

ELEMENTI DI IMPIANTI ELETTRICI

LE CENTRALI DI PRODUZIONE

È evidente l'importanza che assume agli effetti dello sviluppo della vita civile ed industriale di una regione la disponibilità di energia in una forma facilmente trasformabile in calore, in lavoro meccanico, in energia chimica, in luce o in altre richieste utilizzazioni. Allo stato attuale una delle forme di energia che meglio si presta alle esigenze suddette è l'energia elettrica per la sua facilità di trasformazione, per la possibilità di trasmissione a lunghissime distanze, per la sua facile divisibilità e per la sua affidabilità. Pertanto, la maggior parte delle energie economicamente utilizzabili vengono trasformate in energia elettrica o immediatamente alla sorgente o dopo un trasporto nella loro forma originale, verso i centri di utilizzazione.

Dato che ancora i generatori magnetofluidodinamici (nei quali si ha una conversione diretta da energia termica e meccanica in energia elettrica) sono in fase di ricerca, si può senz'altro affermare che la totalità dell'energia elettrica prodotta nelle centrali elettriche è dovuta agli alternatori. Le centrali si classificano in base all'energia primaria utilizzata; le forme di energia primaria oggi economicamente utilizzabili sono:

- *Energia idraulica.* Nella maggior parte conseguente a salti di grandi portate d'acqua fluente o accumulata in serbatoi (o bacini); eccezionalmente derivante da spostamenti di grandi masse d'acqua per effetto delle maree. In entrambi i casi la conversione in energia elettrica deve avvenire nelle vicinanze delle sorgenti di energia. Nelle centrali ad acqua fluente si sfruttano grandi portate d'acqua con piccoli valori di salto geodetico. Si utilizzano particolari turbine idrauliche (Francis e Kaplan), che funzionano meglio a basse velocità. Ne consegue che gli alternatori accoppiati hanno un elevato numero di coppie polari (generalmente 8 o 16). Le centrali a serbatoio utilizzano invece l'energia potenziale di masse d'acqua immagazzinata in opportuni bacini (naturali o artificiali); di solito funzionano con piccole portate e con elevati salti geodetici. Di regola si utilizza come turbina idraulica una turbina Pelton, che funziona meglio ad alte velocità. Ne consegue che gli alternatori accoppiati hanno un piccolo numero di coppie polari (generalmente 2, 3 o 4). La presenza del bacino consente a queste centrali di erogare energia nel periodo di tempo più opportuni. Inoltre la turbina Pelton si presta meglio di quelle termiche a rapide e continue variazioni di carico. Si noti che tutte le centrali idroelettriche, benché in parte dipendenti dagli eventi meteorologici, non danno luogo a costi per il "combustibile". Il costo di impianto delle centrali nuove è tuttavia crescente a causa dell'esaurimento dei siti facilmente sfruttabili.
- *Energia termica.* Eccezionalmente di natura geotermica (soffioni boraciferi), nel qual caso è indispensabile la conversione presso la sorgente; generalmente ottenuta con la combustione di combustibili fossili solidi, liquidi o gassosi (carbone, petrolio, nafta, metano, gas naturale) sia nei pressi delle sorgenti, sia vicino ai centri di utilizzazione. In fase contrastata di impiego è la produzione di energia termica derivante dall'utilizzo della fissione nucleare, energia di costo molto variabile. In fase di studio è la produzione di energia termica derivante dall'utilizzo della fusione nucleare, di cui però non si è in grado, allo stato attuale delle conoscenze, di individuare la data del suo utilizzo industriale. Il calore sviluppato dal combustibile viene in ogni caso sfruttato mediante turbine a vapore o turbine a gas, che funzionano da motore nei riguardi dei turboalternatori. Le turbine termiche funzionano meglio ad alte velocità, per cui i turboalternatori hanno un numero molto ridotto di coppie polari (1 o 2). Per la loro grande inerzia termica, occorrono alcune ore per la loro messa in marcia. A differenza delle centrali idroelettriche, le centrali termoelettriche presentano il vantaggio di un regime di produzione indipendente da fattori stagionali, adattandosi flessibilmente alle esigenze del consumo. Tuttavia, per tutte le centrali termiche, con l'eccezione di quelle geotermiche, occorre tenere conto che, oltre al costo di costruzione, vi è un costo di esercizio dovuto al consumo di combustibile. Inoltre, è bene ricordare che questo tipo di centrale è caratterizzato da un notevole impatto ambientale: all'immissione in atmosfera dei prodotti della combustione e allo smaltimento delle scorie (ceneri, bitumi, ecc.) in

discarica, si aggiunge l'inquinamento termico provocato dalle acque di scarico degli scambiatori di calore.

- *Energia eolica.* Utilizzata per la produzione di modeste quantità di energia elettrica in zone battute dai venti per la maggior parte dell'anno, lontano da altre centrali elettriche: è evidente l'aleatorietà di questo tipo di produzione, che però rappresenta attualmente la più importante e promettente fonte alternativa a quelle convenzionali.
- *Energia solare.* Per mezzo della conversione fotovoltaica (a resa media annuale di circa 60 W per metro quadrato impegnato), consente limitate produzioni di energia elettrica (in corrente continua) utilizzabili in zone lontane da centri di produzione. Le centrali solari, per essere connesse alla rete elettrica, necessitano di opportuni convertitori DC/AC. Più conveniente è l'utilizzo dell'energia solare per il riscaldamento di acqua a bassa temperatura (circa 60°C); possibile anche il riscaldamento dell'acqua ad alta temperatura concentrando per mezzo di specchi parabolici, la luce su adeguati "bollitori". Anche in questo caso la regolarità della produzione è fortemente pregiudicata, essendo condizionata dalle condizioni atmosferiche e stagionali.
- *Energia da biomasse.* Sono energie ottenibili utilizzando razionalmente materiali di rifiuto prodotti da uomini, animali e vegetali. L'utilizzo può avvenire a mezzo di combustione diretta o per combustione dei prodotti gassosi della fermentazione (principalmente metano).

La maggior parte delle centrali di produzione sono connesse tra loro e con il sistema di distribuzione dell'energia, cosicché l'intera rete nazionale può essere vista come un unico carico, il cui fabbisogno di energia è variabile nel tempo secondo dei diagrammi di carico giornalieri, il cui andamento tipico è mostrato in figura 1. L'andamento del diagramma di carico varia a seconda della stagione dell'anno considerata, tuttavia esso presenta sempre due massimi (punte di carico) ed un minimo notturno. Ponendo in ordinate la potenza richiesta ed in ascisse il tempo, l'area del diagramma di carico rappresenta l'energia giornaliera richiesta.

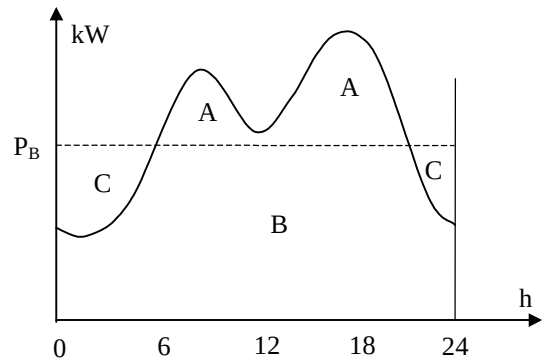


Fig. 1. – Esempio di diagramma di carico giornaliero. Sono evidenziate: le punte di carico (A), il carico base (B) e le eccedenze (C).

L'adeguamento della produzione alla richiesta viene fatto facendo funzionare alcune centrali in servizio continuativo, in modo che sia sempre disponibile una potenza base P_B , mentre altre centrali entrano in funzione per coprire le punte di carico. È evidente che nei periodi in cui la potenza richiesta è minore di P_B vi sarà una eccedenza di potenza disponibile. Per sopperire a questo inconveniente si utilizzano frequentemente delle centrali di pompaggio che, nei periodi di eccedenza, pompano acqua dai bacini di valle ai bacini in quota, accumulando così energia potenziale gravitazionale che potrà essere utilizzata il giorno dopo per coprire le punte del carico.

La scelta delle centrali che devono espletare il servizio di base o quello di punta avviene in base a criteri che possono essere così sintetizzati:

- Le centrali idroelettriche hanno tempi di messa in servizio piuttosto ridotti, dell'ordine dei minuti, per cui sono adatte all'espletamento del servizio di punta, che comporta frequenti distacchi ed inserzioni dell'impianto;
- Le centrali termoelettriche, invece, hanno bisogno di tempi di avviamento molto maggiori, a causa del tempo necessario per fare arrivare il vapore alla pressione e alla temperatura di funzionamento, con costanti di tempo dell'ordine delle ore (crescente con la potenza). Essendo inoltre di potenza notevolmente maggiore di quelle idroelettriche, esse sono idonee al servizio di base, caratterizzato da un funzionamento continuo, anche se non sempre alla stessa potenza.

LE LINEE ELETTRICHE

L'insieme delle macchine, apparecchiature e linee destinate alla produzione, trasformazione, trasmissione, distribuzione ed utilizzazione dell'energia elettrica costituisce il *sistema elettrico* in senso lato. In effetti il sistema complessivo è l'unione di più sottosistemi distinti fra loro a seconda della funzione, della tensione nominale o in base ad altri criteri. In maniera molto schematica la struttura generale di un sistema elettrico di potenza, di tipo trifase, è sintetizzata nella figura 2, dove si fa riferimento ad un unico generatore e si adotta la schematizzazione unifilare per la rappresentazione dei conduttori.

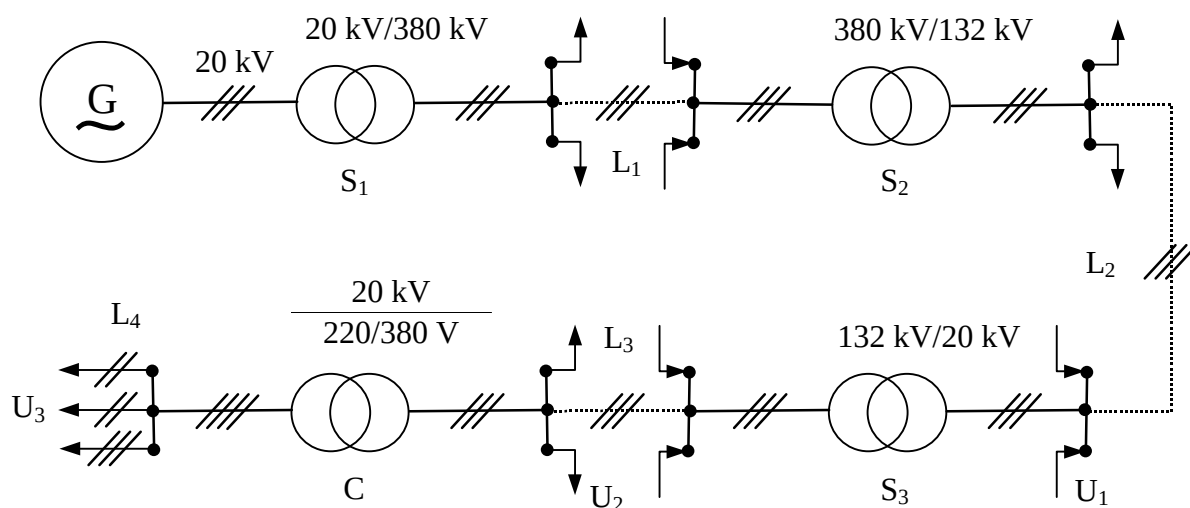


Fig. 2. – Schematizzazione di un sistema elettrico di potenza.

Le funzioni delle varie parti del sistema si possono così classificare:

- *Produzione* di energia elettrica mediante centrali di vario genere, funzionanti a tensione non molto elevata, per problemi di isolamento degli alternatori.
- *Trasformazione* delle grandezze elettriche (tensione e corrente) al fine di avere in ogni punto del sistema il valore di tensione più opportuno. Tale funzione viene svolta dalle stazioni di trasformazione (S_1 , S_2 , S_3) e dalle cabine di trasformazione (C). Le stazioni S_1 ed S_2 sono dette primarie, le S_3 secondarie.
- *Trasmissione* dell'energia elettrica, ossia il trasporto di notevoli quantità di energia a grandi distanze e con valori elevati di tensione, mediante linee aeree o in cavo. Nella figura 2 il tratto L_1 rappresenta una linea di trasmissione ed L_2 una linea di trasmissione secondaria.
- *Distribuzione*: è l'ulteriore livello del trasporto dell'energia ed interessa il collegamento tra le stazioni, le cabine e le utenze. Si distingue una distribuzione in media tensione (MT) svolta dalla linea L_3 ed una in bassa tensione (BT), propria delle linee $L_4^{(o)}$. Nelle zone ad elevata densità di utenza queste linee sono generalmente in cavo.

^(o) Secondo la pratica corrente, pur se non sancita da alcuna norma, si parla di bassa, media ed alta tensione secondo il seguente criterio:

- *Bassa tensione* (BT) quando la tensione nominale è minore di 1000 V;
- *Media tensione* (MT) quando la tensione nominale è maggiore di 1000 V e minore di 30000 V;
- *Alta tensione* (AT) quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V e minore di 130000 V;
- *Altissima tensione* (AAT) quando la tensione nominale è maggiore di 130000 V.

La norma CEI 64-8 classifica invece i sistemi elettrici in base alla tensione nominale nel seguente modo:

- *Categoria zero* quando la tensione nominale è minore di 50 V in alternata o di 120 V in continua;
- *Prima categoria* quando la tensione nominale è di 50 ÷ 1000 V in alternata o di 120 ÷ 1500 V in continua;
- *Seconda categoria* quando la tensione nominale è di 1000 ÷ 30000 V in alternata o di 1500 ÷ 30000 V in continua;
- *Terza categoria* quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V sia in alternata sia in continua.

- *Utilizzazione* dell'energia elettrica, ossia trasformazione di tale energia in una forma adatta ad utilizzazioni civili ed industriali (illuminazione, movimentazione di organi meccanici, ecc.). Nella figura 2 si distinguono le utenze alimentate in AT (U_1), in MT (U_2) e in BT (U_3). La consegna dell'energia elettrica viene effettuata in AT o MT solo per le utenze più importanti (utenze industriali). Per le utenze minori, quali officine o abitazioni (utenze domestiche), le cabine garantiscono una tensione concatenata nominale di circa 380 V oppure una tensione fase – neutro di 220 V.

In realtà il sistema elettrico italiano ha una complessità ben maggiore di quella deducibile dalla figura 2. Tutte le maggiori centrali di produzione sono tra loro collegate mediante linee di interconnessione, in modo tale che, al livello delle tensioni più alte vi sia una unica rete interconnessa, in cui confluisce tutta l'energia prodotta, con il vantaggio che la messa fuori servizio di una centrale non pregiudica l'alimentazione di una o più zone del territorio nazionale. In questo modo diventa però estremamente delicato il problema della regolazione delle energie prodotte dalle varie centrali e della ripartizione dei flussi di energia sulle varie linee. È da tenere presente inoltre la presenza di linee di connessione tra l'Italia ed i paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria) attraverso le quali si attua l'import-export energetico.

Dalla figura 2 si nota che i vari punti del sistema elettrico sono caratterizzati da diversi livelli di tensione. I motivi che portano ad una scelta tecnicamente ed economicamente corretta dei vari valori sono molteplici. Alcuni di essi sono i seguenti:

- Isolamento delle macchine e delle apparecchiature, che deve essere proporzionato alla tensione di esercizio; poiché i trasformatori, che sono macchine statiche, sono più facilmente isolabili degli alternatori si preferisce produrre con tensioni di 15÷30 kV ed elevare la tensione a valori adatti al trasporto mediante i trasformatori. Tali valori sono in generale funzione della potenza da trasmettere e della distanza. In proposito valgono i seguenti ordini di grandezza:

P [MW]	500	130	60	25	10
l [km]	300÷1000	100÷300	60÷130	20÷60	10÷20
V [kV]	380	220	132	60	20

- A parità di potenza apparente la corrente $I = N/\sqrt{3} V$ (in corrente alternata trifase) diminuisce all'aumentare della tensione e pertanto è conveniente effettuare il trasporto, specie per potenze rilevanti, alla tensione più elevata possibile;
- Livelli di tensione delle utenze: la maggior parte delle utenze funziona a bassa tensione e pertanto occorrono i vari stadi di trasformazione della tensione, dai valori di trasporto (220 kV, 380 kV) a quelli di utilizzo (220 V, 380 V nella maggior parte dei casi);
- Sicurezza degli utenti, che aumenta al diminuire della tensione e pertanto, per le parti di impianto a diretto contatto con le persone, è preferibile adottare bassi livelli di tensione.

Un'altra considerazione da fare riguarda la frequenza: il sistema di trasmissione generalmente impiegato è quello a corrente alternata trifase di frequenza 50 Hz (in Europa, 60 Hz negli USA). L'adozione di frequenze più elevate comporterebbe macchine di minori dimensioni a pari potenza. Tuttavia gli aumenti delle reattanze magnetiche proprie delle linee e dei generatori renderebbero estremamente difficoltosa la regolazione della tensione e la stabilità dell'esercizio.

CONFRONTO TRA LINEE DI TRASMISSIONE IN C.C. ED IN C.A.

