

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.

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 nei 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, e le emissioni di CO₂ in atmosfera.

- *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 rappresenta una delle fonte energetiche alternative 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; 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.

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 ad 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.

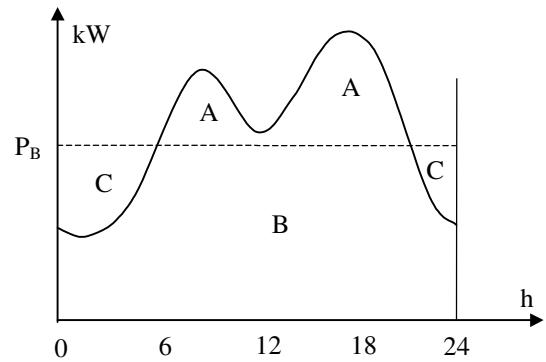


Fig. 1. – Esempio di diagramma di carico giornaliero. Sono evidenziate: le punte di carico (A), il carico base (B) e le eccedenze (C).

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.

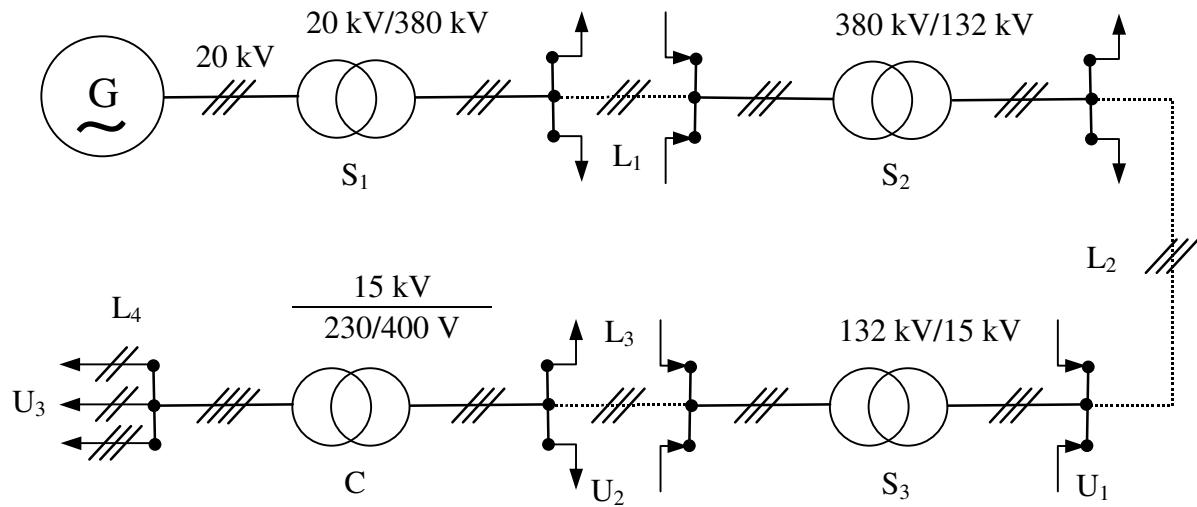


Fig. 2. – Schematizzazione di un sistema elettrico di potenza.

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

- *Produzione* di energia elettrica mediante centrali di varo 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.

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*.

CENNI COSTRUTTIVI

Le linee elettriche atte al trasporto dell'energia si suddividono generalmente in "linee aeree" e "linee in cavo". Le linee aeree sono realizzate, generalmente, con conduttori nudi che si appoggiano a sostegni (pali in legno o in cemento armato, pali in acciaio tubolari, tralicci in acciaio) con l'intermediario di elementi isolanti (isolatori). L'isolamento tra i conduttori è assicurato dall'aria, mentre quello tra i conduttori e la terra è assicurato dagli isolatori. Le linee in cavo sono costituite da conduttori isolati tra loro e verso massa mediante appositi materiali isolanti (gomma, olio, carta impregnata, materiali termoplastici), in modo che le distanze tra i conduttori e tra questi e la massa risultano notevolmente ridotte rispetto al caso delle linee aeree.

Linee aeree

Alcuni esempi di tralicci 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. Il filo (conduttore pieno) è un unico filo metallico a sezione normalmente circolare; la corda (conduttore a treccia) è invece costituita da più fili elementari di piccola sezione intrecciati tra loro. In generale i conduttori sono caratterizzati da determinate sezioni commerciali (in mm^2) ognuna con particolari caratteristiche (peso e resistenza elettrica per unità di lunghezza, carico di rottura, ecc.). Per le medie e basse tensioni si utilizzano anche conduttori in alluminio puro o in lega di alluminio (Aldrey). 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. In casi particolari si impiegano conduttori in filo di rame con anima d'acciaio: ciò quando la sezione occorrente dal punto di vista elettrico sarebbe assai più piccola della minima richiesta per resistere alle sollecitazioni meccaniche. Si tenga infatti presente che il conduttore in opera deve resistere in sicurezza a diverse sollecitazioni, come quella causata dal peso proprio, dall'azione del vento e dal peso dei manicotti di ghiaccio nella stagione invernale.

