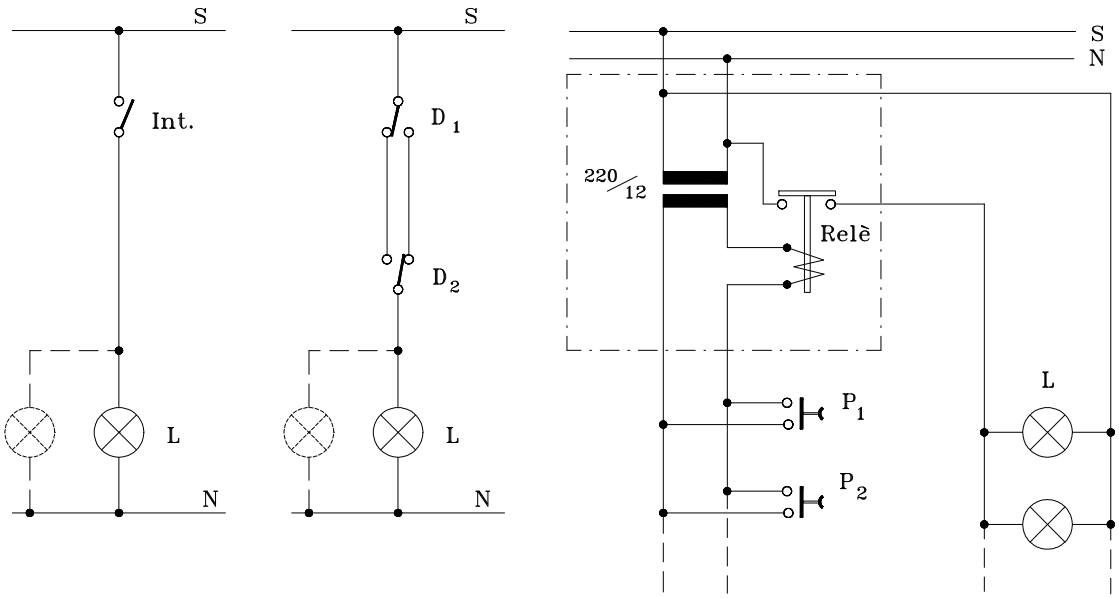
7.6.0 Circuiti di alimentazione delle lampade

Gli impianti di illuminazione per interni sono sempre costituiti da lampade alimentate in derivazione dalla rete in bassa tensione; i comandi di accensione e spegnimento si effettuano mediante interruttori, deviatori o relè a seconda delle situazioni:

Comando di una lampada (o gruppo di lampade in parallelo) **da un solo punto:** si attua mediante un semplice interruttore a due posizioni (aperto – chiuso).-

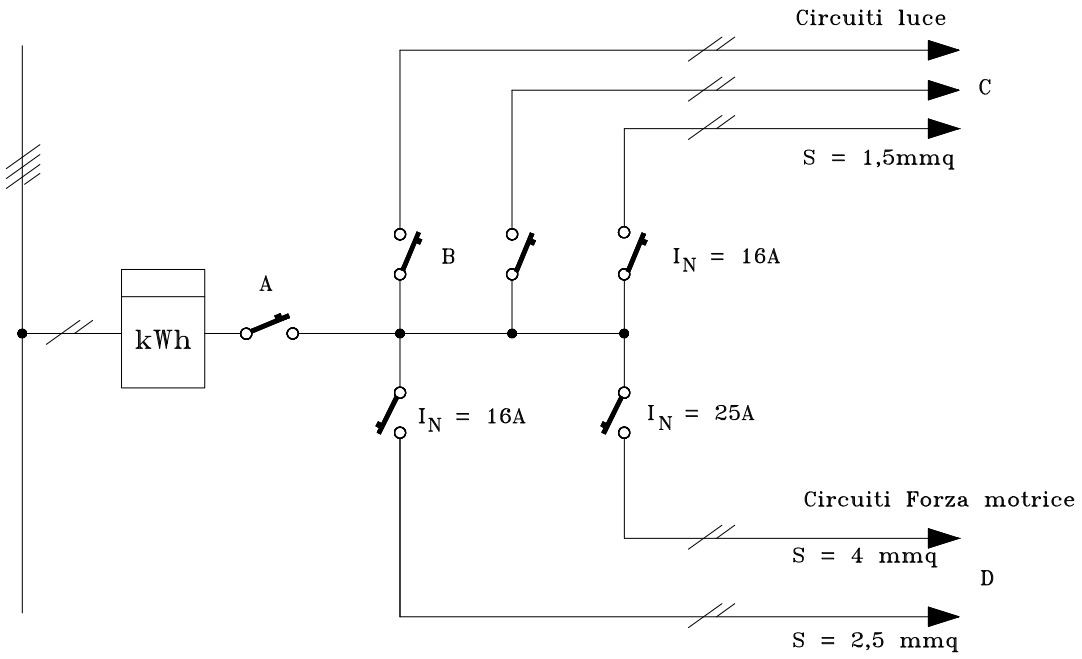
Comando di una lampada (o gruppo di lampade in parallelo) **da due punti diversi:** si attua mediante due deviatori (tre morsetti e due posizioni).-

Comando di una lampada (o gruppo di lampade in parallelo) **da più punti diversi:** si attua normalmente mediante un sistema di comando indiretto a relais.-



7.7.0 Impianti negli edifici civili

Negli impianti degli edifici civili, ciascun'unità abitativa o lavorativa deve essere alimentata distintamente derivandosi dal contatore d'energia e inserendo un interruttore generale di protezione di tipo magnetotermico con relè differenziale (**A**); da questo si derivano le linee di distribuzione interne, ognuna protetta da un singolo interruttore magnetotermico (**B**) con corrente nominale proporzionata all'assorbimento delle apparecchiature alimentate: è norma distinguere i circuiti d'alimentazione delle lampade (**C**) da quelli delle prese dedicate all'alimentazione d'apparecchiature (**D**) che assorbono una maggior corrente (elettrodomestici o motori vari).-



I conduttori hanno sezioni normalizzate e cioè:

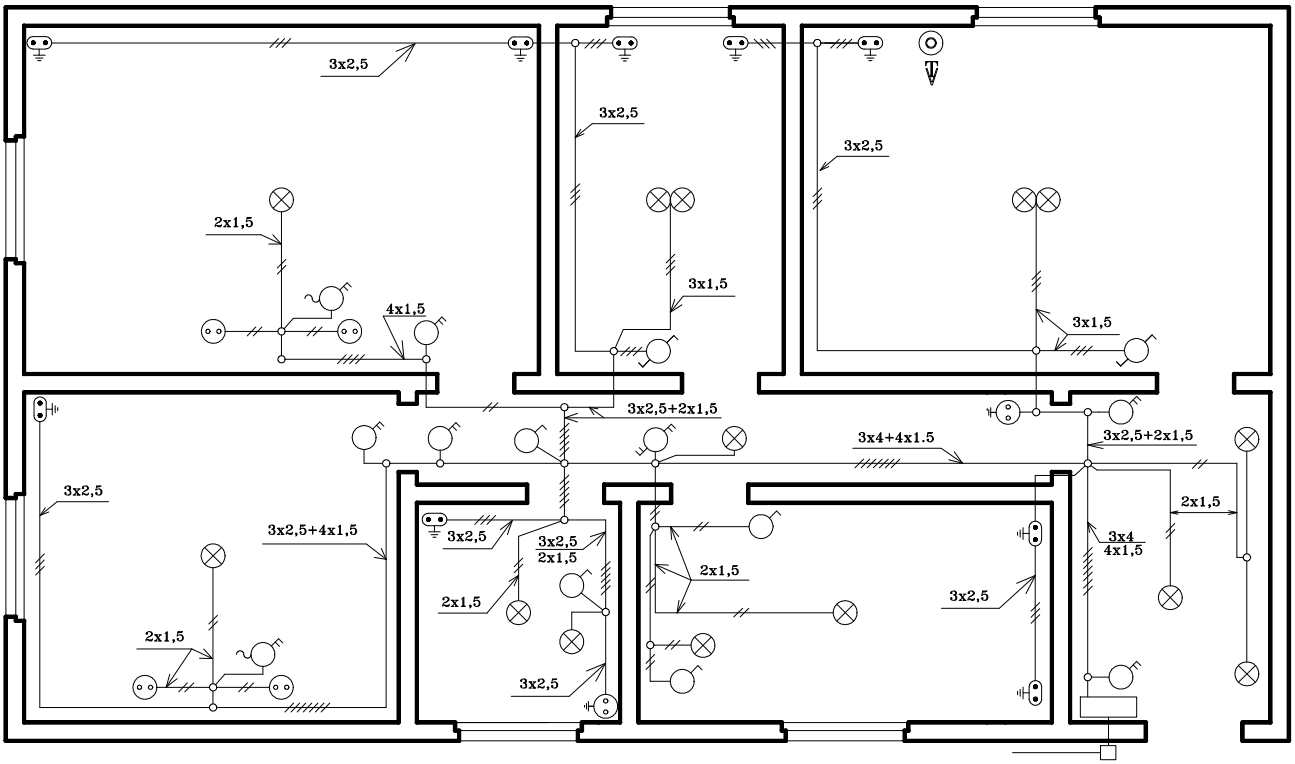
-1,5 mmq per linee d'alimentazione dei punti luce

-2,5 mmq per linee di potenza con correnti fino a 16 A

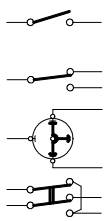
-4 mmq per linee che alimentino carichi di potenza fino a 3,6 kW

Essi devono essere sempre posti entro tubazioni di protezione sotto malta o a vista.- I cambiamenti di direzione dei tubi devono avvenire con l'interposizione di scatole di derivazione che permettano la tesatura o la sostituzione dei conduttori.- Le giunzioni dei fili devono avvenire tramite morsetti a pressione, isolati, posti dentro le scatole di derivazione.-

Impianto d'illuminazione e di distribuzione energia elettrica per usi domestici in un appartamento:



Lampada elettrica	⊗
Interruttore	
Deviatore	
Commutatore	
Invertitore	
Presa bipolare per luce	
Presa per luce con polo di terra	
Deviatore a peretta	
Presa bipolare per forza motrice	



Capitolo VIII

RISCALDAMENTO ELETTRICO DEI MATERIALI

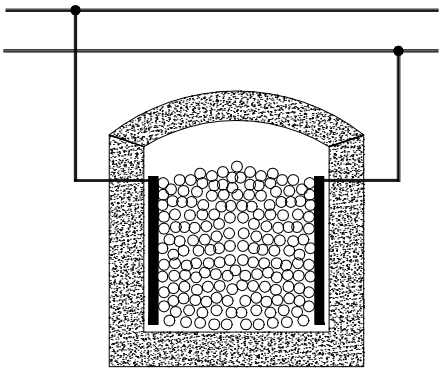
8.1.0 Forni elettrici

L'impiego dell'energia elettrica per il riscaldamento dei metalli, introdotto industrialmente agli inizi del novecento, ha permesso di ottenere temperature superiori ai 3000 °C e quindi notevoli miglioramenti nei trattamenti rispetto a quelli possibili con i forni a combustione in aria dove vengono raggiunte temperature massime di 1900 °C.-

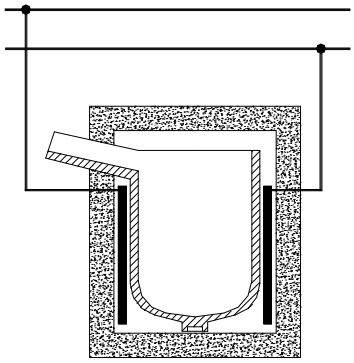
I tre tipi fondamentali di forni impiegati in metallurgia corrispondono ai tre modi diversi di sfruttare gli effetti termici della corrente elettrica:

8.1.1. Forni elettrici a resistenza:

Utilizzano l'effetto Joule, cioè il calore prodotto dal passaggio della corrente attraverso un conduttore: sono del tipo a *resistenza diretta*, se il conduttore è costituito dal materiale stesso da riscaldare (forni a resistenza di scorie e forni a bagno di sale), a *resistenza indiretta*, se l'elemento riscaldante è costituito da un'opportuna resistenza separata, costituita da leghe particolari o in carborundum (forni fusori per metalli e leghe metalliche a basso punto di fusione).-



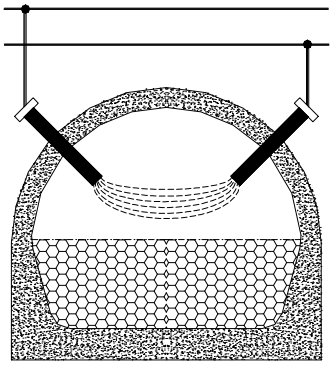
Forno a resistenza diretta



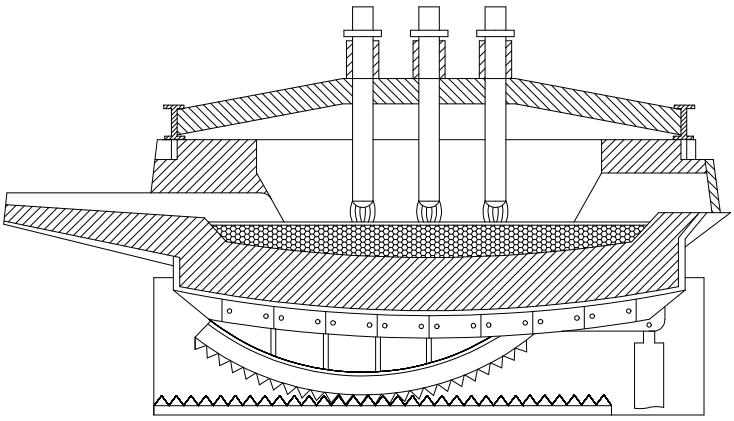
Forno a resistenza indiretta

8.1.2. Forni ad arco:

I forni ad arco sfruttano il principio secondo il quale il passaggio di corrente elettrica attraverso un gas lo porta allo stato di plasma. Ciò si ottiene mettendo in contatto fra di loro due elettrodi collegati a un *circuito* elettrico. Il punto di contatto si riscalda fortemente e, allontanando i



Forno ad arco radiante indiretto

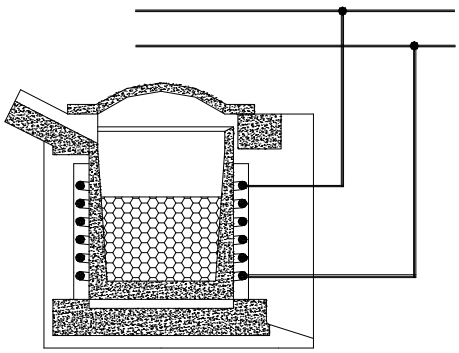


Forno ad arco diretto trifase

due elettrodi, se la differenza di potenziale è sufficiente, può instaurarsi un passaggio di elettroni dal catodo all'anodo attraverso l'aria. L'aria ne risulta ionizzata e la sua resistenza elettrica cala bruscamente favorendo il passaggio di corrente elettrica. La temperatura dell'arco innescato può raggiungere i 4000°C. Il più diffuso è il *forno a elettrodi, alimentato* da corrente alternata trifase. Gli elettrodi sono realizzati in carbone, o in grafite e l'arco s'instaura tra gli elettrodi e la carica (*forni ad arco diretto*). Vengono costruiti anche *forni ad arco radiante o indiretto* nei quali l'arco è fatto scoccare tra i due elettrodi ed il calore viene trasmessi per irraggiamento alla carica del materiale da fondere. La densità di corrente massima è di circa 30 A/cm^2 per ogni elettrodo. La regolazione viene effettuata mediante movimento verticale degli elettrodi azionati da motore elettrico o idraulico. Questo tipo di forno è utilizzato per la produzione di acciai e per la ghisa con capienze fino a 200 *t* e potenze installate fino 100 MW. I refrattari più adatti per le pareti e la volta del forno sono quelli a base di silice. Lo strato di scorie che si forma sul bagno fuso evita che una quantità eccessiva di calore venga irraggiata dai bagno fuso.