In generale il trasferimento di energia elettrica tra due punti, nei sistemi elettrici di potenza (escludendo quindi il campo delle telecomunicazioni), può avvenire nei seguenti tre modi:

È da notare infine che, ai fini antinfortunistici, il DPR n. 547 considera di bassa tensione gli impianti con tensione nominale inferiore a 400 V in alternata e 600 V in continua; *tutti gli altri sono da considerarsi di alta tensione.*

- corrente continua;
- corrente alternata monofase a frequenza industriale (50 Hz per l'Europa, 60 Hz per gli USA);
- corrente alternata trifase a frequenza industriale.

Il confronto tra i pesi di materiale conduttore è uno dei criteri che determina la convenienza economica della linea. Infatti, il peso del conduttore incide sia sul costo proprio dei conduttori che su quello dei sostegni, della posa in opera della linea, etc. Il confronto tra i tre sistemi di trasmissione deve essere effettuato rispettando le seguenti ipotesi:

- parità della potenza trasmessa P [W];
- parità della tensione di trasmissione V [V];
- parità della lunghezza di linea L [m];
- parità della potenza dissipata sulla linea Δp [W];
- parità di conduttore (quindi stesso peso specifico γ e stessa resistività ρ).

1) **corrente continua:** Indicando con R_l la resistenza di linea relativa ad un conduttore e con I la corrente di linea, la potenza persa nei due conduttori è data da:

$$\Delta p = 2 R_l I^2$$

Sostituendo le espressioni $R_l = \rho L/S$ e $I = P/V$ si ottiene: $\Delta p = \frac{2\rho L P^2}{S V^2} \Rightarrow S = \frac{2\rho L P^2}{\Delta p V^2}$

Essendo S e $2LS$ rispettivamente la sezione ed il volume dei conduttori di linea, il peso totale dei conduttori di linea è dato da:

$$G_{cc} = 2LS\gamma = \frac{4\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2} = 4k \quad (1)$$

dove si è definito il fattore costante $k = \gamma\rho L^2 P^2 / (V^2 \Delta p)$.

2) **corrente alternata monofase:** rispetto al caso precedente cambia solo l'espressione della corrente che è $I = P/(V \cos\phi)$ e pertanto, nella formula del peso comparirà a denominatore il termine $\cos^2\phi$, ottenendo:

$$G_{cam} = 2LS\gamma = \frac{4\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2 \cos^2 \phi} = \frac{4k}{\cos^2 \phi} \quad (2)$$

3) **corrente alternata trifase:** essendo tre i conduttori si ha

$$\Delta p = 3 R_l I^2, \text{ dove } R_l = \frac{\rho L}{S} \text{ e } I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos\phi}$$

Sostituendo si ottiene:

$$\Delta p = \frac{\rho L P^2}{S V^2 \cos^2 \phi} \Rightarrow S = \frac{\rho L P^2}{\Delta p V^2 \cos^2 \phi}$$

Il peso dei tre conduttori di linea è dato da:

$$G_{cat} = 3LS\gamma = \frac{3\gamma\rho L^2 P^2}{\Delta p V^2 \cos^2 \phi} = \frac{3k}{\cos^2 \phi} \quad (3)$$

Confrontando le espressioni (1), (2) e (3) e tenendo presente che $\cos^2\phi \leq 1$, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- i pesi in corrente alternata monofase e trifase dipendono dal fattore di potenza, tendendo all'infinito per $\cos\phi$ tendente a zero e assumendo i valori minimi per $\cos\phi = 1$, valori che sono rispettivamente: $(G_{cam})_{\min} = 4k$, $(G_{cat})_{\min} = 3k$;

- per qualsiasi valore di $\cos \varphi$, essendo $G_{\text{cat}} < G_{\text{cam}}$, il peso della linea in corrente alternata trifase è sempre minore di quello in corrente alternata monofase;
- per qualsiasi valore di $\cos \varphi$, essendo $G_{\text{cc}} < G_{\text{cam}}$, il peso dei conduttori in corrente continua è sempre inferiore a quello in corrente alternata monofase, salvo che per $\cos \varphi = 1$, caso in cui i due pesi sono uguali;
- risolvendo la disequazione $G_{\text{cc}} < G_{\text{cat}}$ si ottiene $\cos^2 \varphi \leq 3/4$ e quindi, considerando solo il valore positivo, $\cos \varphi \leq \sqrt{3}/2 = 0.866$. Quanto sopra porta alla conclusione che, per valori di $\cos \varphi < 0.866$, il peso in corrente alternata trifase è maggiore di quello in corrente continua e viceversa; per valori di $\cos \varphi = 0.866$ i due pesi sono uguali.

In definitiva, per fattori di potenza maggiori di 0.866, il sistema di trasmissione più conveniente, per quanto concerne il peso dei conduttori, è quello in corrente alternata trifase, mentre per $\cos \varphi < 0.866$ diventa più conveniente quello in corrente continua. Risulta anche evidente, nei casi di impiego della corrente alternata, la convenienza di un elevato valore del $\cos \varphi$, essendo il peso dei conduttori proporzionale al suo quadrato. Le considerazioni fatte possono essere sintetizzate nel grafico di figura 3.

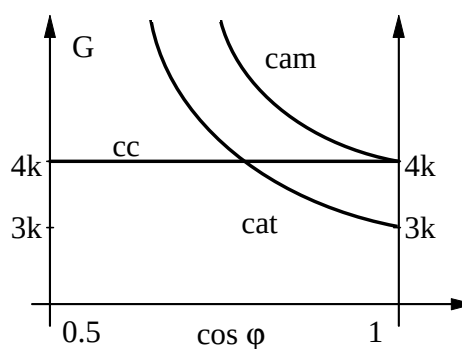


Figura 3.

Oltre al criterio precedente occorre considerare anche altri elementi di valutazione:

- La generazione di energia elettrica avviene quasi totalmente sotto forma di corrente alternata trifase, in quanto i relativi generatori (alternatori trifase) sono costruttivamente più semplici e robusti dei generatori in corrente continua; anche l'utilizzazione avviene prevalentemente in corrente alternata. Volendo effettuare la trasmissione in corrente continua occorre una stazione di conversione a monte ed una a valle della linea. Attualmente la conversione avviene mediante raddrizzatori statici (diodi ed SCR);
- La trasmissione in corrente continua presenta il vantaggio, rispetto alle linee trifase, di un minore costo degli isolatori e dei sostegni, sia per il fatto di impiegare due conduttori (o anche uno se il ritorno è effettuato a terra) anziché tre, sia perché, a parità di valore efficace della tensione V , la linea a corrente alternata va costruita con un livello di isolamento proporzionato al valore massimo $V_M = \sqrt{2} V$, mentre quella a corrente continua deve essere isolata solo per la tensione V ; questi vantaggi risultano particolarmente importanti per le linee lunghe ad altissima tensione;
- In corrente continua c'è una minore caduta di tensione di linea perché manca la caduta di tensione dovuta alla reattanza induttiva. Altro vantaggio, particolarmente sensibile nelle linee in cavo, è l'assenza di effetti capacitivi.

Attualmente la trasmissione di energia elettrica a tensione 220kV - 380kV si effettua con linee aeree trifasi; la corrente continua è stata adottata, per esempio, per l'attraversamento di tratti di mare con cavo sottomarino (Toscana - Corsica - Sardegna a 200kV, Inghilterra - Francia, fiordi norvegesi, etc.).

CENNI COSTRUTTIVI

Le linee di trasporto sono realizzate, generalmente, con conduttori nudi che si appoggiano ad appositi sostegni. Alcuni esempi di tali sostegni (tralici) sono illustrati nelle figure 4, 5 e 6. Valutazioni di carattere sia elettrico (livello di tensione e di corrente) che meccanico (lunghezza dei tratti di conduttore fra due sostegni, presenza di sollecitazioni aggiuntive, quali vento, neve o ghiaccio)

sono alla base dei criteri che conducono alla scelta del materiale conduttore per le linee e la loro organizzazione strutturale. I conduttori (in rame o alluminio) sono realizzati in fili o corde. A parità di resistenza elettrica, un conduttore di alluminio deve avere una sezione maggiorata del 60% rispetto ad un conduttore di rame: il suo peso risulta tuttavia circa la metà di quello in rame. Generalmente sono irrobustiti meccanicamente da un'anima interna costituita da una fune di acciaio.

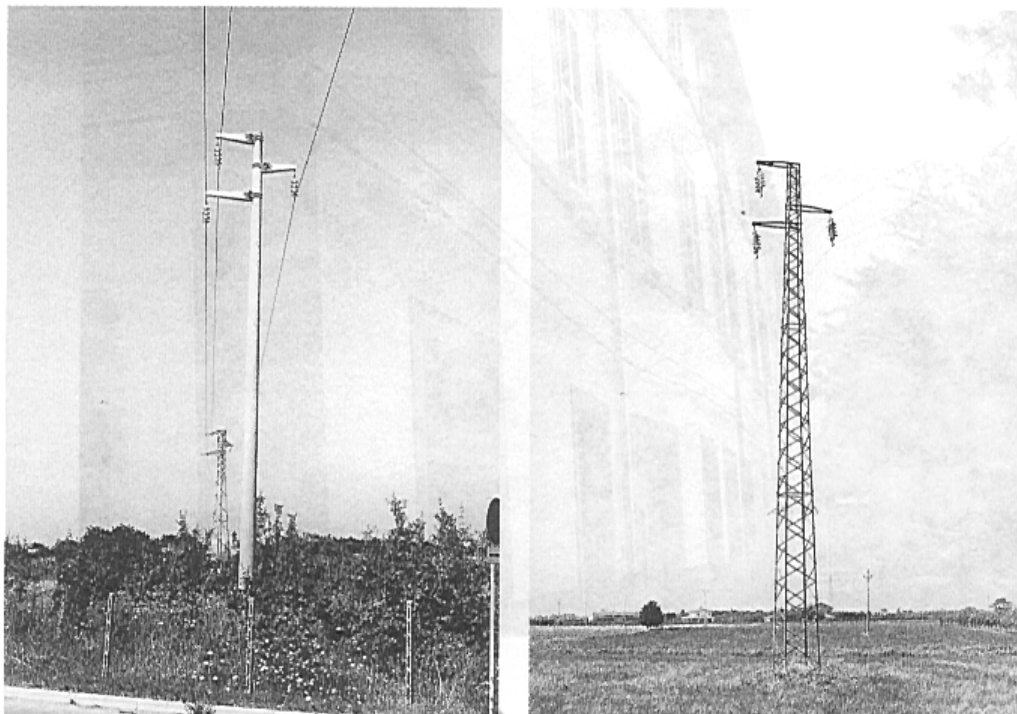
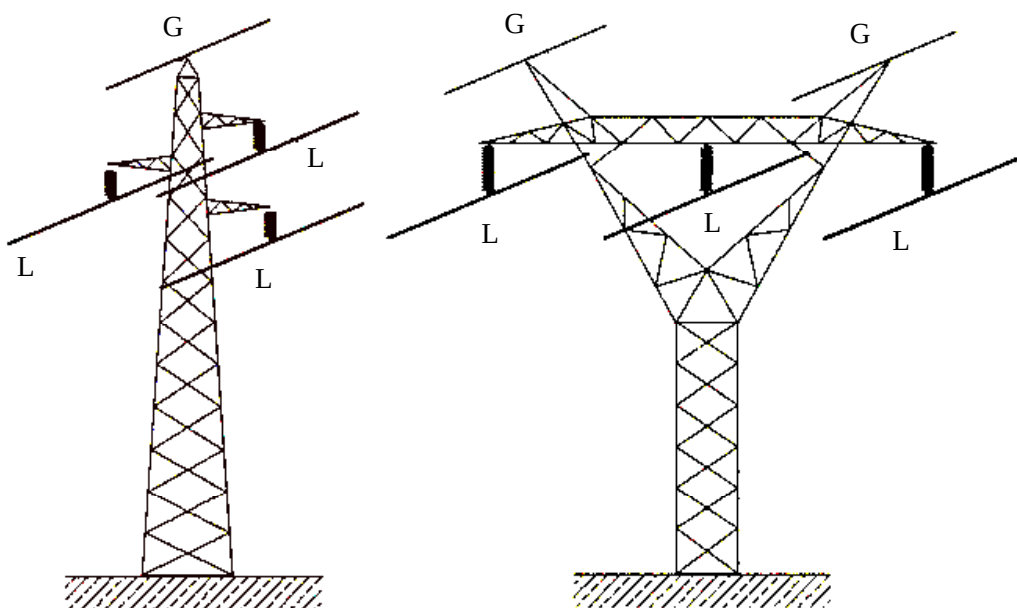


Fig. 4. – Tralicci a terna semplice per BT.

Le linee ad alta tensione prevedono la presenza di un conduttore supplementare (indicato con G nella figura 5), denominato fune di guardia, generalmente posto in cima al traliccio di supporto. La sua funzione è quella di costituire una schermatura protettiva dei cavi sottostanti (indicati con L nella figura 5) nei confronti di eventuali fulminazioni dirette. Inoltre, la fune di guardia, metallicamente connessa ai tralicci, abbassa la resistenza di terra complessiva dei singoli tralicci, collegati in parallelo verso terra. La fune di guardia è generalmente costituita da corde in acciaio zincato o *aluminumweld*, un conduttore con anima in acciaio e strato esterno in alluminio.



(a) (b)

Fig. 5. – Tralicci per MT (a) ed AT (b).

Condizioni di umidità e pressione adatte possono favorire l'instaurarsi di un fastidioso fenomeno noto come "effetto Corona", che consiste nella ionizzazione degli strati di atmosfera intorno alla linea. La presenza dell'effetto Corona è spesso visibile come una fascia luminescente di colore azzurrino che riveste i conduttori. Il fenomeno è fonte di perdite energetiche e di disturbi di vario genere, soprattutto sotto forma di scariche il cui spettro di frequenze è abbastanza ampio da arrecare interferenze nelle comunicazioni, entro la banda delle decine di MHz. Per contrastare il fenomeno occorre abbassare il valore del campo elettrico facendo aumentare il diametro dei conduttori di linea: a tale scopo si adottano linee a conduttori multipli a *fasci* (linee doppie o triple), aventi la funzione proprio di aumentare il diametro efficace dei conduttori.

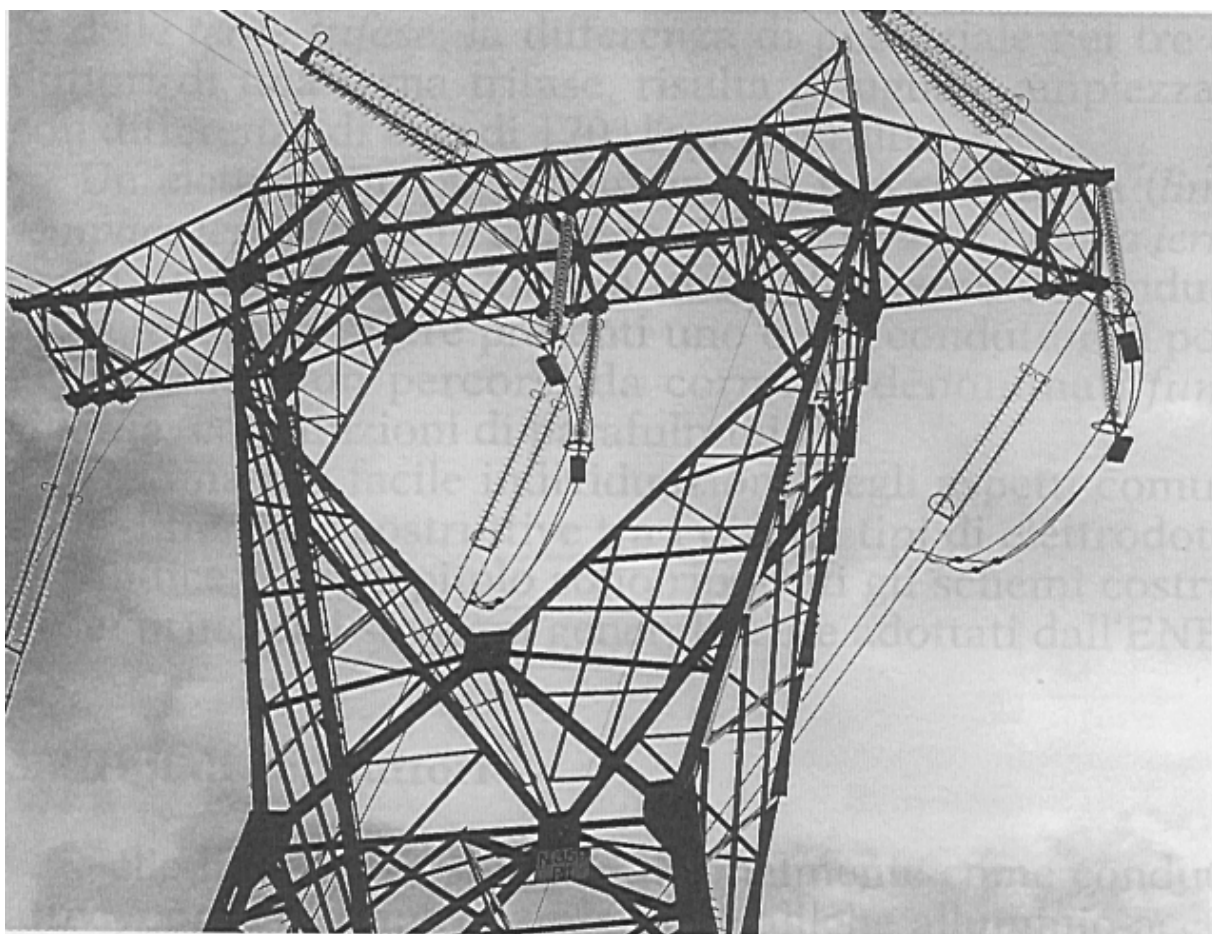


Fig. 6. – Traliccio per AT: si noti il conduttore multiplo a fascio triplo.