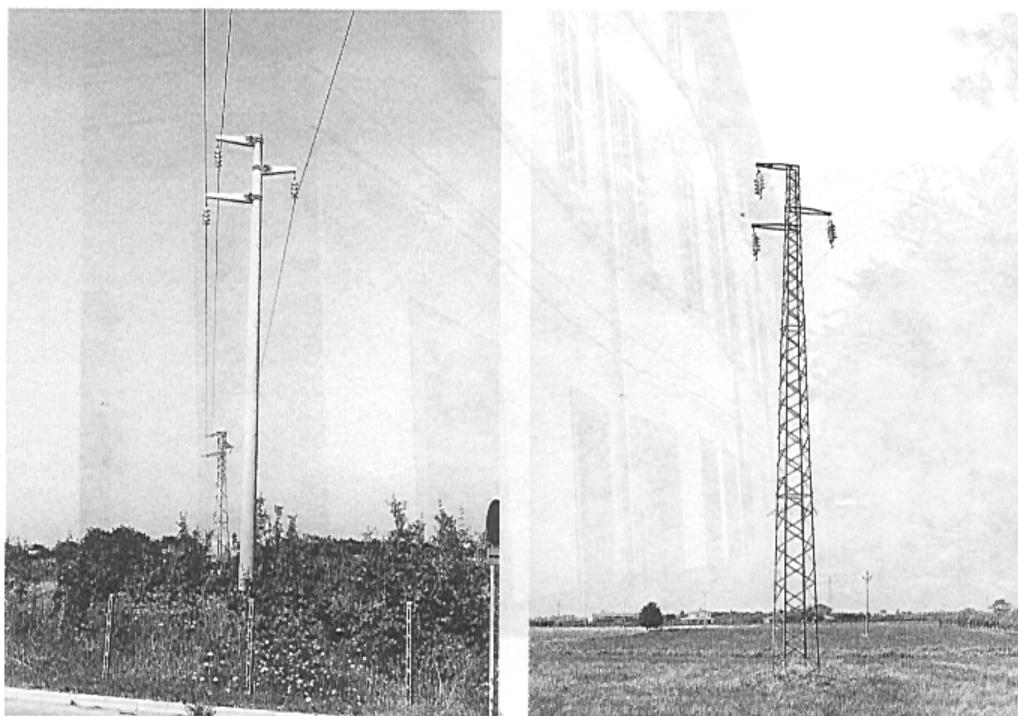


Fig. 4. – Tralicci a terna semplice per BT.

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 *alumoweld*, un conduttore con anima in acciaio e strato esterno in alluminio.

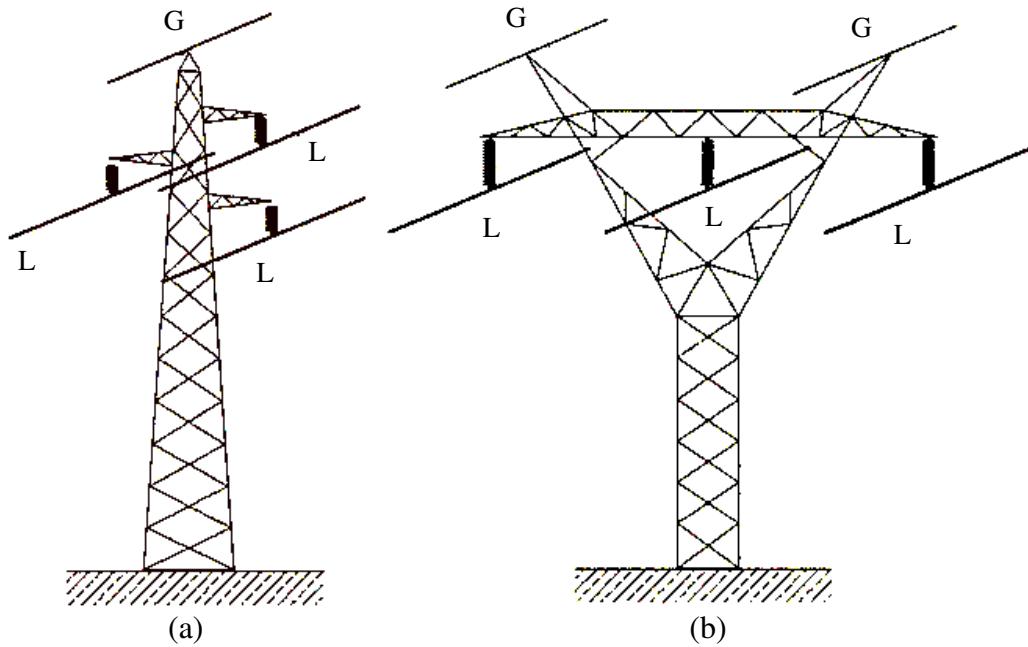


Fig. 5. – Tralicci per MT (a) ed AT (b).

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.