8.1.3 Forni ad induzione:

In questi forni, il calore viene prodotto per effetto delle *correnti parassite di Foucault*, nei metalli conduttori non ferromagnetici, alle quali si aggiungono le *perdite per isteresi magnetica* in quelli ferromagnetici (le perdite per isteresi però si annullano quando viene superata la temperatura di Curiè alla quale i materiali ferromagnetici perdono le loro proprietà magnetiche).- Tali perdite vengono indotte da campi magnetici alternati prodotti da correnti alternate di tre tipi diversi: a bassa frequenza (fino a 50 Hz), a media frequenza (tra i 300 ÷ 10.000 Hz), ad alta frequenza (oltre 20.000Hz).-



L'alimentazione elettrica dei forni a bassa frequenza viene fatta direttamente dalla rete usando la frequenza a disposizione. Nei forni a media ed alta frequenza sono necessari invece dei convertitori statici (raddrizzatori – inverter) che impiegano semiconduttori per le medie frequenze mentre per i forni ad alta frequenza bisogna ricorrere a dei particolari tubi elettronici a vuoto: i KLYSTRON nei quali viene sfruttata la modulazione di velocità di un fascio d'elettroni; questi tubi possono modulare potenze dell'ordine delle decine di chilowatt operando in un campo di frequenza superiore ai 20 kHz.-

I vantaggi fondamentali dei forni elettrici rispetto altri tipi di forni usati in metallurgia con combustibili solidi o liquidi sono:

----Il calore può venire generato in un ambiente limitato e in modo intenso così da raggiungere temperature molto elevate

----E' assente l'azione chimica inquinante legata alle impurità e alle scorie del combustibile

----Le operazioni possono essere eseguite in ambiente riducente, neutro od ossidante secondo le necessità

----La regolazione delle temperature e delle durate dei processi sono molto più semplici e precise.-

8.2.0 Saldatura elettrica

La *saldatura* è la tecnica di giunzione di parti metalliche mediante l'intervento del calore, della pressione o di entrambi, con o senza l'aggiunta di metallo d'apporto; i lembi da saldare vengono generalmente portati allo stato di fusione o rammollimento mediante l'apporto di calore e

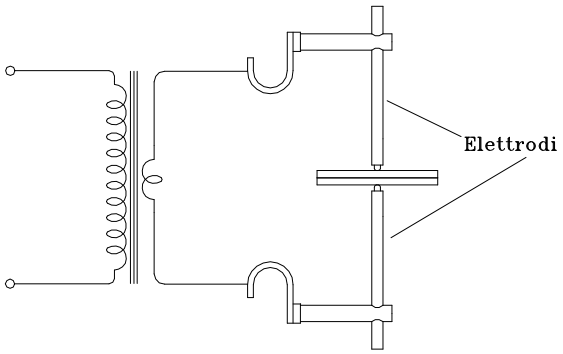
poi compressi fino a diventare un tutto unico, oppure viene usato del materiale d'apporto, anche questo portato allo stato di fusione, quindi depositato a guisa di ponte tra i lembi da saldare che sono pure allo stato liquido.-

La saldatura elettrica si avvale, quale fonte di calore, dell'energia elettrica e si distingue in due grandi categorie: saldatura a resistenza e saldatura ad arco.-

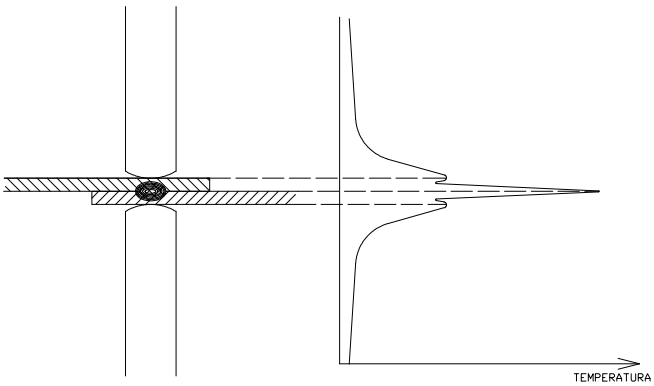
8.2.1 Saldatura a resistenza:

È un procedimento di saldatura autogena, per pressione senza materiale d'apporto, nel quale il calore necessario per portare *localmente* le superfici da saldare a temperatura di prefusione è fornito dalla resistenza elettrica al passaggio di una corrente attraverso la zona da unire.-

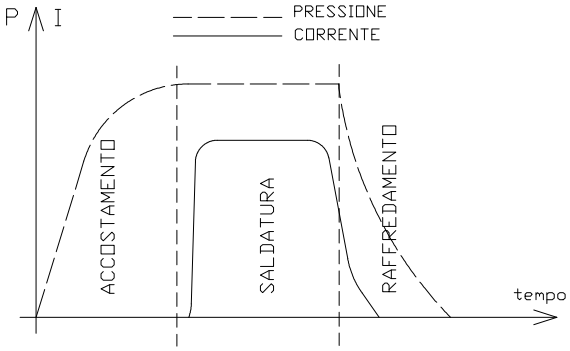
Per ottenere la temperatura di prefusione si richiede una bassissima tensione dell'ordine dei 4 ÷ 8 Volt ed un'elevatissima corrente che va dalle centinaia di ampere per spessori sottili fino ai 100.000 A per grandi spessori.-



L'energia elettrica viene prelevata dalla rete di distribuzione in alternata e, mediante un trasformatore, portata al valore dei pochi volt richiesti; il trasformatore è del tipo corazzato con il secondario di una o due spire di rame cavo e raffreddato con circolazione interna d'acqua.- Ci sono anche in commercio saldatrici funzionanti in corrente continua fornita da appositi generatori aciclici o da batterie di raddrizzatori.-



La corrente elettrica fornita dal trasformatore di alimentazione, che fa parte integrante della saldatrice, viene convogliata attraverso conduttori flessibili di opportuna sezione agli elettrodi di contatto dai quali viene trasmessa alle parti da saldare che in tal modo diventano parte del circuito elettrico: poiché la resistenza elettrica del circuito risulta quasi del tutto concentrata nel *punto di contatto* delle due superfici da saldare affacciate, la corrente, per effetto Joule, le riscalda fino a portarle allo stato di prefusione determinando la loro giunzione mediante la pressione esercitata dagli stessi elettrodi.-



La quantità di calore generato nella zona di saldatura è dato dall'espressione:

$$Q = 0,24 \cdot 10^{-3}\ RI^{2}\Delta T$$

per cui, regolando il tempo ΔT di alimentazione del circuito, si determina con precisione la quantità di calore prodotta nel punto di saldatura e quindi la temperatura del punto stesso.-

8.2.2 Saldatura ad arco:

La saldatura a elettrodo rivestito è la tecnologia di saldatura più diffusa nel mondo, principalmente per i bassi costi delle apparecchiature e per la versatilità di impiego. Fra l'altro è il procedimento più adatto per essere impiegato all'aperto (quindi in cantiere).

Il procedimento a elettrodo rivestito deriva dai primi procedimenti ad arco sviluppati all'inizio del XX secolo. In questi procedimenti inizialmente l'elettrodo (dello stesso tipo di materiale di quello da saldare) non era protetto, quindi si ossidava molto rapidamente e, cosa molto più grave, introduceva ossidi e altre impurità nel bagno di saldatura. Ben presto si vide che aggiungendo al materiale dell'elettrodo disossidanti si ottenevano risultati migliori, inizialmente questi disossidanti erano dentro l'elettrodo (che praticamente era un tubo contenente la polvere disossidante), ma gli sviluppi successivi mostrarono l'utilità di avere un rivestimento esternamente al materiale metallico di cui è composto l'interno.

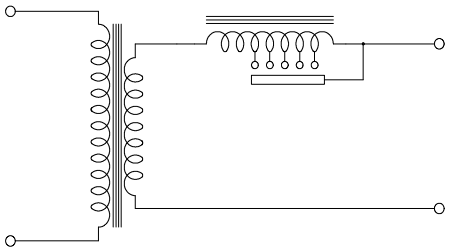
Attualmente gli elettrodi rivestiti sono prodotti in varie forme con differenti funzioni, a seconda delle esigenze sia di sicurezza sia di operabilità sia estetiche della saldatura.

Quando si porta l'elettrodo ad una distanza opportuna dal pezzo scocca l'arco elettrico, che fonde il materiale metallico dell'elettrodo, il rivestimento ed il metallo del pezzo che deve essere saldato. Il saldatore sposta manualmente la pinza, gestendo in tal modo il *bagno di saldatura*. Al termine dell'operazione il saldatore deve scalpellare la crosta (*scoria*) che si è formata sopra la saldatura, avente la funzione di proteggere il metallo nel corso del raffreddamento. Dato che gli elettrodi hanno una lunghezza di qualche decina di centimetri devono essere sostituiti nel corso delle operazioni di saldatura. Sia la necessità di sostituire gli elettrodi, sia quella di scalpellare la scoria dopo aver effettuato la saldatura riducono la produttività del procedimento, riducendone quindi l'economicità.

L'apparecchiatura necessaria per eseguire una saldatura ad arco è costituita da un'opportuna macchina generatrice della corrente elettrica di saldatura e dagli elettrodi; la corrente può essere continua o alternata secondo il sistema, del tipo di elettrodi usati e della natura del materiale da saldare.-

Macchine per saldatura a elettrodo rivestito

Il generatore elettrico per saldare ad elettrodo rivestito in corrente alternata, deve avere una caratteristica più cadente di quella dell'arco, cioè con una tensione tanto minore quanto più alta è la corrente richiesta alla macchina (quindi un normale trasformatore collegato alla rete elettrica non potrebbe funzionare). La necessità di avere una caratteristica cadente implica che al trasformatore (necessario per portare la tensione di rete, 220 o 380 V, alla tensione di utilizzo della macchina - c.a. 80 V a vuoto) deve essere accoppiato un opportuno circuito (praticamente un'impedenza in serie al secondario del trasformatore) che abbatta la tensione fino ai valori d'arco (attorno ai 25 V) una volta che sia innescato l'arco. Ad un morsetto del generatore è collegata la *pinza porta elettrodo*, mentre il pezzo da saldare è collegato all'altro morsetto. Generalmente l'impedenza in serie al trasformatore è regolabile, per mezzo di un volantino che agisce su di essa, in modo da variare la corrente di uscita dal trasformatore, al fine di adeguare questa e quindi la potenza saldante alla sezione dell'elettrodo impiegato.-

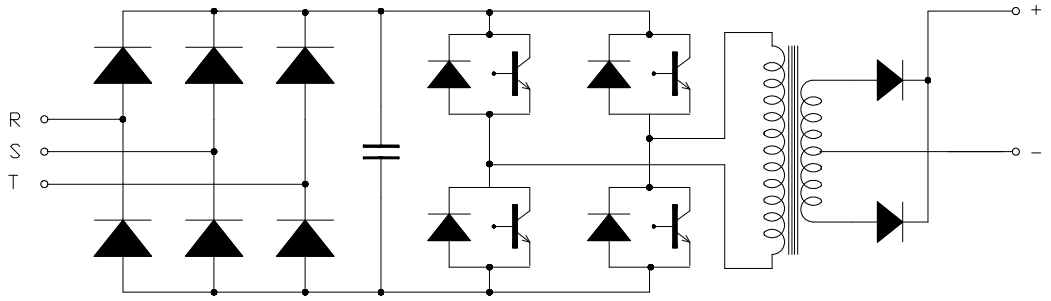


La classe di macchine sopra descritta opera con un trasformatore a frequenza di rete (50 Hz), di potenza pari alla potenza della macchina saldatrice stessa. Ciò comporta che le macchine così

costruite pesano numerosi chilogrammi, anche dieci, per ciascun kilowatt di potenza fornita alla saldatura.-

Nelle saldatrici in continua, la corrente viene prodotta da un gruppo Motore Asincrono – Dinamo oppure da un gruppo di raddrizzatori al silicio alimentati, mediante un trasformatore, dalla rete.

Più recentemente sono state sviluppate saldatrici con trasformatore ad alta frequenza, che sono tanto più piccoli e leggeri, a parità di potenza, quanto più alta è la frequenza.-



La corrente elettrica ad alta frequenza è in questo caso fornita da un inverter alimentato da un raddrizzatore posto all'ingresso; è poi presente un raddrizzatore all'uscita del trasformatore e prima dell'elettrodo. Tali macchine sono più costose ma il circuito di controllo che esse richiedono può svolgere varie funzioni per agevolare il compito dell'operatore, tra le quali molto rilevante è quella anti-stick che evita la fusione senza arco (stick) dell'elettrodo sul pezzo.-

In entrambi i casi la corrente viene erogata mediante apposite regolazioni con le caratteristiche di tensione e di intensità appropriate al lavoro di saldatura e al diametro dell'elettrodo.-

Nel caso di saldatura in corrente continua, normalmente il polo positivo viene collegato al pezzo da saldare ed il negativo all'elettrodo (polarità diretta) in quanto è sull'elettrodo positivo che si produce la maggior quantità di calore (vista la maggior massa del pezzo da saldare, questo disperde più facilmente il calore); soltanto nel caso di saldatura di acciai inossidabili e di materiali non ferrosi è necessario collegare l'elettrodo al polo positivo (polarità inversa), questo per il tipo di rivestimento antiossidante di tipo basico degli elettrodi adatti per tali saldature.-

Gli elettrodi

L'avvento degli elettrodi rivestiti ha portato ad avere elettrodi composti da *anima* metallica e *rivestimento* (polvere agglomerata opportunamente). Quando l'elettrodo fonde i componenti del rivestimento fondono e reagiscono fra loro, modificando la composizione dell'atmosfera in cui scocca l'arco. Una volta giunti sul bagno di saldatura formano una scoria meno densa del metallo di fusione che, quindi, galleggia sul bagno, proteggendolo nella fase di solidificazione.

In conclusione le funzioni del rivestimento sono:

- Funzione *elettrica*, cioè deve stabilizzare l'arco facilitando la ionizzazione dell'atmosfera in cui scocca, questa funzione è essenziale per permettere il funzionamento dell'arco in corrente alternata.
- Funzione *protettiva*, cioè deve impedire il contatto del metallo fuso (molto reattivo con ossigeno e azoto) con l'aria, quindi, sia in fase gassosa (nell'arco) sia in fase liquida (sopra il bagno di fusione). Inoltre alla punta dell'elettrodo si forma un cratere, in cui il metallo d'apporto che sta fondendo viene protetto dal rivestimento non ancora fuso (sporgente).
- Funzione *metallurgica*, cioè deve poter portare in lega nel bagno fuso elementi di lega o elementi che reagiscano con le impurezze del metallo base (principalmente S e P) per trasferirle nella scoria.
- Funzione *operativa*, cioè modificando le caratteristiche del bagno fuso (in particolare la viscosità), in modo che il saldatore possa lavorare in posizioni particolarmente difficili (Verticale e Sopratesta).