L'impiego di conduttori nudi comporta la necessità di provvedere ad un loro adeguato isolamento dai supporti (tralicci), interponendo opportuni isolatori costruiti perlopiù in vetro, porcellana o resine polimeriche. Gli isolatori sono formati spesso da elementi assemblati in maniera da formare una catena la cui rigidità dielettrica complessiva risulta circa multipla di quella dell'isolatore singolo. Un ulteriore parametro di progetto è costituito dalla forma degli isolatori. Il problema della forma è particolarmente curato per gli isolatori per esterno. A differenza di quelli per interni, infatti, devono far fronte a condizioni di esercizio certamente più gravose per la presenza di fattori ambientali sfavorevoli, quali la pioggia, l'umidità e l'azione di agenti contaminanti (fumi industriali e/o salsedine nelle zone costiere). Le sezioni dei due tra i tipi più diffusi di isolatori per esterno sono riportate in figura 7.

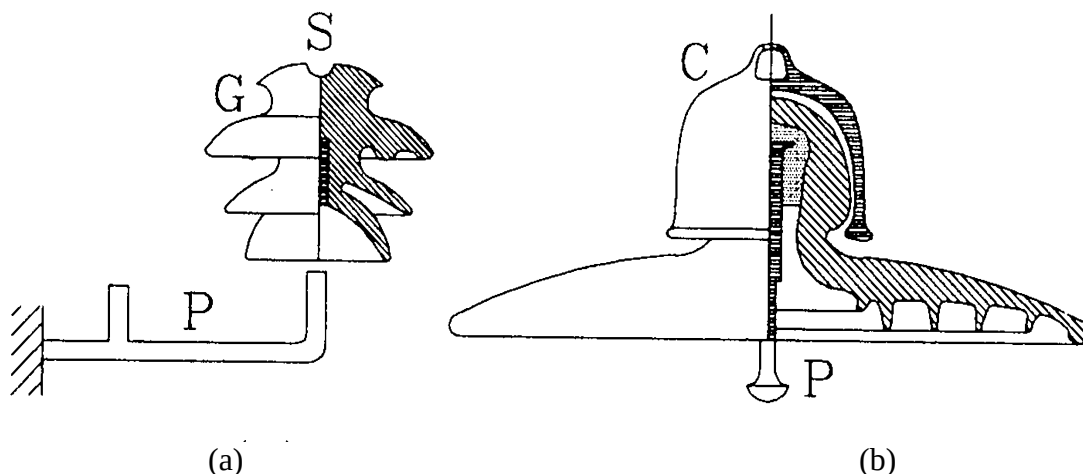


Fig. 7. – Elementi di isolatore per esterni.

L'isolatore a perno mostrato in figura 7.a, impiegato soprattutto per le medie e le basse tensioni, presenta un corpo in vetro o porcellana (tratteggiato in figura). Il conduttore viene sistemato nella scanalatura superiore S oppure fissato lateralmente nella gola C. La parte inferiore è munita di un foro rigato che ne consente il fissaggio su un perno portaisolatore P.

L'isolatore a cappa e perno (vedi figura 7.b), impiegato per le alte tensioni, ha una struttura che lo rende idoneo a formare catene sospese. Al corpo, in vetro o porcellana, vengono applicati, in testa, una cappa superiore C e, in basso, un perno di ghisa P. La catena viene assemblata agganciando un perno entro l'alloggiamento di una cappa, fino a raggiungere una lunghezza complessiva dipendente dalle specifiche necessità di isolamento.

SOVRATENSIONI E SOVRACORRENTI

Sovratensioni

Il dimensionamento e la tenuta degli isolamenti non può essere riferito alla sola tensione di normale esercizio delle linee ma deve offrire adeguata sicurezza anche nei confronti di eventuali sovratensioni, quasi sempre di carattere transitorio, spesso molto più elevate dei valori massimi per i quali è previsto il normale funzionamento dell'impianto.

- Le sovratensioni per *cause interne* sono quelle prodotte da variazioni di regime più o meno brusche legate, in genere, a:
 - a) manovre sugli impianti, generalmente riconducibili a chiusura o apertura di un interruttore,
 - b) improvvisa riduzione del carico,
 - c) risonanza in rete,
 - d) contatto accidentale di un impianto con un altro a tensione di esercizio maggiore.
- Le sovratensioni per *cause esterne* sono imputabili a fenomeni di origine atmosferica, dovuti, in genere, a induzione elettrostatica e/o elettromagnetica. Il caso più grave è certamente quello della fulminazione diretta, quando una linea viene colpita da un fulmine. (Un fulmine presenta valori tipici di tensione massima di circa 1÷5 MV, per tempi di 5÷50 μ s. Il valore massimo della corrente prodotta da un fulmine varia fra circa 5 e 100 kA)

Lo studio delle sovratensioni può essere condotto per via teorica analizzando in regime transitorio il modello circuitale della linea, costituito da equazioni differenziali alle derivate parziali. La verifica sperimentale consiste nel sottoporre singoli componenti o tratti di linea a prove normalizzate con appositi generatori di tensione, sia in regime sinusoidale (a frequenza industriale) che in regime impulsivo.

Sovracorrenti

Un *sovraccarico* è la causa più frequente di sovracorrente, consistente nel superamento dei valori di corrente per i quali una linea o una apparecchiatura sono proporzionate. Si tratta, quasi sempre, di fenomeni di durata limitata, che si verificano in connessione con l'intrinseca modalità di funzionamento di alcuni dispositivi: un esempio tipico è costituito dalle elevate correnti di spunto dei motori asincroni in fase di avviamento, fino a $6 \div 8$ volte superiori alle correnti nominali. I sovraccarichi hanno un effetto quasi esclusivamente termico: se sono di durata limitata e non si ripetono troppo frequentemente, sono privi di conseguenze pericolose. A sovraccarichi via via più rilevanti corrispondono danni sempre più gravi: a partire dal semplice, anche se irreparabile, deterioramento dell'isolante dei cavi, si arriva al vero e proprio incendio.

Una corretta protezione dal sovraccarico richiede che siano rispettate le seguenti condizioni:

- 1) la corrente nominale del dispositivo di protezione non deve essere inferiore alla corrente di normale esercizio del conduttore entro il quale è inserito (al fine di evitare interventi inopportuni);
- 2) la corrente nominale del dispositivo di protezione deve essere inferiore alla corrente massima sopportata dal conduttore in regime permanente (l'intervento della protezione deve aver luogo prima che il conduttore sia compromesso definitivamente);
- 3) il tempo di intervento deve essere inversamente proporzionale all'entità del sovraccarico.

Le sovracorrenti più rilevanti, e pericolose, sono quelle dovute a un cortocircuito tra due elementi dell'impianto non equipotenziali: in tempi brevissimi si possono raggiungere valori elevatissimi della corrente, limitati solo dalle caratteristiche del generatore equivalente della linea a monte della zona di guasto. Le condizioni per la protezione più efficiente dal cortocircuito^(o) sono:

- 1) il dispositivo di protezione deve avere un *potere di interruzione* non inferiore al valore presumibile per la corrente di cortocircuito nel punto di installazione del dispositivo;
- 2) l'intervento deve aver luogo in maniera tempestiva per un cortocircuito che si verifichi in qualunque punto della linea protetta, prima che isolanti o conduttori risultino irrimediabilmente danneggiati;
- 3) il dispositivo deve essere installato all'inizio del tratto da proteggere, con una tolleranza di 3 m (salvo eventuali rischi di incendio);
- 4) la corrente nominale del dispositivo deve essere non inferiore alla corrente di esercizio ordinario della linea protetta.

La *corrente di cortocircuito* I_{cc} in un punto di un impianto elettrico rappresenta la corrente che circolerebbe in un conduttore di resistenza trascurabile che collegasse le linee in tensione. Il valore di I_{cc} dipende da una molteplicità di fattori, quali la sezione e la lunghezza delle linee a monte del guasto o la potenza nominale del trasformatore di alimentazione più prossimo. Un criterio prudente consiste nell'assumere quale valore presunto della corrente di cortocircuito quello corrispondente al caso peggiore, quando si supponga l'impedenza di cortocircuito nulla e il tempo di intervento delle protezioni abbastanza lungo da consentire alla corrente di raggiungere il valore di regime, a transitorio estinto. Oltre che per il dimensionamento delle protezioni, una valutazione preventiva delle correnti di cortocircuito risulta essenziale anche per prevedere gli sforzi elettrodinamici indotti sui conduttori e negli avvolgimenti delle macchine elettriche.

^(o) Per la definizione di "Potere di interruzione" si veda a pag. 14.

APPARECCHI DI MANOVRA E PROTEZIONE

La gestione e la sicurezza di una rete elettrica è affidata ad una molteplicità di apparecchiature che provvedono a:

- a) realizzare le manovre richieste dalle esigenze dell'utenza in condizioni di esercizio ordinario,
- b) far fronte in maniera automatica ad anomalie di funzionamento che possano costituire pericolo per le cose o le persone.

La sintetica panoramica che segue prescinde intenzionalmente dalle complesse problematiche tipiche delle reti in AT, limitandosi a far riferimento soprattutto alle reti in media e bassa tensione.

DISPOSITIVI DI INTERRUZIONE

Il normale esercizio degli impianti prevede la necessità di inserire o disinserire generatori, carichi o intere sezioni di rete. Gli apparecchi di manovra a tale scopo utilizzati presentano caratteristiche funzionali che dipendono fortemente dalla gravosità delle condizioni operative cui devono fare fronte.

Interruttori

Gli interruttori consentono la chiusura e l'apertura di una linea sotto carico anche in condizioni di cortocircuito. Il loro simbolo, per la versione azionata dall'operatore, è quello di figura 8.a. Il simbolo di figura 8.b si riferisce, invece, alla versione automatica, il cui funzionamento è asservito all'intervento di un sistema di protezione (con sensori, relè o altro).



Fig. 8 – Simboli dell'interruttore azionato manualmente (a) e dell'interruttore automatico (b).

In base alle operazioni che sono in grado di compiere, gli interruttori sono distinti in:

- *Interruttori*: sono in grado di stabilire, condurre ed interrompere la corrente in condizioni normali del circuito ed anche di stabilire, condurre per un tempo determinato ed interrompere la corrente in determinate condizioni anormali come quelle di cortocircuito. Possiedono due posizioni stabili di funzionamento (aperto e chiuso) nelle quali possono permanere in assenza di azioni di comando esterne.
- *Interruttori di manovra*: sono in grado di stabilire, condurre ed interrompere la corrente in condizioni normali del circuito, comprese eventualmente specificate condizioni di sovraccarico in servizio. Possono essere in grado di stabilire e di condurre per una durata specificata la corrente in condizioni di cortocircuito, ma non sono in grado di interromperla. Possiedono due posizioni stabili di funzionamento (aperto e chiuso) nelle quali possono permanere in assenza di azioni di comando esterne.

All'apertura di una rete sotto carico si manifesta quasi sempre un arco elettrico che tende a conservare la continuità della corrente. Generalmente gli interruttori sono costruiti in maniera tale da non impedire la formazione dell'arco, la cui presenza limita le sovratensioni induttive, ma nel contempo provvedere alla sua estinzione in tempi brevi (dell'ordine dei millisecondi) ed impedirne il riaccensione a manovra conclusa. Affinché questo avvenga si devono adottare determinati accorgimenti, consistenti in:

- *Deionizzazione dell'ambiente*, sostituendo il dielettrico ionizzato con altro non ionizzato, in modo da ripristinare la rigidità dielettrica tra i contatti;
- *Allungamento dell'arco* e suo eventuale frazionamento in archi elementari, allo scopo di aumentare il valore di tensione necessario al sostentamento dell'arco stesso;
- *Raffreddamento* dei contatti per evitare l'emissione termoionica e limitare la sollecitazione termica.

In relazione al metodo impiegato per l'estinzione dell'arco vi sono vari tipi di interruttore, adatti alle diverse esigenze e con modalità costruttive dipendenti dalla tensione del sistema in cui devono essere impiegati e dalle prestazioni richieste.

– *Interruttori ad olio**

Sono composti schematicamente da una camera cilindrica verticale per ogni polo (sono generalmente tripolari), a tenuta stagna, riempita d'olio. Per ogni polo vi è un contatto fisso a tulipano in cui si inserisce il contatto mobile, mosso da opportuni cinematismi. All'atto della separazione dei contatti (vedi figura 9) nasce l'arco elettrico che, sviluppandosi nell'olio, ne determina il riscaldamento e la ionizzazione. Si formano pertanto delle bolle di gas che, tendendo a salire, favoriscono la circolazione di altro olio tra i contatti, che provvede al ripristino della rigidità dielettrica.

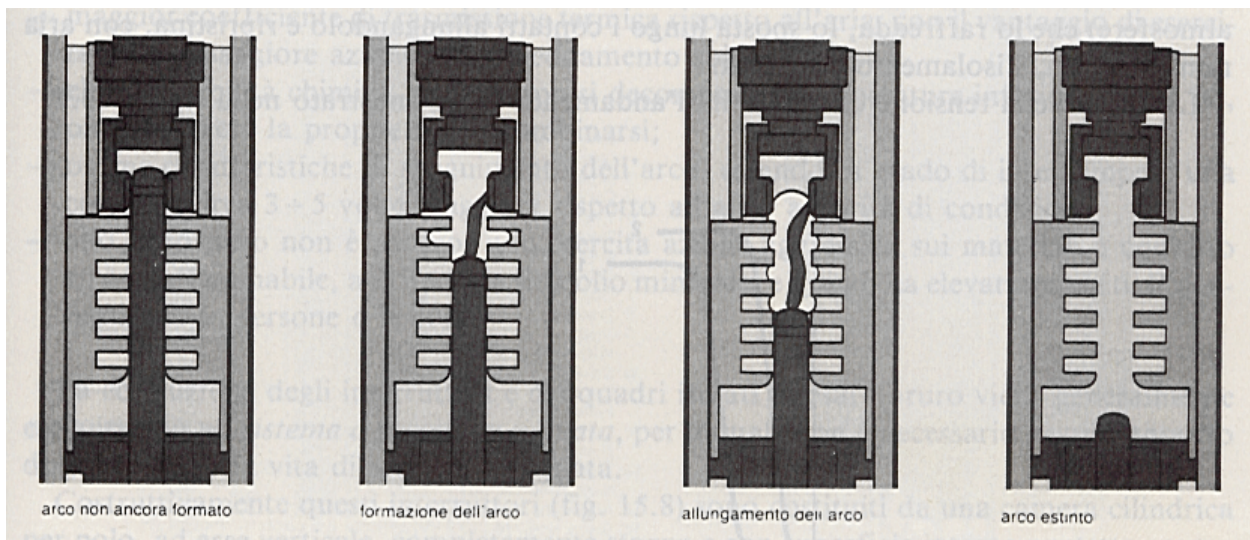


Fig. 9 – Interruttore ad olio: sequenza d'interruzione (ABB).

Gli interruttori ad olio vengono comunemente impiegati nei sistemi MT, specie per il comando dei trasformatori; in AT sono utilizzati fino a 132 kV e per correnti non troppo elevate, per il pericolo di incendi ed esplosioni dovuto all'olio.

– *Interruttori ad aria compressa*

Sono interruttori comunemente usati nelle reti a 220 kV e 380 kV per le loro elevate prestazioni, mentre non vengono utilizzati nei sistemi di distribuzione, a causa della necessità di un impianto di aria compressa. Il principio di funzionamento è elementare: all'apertura dei contatti l'arco ionizza l'aria (rigidità dielettrica 24 kV/cm) in cui si sviluppa; contemporaneamente l'arco stesso viene investito da un getto d'aria in pressione (15 ÷ 16 atm.) che lo raffredda, lo sposta lungo i contatti allungandolo e ripristina, con aria non ionizzata, l'isolamento tra i poli.

– *Interruttori in aria a deionizzazione magnetica (DEION)*

In questi interruttori, l'arco si forma e si estingue in aria, a pressione atmosferica. Il principio di funzionamento è il seguente: mediante due *bobine di soffio* viene generato un campo di induzione magnetica nella regione dell'arco; la forza generata sull'arco dall'interazione con la corrente sposta l'arco stesso, facendo affluire tra i contatti aria fresca non ionizzata che ripristina l'isolamento.

* Gli oli dielettrici per interruttori e trasformatori devono avere una elevata rigidità dielettrica (non inferiore a 120 kV/cm), resistenza all'ossidazione e assenza di corrosività verso i metalli. Si impiegano oli minerali, prevalentemente naftenici, di bassa viscosità, privi di sostanze polari, eventualmente addizionati di antiossidanti. Tali oli, oltre a possedere elevate qualità dielettriche, devono essere a bassa viscosità (inferiore a 40 mm²/s) per facilitare la formazione di correnti di convezione (agevolando lo scambio termico) e per evitare lo spegnimento "lento" dell'arco che, oltre a produrre melme e composti carboniosi corrosivi, ne provocherebbe la decomposizione, con produzione di composti volatili esplosivi. Se il rischio di esplosione è particolarmente sentito si utilizzano Askarel (o apiroli), che sono idrocarburi isolanti ininfiammabili ad elevata costante dielettrica, il cui principale difetto è tuttavia la notevole tossicità.