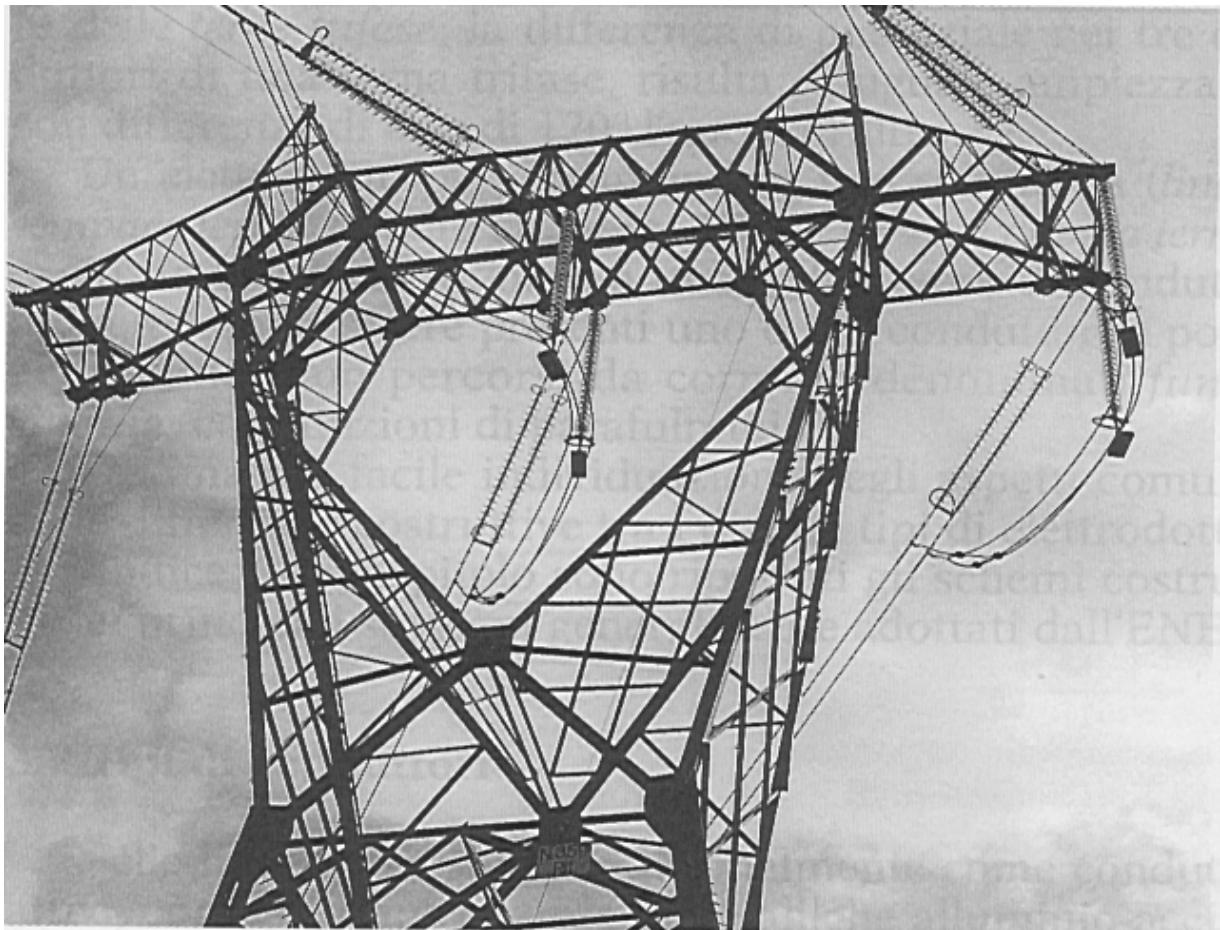


Fig. 6. – Traliccio per AT: si noti il conduttore multiplo a fascio triplo.

L'impiego di conduttori nudi comporta la necessità di provvedere ad un loro adeguato isolamento dai supporti (tralicci), interponendo opportuni isolatori costruiti generalmente 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).

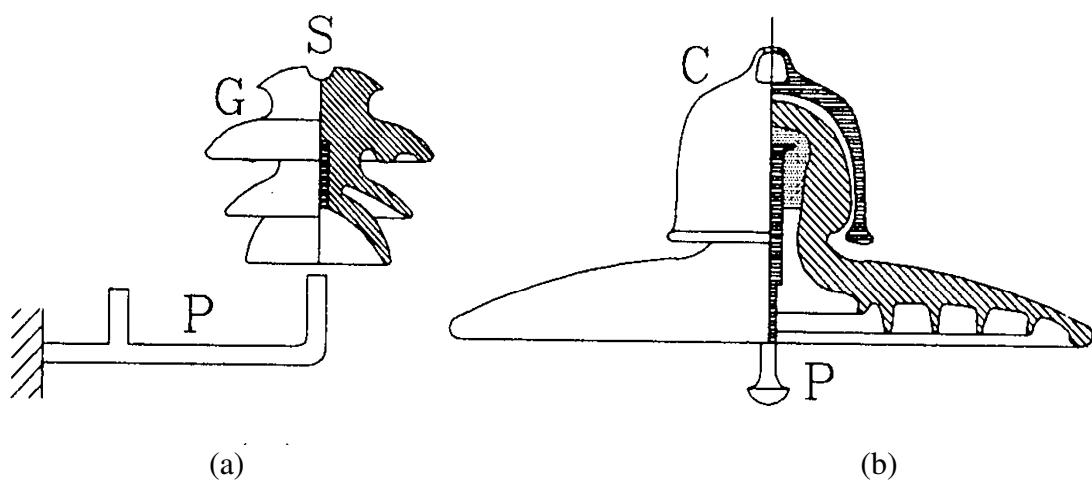


Fig. 7. – Elementi di isolatore per esterni.

Le sezioni dei due tra i tipi più diffusi di isolatori per esterno sono riportate in figura 7.

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.

Linee in cavo

Le linee aeree sono sempre più economiche di quelle in cavo. Tuttavia nell'attraversamento di zone densamente popolate, come nella distribuzione dell'energia nelle grandi città, si rende necessario ricorrere a linee sotterranee in cavo. Un cavo è costituito da un conduttore formato da uno o più fili di rame, da un sistema isolante che isola i cavi tra loro e da terra, e da un sistema di protezione necessario per proteggere il cavo dall'acqua e dall'umidità.

L'isolamento è realizzato in materiale termoplastico per le basse tensioni, in carta impregnata con olio o miscele isolanti per le medie ed alte tensioni. Il complesso dei conduttori così isolati è racchiuso in un tubo di piombo, con funzioni di tenuta della miscela isolante di impregnazione. Nei cavi per bassa tensione isolati in gomma non è necessario l'utilizzo del tubo di piombo. Il sistema protettivo è costituito da una guaina di materiale termoplastico o da un'armatura in nastro d'acciaio.

Per linee a bassa tensione si impiegano normalmente cavi quadripolari (tre fasi più il neutro); per tensioni fino a 15-20 kV si utilizzano cavi tripolari, realizzati nel modo descritto. Per tensioni molto elevate si utilizzano cavi unipolari di tipo particolare, come quelli ad olio freddo (cavi Emanueli): in essi l'isolante è completamente imbevuto d'olio e il riempimento completo che garantisce l'assenza di bolle d'aria pericolose per la formazione di vie preferenziali di scarica, è garantito da un canale interno in cui scorre olio in pressione.

Costanti fondamentali delle linee

Considerando per l'analisi le linee elettriche 'corte', ovvero caratterizzate da lunghezze inferiori a 50-60 Km e tensioni inferiori ai 60 kV, si possono trascurare le perdite sugli isolatori, l'effetto corona, e fenomeni dovuti a capacità trasversali della linea, considerando pertanto solo la resistenza e la reattanza della linea. La resistenza è elemento proprio di un qualunque conduttore percorso da corrente. La reattanza induttiva rappresenta nel circuito elettrico che descrive il comportamento di una linea l'accumulo di energia associata nel sistema fisica al campo magnetico generato dalla corrente che fluisce nei conduttori. La resistenza e la reattanza risultano uniformemente distribuiti lungo una linea, e i loro valori, riferiti all'unità di lunghezza della linea, si chiamano "costanti fondamentali" della linea stessa, e si indicano rispettivamente con r ed x .