Applicazioni della saldatura a elettrodo rivestito

Praticamente la saldatura a elettrodo rivestito può essere sempre utilizzata, sia in officina sia in cantiere. Può essere usata per quasi tutti i materiali, sono esclusi i materiali *basso fondenti* (Pb e Zn), i materiali reattivi con l'ossigeno (Al, Ti, Zr) ed i *metalli refrattari* (Nb, Ta). Non è consigliabile (per motivi economici) saldare con questa tecnologia giunti di spessore superiore a 35-40 mm.

Il difetto più comune che si incontra nei cordoni di saldatura effettuati con questa tecnologia sono le inclusioni di scoria, che possono essere dovute sia ad un maneggio errato dell'elettrodo sia ad una rimozione non sufficiente della scoria.

È il sistema di saldatura elettrica maggiormente impiegato nelle applicazioni industriali; esso sfrutta l'elevatissimo calore dell'arco elettrico per portare allo stato liquido il metallo d'apporto e i lembi da saldare.-

Nelle saldatrici in continua, la corrente viene prodotta da un gruppo Motore Asincrono – Dinamo oppure da un gruppo di raddrizzatori al silicio alimentati, mediante un trasformatore, dalla rete; nelle saldatrici in alternata, la corrente viene fornita da un particolare trasformatore riduttore alimentato direttamente dalla rete.-

In entrambi i casi la corrente viene erogata mediante apposite regolazioni con le caratteristiche di tensione e di intensità appropriate al lavoro di saldatura e al diametro dell'elettrodo.-

Nel caso di saldatura in corrente continua, normalmente il polo positivo viene collegato al pezzo da saldare ed il negativo all'elettrodo (polarità diretta) in quanto è sull'elettrodo positivo che si produce la maggior quantità di calore (vista la maggior massa del pezzo da saldare, questo disperde più facilmente il calore); soltanto nel caso di saldatura di acciai inossidabili e di materiali non ferrosi è necessario collegare l'elettrodo al polo positivo (polarità inversa), questo per il tipo di rivestimento antiossidante di tipo basico degli elettrodi adatti per tali saldature.-

8.3.0 Riscaldamento ad induzione elettromagnetica

Il riscaldamento ad induzione, può essere considerato il settore che ha dato il maggior contributo allo sviluppo delle tecniche di riscaldamento dei materiali, a livello industriale.-

Esso trova impiego:

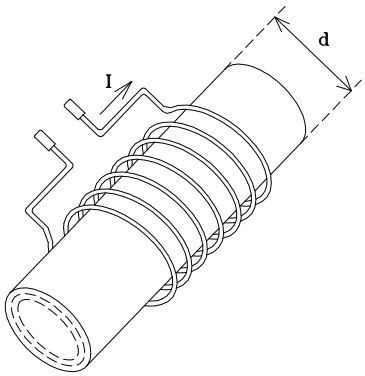
- nella saldatura e nella brasatura di metalli ferrosi e non ferrosi in atmosfera ambiente, controllata o sottovuoto;
- nella tempra localizzata e superficiale dei più svariati prodotti d'acciaio, con tempi di riscaldamento relativamente lunghi, alcune decine di secondi, o molto brevi, decimi o centesimi di secondo;
- nel riscaldamento totale o localizzato di metalli ferrosi e non ferrosi per la loro lavorazione a caldo, a temperature comprese tra 500 e 1250 ^{0}C;
- nella fusione dei metalli, con forni in atmosfera ambiente, in gas e sottovuoto;

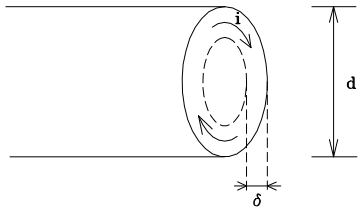
I fattori che hanno portato alla diffusione industriale del riscaldamento ad induzione sono sostanzialmente i seguenti:

- l'utilizzazione razionale dell'energia elettrica;
- la ripetibilità dei trattamenti termici e quindi la costanza delle caratteristiche del prodotto finito;
- l'aumento della produzione per la possibilità di realizzare riscaldamenti in tempi brevissimi;
- una rapida entrata a regime dei cicli di riscaldamento;
- una notevole riduzione delle perdite di calore verso l'ambiente, con conseguente elevato rendimento.-

Elemento fondamentale che caratterizza i moderni impianti è la loro completa automazione, resa possibile dall'impiego di sistemi di programmazione, regolazione e controllo mediante microprocessori.-

La produzione di calore all'interno dei materiali *metallici* conduttori avviene per effetto delle ***correnti parassite di Foucault***, indotte da un campo magnetico variabile nel quale è immerso il materiale stesso; se tale materiale è anche *ferromagnetico* e la temperatura rimane di sotto alla *temperatura di Curiè*, vi si aggiungono le perdite per ***isteresi magnetica***.-





Nel caso di un cilindro metallico immerso nel campo magnetico generato da un solenoide percorso dalla corrente alternata $\dot{I}$, le correnti parassite di Foucault percorrono delle spire ideali poste su piani normali alla direzione del campo induttore (che corrisponde all'asse del solenoide e quindi del cilindro); a causa dell'*effetto pellicolare*, tali correnti si addensano verso la superficie del cilindro (qui le spire ideali hanno una superficie maggiore e quindi, a parità d'induzione, un flusso concatenato maggiore): ne segue un riscaldamento per effetto Joule che si sviluppa essenzialmente sulla superficie del cilindro (il discorso vale a prescindere dalla forma della sezione).-

La profondità utile di penetrazione del calore, corrispondente allo strato δ maggiormente interessato alle correnti indotte, è legata alla frequenza f del campo induttore, alla permeabilità μ del materiale e dalla sua resistività ρ, dalla relazione:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

A parità di materiale, agendo sulla frequenza f del campo induttore si può cosi ottenere la variazione di δ a secondo delle necessità della lavorazione.-

Ad esempio, nel caso dei riscaldamenti uniformi usati nelle lavorazioni a caldo dei metalli (laminazione, forgiatura o stampaggio), si usano frequenze relativamente basse (grande profondità di penetrazione del calore), mentre in quelli per tempra s'impiegano frequenze elevate per ridurre lo spessore di penetrazione ad alcuni millimetri o a decimi di mm, cioè a valori dello stesso ordine di grandezza dello spessore dello strato da temprare.-

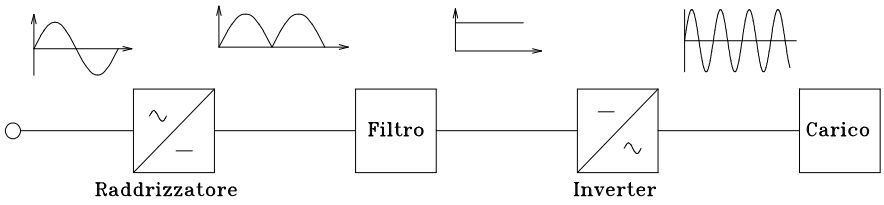
Il problema della determinazione delle densità di corrente e delle potenze specifiche è in realtà più complesso quando si voglia tenere conto delle variazioni delle caratteristiche del materiale durante il riscaldamento (in particolare per gli acciai magnetici, punti di Curie, ecc.), o nel caso di riscaldamenti di corpi con geometrie complicate (ruote dentate, ingranaggi, camme, ecc.).

Per questi casi sono però oggi disponibili programmi di calcolo specializzati che forniscono con esattezza le distribuzioni richieste.-

Usando l'induzione elettromagnetica per il riscaldamento dei metalli si riesce a raggiungere delle elevate densità superficiali di potenza, dell'ordine dei 5 kW/cm^2, riducendo così i tempi di lavorazione ad alcune decine di secondi con notevoli risparmi energetici.-

Normalmente un gruppo statico Raddrizzatore – Filtro, alimentato dalla rete a frequenza industriale, alimenta a sua volta un Inverter che fornisce la tensione alla frequenza richiesta; per processi di tempera superficiale è necessario l'impiego di frequenze dell'ordine dei 500 kHz, per processi d'indurimento con spessori di alcuni millimetri si impiegano frequenze di circa 10 kHz. Per il riscaldamento di billette a scopo di lavorazioni a caldo, ove è richiesto un riscaldamento a cuore in tempi brevi, s'impiegano valori di frequenza più bassi.-

Il carico è costituito dalla bobina che genera il campo magnetico nel quale è immerso il pezzo da riscaldare: tale carico si può assimilare ad un trasformatore il cui primario è la bobina induttrice, il pezzo da riscaldare è il nucleo e le spire ideali nelle quali circolano le correnti di Foucault sono il secondario chiuso su un'impedenza ohmico-induttiva.-



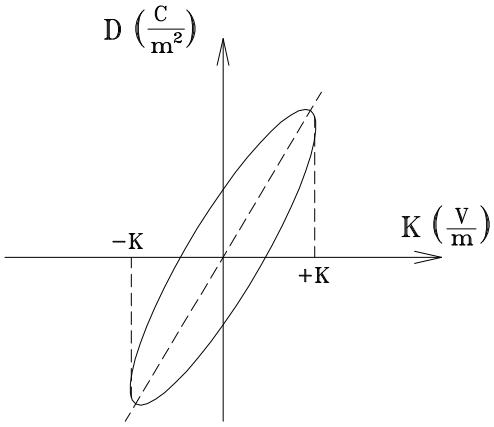
Lo spessore di penetrazione del calore, come già visto, è regolato dalla frequenza generata dall'Inverter mentre la potenza fornita (legata al volume, al salto termico, al calore specifico del materiale e alla durata del processo) viene regolata agendo sul raddrizzatore controllato in modo da variare la tensione d'alimentazione dell'Inverter.-

Un altro elemento di fondamentale importanza è il fattore di potenza del sistema che determina la potenza attiva che viene trasferita al carico dalla rete; poiché il carico è costituito dalla bobina di campo, sarà necessario rifasare il complesso predisponendo una batteria di condensatori, disposta nelle immediate vicinanze della bobina induttrice.-

8.4.0 Riscaldamento per perdite dielettriche in alta frequenza

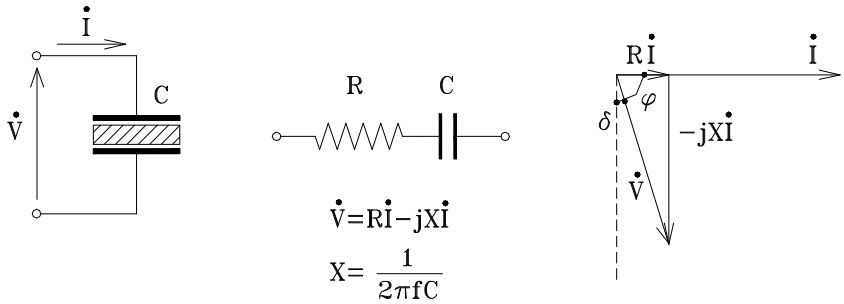
La proprietà dei materiali dielettrici di riscaldarsi per effetto delle perdite dielettriche, quando sono sottoposti ad un campo elettrico variabile, trova importanti applicazioni nei dispositivi riscaldanti a scopo industriale e terapeutico.-

Quando un materiale isolante è sottoposto ad un campo elettrico variabile tra due valori **+K** e **–K ,** la sua induzione dielettrica **D** risulta variare secondo il diagramma di figura che rappresenta il *ciclo d'isteresi dielettrica* del materiale.-



L'area del ciclo corrisponde all'energia persa e trasformata in calore per unità di volume; se il materiale fosse perfetto, l'area del ciclo sarebbe nulla in quanto tutta l'energia usata per orientare i dipoli elettrici all'interno della materia, durante l'intervallo in cui il campo aumenta, sarebbe interamente restituita nella fase successiva quando il campo si annulla. Nel caso di materiali reali invece, non tutta l'energia assorbita nella fase di carica viene poi restituita, bensì risulta parzialmente trasformata in calore, in seguito ai micro attriti interni durante gli orientamenti dei dipoli elettrici.-

Il dispositivo riscaldante può essere immaginato come un condensatore alle cui armature viene applicata una tensione alternata in alta frequenza ed il cui dielettrico è costituito dal materiale da riscaldare.- Rappresentando il dispositivo mediante un condensatore **C** avente la sua resistenza equivalente di perdita **R** in serie, la potenza attiva assorbita risulta essere:



$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi = VI\cos(90° - \delta) = VI \operatorname{sen}\delta \cong VI \tan\delta$$

essendo δ l'angolo di perdita del condensatore; esprimendo la corrente in funzione della tensione e tenendo presente che l'angolo di perdita δ nei condensatori é piccolo per cui $Z \cong X$:

$$P = V\frac{V}{Z}\tan\delta \cong V^2\frac{1}{X}\tan\delta = 2\pi f C V^2 \tan\delta = 2\pi f \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{S}{d} V^2 \tan\delta = 2\pi f \varepsilon_o \varepsilon_r S d \frac{V^2}{d^2}\tan\delta$$

$$p = \frac{P}{Sd} = 2\pi\, f\, \varepsilon_o \varepsilon_r\, K^2 \tan\delta \qquad (W/m^3)$$

ove **p** è la perdita per unità di volume del dielettrico.-

Poiché la quantità di calore prodotto all'interno del materiale corrisponde alla potenza persa, il riscaldamento potrà essere regolato agendo sul valore del campo elettrico **K** e quindi della tensione applicata **V** o sulla frequenza **f**.- Poiché il campo elettrico, e quindi la tensione, deve essere inferiore al valore della rigidità dielettrica del materiale, per aumentare la quantità di calore prodotto bisognerà agire essenzialmente sulla frequenza che potrà arrivare a valori di 150 ÷ 200 MHz.-

Il riscaldamento elettrico, per perdite dielettriche in alta frequenza, è largamente usato nell'industria del legno per la produzione di compensati, impiallacciature ecc., per la saldatura di laminati plastici, per l'essiccamento della gomma, per la fabbricazione d'oggetti in plastica termoindurente, per la saldatura di materie plastiche, per l'essiccazione di fibre sintetiche e naturali.-

Capitolo IX

TRAZIONE ELETTRICA

9.1.0 Generalità

In generale per trazione elettrica s'intende l'uso dell'energia elettrica per azionare dei motori aventi la funzione di trainare dei mezzi di locomozione per strada o su rotaia: a favore di tale mezzo di locomozione giocano l'assenza d'inquinamento da gas di scarico dell'ambiente, l'assenza di rumorosità, flessibilità d'impiego del motore elettrico, l'assenza di vibrazioni indesiderate.-

L'unico fattore negativo del sistema è la difficoltà di rifornimento dell'energia elettrica per un mezzo in movimento; da tale punto di vista, si distinguono le seguenti soluzioni nelle diverse situazioni d'impiego:

Trasporto a bordo di una batteria d'accumulatori elettrici, avente capacità sufficiente ad accumulare una quantità d'energia bastante a fornire al mezzo una accettabile autonomia.-

Generazione dell'energia elettrica a bordo mediante un gruppo elettrogeno installato sul veicolo stesso ed azionato a benzina o gasolio trasportati in apposito serbatoio.-

Prelievo dell'energia elettrica da una linea d'alimentazione fissa mediante opportuni contatti striscianti.-

La prima soluzione riguarda le autovetture elettriche a *zero emissione*, con problematiche che riguardano essenzialmente il peso e volume delle batterie d'accumulatori da trasportare e che sono attualmente in fase di studio con prospettive di soluzioni diverse, compresa la generazione di corrente con celle ad idrogeno.-

La generazione dell'energia a bordo del veicolo trova importanti applicazioni nelle motrici ferroviarie del tipo Diesel – elettriche.-

Le motrici elettriche, che prelevano l'energia elettrica da linee fisse mediante contatti striscianti, trovano importantissime applicazioni nella trazione filoviaria urbana ed extraurbana su strada e nella trazione elettrica ferroviaria e metropolitana su rotaia.-

Attualmente l'impiego di gran lunga più importante della trazione elettrica s'incontra in campo ferroviario (Ferrovie, metropolitane, tramvie e filovie) ove l'alimentazione della motrice viene fatta attraverso linee di contatto.