L'arco viene in questo modo sospinto in camere di estinzione composte di materiale ceramico isolante (a base di ossido di zirconio), nelle quali l'arco si fraziona e si estingue progressivamente senza provocare sovratensioni. L'assenza di materiali metallici nelle camere di estinzione evita la formazioni di vapori metallici conduttori.

– *Interruttori ad esafluoruro di zolfo (SF_6)*

L'esafluoruro di zolfo è un gas isolante, le cui proprietà fondamentali sono:

- Rigidità dielettrica molto elevata (80 kV/cm ad 1 atm. e crescente con la pressione), superiore rispetto a quella dell'aria e degli altri isolanti gassosi (azoto, anidride carbonica). Questo consente di adottare distanze di isolamento minori, riducendo di conseguenza ingombro e costo dell'apparecchiatura;
- Maggiore coefficiente di trasmissione termica rispetto all'aria, con il vantaggio di esercitare una maggiore azione di raffreddamento sui poli;
- Elevata stabilità chimica, per cui non si decompone a temperature inferiori a 200 °C, oltre ad avere la proprietà di ricombinarsi;
- Ottime caratteristiche di spegnimento dell'arco, essendo in grado di interrompere una corrente 3 ÷ 5 volte superiore rispetto all'aria, a parità di condizioni;
- Allo stato puro non è tossico, è inerte ed ininfiammabile e quindi ha elevati requisiti di sicurezza per le persone e le cose.

Costruttivamente questi interruttori sono composti da una camera cilindrica verticale per ogni polo (vedi figura 10), a tenuta stagna, riempita di SF_6 a 3 ÷ 4 atm.. Per ogni polo vi è un contatto fisso a tulipano in cui si inserisce il contatto mobile, mosso da opportuni cinematismi. Il principio di funzionamento e la sequenza di spegnimento dell'arco sono le stesse che si hanno negli interruttori ad aria compressa.

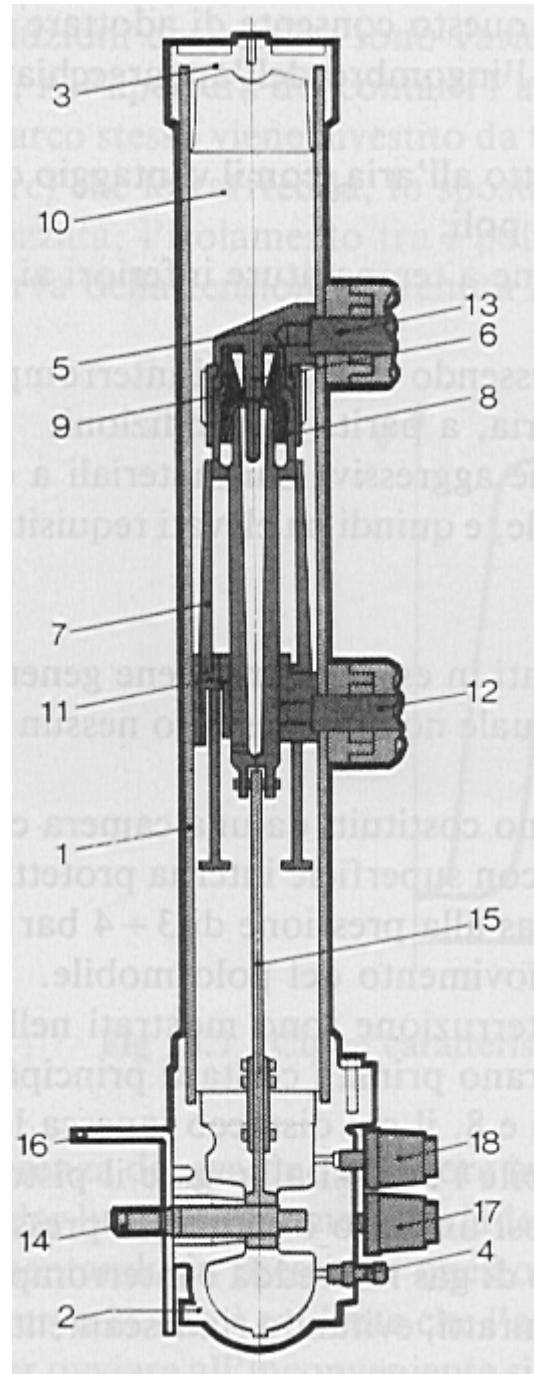


Fig. 10 –Interruttore ad SF_6 : vista in sezione.
 1) Cilindro isolante in vetroresina; 2) Coppa in lega di alluminio; 3) Cappellotto; 4) Valvola per il riempimento e lo svuotamento; 5-6) Contatti fissi a tulipano e d'arco; 7-8) Contatti mobili principale e d'arco; 9) Ugello di soffio in vetroresina; 10) Camera di espansione; 11) Contatto guida; 12) Terminale inferiore in rame; 13) Terminale superiore in rame; 14) Albero di manovra con leva; 15) Biella isolante per il movimento del contatto mobile 8; 16) Telaio di supporto del polo; 17-18) Sensori d'allarme di pressione e temperatura. (ABB)

– *Interruttori sotto vuoto*

Il loro funzionamento si basa sulla considerazione che rarefacendo il mezzo in cui l'arco si sviluppa si riduce la quantità di particelle ionizzate e l'energia dell'arco, permettendone così l'estinzione solo a causa della distanza tra i contatti. Sono composti schematicamente da una camera cilindrica verticale per ogni polo, sotto vuoto. All'atto della separazione dei contatti nasce l'arco elettrico che utilizza come mezzo conduttore i vapori metallici provenienti dallo strato superficiale dei contatti. Una opportuna geometria dei contatti fa espandere l'arco su tutta la loro superficie, distribuendone uniformemente il calore. Rapidamente l'arco si estingue e non si riadesca dato che i vapori metallici si sono nel frattempo condensati, ripristinando l'isolamento

Le principali caratteristiche funzionali che caratterizzano un interruttore sono:

- La *tensione nominale di esercizio* V_e , che rappresenta la tensione alla quale vengono riferite le prestazioni dell'apparecchio sia nelle normali operazioni di apertura e chiusura che in condizioni di cortocircuito. Nel caso di reti trifasi, occorre riferirsi alla tensione concatenata. I valori più comuni tra quelli normalizzati sono 220, 440, 660, 1500, 2400, 3000 per la c.c. e 220, 380, 660, 3000, 6000, 10000 per la c.a..
- La *tensione nominale di isolamento* V_i , che è il valore di tensione, generalmente fissato dalle norme, che garantisce l'isolamento dell'apparecchio o di un suo componente accessorio.
- Le *tensioni per il coordinamento dell'isolamento*, che esprimono livelli di sovratensione ai quali occorre far riferimento per la scelta e il dimensionamento delle parti isolanti: corrispondono a differenti condizioni operative, usualmente normalizzate, quali, ad esempio, la prova di tenuta ad impulso per la simulazione della fulminazione.
- La *corrente nominale*, che è il valore della corrente che l'interruttore può condurre in assegnate condizioni ambientali e nel rispetto delle specifiche termiche progettuali. Il valore può variare a seconda del tipo di servizio previsto, continuo o discontinuo.
- Il *potere nominale di interruzione* I_{in} , espresso dal valore della corrente di cortocircuito che un interruttore automatico può interrompere ad una tensione superiore di non oltre il 10% rispetto a quella nominale, quando la frequenza e il fattore di potenza siano quelli nominali. Il potere di interruzione, indicato sulla targa di identificazione dell'apparecchio, deve essere superiore alla corrente di cortocircuito presunta nel punto di installazione della protezione.
- Il *potere nominale di chiusura su cortocircuito* I_{cn} , che è la corrente di cortocircuito sulla quale un interruttore può essere chiuso ad una tensione superiore del 10% a quella nominale, a frequenza e fattore di potenza nominale. Ci si riferisce, generalmente, a valori normalizzati della corrente di cortocircuito, secondo la serie seguente, espressa in kA:

I_{cc} , [kA]: 6.3; 8; 10; 12.5; 16; 20; 25; 31.5; 40; 50; 63; 80; 100.

La necessità di far fronte a sollecitazioni meccaniche e termiche anche molto gravose rende, in conclusione, gli interruttori molto ingombranti, pesanti e costosi.

Teleruttori (o contattori)

Sono dimensionati per interrompere le sole correnti di normale esercizio, con esclusione di quelle di cortocircuito. Sono caratterizzati da una unica posizione stabile di funzionamento che è quella di aperto. Nella posizione di chiuso possono permanere solo in presenza di una azione di comando, generalmente di tipo elettromagnetico. Confrontato con un interruttore di uguale corrente nominale, un contattore presenta, dunque, struttura più semplice, dimensioni ridotte e costo sensibilmente inferiore. Vengono rappresentati con il simbolo di figura 11.a, o con il simbolo di figura 11.b per il tipo automatico.



Fig. 11 – Simboli del contattore azionato manualmente (a) e del contattore automatico (b).

Nella forma più semplice vengono impiegati nelle reti di Categoria 1 ($V < 1000$ V in alternata oppure $V < 1200$ V in continua); in versione speciale sotto vuoto sono anche usati nell'ambito delle reti a MT.

Sezionatori

Sono destinati ad interrompere la continuità elettrica per le sole linee a vuoto. I loro contatti, spesso del tipo a coltello, sono generalmente visibili e forniscono, in tal modo, una sorta di assicurazione visiva sullo stato di apertura della linea. Il loro simbolo è quello di figura 12.a; il simbolo di figura 12.b si riferisce alla versione automatica.



Fig. 12 – Simboli del sezionatore azionato manualmente (a) e del sezionatore automatico (b).

I sezionatori a semplice interruzione sono costruiti secondo lo schema di principio di figura 13.a: nella posizione di circuito chiuso, il conduttore a lama L, incernierato ad una estremità, viene mantenuto fra le espansioni del morsetto fisso di sinistra, collegando, così, i due conduttori C. La rotazione della lama L interrompe la continuità ohmica dei conduttori C. Entrambi i blocchi superiori sono supportati da isolatori I il cui dimensionamento va riferito alla tensione fra i morsetti a circuito aperto. La figura 13.b descrive il principio di funzionamento dei sezionatori a doppia interruzione: la rotazione della lama produce, come è evidente, una duplice interruzione per ogni linea.

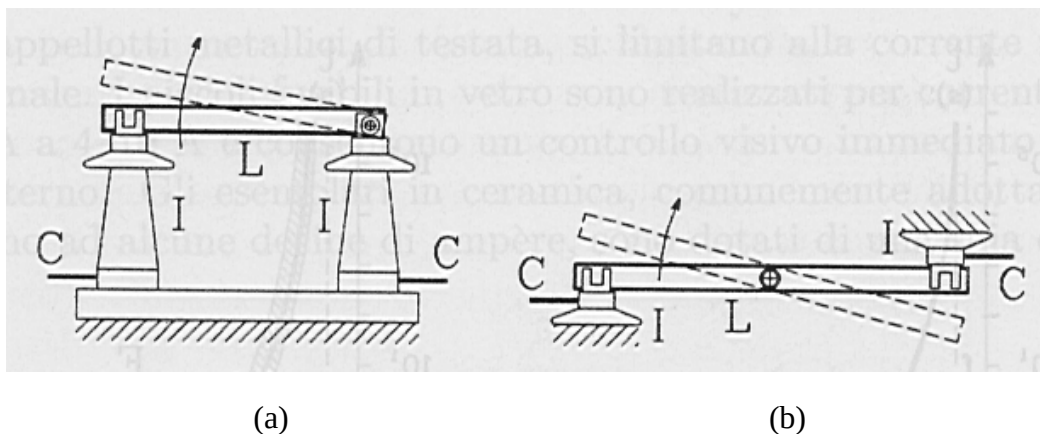


Fig. 13 – Schemi di un sezionatore a semplice interruzione (a) e a doppia interruzione (b).

La manovra dei sezionatori può essere effettuata a mano o con l'ausilio di azionamenti elettrici o meccanici: è importante, in ogni caso, che rimanga rigorosamente subordinata, a quella degli in-

terruttori (o dei teleruttori), in modo che i sezionatori operino sempre a vuoto. Nella fase di interruzione del circuito, si apre prima l'interruttore e poi i sezionatori; in quella di ripristino della continuità invece si richiudono prima i sezionatori e poi l'interruttore (vedi figura 14).

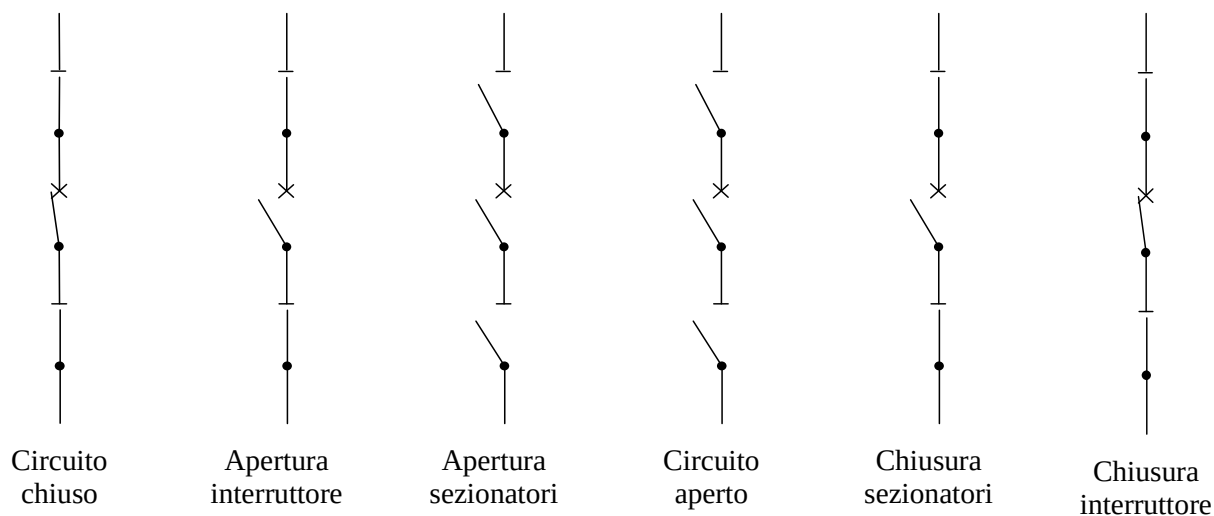


Fig. 14.a – Sequenza di apertura di un circuito. Fig. 14.b – Sequenza di chiusura di un circuito.

FUSIBILI

I fusibili rappresentano i più semplici e, spesso, i più rapidi dispositivi di protezione contro le sovracorrenti. Sono costituiti essenzialmente da un corto conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato entro un apposito contenitore. Per le loro caratteristiche intrinseche i fusibili non discriminano fra sovraccarico e cortocircuito: il tempo di intervento dipende esclusivamente dal raggiungimento del regime termico che ne determina la fusione e decresce all'aumentare della corrente. Indicando con R_f la resistenza del conduttore con il quale il fusibile è realizzato, la protezione interviene interrompendo il circuito quando il calore W_J dissipato per effetto Joule nell'intervallo convenzionale di intervento $[0, t_i]$ supera il calore di fusione W_f :

$$W_J = R_f \int_0^{t_i} i^2 dt > W_f$$

facendo riferimento al valore efficace I della corrente, il calore dissipato varia linearmente con il tempo:

$$W_J(t) = R_f I^2 t.$$

La figura 15.a riporta un tipico andamento della caratteristica tempo - corrente di un fusibile, in scala doppiamente logaritmica. La retta verticale f corrisponde alla corrente minima di fusione I_m mentre la tratteggiata j rappresenta il calore di fusione $I^2 t$: insieme contribuiscono a determinare la curva a tratto spesso della cosiddetta *caratteristica del tempo di fusione*.

In realtà, le condizioni di intervento di un fusibile sono determinate solo entro una fascia di incertezza legata a una molteplicità di fattori, tra i quali vanno annoverate le differenze costruttive. È usuale, allora, far riferimento piuttosto alla cosiddetta zona di intervento del fusibile: indicata con F in figura 15.b, rappresenta l'insieme dei punti di sicura fusione; i valori di corrente inferiori alla fascia di incertezza individuano la zona di sicurezza S , entro la quale può essere escluso l'intervento della protezione.

(b)

Fig. 15 – Caratteristica del tempo di fusione e zona di intervento (F) del fusibile.

La scelta di un fusibile viene effettuata con riferimento ai parametri di seguito definiti.

- La *corrente nominale* (definita anche portata) che rappresenta la corrente massima che può percorrere il fusibile senza che questo fonda.
- La *forma d'onda della corrente*: il regime stazionario rappresenta certamente la condizione più gravosa.
- Il *potere di interruzione nominale*: è definito in maniera analoga a quello degli interruttori.
- La *tensione nominale* è quella alla quale sono riferite le prestazioni del fusibile: deve essere non inferiore a quella di esercizio normale della linea da proteggere.