La resistenza ohmica di un metro di conduttore di filo cilindrico vale:

$$r = \rho / S \quad (\Omega/m) \quad (1)$$

essendo ρ la resistenza del materiale costituente il conduttore, generalmente espressa in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, e S la sezione in mm^2 .

A 20 °C, temperatura alla quale si riferisce la resistenza dei conduttori, risulta:

- per il rame $\rho = 0.01769 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- per l'alluminio $\rho = 0.0282 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- per l'Aldrey $\rho = 0.0325 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Per le corde si ha:

$$r = k \rho / S \quad (\Omega/m) \quad (2)$$

dove k varia da 1.01 a 1.04 dalle piccole alle grandi sezioni ed è un coefficiente che tiene conto della maggiore lunghezza effettiva dei fili elementari rispetto alla lunghezza complessiva della corda a causa della cordatura.

Il valore della resistenza viene riportato alla temperatura di funzionamento determinata dalla temperatura ambiente e dal sovraccaldamento dovuto alle perdite per effetto Joule, tramite la nota relazione tra la resistività e la temperatura:

$$r = r_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} [1 + \alpha (T - 20)] \quad (3)$$

dove α è il coefficiente di temperatura pari a $0.0039\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ per il rame e a $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ per l'alluminio. La reattanza induttiva può essere ricavata da formule semi-empiriche che nel caso di conduttori tripolari tengono conto oltre che della autoinduzione, anche della mutua induzione tra i diversi conduttori. In tali formule la reattanza induttiva di un metro di filo dipende dal diametro dei conduttori e dalla loro distanza.

Riscaldamento dei conduttori

Il calore sviluppato per effetto Joule in conduttore percorso da corrente ne aumenta la temperatura e tende a disperdersi verso l'ambiente esterno; la sovratemperatura di regime del conduttore rispetto all'ambiente $\Delta\theta$ è quella raggiunta in regime stazionario, in cui tutto il calore prodotto viene disperso all'esterno.

Trascurando l'emissione di calore per irraggiamento, il calore Q sviluppato e quindi disperso nell'unità di tempo a regime termico vale:

$$Q = RI^2 = \lambda s \Delta\theta \quad (4)$$

ove R è la resistenza del conduttore in Ω , I l'intensità di corrente in A (valore efficace), λ il coefficiente di scambio termico in $\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, s la superficie disperdente in m^2 e Q è espresso in W e $\Delta\theta$ in $^{\circ}\text{C}$.

La determinazione teorica del coefficiente λ è complessa, a causa della sua dipendenza dalle condizioni del conduttore (nudo o isolato), dalla natura dell'ambiente esterno (aria per le linee aeree, terra per i cavi). In genere si ricorre pertanto a dati sperimentali.

Riferendosi all'unità di lunghezza del conduttore, si ha:

$$r = \rho / S \quad (\Omega/\text{m}) \quad (5)$$

e dalla (4) si ottiene:

$$\Delta\theta = \rho I^2 / \lambda S \quad (6)$$

A parità di condizioni la sovratemperatura del conduttore è pertanto proporzionale alla resistività del materiale utilizzato (per l'alluminio è 1.6 volte superiore a quella che si ha per il rame). La sovratemperatura è inoltre proporzionale al quadrato dell'intensità di corrente. Un eccessivo riscaldamento dei conduttori è dannoso. Esso provoca un aumento della resistenza ohmica e quindi delle perdite Joule. Nei conduttori isolati può deteriorare il materiale isolante riducendone la durata di vita, mentre nei conduttori nudi tesi in aria aumenta le frecce per deformazione e diminuisce la resistenza meccanica.

Per i conduttori isolati e per i cavi il riscaldamento massimo ammissibile è soprattutto limitato dalla vita dell'isolante, che diminuisce rapidamente all'aumentare della temperatura. E' quindi necessario stabilire i valori massimi consentiti della intensità di corrente per i diversi tipi di conduttori, e quindi affinché $\Delta\theta$ non superi i valori di sicurezza previsti per il particolare isolante utilizzato.

Il valore massimo di I , detto *portata* del conduttore, corrispondente alla massima sovratemperatura ammissibile, si ottiene dalla (6) in relazione alla sezione del conduttore stesso:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{\lambda s S}{\rho} \Delta \theta_{MAX}} \quad (7)$$

I valori delle portate dei conduttori sono determinati sperimentalmente e riportati in apposite tabelle pubblicate nelle Norme CEI. Le portate per i conduttori di linee aeree esterne sono in genere superiori a quelle delle linee in cavo di circa il 50 %.

La corrente effettiva nel conduttore non deve mai essere superiore alla sua portata. Nel progetto delle linee, qualora il calcolo conducesse a questa situazione, è necessario procedere passando dalla sezione iniziale ad una superiore.

Caduta di tensione lungo la linea

Considerando linee elettriche ‘corte’, come quelle di distribuzione in M.T. e B.T. si può indicare con $\underline{Z} = R + jX$ l’impedenza complessiva della linea, e con \underline{V}_P e \underline{V}_A i numeri complessi rappresentativi della tensione in partenza e in arrivo della linea stessa. E’ pertanto possibile scrivere la legge di Ohm simbolica per la linea monofase:

$$\underline{V}_P = \underline{V}_A + \underline{Z} \underline{I} \quad (8)$$

essendo la corrente di linea \underline{I} costante in ogni sezione per l’ipotesi di linea corta. Il diagramma vettoriale corrispondente alla equazione (8) è riportato in Fig. 8, dove si indica con ϕ l’angolo di sfasamento tra \underline{V}_A e \underline{I} , il cui valore dipende dal carico utilizzatore della linea.