Un impianto di elettrificazione per la trazione è normalmente costituito da un circuito d'alimentazione (centrali e linee di trasporto primarie) ed un circuito di trazione(sottostazioni, linee di contatto, mezzi di trazione e binario).Di solito si utilizzano le centrali e le linee primarie delle reti industriali trifase dell'ente fornitore di energia elettrica per la fase di produzione e trasporto ad alta tensione fino alle sottostazioni di trasformazione dove inizia il cosiddetto circuito di trazione.

La scelta di diversi sistemi di trazione elettrica (ad esempio: 3 kV in corrente continua o 15 kV in corrente alternata) deriva dall'esigenza di risolvere due problemi tecnici, che richiedono soluzioni differenti e spesso contrastanti:

- il trasporto dell'energia elettrica dalle sottostazioni, lungo linee di contatto fino al veicolo; tale problema comporta l'elevazione della tensione per quanto possibile, al fine di ridurre la corrente (in tal modo è possibile utilizzare sezioni più piccole, cioè linee più leggere e sostegni meno caricati) e di conseguenza le perdite per effetto joule e le cadute di tensione in linea a parità di potenza trasmessa. Ovvero, a parità di perdite per effetto joule e di cadute di tensione in linea, l'aumento di tensione può comportare l'incremento della distanza fra le sottostazioni che alimentano una linea;
- la trasformazione dell'energia elettrica pervenuta a bordo in energia meccanica per l'ottenimento del moto attraverso i motori elettrici; questi ultimi lavorano con valori bassi di tensione in quanto i motori elettrici sono, in genere, macchine a bassa tensione per motivazioni di carattere elettrico.

Nel campo dei trasporti ferroviari i sistemi impiegati sono i seguenti:

- sistema a corrente continua con V = 750 V , 1500 V, 3000 V;
- sistema a corrente alternata monofase con V = 15 kV con frequenza 16,7 Hz; 25 kV con frequenza 50 Hz.

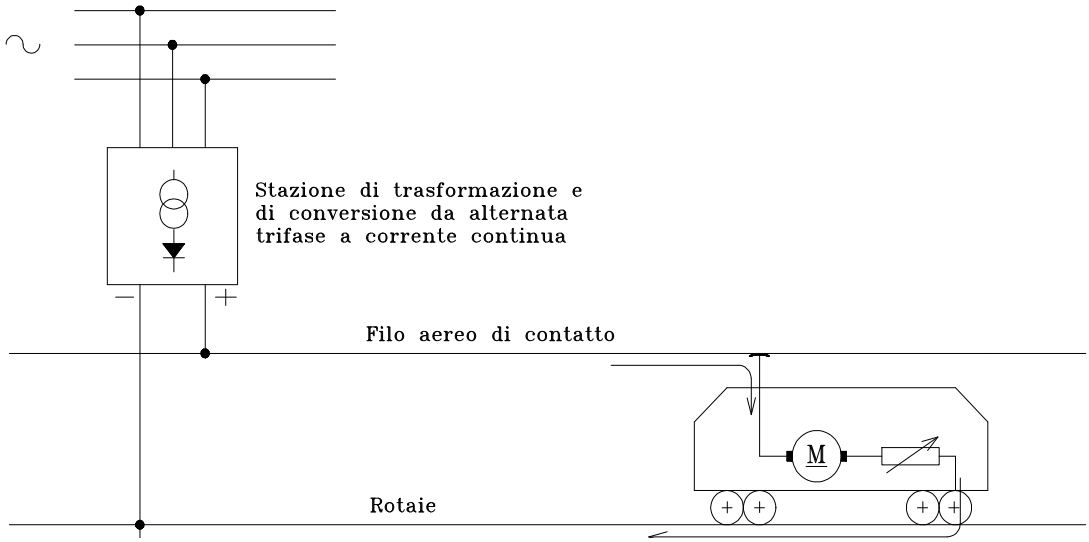
I sistemi di trazione si definiscono “diretti” se la corrente di alimentazione dei motori è dello stesso tipo di quella che circola nella linea di contatto; altrimenti i sistemi di trazione si definiscono “indiretti”. I sistemi su descritti sono diretti; il sistema indiretto oggi impiegato è fondamentalmente:

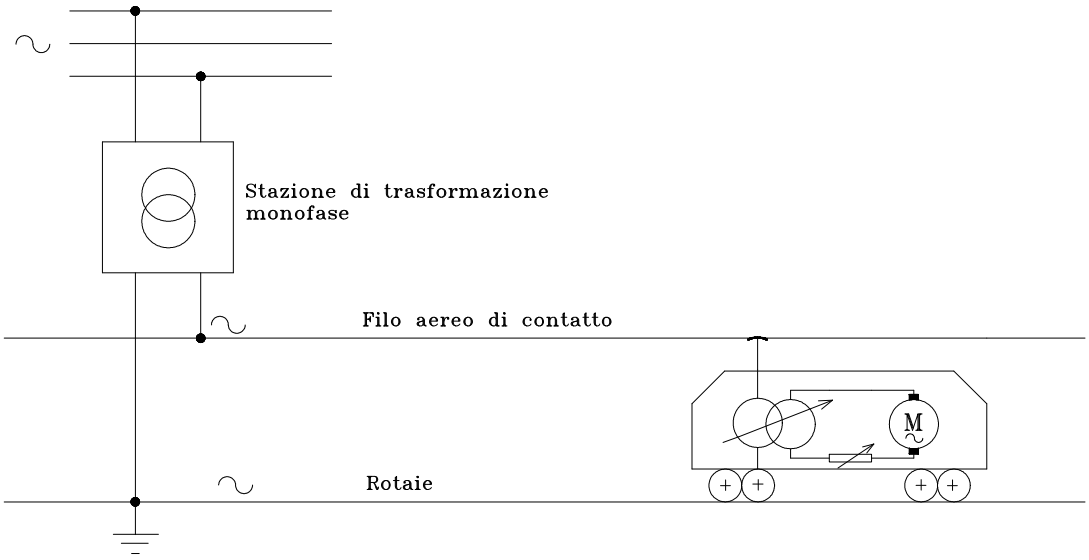
- sistema monofase - continuo con V = 25 kV- 50 Hz.

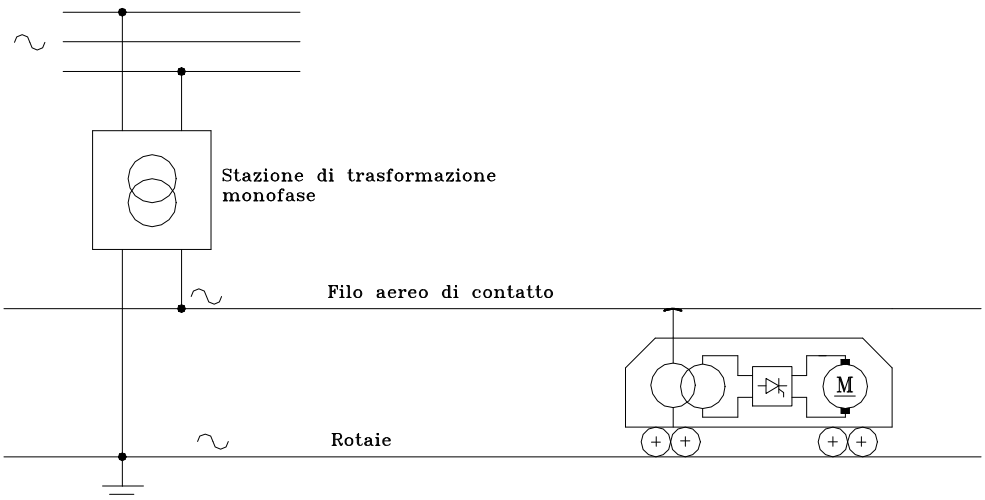
In tabella sono evidenziati i sistemi di trazione elettrica in uso nei paesi europei.

Continua 750 V	Gran Bretagna (1960 km)
Continua 1500 V	Francia, Olanda
Continua 3000 V	Italia, Belgio, Lussemburgo, Polonia, Cecoslovacchia.
Alternata monofase 25 kV – 50 Hz	Francia, Lussemburgo, Gran Bretagna, Ungheria,
Alternata monofase 15 kV – 16,7 Hz	Germania, Austria, Svizzera, Svezia, Norvegia.

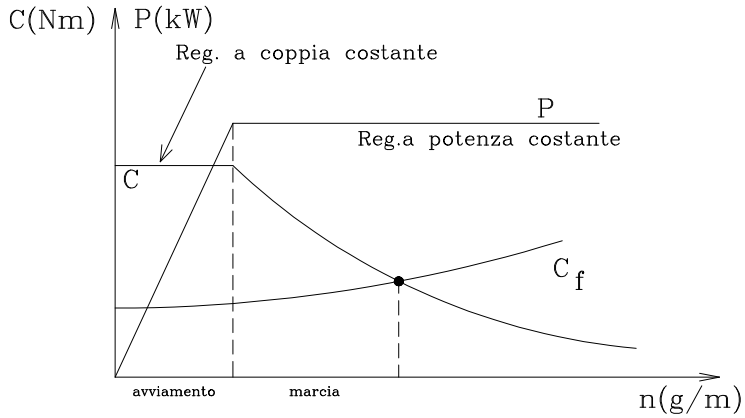
Tutti i sistemi sopra indicati usano come conduttore d’andata una linea di contatto ad un solo filo e come conduttore di ritorno le rotaie sulle quali corre il locomotore.-







I grandi vantaggi nell'uso della trazione elettrica sono riconducibili in una maggiore efficienza energetica (se confrontata con i tradizionali motori endotermici), maggiore robustezza in termini di potenza specifica installata a bordo, e possibilità di realizzare facilmente una regolazione a coppia costante durante la fase di avviamento e una regolazione a potenza costante durante la fase a velocità di crociera. Questo aspetto è fondamentale, in considerazione del fatto che alcuni motori elettrici hanno caratteristiche meccaniche simili a quelle di un motore ideale perfettamente elastico.-

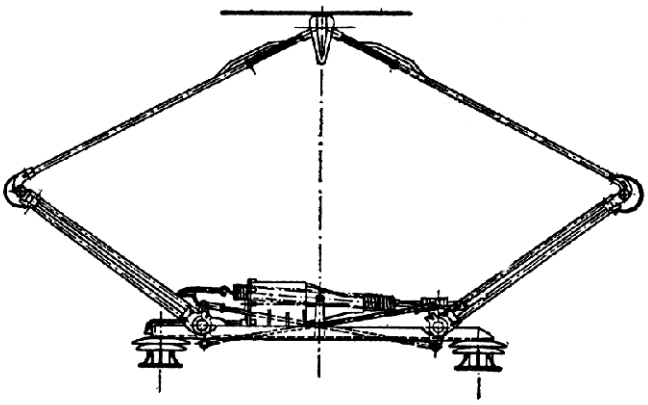


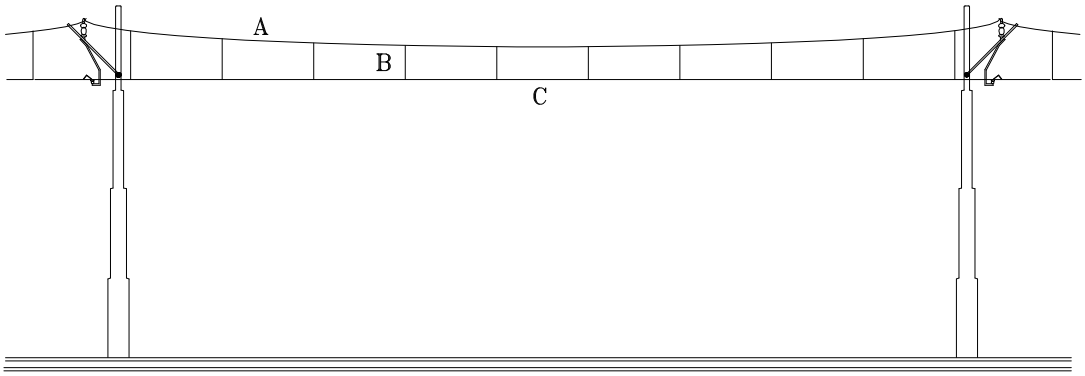
Il contatto elettrico con la linea d'alimentazione aerea è garantito da un contatto strisciante mantenuto in posizione da un organo a molle detto *captatore di corrente* o *pantografo* mentre quello con le rotaie è garantito dalle *ruote* motrici metalliche e dal peso della motrice stessa.-

La linea elettrica di contatto deve essere dimensionata in modo da garantire l'alimentazione dei motori in ogni condizione di marcia prevista e ciò sia dal punto di vista elettrico che meccanico.-

La sezione dei conduttori è unificata al valore di 100 ÷ 120 mmq e devono essere tesati ad un'altezza dal suolo di 5.50 m.-

La sospensione longitudinale dei conduttori della linea di contatto **(C)**, lungo la mezzeria dei binari, è attuata con il sistema detta a *catenaria* mediante una fune portante (**A**) e dei *pendini* di sospensione **(B)** aventi lunghezza diversa in modo da mantenere il filo di contatto parallelo alle rotaie; per garantire tale parallelismo, in ogni condizione di temperatura, le estremità dei fili di contatto vengono contrappesate ogni 1200 ÷ 1400 m.-





9.2.0 Trazione elettrica a corrente continua

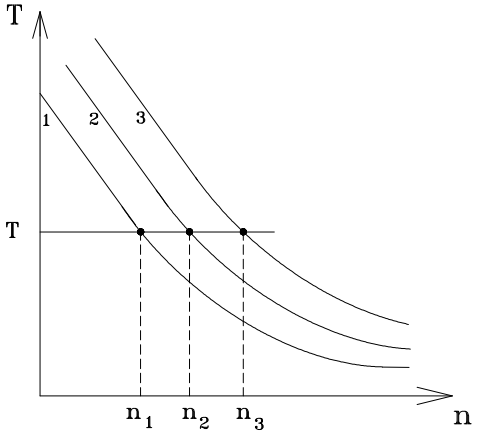
I motori usati nella trazione elettrica, sia in continua sia in alternata, devono avere delle caratteristiche ben precise:

Grande coppia di spunto per permettere la messa in movimento di tutto il convoglio ferroviario portandolo a velocità di regime nel più breve tempo possibile.