La figura 16 mostra la forma più comune di fusibile per bassa tensione. Il corpo, in vetro per i modelli più piccoli, o in ceramica, è terminato da cappellotti di testata a grande superficie di contatto. L'elemento fusibile cilindrico è sistemato al centro del contenitore e, nei modelli per correnti elevate, è immerso in una massa deionizzante ad altissima inerzia termica. I dati caratteristici, incisi sul corpo o sui cappellotti metallici di testata, si limitano alla corrente massima e alla tensione nominale. I fusibili in vetro sono realizzati per correnti che vanno da frazioni di mA alla decina di A e consentono il controllo visivo immediato dello stato del conduttore interno. Gli esemplari in ceramica, realizzati per correnti di qualche decina di A, sono dotati di una spia di segnalazione di intervento.

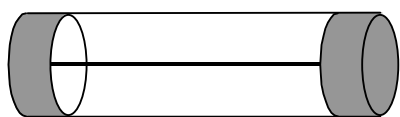
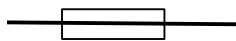
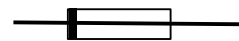


Fig. 16.



(a)



(b)

Fig. 17.

Il simbolo del fusibile è riportato in figura 17.a; il simbolo di figura 17.b si riferisce invece al fusibile dotato di indicazione a tratto spesso dell'estremo che rimane in tensione dopo l'intervento. Tempi di intervento particolarmente rapidi diventano essenziali quando si tratta di proteggere strumenti di misura o delicate apparecchiature elettroniche. In questi casi si fa ricorso ai fusibili di tipo rapido (sigla F) o ultrarapido (sigla FF) in cui il conduttore fusibile è caricato con una molla pretesa che ne forza la rottura prima che questa sia completata dal normale processo di fusione.

In figura 18, infine, è presentata una forma usuale di coordinamento di una protezione con un fusibile: quando si preveda la possibilità che la corrente di cortocircuito superi il potere di interruzione nominale dell'interruttore automatico, occorre inserire a monte di questo il fusibile. La piccola saetta indica usualmente la sezione nella quale si è verificato il guasto.

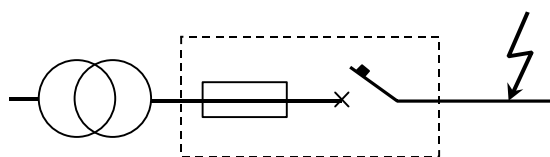


Fig. 18 – Coordinamento della protezione.

SCARICATORI

Gli scaricatori rappresentano i più semplici dispositivi di protezione contro le sovratensioni. Nella versione spinterometrica (vedi figura 19), sono costituiti da due elettrodi affacciati posti ad una certa distanza: uno di essi fa capo alla linea da proteggere mentre l'altro è collegato direttamente a terra. Quando la tensione di linea supera la rigidità dielettrica dell'aria interposta fra le punte dello scaricatore, si verifica un arco, che costituisce la via preferenziale attraverso la quale si scarica la sovratensione: la distanza fra le punte dipende dal valore della tensione per la quale si desidera che avvenga l'innesco dell'arco.

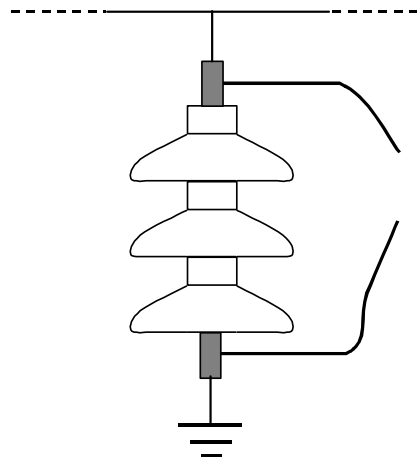


Fig. 19. - Schema di scaricatore spinterometrico.

Nei sistemi ad alta tensione si dà la preferenza ai cosiddetti scaricatori *a resistenza non lineare*: relativamente più costosi degli altri, sono realizzati ponendo in serie uno scaricatore spinterometrico con una resistenza non lineare allo scopo di mantenere praticamente costante la tensione ai capi della protezione. Il dimensionamento dello scaricatore può essere, allora, effettuato sulla base di una tensione fissata e nota, indipendente dalla corrente che si scarica a terra attraverso l'arco. La tendenza più recente è quella di realizzare gli scaricatori con un solo elemento non lineare (ad es., in ossido di zinco). Gli scaricatori, ovviamente, vanno installati il più vicino possibile alle apparecchiature da proteggere.

RELÈ

Il termine (adattamento fonetico dal francese “relais”) indicava, originariamente, un dispositivo, con funzioni sia di protezione che di manovra, costituito, in sostanza, dall'elettromagnete EM della figura 20. In tale relè elettromagnetico, eccitato da una opportuna corrente di comando i_c , la forza di attrazione sviluppata vince la resistenza di una molla antagonista M e sposta una ancora A mobile capace di operare un azionamento meccanico, ad esempio, per aprire o chiudere i contatti C.

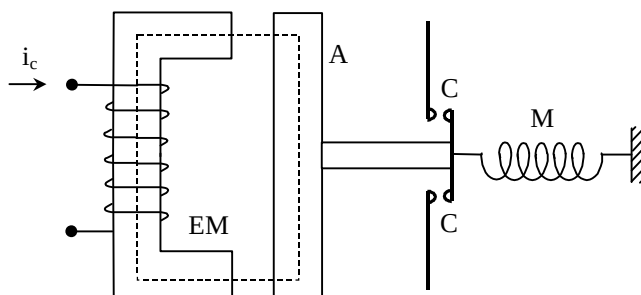


Fig. 20 – Schema di principio di un relè elettromagnetico.

Nella accezione attuale il relè designa una gamma decisamente più ampia di dispositivi, anche molto complessi, ai quali viene asservita una molteplicità di dispositivi di comando o di segnalazione, in funzione dell'andamento di una o più grandezze caratteristiche dei circuiti. In relazione alla grandezza alla quale sono sensibili, i relè vengono classificati come voltmetrici, amperometrici, wattmetrici, frequenzimetrici, a impedenza, termici, tachimetrici, ecc. L'impiego di trasduttori consente la realizzazione di relè sensibili anche a grandezze non elettriche, quali pressione, posizione, ecc.

Versatili ed affidabili circuiti elettronici costituiscono la struttura di base di dispositivo funzionalmente classificabili come *relè statici* per la mancanza di parti in movimento: l'apertura o la chiu-

sura di contatti viene effettuata sfruttando le proprietà di componenti non lineari come i diodi controllati (SCR) o i transistori.

Una ulteriore suddivisione fa riferimento al valore della grandezza controllata:

- *relè di massima* sono quelli che intervengono quando una certa grandezza supera un valore prefissato;
- i *relè di minima* intervengono quando la grandezza da controllare scende al di sotto di una soglia determinata;
- i *relè differenziali* sono sensibili alla differenza fra due grandezze, ad esempio tra quella di ingresso e quella di uscita da un certo dispositivo;

I relè possono essere dotati di un blocco, che rende stabile la posizione di un contatto, indipendente dalla modifica della condizione di eccitazione: un ripristino eventuale della condizione precedente del contatto prevede un riarmo manuale. Il relè si dice *a scatto istantaneo* se il suo tempo di intervento è limitato solo dall'inerzia delle masse in gioco; in molti casi è, tuttavia, desiderabile far ricorso a un *relè a scatto ritardato*, che esplica la sua azione dopo un certo ritardo, eventualmente programmabile.

La figura 21 riproduce un possibile simbolo del relè: i due terminali costituiscono l'accesso alla corrente di controllo (o eccitazione); a lato c'è un tipico schema "logico" dell'azione del relè su una molteplicità di contatti mobili, che possono essere in chiusura, in apertura o misti.

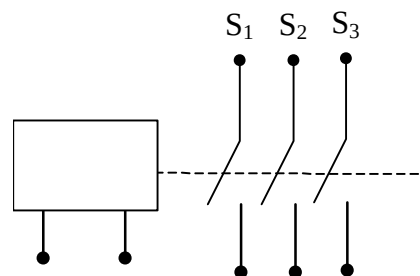


Fig. 21

Relè amperometrico

Il dispositivo elettromagnetico descritto in figura 20 appare particolarmente adatto a svolgere la funzione di relè amperometrico: la forza di attrazione sviluppata dall'elettromagnete dipende, ovviamente, dalla corrente di eccitazione.

Nello schema di figura 22 assume il ruolo di relè di massima corrente: quando la corrente I supera un valore assegnato, apre il circuito di alimentazione sconnettendo l'utilizzatore U eventualmente affetto da cortocircuito. La presenza della resistenza R (shunt) è richiesta dalla necessità di limitare la corrente i_e nella bobina di eccitazione del relè. La caduta di tensione provocata dall'impiego di un relè amperometrico, sia inserito direttamente che in parallelo allo shunt, pone un problema di disturbo analogo all'autoconsumo degli amperometri.

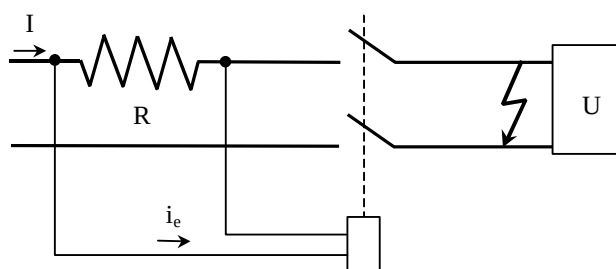


Fig. 22 – Schema di principio di relè amperometrico di massima corrente.

Relè voltmetrico

Un relè magnetoelettrico si presta molto agevolmente a svolgere la funzione di protezione a massima tensione quando venga impiegato secondo lo schema di principio di figura 23. La bobina di eccitazione viene inserita fra i due fili di linea: la resistenza addizionale R_a serve a limitare la corrente di eccitazione. Quando la tensione di alimentazione supera una soglia prefissata (eventualmente regolabile con la taratura della molla), il relè provoca l'apertura dei contatti e il disinserimento della alimentazione.

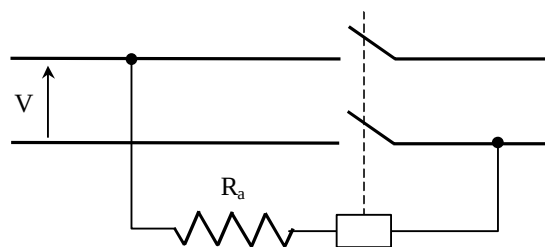


Fig. 23 – Schema di principio di relè voltmetrico di massima tensione.

Si ottiene una protezione a minima tensione se il relè in questione è normalmente eccitato e i contatti sono normalmente chiusi. La diminuzione della corrente di eccitazione dovuta all'abbassamento della tensione diseccita il relè, con la conseguente apertura dei contatti.

Relè termico

Si tratta di un relè provvisto di un dispositivo di sgancio sensibile alla temperatura. Secondo la schematizzazione di figura 24, si basa sul diverso coefficiente di dilatazione termica dei due metalli che compongono la lamina bimetallica (1): la corrente I , condotta dal il cavo flessibile (2), ne provoca il riscaldamento e il progressivo incurvamento, fino a determinare lo scatto del meccanismo di sgancio (3), con la conseguente apertura del circuito di alimentazione. Per il ripristino manuale del dispositivo di sgancio occorre attendere che la lamina bimetallica si sia sufficientemente raffreddata.

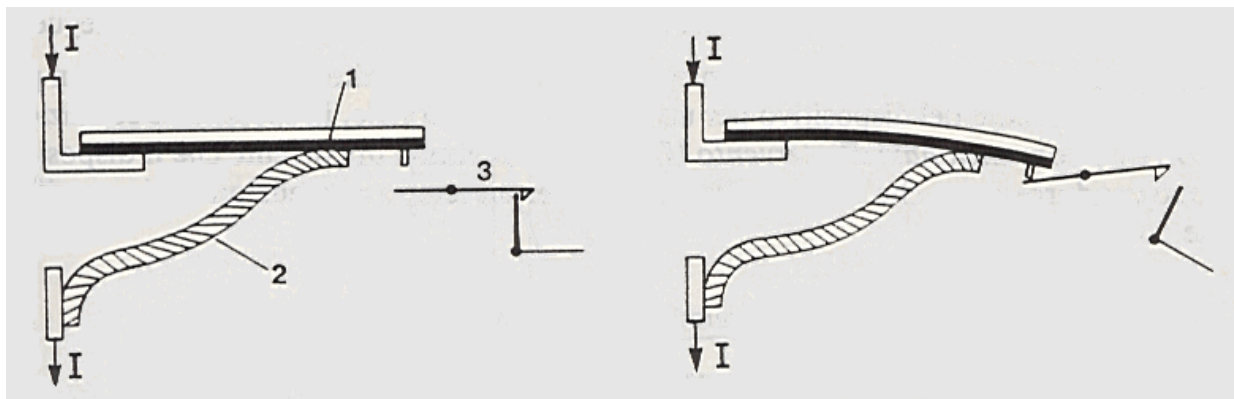


Fig. 24 – Principio di funzionamento di un relè termico: 1) lamina bimetallica, 2) cavo flessibile, 3) meccanismo di sgancio.

Tempi e soglie di intervento dipendono dal regime termico esistente: una stessa variazione di corrente può provocare o meno lo sgancio del relè a seconda che la lamina sia già calda o sia, invece, a temperatura ambiente. Questo tipo di relè si presta ad essere efficacemente impiegato nei casi in cui sia prevedibile una sovracorrente anche piuttosto intensa ma di breve durata, come avviene, ad esempio, all'avviamento di un motore asincrono: l'inerzia termica del dispositivo vale a prevenire aperture intempestive del circuito di alimentazione ma non manca di assicurare la protezione nel caso di una sovracorrente protratta nel tempo.

Relè magnetotermico

Risulta dalla combinazione di un relè termico con un relè elettromagnetico e sfrutta le caratteristiche di entrambi per realizzare una più efficace caratteristica di protezione. In particolare, i due componenti di base vengono calibrati in modo tale che

- per correnti non troppo elevate (da circa 3 a circa 15 volte la corrente nominale del circuito) è previsto l'intervento del relè termico;
- per correnti superiori interviene il relè elettromagnetico.

Una tipica caratteristica tempo-corrente, in scala doppiamente logaritmica, è quella riportata in figura 25: la zona indicata con A, corrisponde alla fascia di valori della corrente sufficientemente bassi da escludere l'intervento del relè; per sovracorrenti comprese nella fascia B interviene il relè termico: la pendenza negativa garantisce tempi di intervento inversamente proporzionali alla sovracorrente; il relè elettromagnetico, infine, interviene in tempi brevissimi per le correnti di cortocircuito della fascia C.

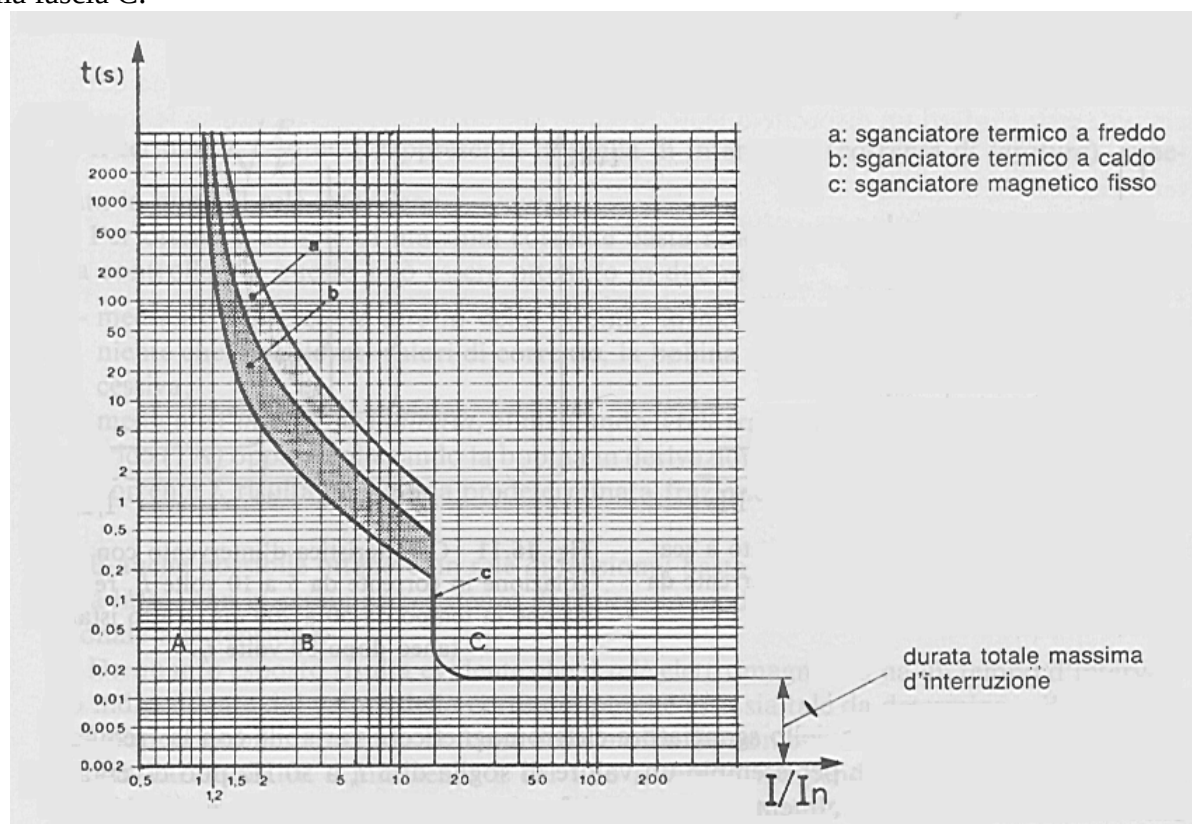


Fig. 25 - Caratteristica tempo-corrente di un relè magnetotermico.