Poiché le cadute ohmiche RI e reattive XI sono molto piccole rispetto alle tensioni in partenza e in arrivo, l’angolo α tra \underline{V}_P e \underline{V}_A è sempre molto piccolo. E’ pertanto possibile confondere V_P con la sua proiezione OA sulla direzione di V_A , ottenendo:

$$\underline{V}_P = \underline{V}_A + RI \cos \phi + XI \sin \phi \quad (9)$$

La caduta di tensione risulta pertanto in modulo pari a:

$$\Delta V = V_P - V_A = RI \cos \phi + XI \sin \phi \quad (10)$$

con una caduta percentuale relativa alla tensione di arrivo pari a:

$$\Delta V \% = 100 (V_P - V_A) / V_A = 100 (RI \cos \phi + XI \sin \phi) / V_A \quad (11)$$

Essendo $P = V_A I \cos \phi$ e $Q = V_A I \sin \phi$ la potenza attiva e reattiva richieste dal carico, moltiplicando e dividendo per V_A la (10), si ottiene:

$$\Delta V \% = 100 (RP + XQ) / V_A^2 \quad (12)$$

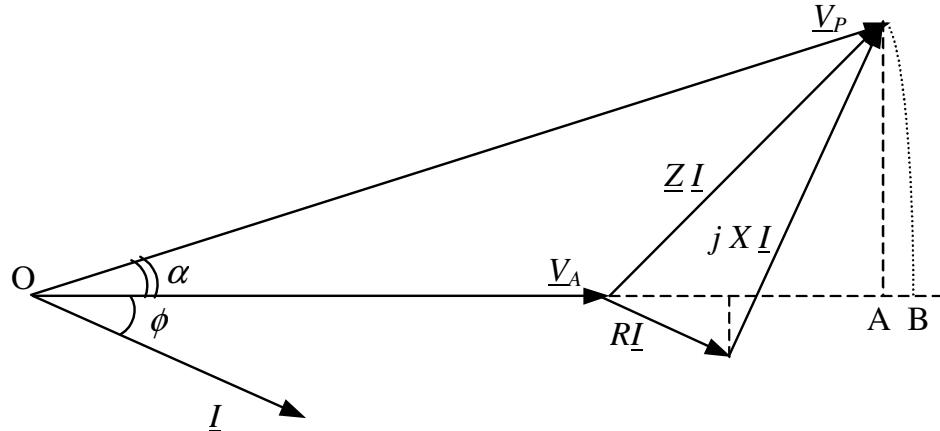


Fig. 8 Caduta di tensione lungo una linea corta

La caduta di tensione di linea può pertanto essere ridotta diminuendo Q tramite un opportuno rifasamento del carico. Si noti inoltre che la caduta percentuale diminuisce all'aumentare della tensione di esercizio, a parità di P e Q . La equazione (12) vale anche per una linea trifase, intendendo per R e X la resistenza e la reattanza di una fase, per P e Q le potenze trifase, e per V_A la tensione concatenata.

L'approssimazione su cui si basa la (12) è valida solo per carichi induttivi. In presenza di carichi capacitivi, l'angolo α risulta non piccolo invalidando la (12).

Per carichi induttivi ($\phi > 0$), ΔV risulta positivo, mentre per carichi capacitivi si può anche avere ΔV nullo o negativo, implicando una tensione di arrivo più elevata di quella di partenza.

Per il regolare funzionamento degli apparecchi utilizzatori, è necessario che il valore della tensione si mantenga con approssimazione costante durante l'esercizio. Gli utenti di forza motrice non sono molto sensibili alle variazioni di tensione, nel senso che in genere i motori, quali gli asincroni, funzionano in modo relativamente soddisfacente anche con tensioni che differiscono da quella nominale di progetto di circa il 10%. E' tuttavia opportuno che le oscillazioni di tensione rimangano limitate entro il 5%. Essendo infatti la coppia di un motore asincrono proporzionale al quadrato della tensione, una diminuzione di questa del 5% determina una riduzione della coppia massima al (95%)² $\approx 90\%$ del suo valore nominale.

Gli impianti di illuminazione sono ancora più sensibili alle variazioni di tensione: un aumento di tensione del 5% riduce la vita delle lampade ad incandescenza a circa il 55% di quella che si avrebbe alla tensione nominale, mentre una riduzione di tensione del 5% riduce il flusso luminoso a circa l'83% del suo valore nominale.

Risulta pertanto evidente che le variazioni di tensione tra le condizioni di carico massimo e minimo siano contenuti entro limiti ristretti e prefissati. Essendo tali variazioni dovute alle cadute di tensione lungo le linee poc'anzi analizzate, è necessario limitare tali cadute entro un ben preciso intervallo. Si è constatato sperimentalmente che, ove le oscillazioni di tensione siano di breve durata e non frequenti, l'impianto funziona in modo soddisfacente se il valore massimo delle oscillazioni è contenuto entro il 4%.

Supponendo di dover progettare una linea di distribuzione trifase di lunghezza L (distanza tra cabina e utilizzazione), essendo note la potenza attiva P da fornire al carico e la tensione concatenata V_A , nell'ipotesi di carico a fattore di potenza unitario si ottiene dalla (12):

$$\Delta V \% = 100 \frac{RP}{V_A^2} \quad (13)$$

Fissato il valore di $\Delta V \%$ ed espressa la resistenza per fase secondo la

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (14)$$

si ricava la sezione minima di conduttore necessaria al fine di contenere la caduta di tensione entro i limiti stabiliti:

$$S = 100 \frac{\rho l P}{V_A^2 \Delta V \%}$$

I due principali criteri di progetto per le linee di distribuzione risultano pertanto essere la limitazione del sovrariscaldamento del conduttore e la limitazione delle cadute di tensione lungo la linea. All'atto pratico le condizioni termiche risultano in genere automaticamente soddisfatte nei conduttori aerei proporzionali in modo da avere cadute di tensione inferiori al 4%. Per linee di collegamento molto corte in cavo, si può invece avere il soddisfacimento delle condizioni elettriche di limitata caduta di tensione, ma sovratemperature superiori al valore prefissato. In tali casi la determinazione della sezione del conduttore è prevalentemente dettata dalle esigenze di carattere termico.