Facilità di regolazione della velocità, entro ampi limiti, in modo continuo e con minime perdite.

Possibilità di passare automaticamente dal funzionamento come motore a quello come freno possibilmente a recupero d'energia da restituire alla linea d'alimentazione.-

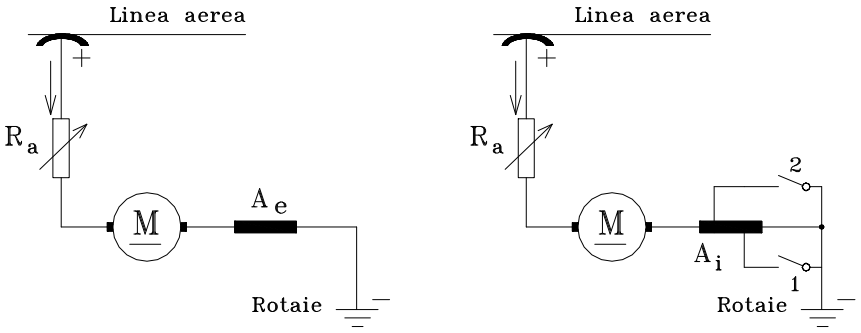
Nel caso della trazione in corrente continua il motore che meglio fornisce tutte le caratteristiche sopra indicate è il **Motore con eccitazione in serie**, con la sua caratteristica meccanica ad elevatissima coppia di spunto, la facilità d'avviamento con linearità, la possibilità di ampie regolazioni della velocità mediante la regolazione del campo induttore o della tensione d'alimentazione (attuata mettendo in serie o parallelo due o quattro motori), la capacità di sopportare ampie variazioni della tensione di rete senza inconvenienti di funzionamento (a parte eventuali variazioni di velocità) e la notevole robustezza e affidabilità.-



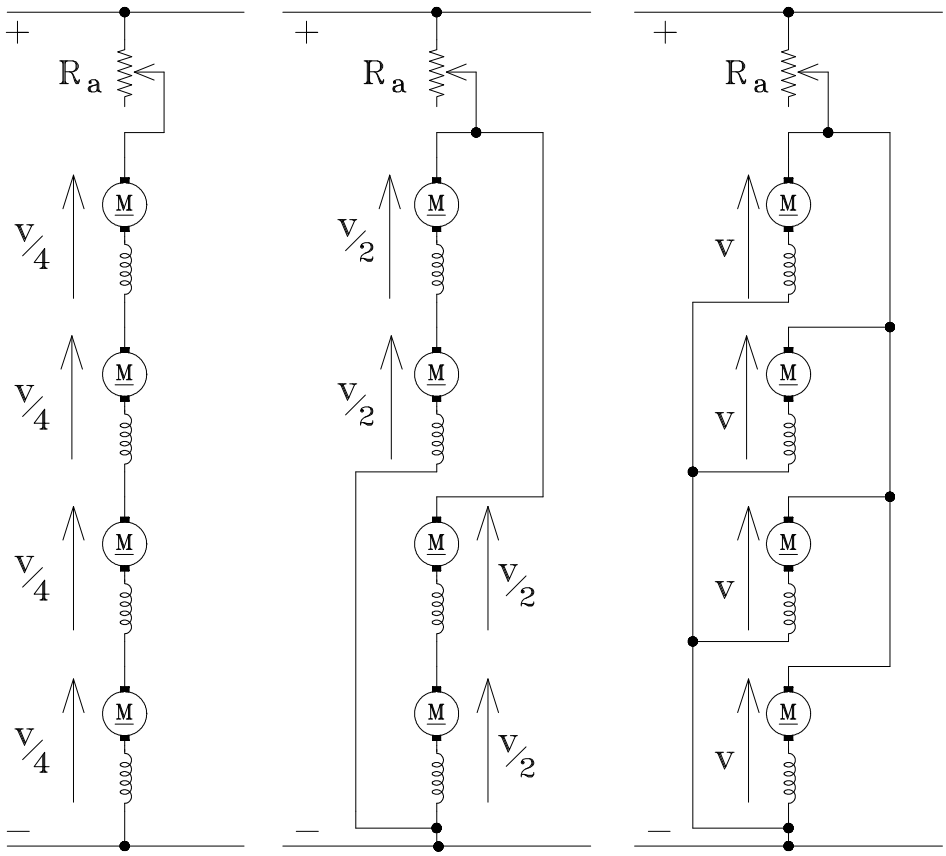
L'alimentazione in corrente continua evita la caduta di tensione induttiva in linea dovuta alla reattanza dei conduttori, particolarmente per il ritorno in rotaia.-

L'avviamento dei motori è ottenuto con la graduale esclusione del **reostato d'avviamento R_a** posto in serie al motore e col circuito di eccitazione totalmente inserito.-

Il successivo graduale aumento di velocità, a parità di coppia frenante, si ottiene cortocircuitando, per gruppi, parti dell'avvolgimento d'eccitazione A_e (curve 2 e 3).-



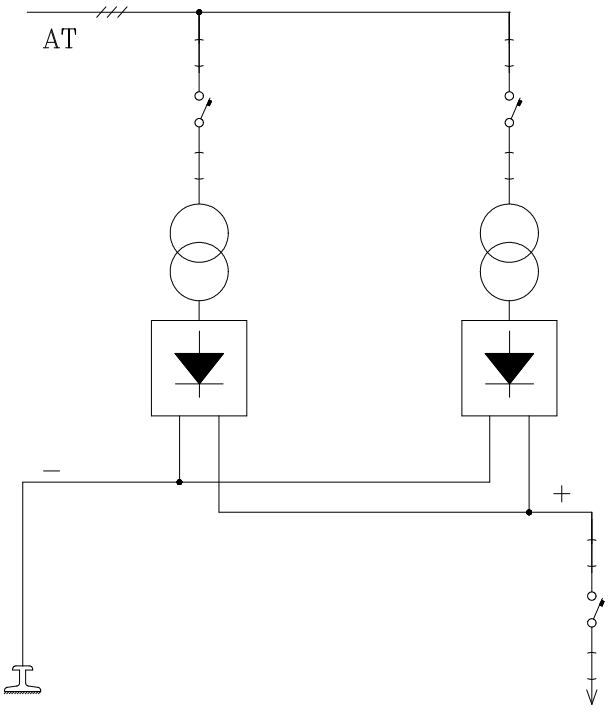
Per locomotori dotati di più motori, un'ulteriore variazione della velocità si ottiene variando la loro tensione d'alimentazione collegandoli in serie – parallelo, come indicato in figura.-



Con l'indebolimento del flusso d'eccitazione visto precedentemente (3 possibili velocità), combinato con i tre collegamenti serie - parallelo dei motori si riescono così ottenere nove velocità diverse.-

Con il motore a corrente continua eccitato in serie non è possibile ottenere la frenatura a recupero d'energia ma soltanto quella a dissipazione mediante un reostato di carico che dissipi l'energia di frenatura: bisognerà però invertire i collegamenti tra indotto ed eccitazione per evitarne la smagnetizzazione oltre naturalmente ad interrompere l'alimentazione dalla rete e collegarsi ai reostati di dissipazione che verranno gradualmente inseriti per parzializzare lo sforzo di frenatura; la frenatura elettrica a dissipazione è sempre eseguita in ausilio ai freni pneumatici di sicurezza.-

L'inversione del senso di marcia dei locomotori si ottiene invertendo il collegamento tra ciascun motore ed il relativo avvolgimento d'eccitazione.- Nelle Ferrovie Italiane la tensione d'esercizio normalizzata delle linee di contatto è di 3 kV. L'energia elettrica viene fornita da sottostazioni che sono il luogo fisico dove i parametri di tensione e corrente sono adattati alle esigenze della trazione ferroviaria. Esse vengono alimentate dalla rete nazionale ad Alta Tensione. Le sottostazioni ferroviarie sono distribuite lungo le linee a distanze dipendenti, principalmente, dal valore della tensione della linea di contatto. Nel sistema a 3 kV in c.c. la distanza tra le sotto stazioni è tra i 20 – 35 km. In una sottostazione sono, normalmente, presenti due trasformatori per trasformare la tensione e la corrente in ingresso (lato alta tensione) a valori adatti alla trazione (lato bassa tensione); dei gruppi di conversione che trasformano la corrente alternata in continua (raddrizzatori); infine sono presenti interruttori di potenza e sezionatori per la protezione dai corto circuiti, sovraccarichi e le operazioni di manutenzione della sottostazione.



9.3.0 Trazione elettrica a corrente alternata monofase

La trazione a corrente alternata permette di elevare la tensione della linea di contatto fino a valori di diverse decine di chilovolt operandone poi una riduzione a valori più convenienti per i motori mediante trasformatori installati sui locomotori. In tal modo la distanza tra le sottostazioni d'alimentazione delle linee di contatto possono essere più che raddoppiate.-

Le soluzioni adottate possono essere due: a.) Con motori monofasi a collettore in corrente alternata – b.) Con motori a corrente continua con eccitazione in serie e raddrizzatori a bordo del locomotore.-

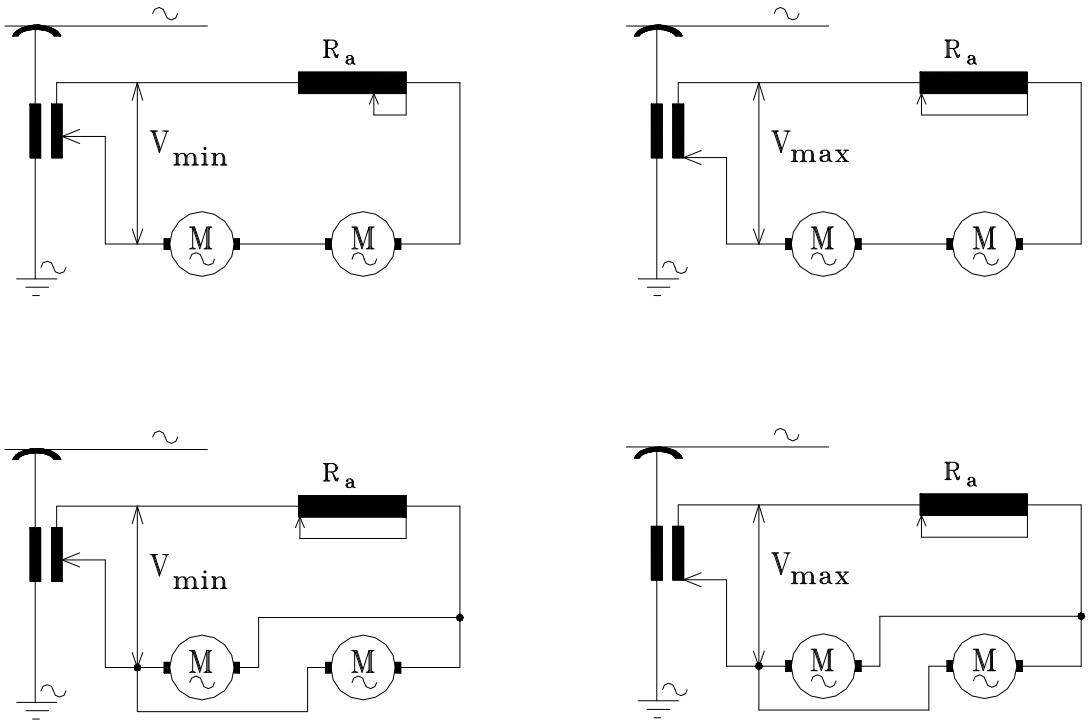
9.3.1 Trazione elettrica con linee di contatto in corrente alternata monofase e motori a collettore con eccitazione in serie:

Con questa soluzione, la linea di contatto viene mantenuta alla tensione di **15 kV** , **16 ⅔ Hz,** per venire poi ridotta a bordo del locomotore alla tensione d'esercizio di 750 V dei motori a collettore con eccitazione in serie, mediante un trasformatore a rapporto variabile sotto carico.- Tali motori presentano caratteristiche funzionali **T(n)** simili a quelle viste per i motori in corrente continua e quindi si prestano bene per la trazione.- Le difficoltà principali che s'incontrano nell'impiego di tali motori in serie sono legate all'imperfetta commutazione dovuta al campo trasverso alternativo, la cui azione nelle spire cortocircuitate dalle spazzole si sovrappone a quella dell'autoinduzione; per ridurre tali effetti negativi (scintillio alle spazzole) s'impiega una tensione alternata a frequenza ridotta: 16 ⅔ Hz.- Tale tensione a frequenza ridotta viene generata nelle apposite centrali ad uso della trazione mediante due macchine sincrone coassiali aventi numero di poli diverso in rapporto 1: 3 ; ad esempio un motore sincrono con **sei copie polari**, alimentato dalla rete a 50 Hz, porta in rotazione alla velocità di $n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \; {}^{g}\!/_{\min}$ un generatore sincrono coassiale avente **due copie polari** che fornirà una tensione alternata a frequenza:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{500 \cdot 2}{60} = 16\,{}^{2}\!/_{3}\,Hz$$

La frequenza ridotta offre anche il vantaggio di ridurre le cadute induttive sulle linee di contatto.-

La riduzione della corrente d'avviamento e la variazione della velocità vengono ottenute variando la tensione d'alimentazione dei motori; ciò si ottiene sia mediante lo stesso trasformatore a rapporto variabile sotto carico, usato per adattare il valore della tensione della linea di contatto a quella di funzionamento dei motori, che collegando i diversi motori in diverse combinazioni serie – parallelo.-



L'inversione del senso di marcia è ottenuto invertendo il collegamento tra rotore e avvolgimento di campo. La frenatura elettrica a dissipazione presenta problemi notevoli a causa della commutazione per cui vengono preferiti i freni meccanici.-

Il sistema di trazione monofase è in esercizio presso le ferrovie svizzere, austriache, germaniche, norvegesi e svedesi.-

9.3.2 Trazione elettrica con linea a corrente alternata monofase e motori a corrente continua:

Questa soluzione prevede una linea elettrica di contatto in corrente alternata monofase alla tensione di 25 kV, 50 Hz. A bordo del locomotore viene posto un trasformatore monofase a rapporto fisso che riduce la tensione alternata della linea di contatto dal suo valore di 25 kV a quello più adatto al funzionamento di un raddrizzatore monofase a ponte totalmente controllato (1000÷3000 V); la tensione continua così ottenuta va ad alimentare i motori a corrente continua con eccitazione in serie.- Questo sistema evita così l'uso dei motori monofasi a collettore in alternata, con i problemi connessi alla commutazione e permette quindi di alimentare il sistema a 50 Hz; la possibilità di regolazione della tensione d'alimentazione dei motori in continua mediante il raddrizzatore totalmente controllato e l'impiego della tensione alternata a 50 Hz offre la possibilità di impiegare trasformatori a rapporto fisso molto più leggeri.-