L'ampia variabilità dei parametri di dimensionamento rende questo tipo di protezione estremamente adattabile ai casi specifici. La possibilità di regolare la soglia attiva allo sganciatore elettromagnetico ne aumenta, poi, la flessibilità d'uso. L'eventuale regolazione andrebbe, comunque, effettuata da parte di personale consapevole delle conseguenze finali sul piano del coordinamento complessivo delle protezioni.

Relè differenziale

La linea tratteggiata di figura 26 delimita i componenti che costituiscono lo schema di principio di un relè differenziale monofase. Intorno ad un nucleo magnetico toroidale vengono controavvolti due avvolgimenti di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione all'impedenza di carico Z_c . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi di induzione prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo.

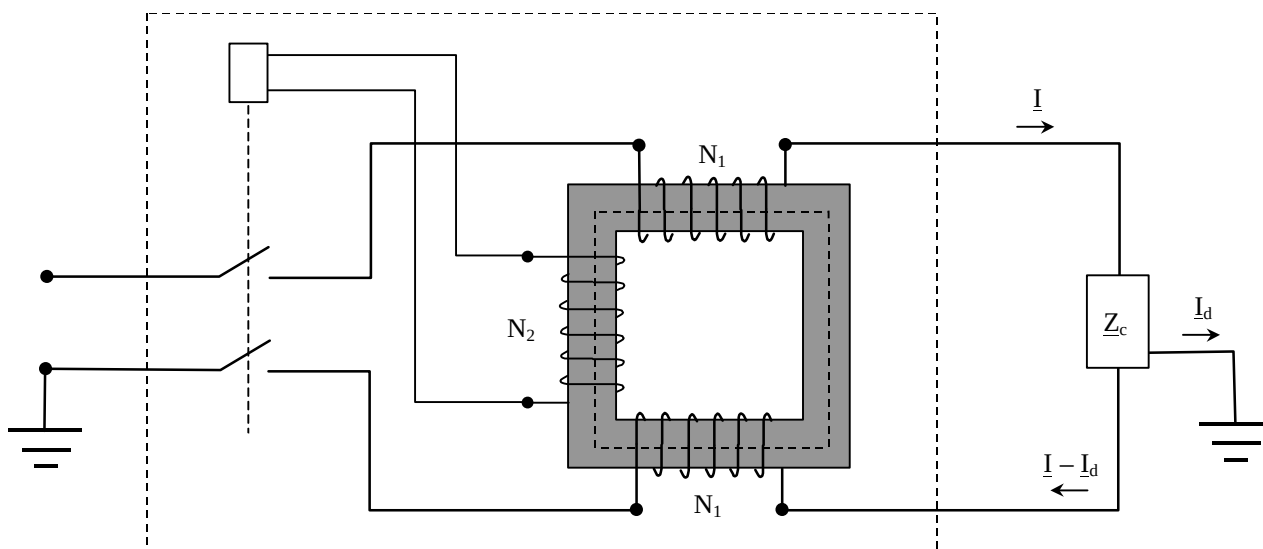


Fig. 26 - Schema di principio di relè differenziale monofase.

Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_d , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_d$, altera il precedente equilibrio fra i flussi di induzione: si manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una f.e.m. indotta e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione.

Questo dispositivo è caratterizzato da una corrente differenziale nominale di intervento (sensibilità nominale), definita come il valore minimo $I_{\Delta N}$ della differenza fra i valori efficaci delle correnti sufficiente a provocare l'apertura del circuito. Il relè differenziale avente una corrente nominale di intervento $I_{\Delta N} = 0.3 \text{ A}$, viene abitualmente impiegato per la protezione di motori o altre apparecchiature contro i "guasti a terra": quando, per la perdita di isolamento di un conduttore di alimentazione, la carcassa venga accidentalmente in tensione, la corrente dispersa a terra provoca l'intervento della protezione differenziale.

Come si vedrà in maggiore dettaglio nel capitolo sulla sicurezza elettrica, una maggiore sensibilità, $I_{\Delta N} < 0.03 \text{ A}$, rende questo dispositivo particolarmente idoneo a costituire l'unica forma di *protezione* attiva per la sicurezza personale contro i rischi della folgorazione.

La protezione descritta nello schema di figura 26 risulta utilizzabile esclusivamente in regime sinusoidale. Possono essere tuttavia concepite protezioni differenziali "magnetiche" anche in regime stazionario e dinamico.

ELEMENTI DI SICUREZZA ELETTRICA

Per una adeguata valutazione del rischio elettrico, si riportano alcuni dati statistici, relativi ad anni recenti:

1. Per *elettrocuzione* (o *folgorazione*) si verificano in Italia circa 400 infortuni mortali all'anno, circa il doppio della media europea;
2. circa il 5% degli incidenti elettrici finisce per avere esito mortale (30 volte di più rispetto agli incidenti non elettrici);
3. la maggior parte degli infortuni domestici ha luogo nel bagno;
4. circa il 15% degli incendi ha cause di natura elettrica.

Va aggiunto che in non pochi casi la causa "elettrica" di un decesso sfugge ad una pur accurata analisi autoptica per la mancanza di segni evidenti. Molto spesso inoltre la causa elettrica dell'infortunio è solo indiretta: l'operaio che lavora su una scala e tocca un filo elettrico attivo, anche se non subisce una scarica mortale, va incontro ad un grave infortunio se lo spavento provoca un movimento inconsulto che lo fa precipitare.

Condizione e modalità per il verificarsi di un infortunio elettrico possono essere estremamente variabili, in relazione ad una molteplicità di apparecchiature, di impianti e di condizioni di impiego. Anche se la legislazione ordinaria contiene esplicite disposizioni atte a favorire la sicurezza, la previsione del rischio e la formulazione di prescrizioni e misure atte a prevenire od a minimizzare il pericolo viene affidata ad appositi enti nazionali ed internazionali che provvedono ad emanare ed aggiornare periodicamente le Normative di Sicurezza. Nel caso dell'Italia tale attività viene svolta dal CEI. L'importanza delle Norme CEI viene adeguatamente evidenziata già dalla legge 1-3-1968 n.186, che impone di realizzare impianti ed apparecchiature elettriche "a regola d'arte" precisando poi che tale si considera ciò che soddisfa le Norme CEI. La legge 18-10-1977 n.791 estende tale concetto anche al settore della sicurezza, come ribadito anche dalla recente legge 5-3-1990 n.46. L'adeguamento alle norme CEI costituisce dunque una condizione sufficiente, anche se non necessaria, al soddisfacimento delle condizioni sulla esecuzione a regola d'arte e secondo criteri di sicurezza.

EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

Per comprendere gli effetti della corrente elettrica sul corpo umano, è bene ricordare che le cellule sono dotate di una membrana che presenta una permeabilità ionica di tipo selettivo, molto maggiore, ad esempio, per lo ione di potassio K^+ che non per lo ione sodio Na^+ . La base della "pompa chimica" cellulare è un meccanismo di espulsione degli ioni sodio e di assorbimento degli ioni potassio. Associato a questo tipo di dinamica ionica è definito il *potenziale di riposo* della cellula, legato alle concentrazioni ioniche riscontrabili: per una cellula nervosa, ad esempio, il potenziale di riposo è circa -70 mV, valutato come differenza di potenziale tra l'interno della cellula e l'esterno. L'applicazione, per un intervallo di tempo sufficientemente lungo, di una tensione esterna superiore ad un certo valore di soglia (*potenziale di azione*) può alterare le concentrazioni ioniche cellulari e lo stato di polarizzazione, inducendo uno stato di stimolazione. La rimozione della tensione esterna può permettere alla cellula di riportarsi allo stato primitivo in tempi più o meno brevi.

Il passaggio di una corrente elettrica nei tessuti umani ha effetti fisiologici largamente variabili, dipendenti dal valore della corrente, dalla sua frequenza, dalla durata del contatto, dalla sensibilità individuale e dalla zona del corpo in cui il fenomeno ha luogo. La *soglia di sensibilità* può variare da alcune decine di μA , per la lingua, a poco più di una decina di mA. L'influenza della durata del contatto viene descritta nella *curva di pericolosità corrente - tempo* di figura 27.a, ad andamento approssimativamente iperbolico.

Riguardo alla frequenza di variazione della corrente, va evidenziato come la corrente continua sia tendenzialmente meno pericolosa di quella alternata: il suo passaggio provoca, infatti, una contrazione muscolare seguita da una fase di rilascio. Ad ampiezze elevate, tuttavia, anche la corrente continua provoca fenomeni di paralisi: le variazioni di resistenza del corpo dovute, ad esempio, a bruciature che si estendono in maniera casuale, provocano fluttuazioni di corrente che determinano contrazioni muscolari.

In corrente alternata, il limite di pericolosità I_p viene legato alla durata della circolazione nei tessuti corporei dalla relazione:

$$I_p = 10 + \frac{10}{t}$$

dove la corrente I_p ed il tempo t sono espressi, rispettivamente, in mA ed in secondi.

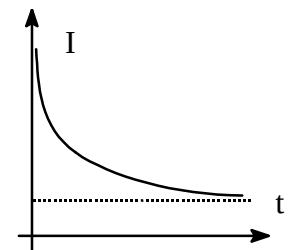


Figura 27.a

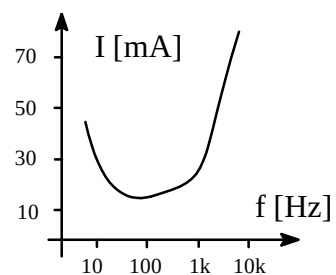


Figura 27.b

La curva (corrente di rilascio - frequenza) di figura 27.b, evidenzia un minimo (corrispondente ad un massimo di pericolosità) proprio al valore di 50 Hz, coincidente proprio con la frequenza industriale europea, per poi decrescere abbastanza nettamente al crescere della frequenza.

Il livello di pericolosità I_p della corrente ad alta frequenza ($f > 1 \text{ kHz}$) si ottiene moltiplicando per la frequenza (in kHz) la soglia definita per la frequenza industriale: $I_p < f I_{(50 \text{ Hz})}$.

Il limite di pericolosità per le correnti impulsive (di durata inferiore a 10 ms) viene invece riferito all'energia dissipata: $W_p < 50 \text{ J}$. (Si ricordi che l'energia media associata ad un fulmine si aggira intorno a 50 MJ.)

L'elettrocuzione risulta pericolosa a causa dei seguenti fenomeni fisiologici:

1. *Tetanizzazione*: a causa dello stimolo elettrico sulle singole cellule, si manifesta la contrazione di un intero fascio muscolare, con una sintomatologia non diversa da quella del tetano (da cui il nome). Particolarmente pericoloso un contatto in corrente alternata: i tessuti muscolari sono interessati da una serie di stimoli che si ripetono in maniera regolare determinando uno stato di contrazione permanente che impedisce all'infortunato di interrompere il contatto. La massima corrente che attraversi il corpo e consenta ancora di "lasciare la presa" viene definita *corrente di rilascio*.
2. *Blocco respiratorio*: per valori piuttosto elevati di corrente (che accentuano i sintomi di contrazione muscolare) e soprattutto se la zona interessata è quella toracica, comprendente i muscoli respiratori, si può subire un danno da paralisi respiratoria, causa di danni irreversibili al cervello se tale blocco supera i 2 ÷ 3 minuti. È questo tipo di fenomeno la causa del colorito cianotico che presentano le vittime dell'elettrocuzione.
3. *Fibrillazione ventricolare*: i disturbi legati a cause elettriche investono anche il muscolo cardiaco, regolato nel suo pulsare da stimoli elettrici. Se a questi si sovrappongono altri stimoli esterni, di intensità adeguatamente alta, si può pervenire ad una perdita completa di quel coordinamento che rende possibile l'attività cardiaca. A seguito di una stimolazione intensa ed incoerente, ciascuna delle fibre del ventricolo risulta soggetta a contrazioni disordinate, il cui persistere finisce per diventare letale.
4. *Ustioni*: bastano densità di corrente di pochi mA/mm^2 per qualche secondo per provocare ustioni apprezzabili, soprattutto sulle zone dotate di maggiore resistività, come la pelle. Oltre i 40 ÷ 50 mA/mm^2 si ha una carbonizzazione dei tessuti interessati, che, aumentando notevolmente la resistenza locale, può avere un effetto paradossalmente protettivo nei confronti di ulteriori più gravi danni.

La resistenza del corpo umano, che generalmente compete alla pelle, dipende dai seguenti parametri:

1. I *punti di ingresso e di uscita* della corrente: il valore più alto si raggiunge per il contatto fra le due mani e diminuisce del 25% fra una mano ed i due piedi e del 50% nel contatto fra le due mani ed i due piedi.
2. L'aumento della *pressione di contatto* fa diminuire la resistenza.
3. La resistenza è inversamente proporzionale alla *superficie di contatto*.
4. La resistenza tende a diminuire con la *durata del contatto*: solo una eventuale carbonizzazione da ustione ne provoca un aumento.
5. La consistenza e lo stato della pelle sono decisive: a tensione non superiore a 50 V, la resistenza corporea si riduce del 25% se la pelle è bagnata con acqua; la riduzione arriva al 50% se la pelle è bagnata con soluzioni conduttrici (come ad esempio molti detergenti).
6. La resistenza del corpo umano dipende in maniera inversa dalla *tensione applicata*. Una epidermide asciutta, soprattutto nelle zone callose, determina una resistenza di 10 ÷ 100 k Ω ad una ten-

sione di 50 V, che scende però ad appena 1 k Ω quando la tensione sale a 500 V. In caso di lesioni cutanee estese la resistenza scende fino a 500 Ω

L'International Electrotechnical Commission (IEC) (Publ. 364-4-41) ha individuato una curva di sicurezza, riportata nella figura 28, che fornisce, in corrispondenza ad ogni valore di tensione di contatto* (la curva si riferisce al valore efficace della tensione supposta in c.a.) il tempo massimo che un dispositivo di protezione può impiegare per interrompere il contatto stesso, affinché non vi sia pericolo per la persona soggetta al contatto. La curva mostra come tensioni aventi un valore efficace inferiore a 50 V possano permanere indefinitamente nel tempo senza provocare pericolo per le persone. Tale valore di tensione viene denominato tensione di contatto limite ed usualmente indicato con il simbolo U_L . In condizioni ambientali particolari (cantieri, locali agricoli, piscine) la tendenza normativa è di ridurre la tensione di contatto limite U_L a 25 V.

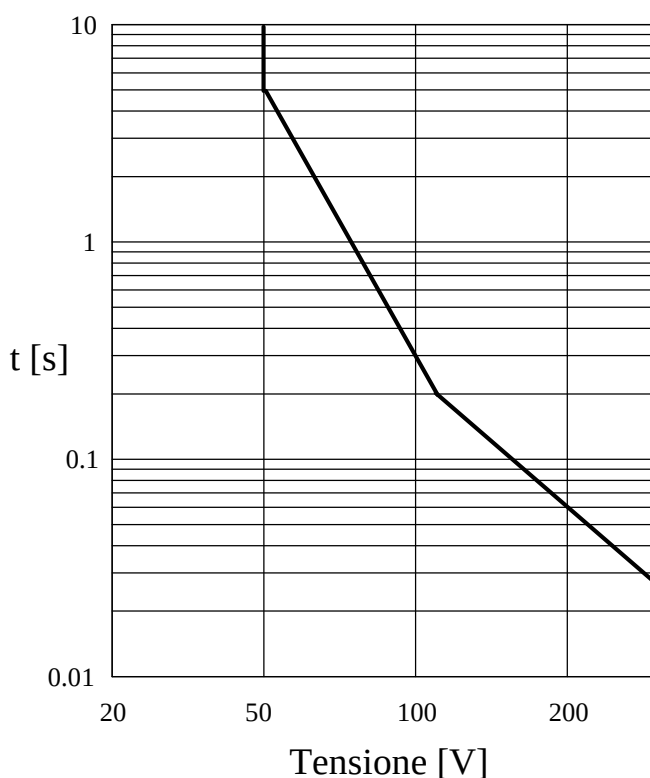


Figura 28

* Normalmente, dipendendo la tensione di contatto da fattori indipendenti dall'impianto, quali ad esempio la resistenza interna della persona soggetta al contatto ed il tipo di contatto tra la persona ed il terreno, si utilizza la tensione di contatto a vuoto, definita come la tensione esistente tra la massa ed il punto del terreno occupato dalla persona, prima che avvenga il contatto persona-massa. La tensione di contatto a vuoto, coincide quindi con la tensione di contatto solo nella ipotesi che la resistenza interna della persona sia infinita e quindi la persona non venga attraversata da alcuna corrente. La tensione di contatto effettiva, risulterà quindi sicuramente inferiore alla tensione di contatto a vuoto, essendo ridotta rispetto a questa, a causa della caduta di tensione tra i piedi della persona ed il terreno (vedi figura 33.b)

TIPI DI CONTATTO ED ISOLAMENTI

Gli incidenti di tipo elettrico vengono classificati in due categorie:

1. Un *contatto diretto* si verifica quando una o più parti del corpo vengono in tensione con parti di impianto elettrico normalmente in tensione (conduttore nudo, viti di fissaggio, morsettiera);
2. si parla invece di *contatto indiretto* quando la folgorazione è provocata dal contatto con ampie parti metalliche normalmente non in tensione (*massa*), che potrebbero però andare in tensione per un difetto di isolamento.