Distribuzione in media e bassa tensione

Come già accennato, le linee e reti di distribuzione possono essere in M.T. (distribuzione primaria) o in B.T. (distribuzione secondaria). Esse costituiscono il mezzo attraverso cui si raggiungono i

singoli centri di utilizzazione dell'energia, dal grosso complesso industriale al piccolo utente. Le linee a M.T. (10-20 kV) servono o per la diretta alimentazione di grosse utenze (complessi industriali, ospedali). Le linee a M.T. per l'alimentazione di medi e grandi centri abitati sono realizzate mediante cavi sotterranei. In tutti gli altri casi si utilizzano conduttori nudi su pali.

Le linee a B.T. convogliano l'energia dalle cabine di trasformazione M.T./B.T. a utenze che si trovano nel raggio d'azione di una cabina, compreso tra 100 e 1000 metri. Un insieme di linee di B.T. connesse tra loro secondo diversi schemi costituisce una rete di distribuzione a B.T. Le linee a B.T. per i medi o grossi centri abitati si realizzano generalmente con cavi sotterranei, mentre quelle per piccoli centri abitati con cavi ad anima d'acciaio sospesi. Per i centri rurali si utilizzano conduttori nudi su pali.

Le linee a M.T. sono linee trifase a tre fili, mentre quelle a B.T. sono tipicamente costituite da quattro fili (tre fasi più il neutro). I trasformatori M.T./B.T. installati nelle cabine sono dotati di un collegamento secondario a stella con neutro.

Il neutro della B.T. parte dal centro stella del secondario del trasformatore e viene di solito messo a terra. La sezione del conduttore neutro viene tipicamente scelta pari alla metà di quella dei conduttori di fase. Il neutro è infatti percorso dalla somma vettoriale delle correnti delle tre fasi, che si annulla solo qualora queste siano equilibrate. Per ridurre al massimo la corrente che percorre il neutro, si ripartiscono le utenze monofase il più precisamente possibile sulle tre fasi, in modo da mantenere gli squilibri entro limiti modesti. Viene riportato in figura 9 uno schema di collegamento per una cabina di trasformazione M.T./B.T.

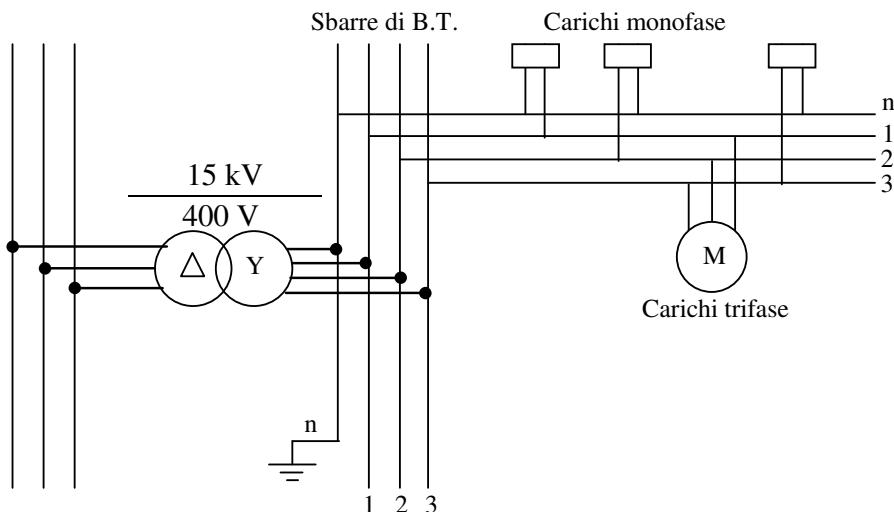


Fig. 9. – Schema di principio di una cabina di trasformazione M.T./B.T.

SOVRATENSIONI E SOVRACORRENTI

Sovratensioni

Il dimensionamento e la tenuta degli isolamenti non può essere riferito alla sola tensione di normale esercizio delle linea 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 $1\div 5$ MV, per tempi di $5\div 50$ 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.

Sovraccorrenti

Un *sovraffollamento* è la causa più frequente di sovraccorrente, consistente nel superamento della portata della linea o dei valori di corrente per i quali una apparecchiatura è dimensionata. 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 sovraffollamento 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 sovraccorrenti 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

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

prudenziale 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.

APPARECCHI DI MANOVRA E PROTEZIONE

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

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

La panoramica che segue prescinde intenzionalmente dalle complesse problematiche tipiche delle reti in AT, limitandosi a far riferimento 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 10.a. Il simbolo di figura 10.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. 10 – 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).
- 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).

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 riadescimento 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. All'atto della separazione dei contatti (vedi figura 11) 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.

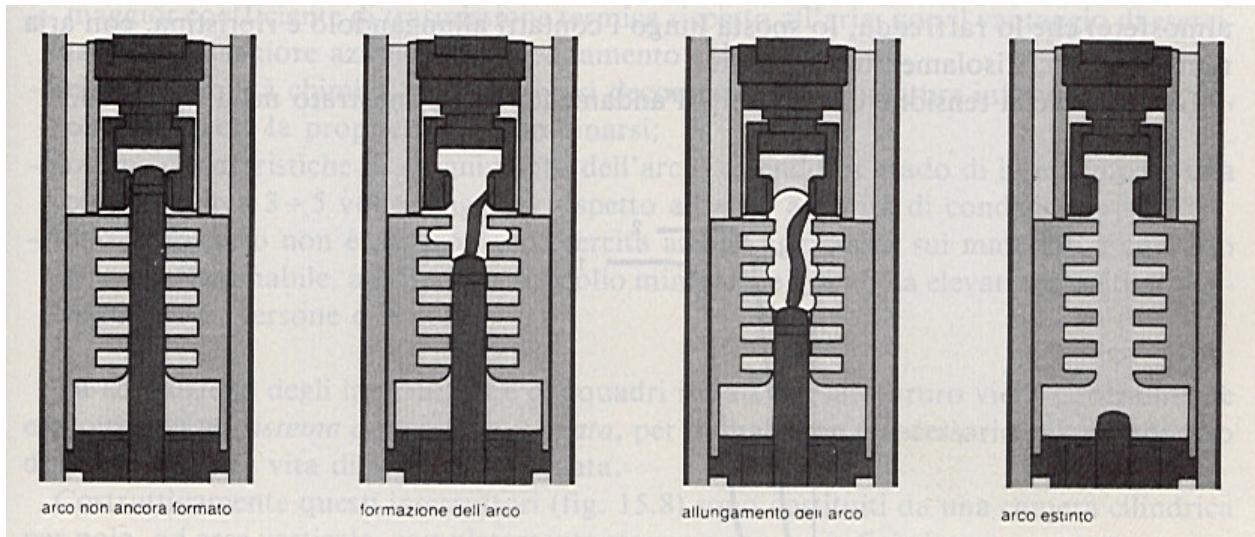


Fig. 11 –Interruttore ad olio: sequenza d'interruzione (ABB).