Avviamento e variazione di velocità vengono facilmente ottenuti agendo sul controllo dei raddrizzatori senza bisogno di variare il collegamento serie-parallelo dei motori stessi che risultano stabilmente collegati in parallelo ed alimentati a tensione continua variabile da zero al loro valore nominale.-

9.4.0 I mezzi di trazione elettrica multisistema

Esigenze di carattere diverso hanno portato i vari paesi a sviluppare sistemi di trazione diversi, in continua e alternata con valori di tensione e frequenza diversi; con lo sviluppo dell'integrazione economica europea e la conseguente esigenza di interconnessione delle reti di trasporto, si è manifestata la necessità di unificare, tra i vari paesi, il sistema di trazione.-

Un contributo decisivo al superamento delle difficoltà operative in tale campo è venuto dalle applicazioni dell'elettronica, sia di potenza che di segnale, che si sono sviluppate da circa quarant'anni, modificando sostanzialmente l'applicazione dei sistemi di trazione; infatti hanno consentito di svincolare il tipo di alimentazione della linea di contatto dal tipo dei motori. Elemento essenziale nell'affermazione dell'elettronica di trazione è stato lo sviluppo tecnologico dei semiconduttori impiegati nella parte di potenza e l'incremento delle loro prestazioni, passando dai primi diodi controllati ai più performanti GTO (Gate Turn Off Tyristor che possono essere resi conduttori o aperti con un apposito segnale di gate positivo o negativo anche in fase di polarizzazione diretta del tiristore) e ai nuovi IGBT (Transistor Bipolare a Gate Isolato, transistor bipolari di grande potenza con base di comando isolata dal segnale da pilotare che sono in grado di aprire e chiudere un circuito con correnti di 1200 A sotto tensioni di 6000 V) .-

Riguardo le tipologie dei convertitori, ne esistono tre grandi famiglie:

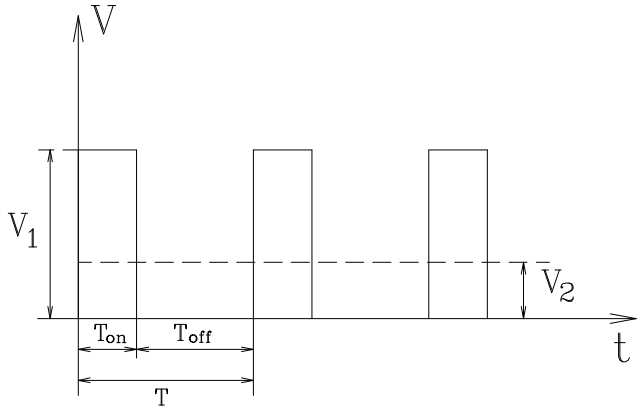
1. *I raddrizzatori semplici o controllati,* che sono convertitori da corrente alternata a corrente continua;
2. *I "chopper" o "frazionatori"*, che sono convertitori da corrente continua a corrente continua che variano il valore della tensione in uscita rispetto all'entrata, e conseguentemente le rispettive correnti;
3. *gli "inverter" o "invertitori"*, che sono convertitori da corrente continua a corrente alternata.

I raddrizzatori sono impiegati sia nei sistemi di alimentazione a corrente continua che in quelli a corrente alternata. Nel primo caso sono impiegati a terra, nelle sottostazioni di alimentazione, per la conversione della corrente alternata trifase della rete industriale in corrente continua di idonea tensione. Nel secondo caso sono impiegati a bordo, soprattutto nelle linee alimentate alla frequenza di 50Hz, per la conversione della corrente alternata della linea in corrente continua a bordo per alimentare i motori a corrente continua. Nei sistemi con linea monofase, infatti, la prima applicazione dei raddrizzatori, utilizzati come semplici ponti di diodi posti a valle di trasformatori a rapporto variabile, ha permesso di realizzare la conversione a bordo e di poter alimentare i motori in corrente continua con tensione continua variabile. In seguito a bordo furono adottati ponti controllati, che permettono la regolazione della tensione in uscita mediante controllo dell'angolo di fase all'accensione dei diodi controllati del ponte consentendo di usare trasformatori a rapporto fisso. Ne risulta un fattore di potenza sulla rete di alimentazione piuttosto basso ai carichi parziali, peggiorandone le prestazioni; il problema è particolarmente sentito sulle reti a frequenza 16,66 Hz. Le più recenti realizzazioni oggi impiegano a bordo il cosiddetto "convertitore a 4 quadranti", ossia reversibile, di concezione tedesca. Questo convertitore consente di ottenere in uscita una tensione continua controllata, prelevando allo stesso tempo dalla rete monofase una corrente con un fattore di potenza sempre prossimo a uno; inoltre, se del caso, il convertitore permette di restituire potenza alla rete monofase, durante la frenatura a recupero.-

Sui rotabili, con linee di alimentazione e locomotori entrambi in corrente continua, le prime applicazioni dei convertitori sono state realizzate con il chopper, che consente di regolare la tensione a valle mediante una successione di periodi di conduzione (T.on) e di blocco (T.off), ottenendo in uscita una tensione media variabile in funzione del rapporto di conduzione, chiamato *duty cycle*,.-

$$V_2 = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} * V_1$$

A seconda della disposizione circuitale, il chopper può essere abbassatore (step down) o elevatore (step up) della tensione in uscita rispetto a quella in entrata. Il chopper ha consentito di eliminare gli avviatori reostatici dai mezzi in corrente continua, perché si ottiene il controllo diretto e completo della tensione ai motori. Inoltre la regolazione continua della coppia dei motori consente un miglior sfruttamento dell'aderenza, aumentando i carichi rimorchiabili.-



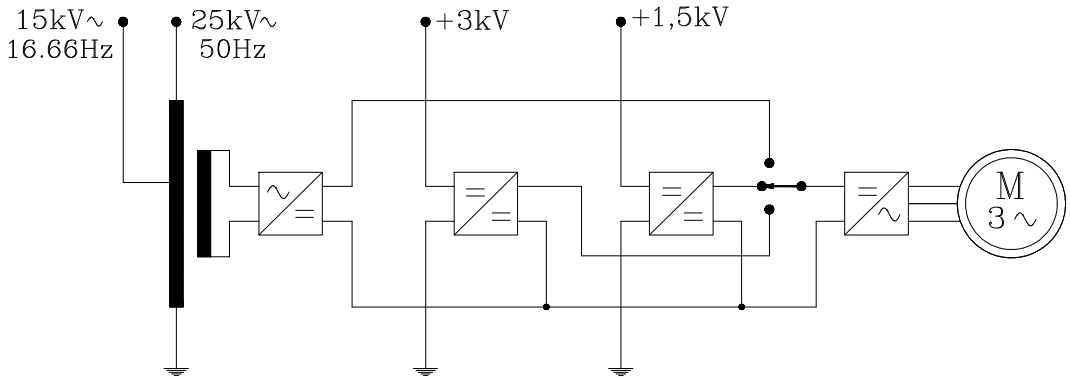
Un salto qualitativo si è avuto con 1'impiego degli inverter di potenza di tipo trifase, che permettono di alimentare motori asincroni trifasi partendo da una tensione continua. *Si è abbandonato quindi il motore a collettore a corrente continua eccitato in serie, usando il motore asincrono trifase*, che presenta gli innegabili vantaggi della robustezza e semplicità costruttiva e della più elevata potenza specifica. L'inverter, alimentato mediante un raddrizzatore controllato, permette di applicare a questi motori una frequenza e tensione variabili, realizzando quindi una regolazione continua della velocità e della coppia.-

Se la linea di contatto è a corrente continua (3000V o 1500V), l'inverter può essere alimentato direttamente dalla linea stessa. Questa soluzione consente di costruire dei locomotori estremamente semplici e con apparecchiature ridotte ai minimo, certamente le più semplici ed economiche fra tutti i sistemi di trazione elettrica.-

Con alimentazione in corrente alternata, sia a l5kV-16,7 Hz, sia a 25kV-50Hz, è oggi generalizzato 1'impiego del ponte raddrizzatore a quattro quadranti, che trasforma la corrente alternata nella corrente continua necessaria per alimentare l'inverter. La locomotiva si compone quindi del trasformatore, raddrizzatore e inverter: questa è la configurazione tipica delle locomotive tedesche.-

Con opportuni accorgimenti costruttivi lo stadio di ingresso può essere realizzato in modo da configurarsi come un primo stadio a ponte raddrizzatore alimentato dal trasformatore d'ingresso, oppure essere riconfigurato come un chopper. In questo modo l'inverter può essere alimentato sia da una linea a corrente continua tramite il chopper, sia da una linea in corrente alternata tramite il trasformatore e il ponte raddrizzatore.-

Utilizzando trasformatori con due prese è possibile far funzionare la locomotiva con le due tensioni dei sistemi monofase (3000V_{DC}; 1500V_{DC}; 15kV-16,7Hz; 25kV-5OHz).-



Appare così chiaro che con questi convertitori è possibile realizzare in maniera abbastanza semp1ice dei rotabili politensione, in grado cioè di funzionare sia con reti in corrente continua che

alternata e con diversi valori di tensione, configurando con adeguate commutazioni i convertitori di entrata secondo lo schema richiesto dalla rete di alimentazione e utilizzando secondo il caso uno dei quattro differenti pantografi che è possibile installare sul tetto.-

In effetti oggi i limiti imposti all'interoperabilità dal sistema di alimentazione sono da considerare superati con adeguate locomotive, solo con qualche complicazione costruttiva ormai risolta e con maggiori costi abbastanza limitati. D'altra parte *non appare conveniente al momento pensare di convertire i vari sistemi di alimentazione esistenti* considerando anche il fatto che soltanto il sistema a 1500 V presenta dei limiti di potenzialità. In effetti le Specifiche Tecniche di Interoperabilità considerano per le linee con velocità fino a 200 Km/h ammessi tutti i quattro sistemi fondamentali: corrente continua 1500V o 3000V e corrente alternata monofase 15kV e 25kV.-

Sono ormai in circolazione diversi tipi di locomotive quadricorrente omologate in diversi paesi e in grado di circolare sui grandi assi europei.-

Capitolo X

TARIFFAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Il costo dell'energia elettrica che l'utente finale deve corrispondere alla società fornitrice deve tenere conto dei diversi elementi che concorrono a determinare le spese sostenute dal produttore e dai vari distributori, oltre agli utili d'esercizio.-

Da questo punto di vista, i fattori che devono essere presi in considerazione, sono:

Oneri patrimoniali per ammortamenti del patrimonio immobilizzato negli impianti e le imposte

Spese fisse proporzionali all'entità dell'immobilizzo

Spese proporzionali all'energia prodotta (manutenzione degli impianti, costo del combustibile e rimunerazione degli operatori)

Spese derivanti dall'esercizio degli impianti di produzione e trasporto dell'energia (perdite elettriche per effetto Joule in tutti i conduttori, ecc.)

Altri elementi che intervengono nella determinazione del costo unitario dell'energia sono legati essenzialmente alle caratteristiche del prelievo e cioè:

Il valore della potenza impegnata e della tensione alla quale viene eseguita la fornitura

Il valore medio del fattore di potenza

Il momento della giornata in cui avviene il prelievo (per particolari tipi di forniture)

Il sistema tariffario più comunemente usato è quello *binomio*, che raggruppa gran parte dei componenti visti in due categorie:

I° Un corrispettivo mensile fisso da valutare indipendentemente dalla quantità d'energia prelevata, ma proporzionale alla potenza impegnata o prelevata (se maggiore di quella impegnata e sono state installate le apparecchiature di misura atte a valutarla)

II° Un corrispettivo proporzionale all'energia prelevata che, nelle utenze non domestiche, tenga conto del fattore di potenza medio mensile.-

$$C = k_1 P + k_2 W$$

ove k_1 è il costo unitario della potenza installata (P) e k_2 il costo unitario dell'energia prelevata (W).-

La determinazione corretta dei valori di k_1 e k_2 è un problema d'enorme complessità legato non soltanto a fattori tecnici quali quelli illustrati precedentemente, ma anche a fattori di politica economica nazionale ove bisogna tenere conto del tipo d'utenza (illuminazione pubblica, usi agricoli, consorzi di bonifica, utenze domestiche di varie fasce di reddito, locali diversi dalle abitazioni, usi industriali con potenze impegnate superiori a certi valori o relativi a produzioni strategiche).-

Attualmente in Italia i valori di k_1 e k_2 vengono stabiliti dal Comitato Interministeriale Prezzi (C.I.P.).-

Capitolo XI

PROPULSIONE ELETTRICA NAVALE

11.1.0 Generalità

La propulsione elettrica è stata applicata nel campo navale già da più di un secolo grazie ai motori in corrente continua offrendo, buona manovrabilità, controllo della velocità preciso e fluido, ridotti ingombri dei macchinari, bassa rumorosità e ridotte emissioni inquinanti.-

Negli ultimi anni l'evoluzione nel campo dell'elettronica di potenza, ha offerto la possibilità di controllare efficacemente sia i motori in corrente continua che quelli in alternata di grandi potenze.-

Sebbene per la stragrande maggioranza delle navi - quelle indicate come "standard", a più basso costo relativo e a più bassa tecnologia - la propulsione meccanica con motori diesel rappresenti attualmente, nella maggioranza dei casi, l'unica scelta possibile, si sta comunque assistendo a una sempre maggior diffusione della propulsione elettrica per le altre tipologie di navi (da crociera, megayacht, traghetti, rompighiaccio, navi militari...).-

11.2.0 Generazione dell'energia elettrica

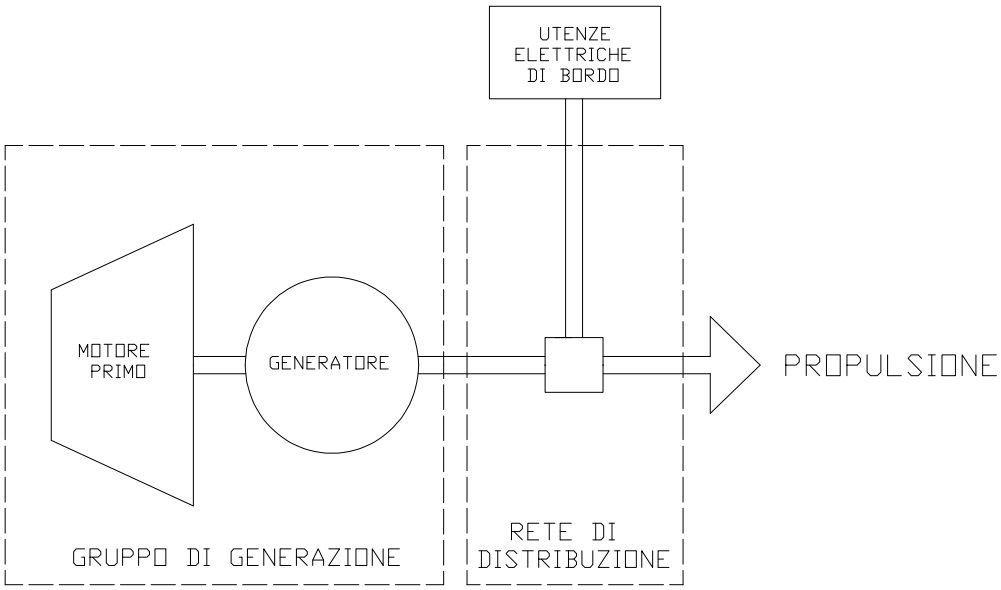
Un tradizionale sistema di propulsione marino sfrutta un motore primo per azionare l'elica attraverso un'asse e nella maggior parte dei casi ogni asse risulta collegato ad un motore; d'altro canto è impossibile connettere più assi senza complicati meccanismi (gearbox).