Gli isolamenti vengono classificati in quattro categorie:

1. *Isolamento principale* viene detto quello che avvolge i conduttori in tensione impedendo che vengano a contatto con il corpo umano (ad esempio la guaina di PVC dei cavi)
2. L'*isolamento funzionale* è costituito dai vari tipi di isolatori che, tenendo separati i conduttori fra loro e dalle carcasse metalliche, consente il funzionamento delle apparecchiature elettriche (ad esempio l'aria che separa i conduttori delle linee di alta tensione)
3. Un *isolamento supplementare* è quello che va ad aggiungersi al principale (ad esempio l'impugnatura isolante di uno strumento elettrico alimentato da cavi protetti da una loro guaina isolante). L'insieme dell'isolamento principale e di quello supplementare costituisce il *doppio isolamento*.
4. Un *isolamento rinforzato* è un isolamento unico che risponda alle sollecitazioni elettriche e meccaniche con lo stesso grado di affidabilità di un doppio isolamento.

PROTEZIONI DAL CONTATTO INDIRETTO

La misura di protezione più usuale contro i contatti indiretti è quella di collegare la massa dell'apparecchio a terra, tramite un apposito conduttore, che prende il nome di conduttore di protezione. I requisiti della protezione dipendono dal tipo di sistema elettrico di alimentazione, ma in ogni caso si deve garantire l'*interruzione automatica del circuito* in caso di pericolo per le persone. I dispositivi di interruzione automatica del circuito devono intervenire in un tempo tanto più breve quanto maggiore è la tensione sulle masse, secondo la curva di sicurezza. Un apparecchio, destinato ad essere protetto mediante interruzione automatica del circuito, è dotato di isolamento principale e la massa è munita di un morsetto dove collegare il conduttore di protezione; esso viene denominato *apparecchio di classe I*.

Non è necessario prevedere l'interruzione del circuito in ognuno dei seguenti casi (misure di protezione passive contro i contatti indiretti):

1. *Impiego di apparecchi con isolamento doppio o rinforzato*: In caso di cedimento dell'isolamento principale la persona è protetta dall'isolamento supplementare. Un apparecchio con isolamento doppio o rinforzato è denominato *apparecchio di classe II*.
2. *Bassissima tensione di sicurezza*: L'apparecchio è alimentato da un sistema elettrico a tensione non superiore ai limiti di sicurezza, e sono presi provvedimenti affinché tali limiti non vengano superati. Non occorrono misure di protezione sull'apparecchio contro i contatti indiretti, perché esse sono già insite nel sistema elettrico di alimentazione. Un apparecchio destinato ed essere alimentato a bassissima tensione di sicurezza è denominato *apparecchio di classe III*.
3. *Locali isolanti*: L'apparecchio è utilizzato in un ambiente isolato da terra e senza masse estranee. Un locale viene considerato completamente isolato da terra quando pareti e pavimento presentano una resistenza verso terra superiore a 50 k Ω per tensioni nominali fino a 500 V e di almeno 100 k Ω per tensioni oltre 500 V. All'interno di un locale isolante è vietata l'installazione di prese a spina: le apparecchiature devono essere alimentate con collegamenti fissi. Per prevenire la possibilità di toccare simultaneamente due masse, la distanza minima tra due masse contigue deve

essere superiore a 2 m, se a portata di mano, oppure a 1.25 m se posto dietro un ostacolo di protezione. L'impiego di locali isolanti, escluso per gli ambienti civili, è riservato ad ambienti con funzioni particolari (ad esempio i centri di calcolo elettronico). Un apparecchio con isolamento principale e senza morsetto di terra è denominato *apparecchio di classe 0*.

4. *Separazione dei circuiti*: L'apparecchio è alimentato da una sorgente autonoma o dalla rete di distribuzione tramite un trasformatore che ha il compito di isolare il circuito secondario dagli altri circuiti e da terra (trasformatore di isolamento o separatore). Se il circuito secondario è poco esteso, in modo che le correnti capacitive siano trascurabili, un guasto d'isolamento verso massa non è pericoloso per le persone.
5. *Locali equipotenziali*: Una condizione di assoluta sicurezza viene raggiunta quando tutte le masse presenti nel locale sono rese equipotenziali mediante il collegamento con opportuni conduttori alla superficie metallica che racchiude e rende equipotenziale l'intero ambiente. Qualunque collegamento a terra va accuratamente evitato. Tale sistema non è consentito negli ambienti civili.

IMPIANTO DI TERRA

1. Con il termine *terra* si indica la massa del terreno assunta convenzionalmente a potenziale nullo ovunque.
2. Un *dispersore di terra* è un corpo metallico posto ad una certa profondità nel terreno, in buon contatto con questo e destinato a disperdere eventuali correnti.
3. Il *conduttore di terra* provvede a realizzare il collegamento fra le parti da proteggere ed il dispersore di terra.
4. Un *impianto di terra* è costituito dall'insieme dei dispersori e dei conduttori di terra.

Al fine di chiarire quanto definito sopra, si consideri un dispersore emisferico (vedi figura 29) di raggio R_0 che disperda in un terreno omogeneo, di conducibilità σ , una corrente I . A causa della caduta di tensione lungo il terreno, la tensione misurabile tra l'elettrodo ed i punti del terreno aumenta con la distanza r , in tutte le direzioni radiali. Per punti infinitamente lontani la differenza di potenziale tra l'elettrodo ed il terreno è massima

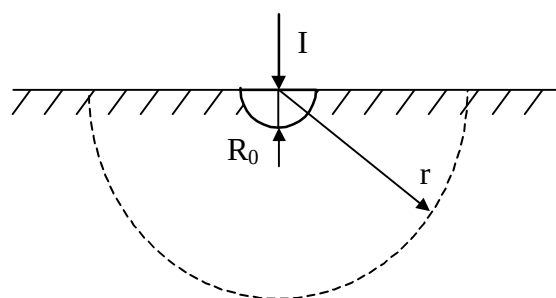


Fig. 29. – Dispersore di terra emisferico.

È possibile dimostrare che, nel caso ideale considerato, la legge di variazione del potenziale è espressa da* :

* A tale scopo è sufficiente notare la similarità fra il regime elettrodinamico stazionario ed il regime elettrostatico (si consideri la figura 28 simmetrica rispetto al piano di terra).

Si consideri una sfera metallica di raggio R_0 e superficie S , posta nell'origine ed immersa in un mezzo lineare, omogeneo, isotropo ed infinito con costante dielettrica ϵ . Le equazioni da risolvere per il regime elettrostatico sono:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

Il problema è completamente definito imponendo le condizioni di annullamento all'infinito per il potenziale e per il campo elettrico e la carica sulla sfera:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS = Q$$

Si consideri un dispersore sferico di raggio R_0 e superficie S , posto nell'origine ed immerso in un mezzo lineare, omogeneo, isotropo ed infinito a conducibilità σ . Le equazioni da risolvere per il regime elettrodinamico stazionario sono:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

Il problema è completamente definito imponendo le condizioni di annullamento all'infinito per il potenziale e per il campo elettrico e la corrente uscente dal dispersore:

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = 2I$$

Poiché i problemi sono impostati in maniera matematicamente equivalente, si possono definire le seguenti equivalenze: $\mathbf{J} \Leftrightarrow \mathbf{D}$, $\sigma \Leftrightarrow \epsilon$. La soluzione per il potenziale v , definito dalla relazione $\mathbf{E} = -\nabla v$, è nota. Si ha dunque:

$$v(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|}$$

Si è assunto pari a zero il potenziale dei punti infinitamente lontani dal dispersore, come usuale. Questo punto convenzionale, in pratica abbastanza lontano da poterne trascurare il potenziale, costituisce una *terra di riferimento a potenziale zero*. Su tutti i punti della superficie del dispersore, ponendo $r = R_0$, il valore del potenziale è:

$$V_t = \frac{I}{2\pi\sigma R_0}$$

Tale tensione V_t è detta *tensione totale di terra* e rappresenta la differenza di potenziale tra l'elettrodo ed il punto a potenziale zero. La *resistenza totale di terra* si calcola quindi eseguendo il rapporto:

$$R_t = \frac{V_t}{I} = \frac{1}{2\pi\sigma R_0}$$

Il dispersore di terra risulta quindi rappresentabile con lo schema elettrico illustrato in figura 30, dove E indica l'elettrodo e TO il punto di terra a potenziale zero. Questo consente di conglobare nella resistenza R_t tutta l'opposizione incontrata dalla corrente I dispersa a terra.

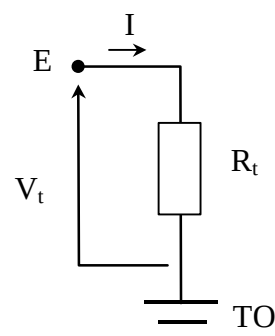


Fig. 30. – Schema elettrico equivalente del dispersore di terra.

In linea di principio, qualunque oggetto metallico che risulti posto in intimo contatto con il terreno può essere considerato un dispersore. Le Norme forniscono prescrizioni relative a qualità e dimensioni dei dispersori. Il materiale costitutivo deve essere tale da impedire un facile deterioramento dovuto all'umidità (la corrosione è responsabile di un aumento della resistenza di terra). I metalli comunemente impiegati sono il rame, l'acciaio rivestito di rame e i materiali ferrosi a pesante zincatura.

La resistenza di terra dipende dalla resistività del terreno entro il quale è immerso il dispersore e dalle sue dimensioni; per tre casi comuni, si ottengono valori ben approssimati con le seguenti formule empiriche, con le dimensioni in metri e la resistività ρ in $\Omega\cdot\text{m}$:

Tipo di dispersore	Resistenza di terra
▪ a picchetto (di lunghezza L)	$R_t = \rho/L$
▪ ad anello orizzontale (di perimetro P)	$R_t = 2 \rho/P$
▪ a maglia (L = somma di tutti i lati)	$R_t = \rho/L$

La conduzione entro il terreno costituisce un fenomeno di natura essenzialmente elettrolitica: ciò spiega la sensibile dipendenza della sua resistività dalla presenza di acqua nei vari tipi di terreni. Si fornisce di seguito una tabella delle resistività dei terreni più comuni.

Mezzo disperdente	ρ [$\Omega\cdot\text{m}$]
sabbia marina	0.3÷3
acqua marina	1
argille, marne umide	30÷150
acqua dolce	50÷100
torba (o sabbia) umida	200÷300
granito, basalto, calcestruzzo	1000÷3000
sabbia secca	

$$v(\mathbf{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|}, \text{ per } \|\mathbf{r}\| > R_0$$

$$v(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|}, \text{ per } \|\mathbf{r}\| > R_0$$

Un metodo efficace per abbassare, anche di molto, la resistenza di terra consiste nel sostituire il terreno tutt'intorno al dispersore con grafite, torba, argilla o altro materiale a bassa resistività. L'operazione, compiuta durante la fase di installazione del dispersore, ha lo scopo di migliorare le condizioni di conducibilità nella zona immediatamente circostante il dispersore: è proprio questa zona, infatti, a fornire il maggior contributo nel calcolo della resistenza complessiva di terra. Un altro metodo consiste nel disporre una molteplicità di dispersori reciprocamente collegati, a costituire una efficace maglia di protezione il cui perimetro segue, con buona approssimazione, quello dell'edificio protetto.

LE RETI DI DISTRIBUZIONE E IL COLLEGAMENTO A TERRA

I sistemi elettrici di categoria 0 e 1 vengono classificati sulla base del collegamento a terra ed identificati mediante una sigla di due lettere che si riferiscono, rispettivamente, allo stato del neutro e delle masse:

Prima lettera $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{T} : \text{neutro collegato a terra direttamente o tramite impedenza trascurabile} \\ \mathbf{I} : \text{neutro isolato da terra (o collegato con impedenza)} \end{array} \right.$

Seconda lettera $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{T} : \text{masse collegate direttamente a terra} \\ \mathbf{N} : \text{masse collegate al punto del sistema connesso a terra (generalmente il neutro)} \end{array} \right.$

- Nei sistemi **TT** il neutro e le masse sono collegati a terra, ciascuno con un suo impianto di terra autonomo (vedi figura 31).

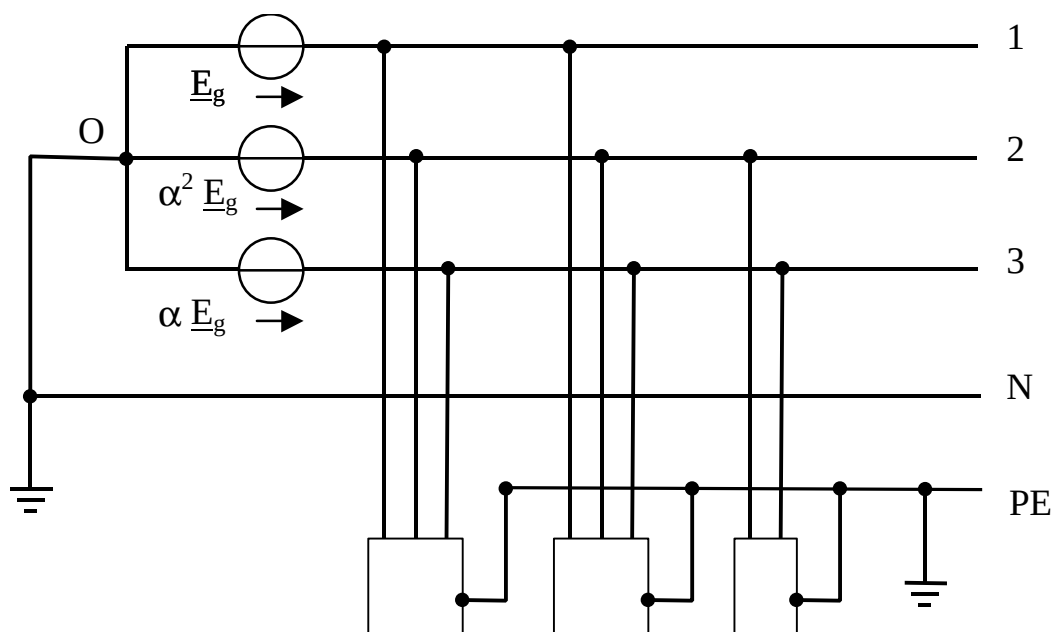


Fig. 31 – Schema di sistema TT.

- I sistemi **TN**, con il neutro collegato direttamente a terra (vedi figura 32), si diversificano, inoltre, in
 - sistema **TN-C**, nel quale le masse sono direttamente collegate al conduttore di neutro (PEN) 5
 - sistema **TN-S**, nel quale ciascuna delle masse è collegata al neutro mediante un proprio conduttore di protezione (PE).

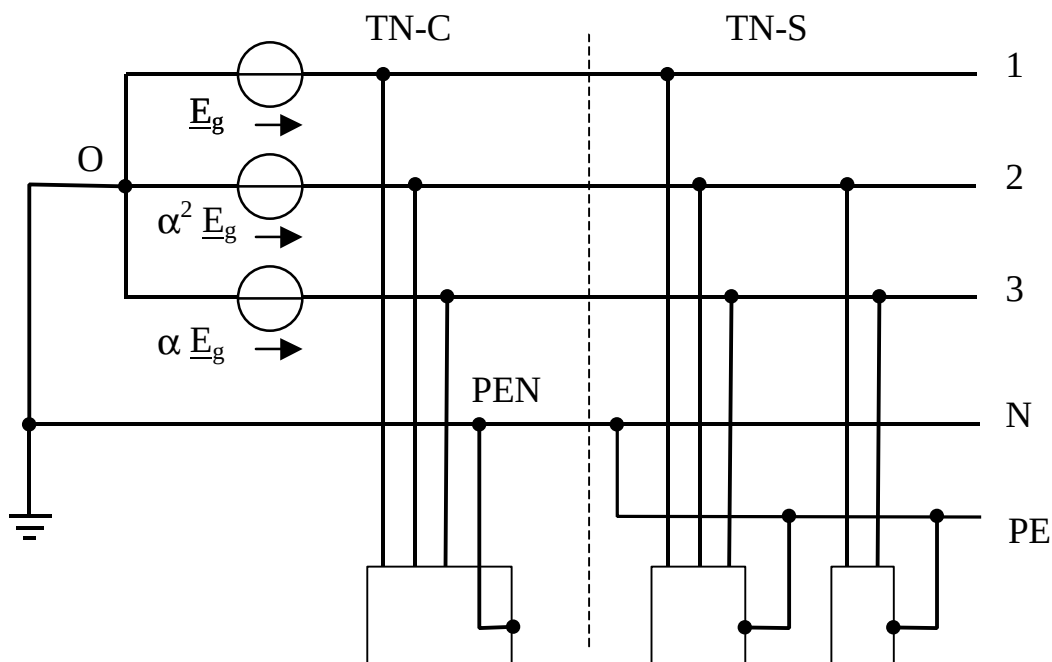


Fig. 32 – Schemi dei sistemi TN-C e TN-S.

- Nei sistemi **IT** le parti elettriche attive sono isolate da terra o sono collegate a terra tramite una impedenza non trascurabile; le masse sono poste a terra ciascuna con un proprio conduttore di protezione (PE) (vedi figura 33).