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 (SF₆)*

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 infiammabile 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 12), a tenuta stagna, riempita di SF₆ 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.

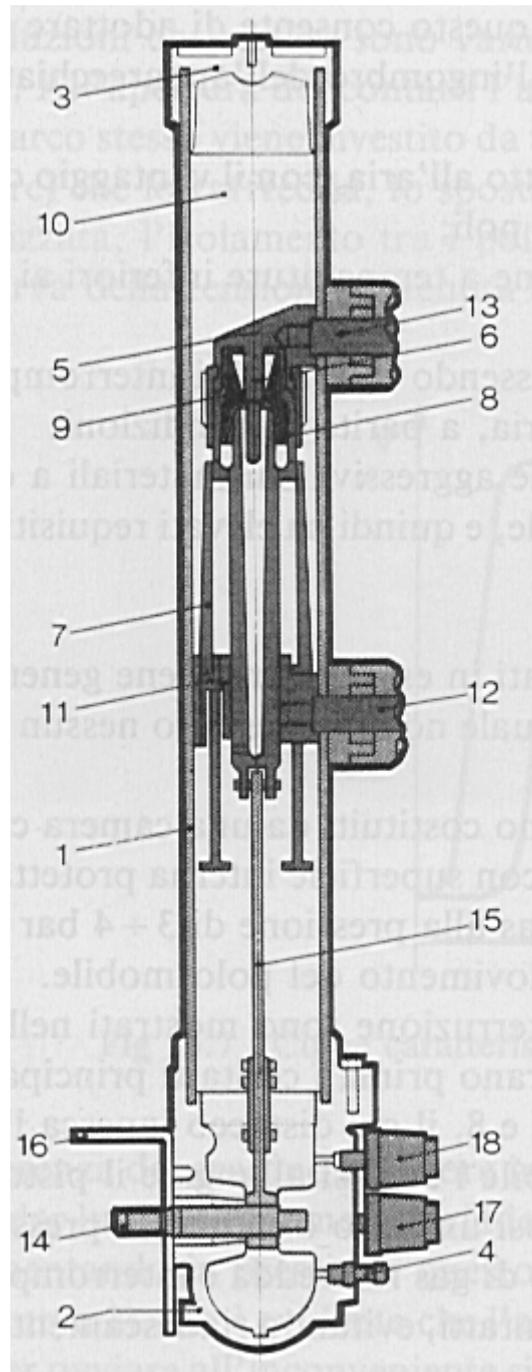


Fig. 12 –Interruttore ad SF₆: vista in sezione.
 1) Cilindro isolante in vetroresina; 2) Coppa in lega di alluminio; 3) Cappellotto; 4) Valvola per il riempimento e lo svuotamento; 5-6) Contatti fissi a tulipano e d'arco; 7-8) Contatti mobili principale e d'arco; 9) Ugello di soffio in vetroresina; 10) 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:

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

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 13.a, o con il simbolo di figura 13.b per il tipo automatico.

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 14.a; il simbolo di figura 14.b si riferisce alla versione automatica.

I sezionatori a semplice interruzione sono costruiti secondo lo schema di principio di figura 15.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 15.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 – Simboli del contattore azionato manualmente (a) e del contattore automatico (b).



Fig. 14 – Simboli del sezionatore azionato manualmente (a) e del sezionatore automatico (b).

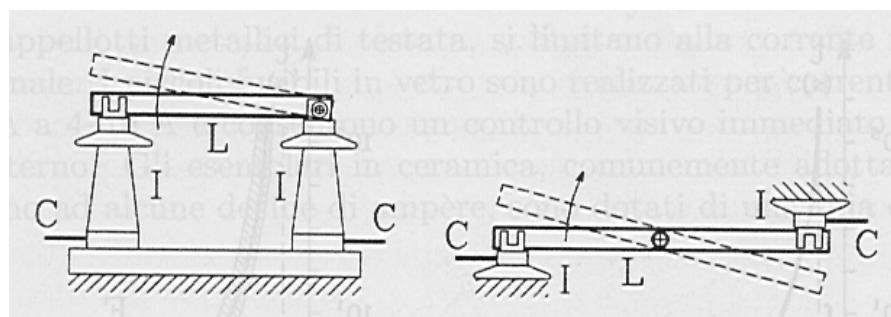


Fig. 15 – Schemi di un sezionatore a semplice interruzione (a) e a doppia interruzione (b).

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 interruttori (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 16).