Tenendo presente che la variazione della potenza propulsiva varia, in prima approssimazione, con il cubo della velocità risulta che ad una potenza dell'80% corrisponde una velocità del 93%, ma il *25%* della velocità richiede solo *1,5%* della potenza. Poiché la maggior parte delle navi raramente usa la potenza massima, i motori primi, collegati ognuna alla propria elica, risulteranno per la maggior parte del loro periodo di utilizzazione sotto sfruttati, con notevole calo dell'efficienza e maggior costo di manutenzione. La propulsione elettrica può fornire energia a più motori elettrici ognuno accoppiato ad un'elica; in questo modo si può regolare la potenza erogata evitando il funzionamento dei motori primi in condizioni di sottocarico durante le operazioni a bassa velocità. Un ulteriore vantaggio è dovuto al fatto che i generatori elettrici non solo alimentano i motori della propulsione, ma anche tutti i servizi della nave, dunque non si hanno più due sistemi di generazione dell'energia indipendenti (uno per la propulsione l'altro per tutte le utenze di bordo) ma un unico sistema di generazione dell'energia elettrica che copre tutte le esigenze di bordo, tale soluzione è indicata secondo la letteratura inglese con il nome di "Integrated Full Electric Propulsion" (IFEP) oppure "All Electric Ship "(AES).

L'integrazione dei due sistemi diminuisce il numero totale di motori primi da installare, riducendo il costo ed il peso complessivo della nave.

Nelle navi dove l'energia richiesta dai servizi assume un ruolo rilevante se paragonata a quella richiesta dal sistema propulsivo si può avere un ulteriore risparmio di carburante usando la potenza dei servizi come carico di base per i generatori elettrici.

In questo modo i motori primi risultano avere sempre un carico sufficiente a garantire la massima efficienza (non funzionano a vuoto), per questo motivo tutte le moderne navi da crociera adottano il sistema IFEP.



L'energia elettrica è generata da un certo numero di Generatori Sincroni (da 2 a 6) ognuno dei quali copre più del 50% del carico elettrico installato a bordo, questa ridondanza multipla è comune a tutte le navi per aumentare la disponibilità di potenza e la sicurezza in mare, in casi di emergenza. I generatori sono mossi generalmente da motori diesel, qualche volta da turbine a gas e nel caso di sottomarini da celle a combustibile o da reattori nucleari.

Un esempio concreto di questo sistema di generazione e distribuzione dell'utilizzazione dell'energia a bordo può essere quello che si incontra sulla nave da crociera "Costa Fortuna" costruita da Fincantieri per la società di navigazione italiana Costa Crociere:

Stazza lorda: 105.000 ton.
Lunghezza: 272 m.
Persone imbarcate (passeggeri + membri equipaggio): 4.500 persone
Velocità: 23 nodi
6 motori diesel: 6 x 15,8 MW = 94,8 MW
6 generatori sincroni: 6 x 15 MVA = 90 MVA di potenza elettrica generata a 6,6 kV
2 motori sincroni di propulsione: 2 x 20 MW a 140 g/m
46 MVA di potenza elettrica a disposizione per i servizi

Le navi sono limitate dal rispetto degli spazi interni, quindi la riduzione del volume delle macchine e la flessibilità nel loro posizionamento permettono di sfruttare al meglio gli spazi in stiva. Per ragioni idrodinamiche le sezioni trasversali poppiere si riducono, questo comporta una spinta idrostatica minore, quindi l'impianto di propulsione deve essere il più leggero possibile per evitare delle sollecitazioni troppo elevate della zona poppiera.

I sistemi propulsivi elettrici, dove l'elica è direttamente calettata all'asse del motore, presentano una maggiore tolleranza riguardo alla posizione della sala macchine se confrontati con i sistemi di propulsione tradizionali, dove la flessibilità nel posizionamento è limitata dalla presenza di lunghe linee d'asse e complicati meccanismi di riduzione della velocità di rotazione dell'elica e di inversione del verso di rotazione.

Il minor peso dei motori elettrici e l'assenza di meccanismi interposti fra il motore stesso e l'elica fanno si che le sollecitazioni sulle strutture poppiere delle navi propulse elettricamente siano inferiori grazie alla massa minore.

11.3.0 Sistemi propulsivi

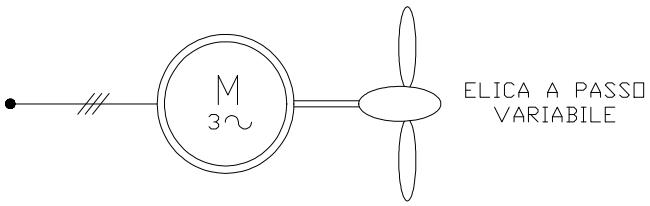
L'energia elettrica prodotta dai generatori è una corrente alternata a tensione e frequenza costante; esistono diverse soluzioni per trasformare tale potenza elettrica in potenza meccanica:

a) Motori in corrente alternata a velocità costante con elica a passo variabile.
b) Motori in corrente continua alimentati tramite SCR ed elica a passo fisso.
c) Motori in corrente alternata ed elica a passo fisso con convertitori di frequenza costituiti da:
   I) Cicloconvertitori
   II) Sincroconvertitori
   III) VSI (Voltage Source Inverter)

11.3.1 Sistema a corrente alternata con elica a passo variabile.

L' energia elettrica in corrente alternata, presente nella rete di alimentazione, avente frequenza e tensione costante (6.000 V; 50Hz), è fornita da diversi generatori.-

L'elica è azionata da un motore asincrono a gabbia che presenta due avvolgimenti statorici distinti, che permettono di commutare il numero dei poli, così e possibile operare a due diversi regimi; il motore è allacciato direttamente alla rete senza l'interposizione di convertitori statici. L'elica a passo variabile infine permette di coprire tutto il campo delle possibili velocità della nave.-



Vantaggi:

a. Il sistema elettrico è semplice
b. Alta efficienza del sistema elettrico se funziona in condizioni di progetto (massimo carico).

Svantaggi:

a. L'elica a passo variabile ha un'efficienza minore rispetto ad un'elica a passo fisso.
b. L'elica a passo variabile ha maggior complessità costruttiva e risulta difficile l'accesso per la manutenzione di routine che richiede la messa in bacino della nave.

All'avvio diretto-su-linea (DOL), il motore presenta una grande corrente di spunto, tipicamente *5-7* volte la corrente nominale, con variazione di coppia all'asse e caduta di tensione nella rete significative, tanto che deve essere definita la minima capacità di marcia del generatore in grado di avviare il motore installato senza comportare gravi squilibri al sistema.-

Spesso è usato un commutatore stella-triangolo per avere una minor corrente di spunto, ma non è la migliore soluzione.-

Dispositivi di Soft-starting come autotrasformatori hanno dimostrato di dare migliori risultati, questi, però vengono usati soltanto per potenze non elevate, viste le dimensioni de il peso degli autotrasformatori di grande potenza.-

11.3.2 Sistema in corrente continua con SCR ed elica a passo fisso.

La corrente di linea è fornita da generatori sincroni a tensione e frequenza costanti (6.000V; 50Hz) , mossi da motori diesel; tale corrente, prima di essere convertita in corrente continua da un

raddrizzatore controllato, è portata alla tensione di 600V da un trasformatore. La spinta è garantita da un'elica a passo fisso azionata da un motore in corrente continua.-

La possibilità di variare la velocità di rotazione e di invertire il senso di marcia del motore, agendo sulla tensione di alimentazione del motore e sulla sua corrente di eccitazione, permettono di variare intensità e direzione della spinta dell'elica.-

La conversione AC/DC è realizzata da un raddrizzatore a ponte totalmente controllato che utilizza degli SCR (Silicon Controlled Rectifier).-

Il valore della tensione di alimentazione dei motori viene regolato variando l'angolo di parzializzazione μ dei tiristori tra 0° e 180° ottenendo una variazione della tensione V:

$$-1{,}35\ V_{AC} < V < +\ 1{,}35\ V_{AC}$$

La coppia è controllata accuratamente e con piccole ondulazioni se l'induttanza L degli avvolgimenti del motore è alta, tuttavia questo va a scapito della dinamicità del sistema.-

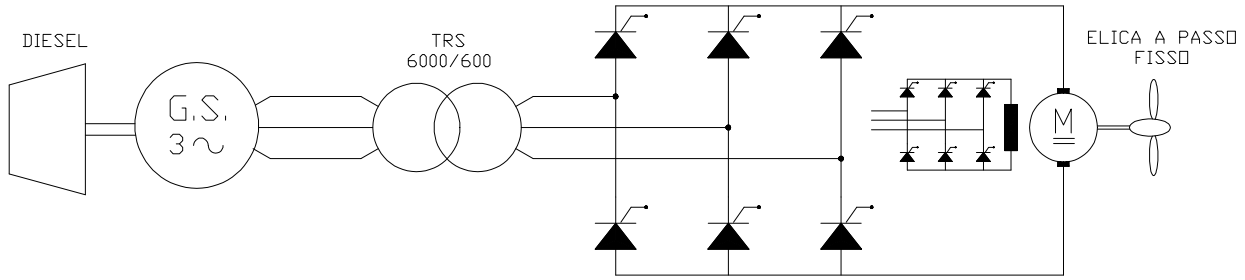
Nella pratica l'angolo μ è compreso fra i seguenti valori:

μ **> 15°** per assicurare il controllo del motore in caso di cadute di tensione nella rete;

μ **< 150°** per avere un margine di commutazione.

La variazione della tensione del lato a corrente continua del ponte induce nel lato a corrente alternata uno sfasamento fra corrente e tensione che dipende dall'angolo μ:

$$P.F. \simeq 0{,}955 \cos \mu$$



Vantaggi:

a. La propulsione AC/DC combina l'alta efficienza e affidabilità della generazione di corrente alternata con la possibilità dei motori in corrente continua di pfornire coppie elevate alle basse velocità e la flessibilità nel variare le caratteristiche.

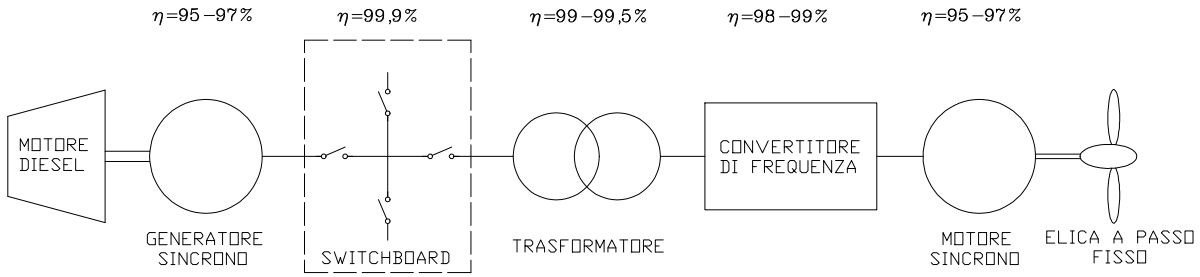
Svantaggi:

a. Voltaggio basso (600 VAc/750 VDc) e quindi elevate correnti
b. Collettore del motore a corrente continua
c. Potenza limitata del motore DC 2-3 MW
d. Bassi fattori di potenza 0,2 < P.F. < 0,92 in particolare a bassi regimi
e. Presenza di interferenze elettromagnetiche.

Le tipologie di navi equipaggiate con questo tipo di propulsione sono pescherecci, pescherecci di alto mare, navi per la ricerca, rompighiaccio. La propulsione dell'elica con motori in DC e adottata nei sottomarini grazie al miglior accoppiamento con il sistema Air Indipendent Propulsion (AIP) che adotta batterie e celle a combustibile.

11.3.3 Sistema a corrente alternata con convertitori di frequenza

Lo schema generale di un sistema a corrente alternata con convertitori di frequenza è riportato nella figura seguente dove sono indicati anche i rendimenti delle singole fasi di generazione e trasformazione dell'energia.-



Caratteristiche e considerazioni sui motori

Prima di trattare le diverse tipologie di convertitori utilizzati è bene spendere due parole sui motori in corrente alternata usati in campo navale.

Come è stato accennato in precedenza a causa di esigenze strutturali e di distribuzione degli spazi sono richiesti dei motori che abbiano dimensioni e peso il più ridotti possibile pur rispettando le potenze previste, questi motori sono chiamati, secondo la letteratura inglese, "high torque dense motors" (motori ad elevata densità di coppia).

Premettendo che nella quasi totalità delle applicazioni sono impiegati motori sincroni, si analizzano gli aspetti costruttivi per ridurre le dimensioni e il peso di queste macchine e per migliorarne le prestazioni.

1. Numero dei poli

Aumentando il numero dei poli si possono costruire macchine più piccole perché l'acciaio della carcassa statorica è interessato da un campo magnetico meno intenso.

Esistono dei limiti al numero di poli che può essere utilizzato; il primo è un limite strutturale legato al fatto che lo statore deve sempre mantenere una certa robustezza, il secondo limite impone che, a parità di velocità di rotazione del motore, all'aumentare del numero di poli, aumenta la frequenza di alimentazione: $\mathbf{n = \frac{60 \cdot f}{p}}$

2. Metodo di eccitazione

La scelta del tipo di eccitazione ha solo un effetto di secondo ordine sulle dimensioni del motore. Le macchine con magneti permanenti richiedono un minor raffreddamento perché le perdite rotoriche sono quasi del tutto azzerate, questi motori possono essere costruiti con intercapedini e traferri minori rispetto ai motori eccitati elettricamente.

3. Numero delle fasi

L'uso di motori con elevato numero di fasi permette di ottenere numerosi benefici, tra i quali sono da ricordare minori rumori e vibrazioni, coppia maggiore, ridotta pulsazione della coppia e maggiore efficienza.

Oggi un sistema convenzionale associa un motore trifase ad un inverter trifase, tuttavia nelle applicazioni dove sono richieste elevate performance si possono adottare motori ad elevato numero di fasi (6 o più).

Propulsione in A.C. con cicloconvertitori

I cicloconvertitori sono dei sistemi a commutazione naturale che utilizzano SCR e trasformano una corrente alternata a tensione e frequenza costanti in una corrente alternata a tensione e frequenza variabile in un unico stadio senza dover ricorrere ad un raddrizzatore controllato e un inverter.-

Il cicloconvertitore può alimentare sia motori sincroni che asincroni, tuttavia nelle applicazioni navali si usano solo motori sincroni che presentano una maggiore robustezza strutturale rispetto ai motori asincroni a gabbia.-

I motori sincroni alimentati da cicloconvertitori hanno tensioni nominali di 1500-1800V, potenze che arrivano a 30 MW e possono raggiungere velocità di rotazione di 500g/min..-

Vantaggi

a. Presentano elevate coppie alle basse velocità.
b. Bassa pulsazione della coppia
c. Eccellente dinamicità nella regolazione dei parametri di funzionamento.
c. Sopporta grandi sovraccarichi fino al 250%.