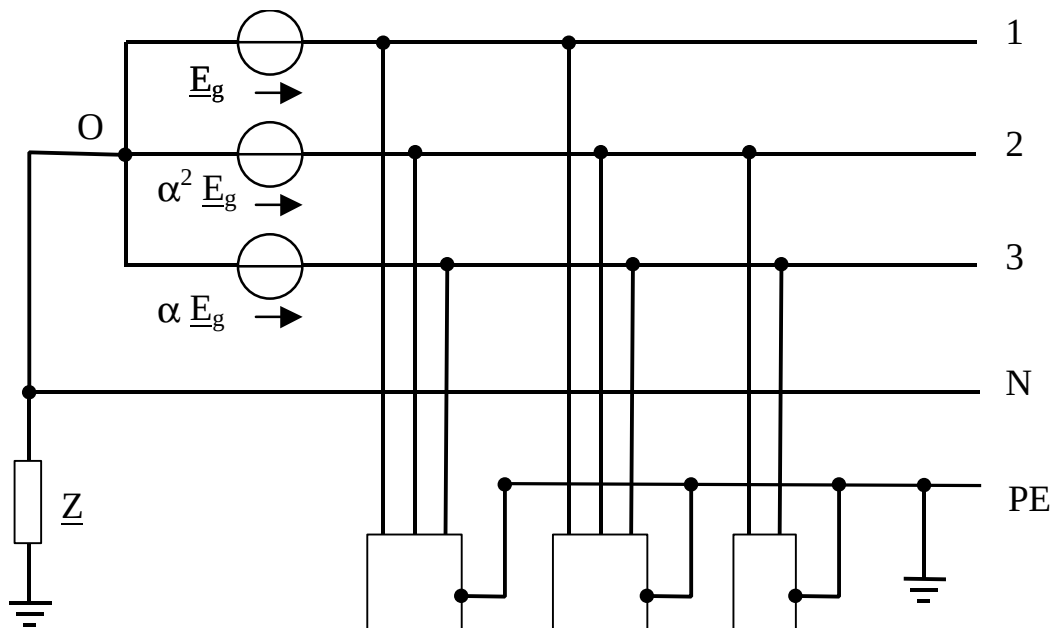


Fig. 33 – Schema di sistema IT.

La scelta tra i sistemi descritti è legata a valutazioni di duplice natura.

- Se si assume come criterio la continuità di esercizio, occorre considerare l'effetto di un guasto a terra. Nel caso di un sistema con neutro a terra (ad esempio TN) è da prevedere una corrente di guasto molto elevata, limitata solo dalla impedenza (generalmente modesta) della sezione di rete entro la quale essa circola (anello di guasto): l'intervento delle protezioni ha la sgradevole conseguenza di interrompere la fornitura di energia, anche se consente una pronta individuazione della condizione di guasto. Il sistema IT è, invece, intrinsecamente immune dall'inconveniente descritto.

- Se si assume come criterio la sicurezza, si ottengono conclusioni diverse. Infatti la Norma CEI 64-8, prevede che le reti di bassa tensione siano del tipo TT o TN. In questo modo il collegamento del neutro a terra vincola la tensione verso terra di ogni conduttore di linea ad essere $1/\sqrt{3}$ della tensione concatenata: anche nel caso di cortocircuito a terra di una delle fasi, lo squilibrio risultante ha effetti limitati (il centro stella si sposta in uno dei vertici del triangolo delle concatenate e le due tensioni stellate residue non possono superare il valore della concatenata).

Si consideri un sistema in bassa tensione del tipo TT. Tale sistema è l'unico consentito dalla norma CEI 64-8, nel caso in cui l'utilizzatore della energia elettrica sia diverso dal distributore della stessa. E' il caso quindi di tutti gli ambienti domestici. Si consideri ora il caso (vedi figura 34.a) di una persona che tocca una massa collegata ad un dispersore di terra nel momento in cui si disperde una corrente I . Nell'ipotesi di trascurare tutti i parametri non resistivi, si può valutare la corrente che attraversa l'infortunato dall'analisi del circuito elettrico della corrente di guasto mostrato nella figura 34b, dove R_c è la resistenza del corpo umano, R_{ct} è la resistenza tra corpo e terra (calze, scarpe, pavimento), R_n la resistenza di terra del dispersore di terra del neutro, E la tensione principale di fase (220 V per il sistema di distribuzione in bassa tensione adottato in Europa).

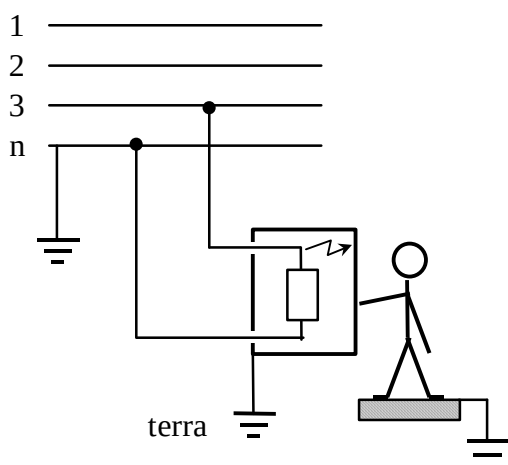


Fig. 34.a

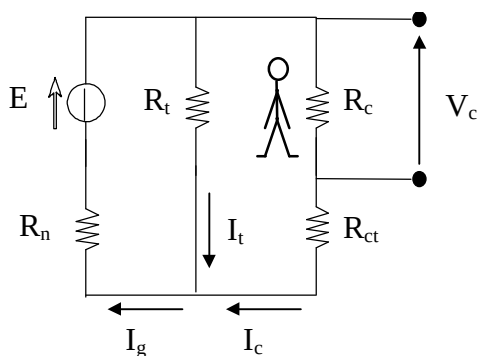


Fig. 34.b

E' immediato notare che, in assenza dell'impianto di terra, la tensione di contatto a vuoto risulta essere pari alla tensione E e quindi superiore al valore limite previsto dalla curva di sicurezza (50 V). In presenza dell'impianto di terra, il valore della tensione di contatto a vuoto risulta:

$$V_{c0} = \frac{R_T}{R_T + R_N} E$$

Per ogni valore della resistenza di terra del neutro (R_N) è quindi possibile determinare il valore della resistenza di terra (R_T) che rende la tensione di contatto a vuoto (V_{c0}) inferiore alla tensione limite U_L . Il valore di R_T che si ottiene risulta però estremamente basso e quindi di difficile realizzazione. La norma CEI 64-8 prevede quindi che la protezione dal contatto indiretto venga raggiunta mediante l'introduzione di un interruttore differenziale avente una opportuna corrente di intervento ($I_{\Delta N}$). La caratteristica di intervento dell'interruttore differenziale permette di soddisfare la curva di sicurezza ogni qualvolta la corrente di guasto superi il valore di intervento dell'interruttore stesso. Al fine di assicurare la protezione anche nel caso in cui la corrente di guasto risulti inferiore

a quella di intervento dell'interruttore differenziale, è necessario che la resistenza di terra abbia un valore sufficientemente piccolo, calcolabile dalla seguente relazione:

$$R_T \leq \frac{U_L}{I_{\Delta N}}$$

La tabella seguente, nella quale si è fatto riferimento ad alcuni dei valori più comuni della corrente di intervento dell'interruttore differenziale (sensibilità), mostra come una efficace protezione possa essere raggiunta anche con valori abbastanza elevati della resistenza di terra: il valore di R_T richiesto quando $I_{\Delta N}$ è di 30 mA è di 1667 Ω , valore facilmente realizzabile.

$I_{\Delta N}$ [A]	10	5	1	0.5	0.3	0.1	0.03	0.01
R_t [Ω]	5	10	50	100	167	500	1667	5000

L'efficienza dell'interruttore differenziale ad alta sensibilità come elemento di sicurezza personale giustifica il nome di *salvavita* con il quale viene comunemente indicato: i valori più comuni per $I_{\Delta N}$ sono di 10 e 30 mA, espressamente previsti da decreti e capitolati.

UN CASO PERICOLOSO

Nel caso di un impianto di terra comune a più utenze, va segnalato per una pericolosità potenzialmente elevata il caso in cui anche una sola delle utenze non sia dotata di protezione differenziale. Facendo riferimento, infatti, alla figura 35, si supponga che tutti i carichi siano provvisti di relè differenziale con la usuale alta sensibilità nominale $I_{\Delta N} = 30$ mA, con la sola eccezione del carico 1, protetto soltanto da un interruttore automatico magnetotermico con $I_n = 32$ A e $I_{5s} = 3 I_n = 96$ A.

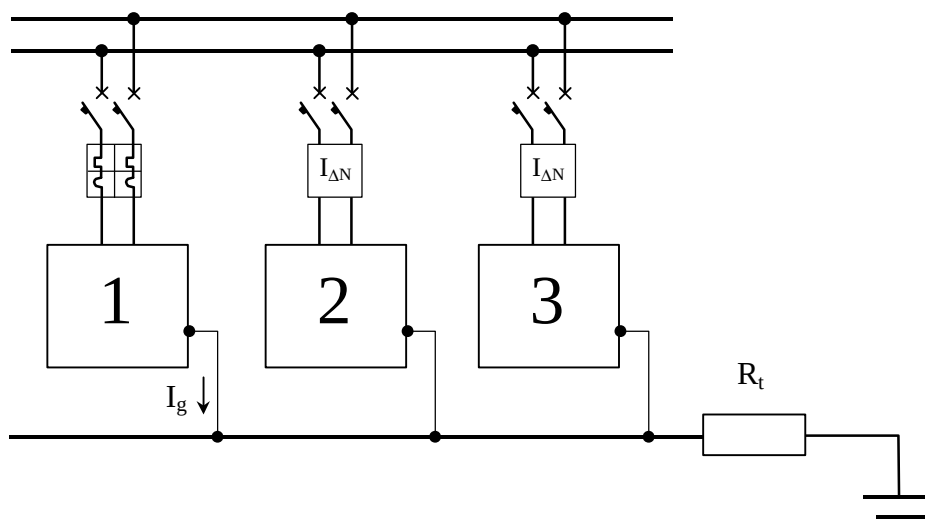


Fig. 35

Le norme di sicurezza vengono soddisfatte con una resistenza di terra $R_t < 50 / I_{5s} \approx 0.52$ Ω , un valore estremamente basso che ripropone le stesse difficoltà già segnalate in precedenza e che finiscono per rendere praticamente necessaria l'integrazione con le protezioni differenziali. Nel caso piuttosto comune di valori consistentemente più elevati, intorno a 10÷20 Ω , possono instaurarsi tensioni di contatto decisamente pericolose: la presenza di un salvavita nei rimanenti appartamenti viene così completamente vanificata e rischia, anzi, di indurre soltanto un mal riposto senso di sicurezza.

Tale situazione, estremamente diffusa nei condomini, dovrebbe essere sanata con la definitiva applicazione della legge 46/90, contenente Norme per la sicurezza degli impianti, tra le quali l'obbligo di installazione generalizzata della protezione differenziale con $I_{\Delta N} < 30 \text{ mA}$.

PROTEZIONI DAL CONTATTO DIRETTO

Le prescrizioni delle Norme sono di tipo essenzialmente passivo, intese soprattutto ad evitare che si verifichi il contatto diretto di persone con parti di impianto normalmente in tensione. A tale scopo occorre adottare misure di protezione totale nei luoghi accessibili a persone non consapevoli del rischio elettrico. Gli isolamenti impiegati devono soddisfare alle specifiche elettriche e meccaniche. In particolare, tutte le parti attive devono essere contenute entro involucri capaci di garantire una protezione totale in tutte le direzioni. Ove questo non sia possibile, occorre che siano rese inaccessibili con sbarramenti adeguati. Eventuali eccezioni riguardano apparecchi o parti di apparecchi che, per la loro specifica natura, non possono essere protetti nella maniera descritta (ad esempio la parte metallica di un portalampada). Le Norme ammettono l'apertura degli involucri isolanti, per ragioni di esercizio o di manutenzione, a patto che sia rispettata una delle seguenti condizioni:

- richieda l'uso di uno specifico attrezzo,
- richieda l'uso di una chiave, affidata, in un numero limitato di copie, a personale specializzato,
- determini la sconnessione automatica dalla rete delle parti in tensione (interblocco), con il ripristino dell'alimentazione reso possibile solo dopo la richiusura dell'involucro,
- l'apertura dell'involucro determini l'interposizione di una barriera intermedia supplementare, rimossa automaticamente solo dopo il ripristino delle condizioni di sicurezza precedenti.

Le misure di *protezione parziale* hanno lo scopo di prevenire solo i contatti accidentali e risultano del tutto inefficaci contro la maggior parte dei contatti intenzionali. Impiegate in locali accessibili solo al personale specializzato, consistono in ostacoli strategicamente disposti e nell'opportuno distanziamento delle parti in tensione e delle masse. Per gli ostacoli viene ammessa la possibilità di rimozione volontaria senza bisogno di speciali attrezzi. Il distanziamento è finalizzato a rendere impossibile l'accesso simultaneo a parti a tensione diversa. Il rispetto di questo obbligo si traduce nella definizione di un *volume di accessibilità* che ponga le parti in tensione fuori dalla "portata di mano" di operatori anche addestrati.

L'interruttore differenziale ad alta ($I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$) o ad altissima sensibilità ($I_{\Delta N} = 10 \text{ mA}$) costituisce l'unica forma di protezione attiva contro il contatto diretto. Tuttavia, il salvavita può risultare del tutto inefficace nel caso di contatto diretto bipolare. Nel caso il corpo umano sia isolato da terra, la protezione non interviene affatto, dal momento che non viene dispersa a terra nessuna corrente. Leggermente meno pericoloso il contatto bipolare se il corpo ha un contatto a terra: pur circolando nel corpo una corrente eventualmente letale, una aliquota di corrente dispersa può provocare l'intervento dell'interruttore differenziale in un tempo sufficientemente breve.

ULTERIORI MISURE DI SICUREZZA

L'elettricità statica

Tra le molte modalità di formazione e accumulo delle cariche statiche, quella certamente più comune è legata allo sfregamento (*triboelettricità*): se almeno uno dei corpi in contatto non è un buon conduttore, la carica netta, creata per separazione, non viene neutralizzata e può accumularsi in misura dipendente, tra l'altro, dalla resistività del corpo e dalla sua costante dielettrica, dalla temperatura e dal grado di umidità, dalla pressione e dalla velocità di strofinio. Si possono raggiungere, così, densità superficiali dell'ordine di qualche nC/cm². Un accumulo di cariche statiche si verifica, tipicamente, sulla vernice della carrozzeria delle automobili per strofinio con l'aria asciutta a velocità elevate o, ancora, in un liquido che scorre entro un tubo.

Salvo casi eccezionali, l'elettricità statica non costituisce, di per sé, pericolo per la incolumità personale: la corrente impulsiva che ha luogo quando le cariche si scaricano a terra attraverso il corpo provoca poco più di una sensazione sgradevole. Un pericolo indiretto per chi si trovi in posizione di equilibrio precario è rappresentato da eventuali cadute derivanti da movimenti inconsulti. Nel caso, però, che il campo elettrico creato dalle cariche statiche superi la rigidità dielettrica dell'aria (intorno ai 30 kV/cm), si può arrivare ad una vera e propria scarica che, se dotata di sufficiente energia, può innescare un'esplosione in opportune miscele di gas o di polveri.

La prevenzione dei rischi derivanti dalla elettricità statica consiste essenzialmente in un insieme di provvedimenti intesi a:

- a) limitare l'accumulo delle cariche, riducendo velocità, superficie e pressione di contatto di sfregamento, e/o modificando con opportuni additivi le caratteristiche fisiche (resistività e costante dielettrica) dei materiali coinvolti;
- b) scaricare a terra le cariche accumulate con opportuni collegamenti con impianti di terra;
- c) neutralizzare le cariche accumulate mediante un campo elettrico di segno e intensità idonei o mediante radiazioni ionizzanti (purché non pericolose a loro volta).

I gruppi di continuità

Diversamente dai casi fin qui presi in esame, occorre aggiungere che, in non pochi, casi, il pericolo è costituito da una interruzione più o meno prolungata di energia elettrica (sale chirurgiche, elaborazione dati, controllo di processo, ecc.). Il mantenimento dell'alimentazione è reso possibile dalla utilizzazione dei cosiddetti gruppi di continuità, capaci di alimentare un carico quando risulti interrotta la fornitura di energia dalla rete pubblica. I gruppi di continuità possono essere classificati in due diverse categorie.

- I gruppi con generatori rotanti sono costituiti da un motore primo (un motore a. scoppio o una turbina) che fornisce energia meccanica ad un alternatore la cui tensione di uscita risulta approssimativamente pari a quella di rete. Opportuni sistemi di regolazione stabilizzano il valore efficace della tensione. Il difetto principale di questo sistema è nella lentezza di avvio, tale da lasciare il carico privo di alimentazione per un lasso di tempo piuttosto lungo. L'adozione di grossi motori e potenti alternatori consente, tuttavia, l'erogazione delle notevoli potenze richieste dai carichi più impegnativi.
- I gruppi di continuità di tipo statico sono composti da una batteria di accumulatori che vengono tenuti permanentemente carichi per mezzo di un alimentatore a trasformatore e diodi. L'energia accumulata viene trasferita al carico attraverso un convertitore (inverter) che trasforma la tensione continua in tensione alternata di valore efficace pari a quello di rete.