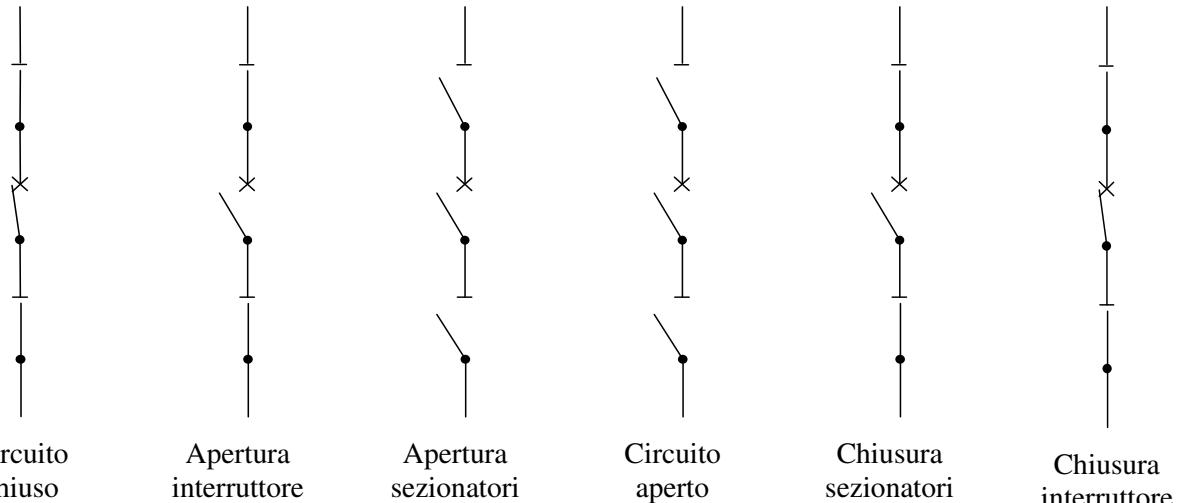


Fig. 16.a – Sequenza di apertura di un circuito.

Fig. 16.b – Sequenza di chiusura di un circuito.

FUSIBILI

I fusibili rappresentano i più semplici e, spesso, i più rapidi dispositivi di protezione contro le sovraccorrenti. 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 17.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 17.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.

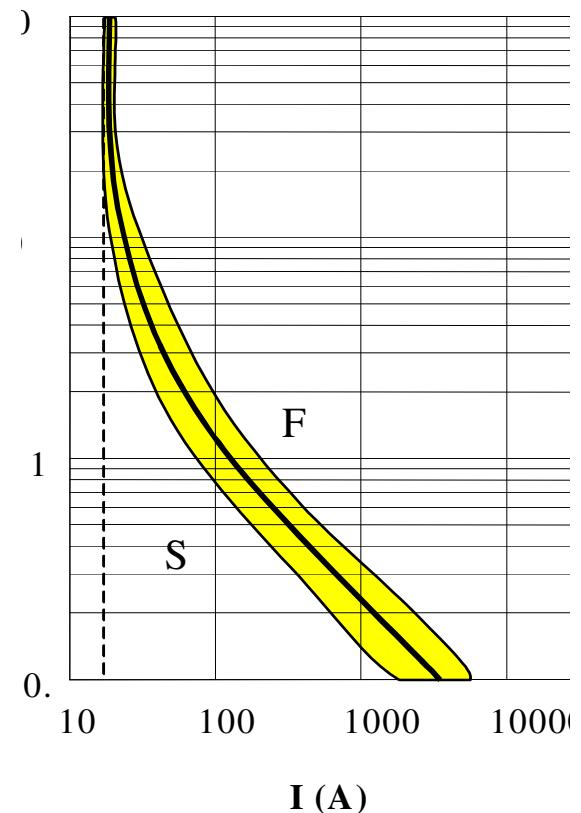
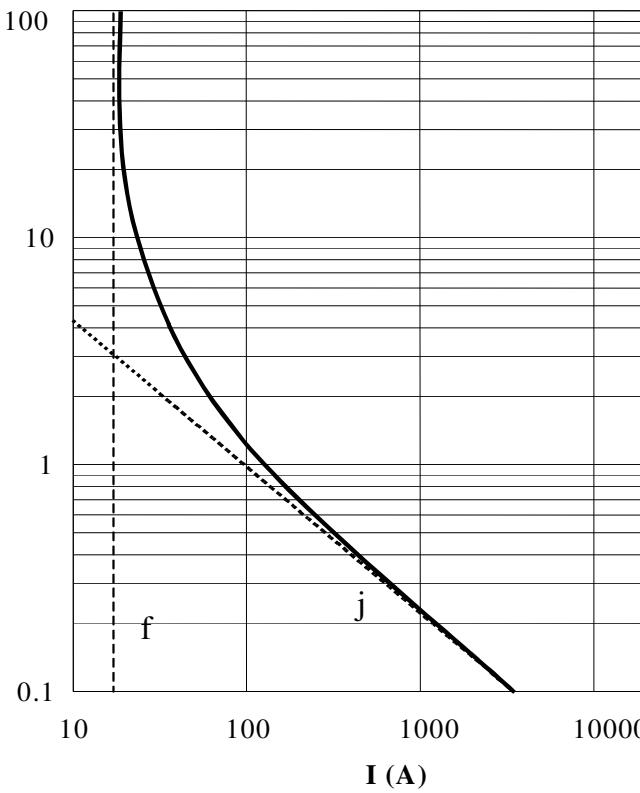


Fig. 17 – Caratteristica del tempo di fusione e zona di intervento (F) del fusibile.

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 18 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.

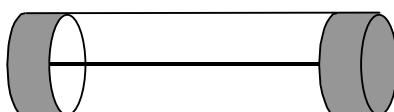


Fig. 18.



Fig. 19.

Il simbolo del fusibile è riportato in figura 19.a; il simbolo di figura 19.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 pre-tesa che ne forza la rottura prima che questa sia completata dal normale processo di fusione.

In figura 20, 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.

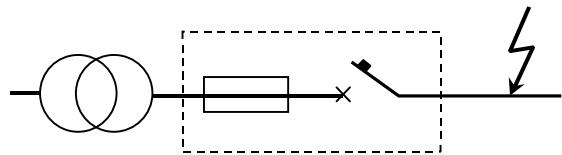


Fig. 20 – Coordinamento della protezione.

SCARICATORI

Gli scaricatori rappresentano i più semplici dispositivi di protezione contro le sovratensioni. Nella versione spinterometrica (vedi figura 21), 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'innesto dell'arco.

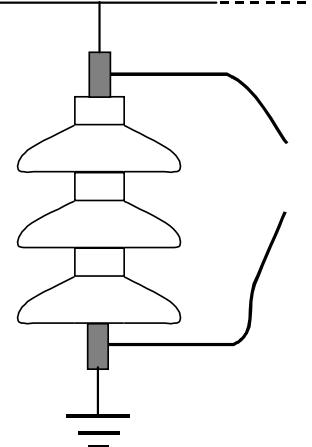


Fig. 21. - Schema di scaricatore spinterometrico.

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 22. 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.