Svantaggi

a. La frequenza in uscita raggiunge al massimo il 30-40% di quella in entrata. (20Hz)
b. Sensibilità alle perturbazioni di rete
c. A causa dell'assenza del tratto in corrente continua la modulazione del controllo degli SCR induce nella rete di alimentazione un sensibile sfasamento fra tensione e corrente (corrente in ritardo), anche se il motore opera con fattore di potenza quasi unitario.
d. Il fattore di potenza dipende dal voltaggio del motore ed è circa 0,76. (la potenza reattiva è il 25-30% maggiore rispetto al sistema funzionante in corrente continua).-

Propulsione in A.C. con sincroconvertitori

I sincroconvertotori sono sistemi a commutazione naturale alimentati da una linea trifase a tensione e frequenza costanti (60 Hz) e sono costituiti da un doppio stadio di conversione:

-Raddrizzatore controllato.
-Inverter.

Il raddrizzatore converte la corrente alternata trifase di linea, a tensione e frequenza costanti, in una tensione continua di valore variabile; solitamente si usano raddrizzatori a ponte completamente controllato (raddrizzatore a 6 impulsi trifase, o raddrizzatore al 2 impulsi esafase). Il raddrizzatore alimenta l'inverter attraverso una linea dove è inserita un'induttanza che tende a livellare la tensione pulsante fornita dal raddrizzatore offrendo una resistenza quasi nulla alla componente continua della corrente e un'impedenza molto elevata alle sue componenti armoniche ad alta frequenza.-

L'inverter commuta a sua volta la tensione continua in una tensione alternata a frequenza variabile; questa tipologia di inverter è costituita da tiristori (SCR).

I sincroconvertitori sono abbinati a motori sincroni: la tensione di alimentazione del motore è regolata dal raddrizzatore variando la tensione continua attraverso un opportuno ritardo del segnale d'innesco dei tiristori, mentre la frequenza di alimentazione è determinata dall' inverter.-

La f.e.m. indotta negli avvolgimenti statorici del motore è usata come segnale per commutare i tiristori dell'inverter, tuttavia questo sistema di commutazione presenta dei problemi all'avviamento e alle basse velocità di rotazione.

All'avviamento il rotore è fermo, il flusso magnetico non genera fem indotte negli avvolgimenti e quindi non ci sono i segnali di commutazione dei tiristori; per ovviare a questo è necessario un circuito ausiliario, che invia i segnali di commutazione agli SCR, dimensionato solo per l'avviamento del motore.

Un sensore rileva la posizione del rotore e un dispositivo elettronico di controllo attiva i tiristori necessari ad avviare la rotazione; il sistema ausiliario di commutazione rimane inserito fino a che il rotore raggiunge il 10% della velocità di rotazione nominale, valore corrispondente ad una tensione indotta negli avvolgimenti in grado di sostenere la commutazione.

Il sistema di propulsione può essere usato come freno a recupero di energia, in questo modo la velocità di rotazione dell'elica è ridotta velocemente e dunque il senso di rotazione è invertito in un tempo breve; talvolta è inserita una resistenza di frenata con lo scopo di trasformare l'energia elettrica prodotta in calore. La resistenza è raffreddata da un impianto ad acqua.-

In questo tipo di convertitori non è possibile modulare l'estensione dell'impulso (gli SRC possono solo essere abilitati alla conduzione); questo comporta che la forma dell'onda in uscita dall'inverter non è sinusoidale ma quasi quadrata con presenza di 5° e 7° armonica, con la conseguenza di aumentare le perdite nel motore e generare delle pulsazioni nella coppia.-

Vantaggi.

a. Grande semplicità del sistema di controllo.
b. La frequenza di uscita può essere maggiore di quella in entrata (fino a 80Hz)
c. E' applicabile anche a motori di grande potenza (fino a 30MW)
d. I motori possono raggiungere elevate velocità (fino a 500 g/min.)
e. Si possono ottenere elevati voltaggi 6000 V

Svantaggi.

a. Elevata pulsazione della coppia a basse velocità.
b. La forma dell'onda in uscita non è sinusoidale.
c. Ampia variabilità del fattore di potenza

Distorsioni indotte nell'impianto di bordo.

Poiché la forma d'onda della tensione fornita dai convertitori non è perfettamente sinusoidale, il contenuto d'armoniche, oltre ad interessare l'alimentazione del motore con conseguenti oscillazioni nella coppia, introduce anche distorsioni nel lato rete. Queste sono importanti in quanto possono causare problemi agli apparati di navigazione come alle altre utenze di bordo. Ci sono però delle differenze secondo il sistema di convertitori adottato.-

Il sincroconvertitore ha lo stadio in corrente continua tra l'alimentazione e il convertitore, e questo isola le armoniche generate dal sincroconvertirore dall'alimentazione principale; risulta quindi che le armoniche sono effettivamente filtrate eliminando così le distorsioni nella tensione di alimentazione dell'impianto elettrico di bordo.-

Il cicloconvertitore non ha lo stadio in continua, così variando la frequenza in uscita si provocano delle armoniche nella tensione di alimentazione di rete. I livelli di queste distorsioni si aggirano intorno all' 11-14% per un cicloconvertitore esafase, e circa la metà per un dodecafase. Però, visto che le distorsioni variano in frequenza con la velocità del motore il filtraggio risulta difficoltoso. Per le utenze a bassa tensione, come apparati di navigazione ed utenze luce, sono installati dei convertitori rotanti. La tensione di linea ad elevato contenuto armonico, alimenta un motore accoppiato ad un alternatore che produce energia elettrica a bassa tensione per gli apparati di navigazione e per le altre utenze che risentirebbero negativamente della presenza di armoniche.-

L'effetto delle armoniche nell'alimentazione del motore è assorbito dall'inerzia del convertitore rotante, di modo che la tensione di uscita risulti priva di distorsioni. La complessità e i costi aggiunti dall'installazione di convertitore rotante sono parzialmente compensati considerando che, in questo modo, si è evitato di installare un trasformatore per convertire la tensione a medio voltaggio di linea in tensione a basso voltaggio per le utenze.-

11.3.4. Pod di propulsione

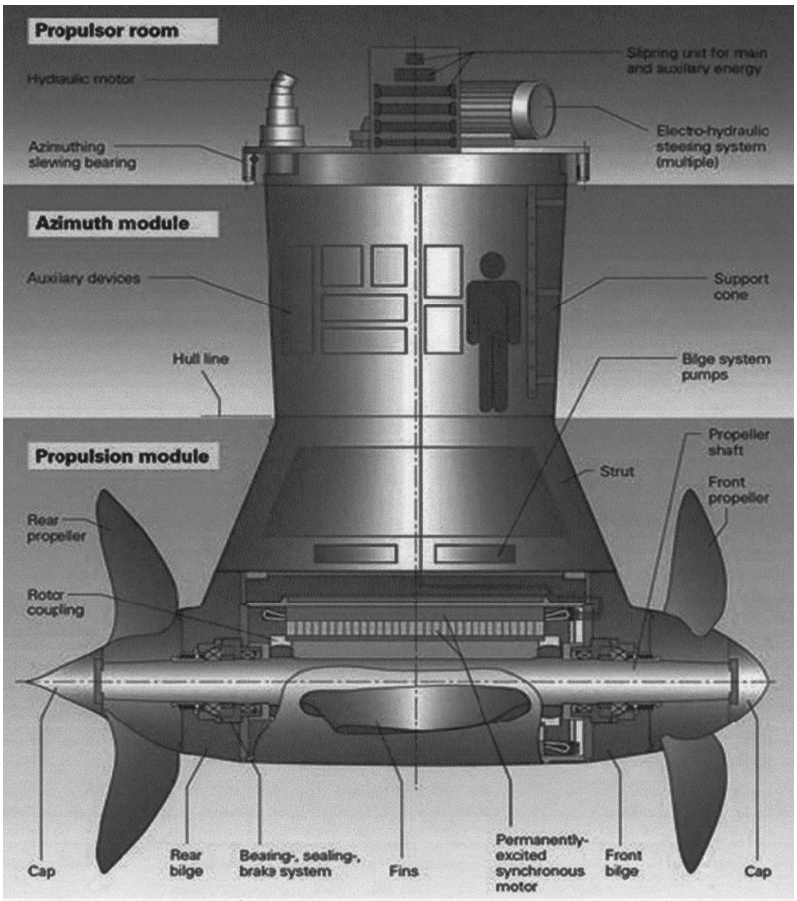
I pod di propulsione sono delle macchine a forma di gondola, appese sotto la poppa della nave, che combinano sia la funzione propulsiva sia la funzione di governo. La propulsione è realizzata tramite un'elica a passo fisso, in configurazione traente, spingente o tandem, mossa da un motore sincrono a corrente alternata installato all'interno del pod. La manovra ottenuta tramite una macchina del timone, installata nello scafo, sopra il pod, capace di farlo ruotare di 360°.-

I vantaggi derivati dall'adozione dei pod per la propulsione sono:

a. semplificazione degli impianti e dell'automazione attraverso l'implementazione del concetto "All electric ship"
b. ridotte emissioni inquinanti nell'atmosfera
c. flessibilità nella disposizione dell'apparato motore
d. ridotto numero dei componenti dell'apparato di propulsione
e. risparmio di combustibile
f. rumorosità e vibrazioni ridotte
g. eccellenti caratteristiche manovriere anche a basse velocità
h. risparmio di spazi interni a poppa
i. riduzione della distanza di arresto di emergenza

Svantaggi:

a. perdite di potenza a causa della propulsione elettrica
b. alti costi di investimento
c. limitazione della potenza all'elica, max 30 MW contro i 70 MW raggiungibili con sistemi a linea d'asse.



Durante la breve vita di questi sistemi di propulsione (il primo è stato montato nel 1990) si sono verificati numerosi problemi di carattere elettrico e meccanico.

I pod di propulsione non possono ancora essere considerati un prodotto ingegneristicamente maturo ed affidabile.-

Dal punto di vista elettrico le avarie sono state causate dalle elevate temperature degli avvolgimenti; temperature inferiori potrebbero essere raggiunte tramite basse correnti induttive (per esempio usando magneti permanenti) oppure dimensionando opportunamente il raffreddamento. Sono stati riscontrati anche dei problemi di isolamento elettrico derivanti dalle infiltrazioni di acqua attraverso le tenute dell' albero portaelica.

Il problema delle avarie scoraggia gli armatori ad adottare i pod in quanto a causa della difficile accessibilità (impossibilità di eseguire riparazioni dall'esterno) bisogna trovare un bacino di carenaggio per eseguire le riparazioni.

Sempre a causa dell'accessibilità l'apparato propulsivo non può essere ispezionato quotidianamente dall'equipaggio, ma è controllato da un apparato di monitoraggio remoto.

11.4.0. Conclusioni

Sebbene per la stragrande maggioranza delle navi - quelle indicate come "standard", a più basso costo relativo e a più bassa tecnologia - la propulsione meccanica con motori diesel rappresenti attualmente, nella maggioranza dei casi, l'unica scelta possibile, si sta comunque

assistendo a una sempre maggior diffusione della propulsione elettrica per le altre tipologie di navi, come quelle da crociera, ove le esigenze operative hanno reso la soluzione “propulsione elettrica” vincente sulla soluzione “propulsione meccanica” grazie ai seguenti, innegabili vantaggi:

- Riduzione dei livelli di rumorosità e di vibrazione con conseguente maggior comfort per i passeggeri
- Recupero di spazio
- Manutenzione meno onerosa
- Gestione ottimale della centrale elettrica di bordo che alimenta sia i motori elettrici di propulsione che l’impianto elettrico, con vantaggi in termini di flessibilità di utilizzo, affidabilità, funzionamento a regime costante dei motori primi (diesel) e conseguente miglioramento dei consumi e delle emissioni inquinanti
- Migliore risposta dinamica ai comandi della propulsione.-

INDICE

CAPITOLO I **1**

RETI DI DISTRIBUZIONE IN MEDIA E BASSA TENSIONE *1*
1.1.0 Generalità *1*
1.2.0 Dimensionamento delle reti di distribuzione *2*
1.3.0 Caratteristiche dei conduttori per linee aeree e in cavo *3*

CAPITOLO II **6**

MATERIALI E APPARECCHIATURE PER IMPIANTI *6*
A BASSA TENSIONE *6*
2.1.0 Cavi *6*
2.2.0 Materiali per installazioni *7*
2.3.0 Dispositivi di manovra, protezione e segnalazione *8*
2.4.0 Contattori *12*

CAPITOLO III **17**

IMPIANTI DI MESSA A TERRA *17*
3.1.0 Generalità *17*
3.2.0 La sicurezza elettrica *18*
3.3.0 Sicurezza negli impianti a bassa tensione *19*

CAPITOLO IV **22**

MOTORI ELETTRICI *22*
4.1.0 Criteri di scelta dei motori elettrici: *22*
4.2.0 Azionamenti a velocità non controllata *25*
4.3.0 Azionamenti a velocità controlla *27*
4.4.0 Protezione dei motori elettrici *27*
4.5.0 Schemi di comando per motori asincroni trifasi *29*

CAPITOLO V **30**

IMPIANTI DI RIFASAMENTO *30*
5.1.0 Il rifasamento degli impianti utilizzatori *30*
5.2.0 Determinazione della capacità di rifasamento *31*
5.3.0 Schemi di installazione dei condensatori di rifasamento *32*
5.4.0 Apparecchiature di manovra e protezione *33*

CAPITOLO VI **36**

IMPIANTI DI CONTINUITÀ ELETTRICA *36*
6.1.0 Generalità *36*
6.2.0 Gruppi statici di continuità *36*
6.3.0 Gruppi rotanti di continuità *37*

6.4.0 Accumulatori elettrici *38*

CAPITOLO VII **47**

ILLUMINAZIONE ELETTRICA *47*
7.1.0 Generalità *47*
7.2.0 Grandezze fotometriche fondamentali *47*
7.3.0 Composizione cromatica della luce *48*
7.4.0 Lampade elettriche *49*
7.5.0 Apparecchi di illuminazione *55*
7.6.0 Circuiti di alimentazione delle lampade *56*
7.7.0 Impianti negli edifici civili *57*

CAPITOLO VIII **59**

RISCALDAMENTO ELETTRICO DEI MATERIALI *59*
8.1.0 Forni elettrici *59*
8.2.0 Saldatura elettrica *60*
8.3.0 Riscaldamento ad induzione elettromagnetica *64*
8.4.0 Riscaldamento per perdite dielettriche in alta frequenza *66*

CAPITOLO IX **68**

TRAZIONE ELETTRICA *68*
9.1.0 Generalità *68*
9.2.0 Trazione elettrica a corrente continua *71*
9.3.0 Trazione elettrica a corrente alternata monofase *73*
9.4.0 I mezzi di trazione elettrica multisistema *75*

CAPITOLO X **78**

TARIFFAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA *78*

CAPITOLO XI **79**

PROPULSIONE ELETTRICA NAVALE *79*
11.1.0 Generalità *79*
11.2.0 Generazione dell'energia elettrica *79*
11.3.0 Sistemi propulsivi *81*
11.4.0. Conclusioni *86*