

## **CAPITOLO 1**

### **SISTEMI ELETTRICI DI POTENZA**

#### **1.1) CENNI SUL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE E DI TRASPORTO DELL'ENERGIA ELETTRICA**

Un sistema elettrico è composto generalmente dai seguenti sottosistemi:

##### **1) Nodi di produzione:**

sono in pratica le Centrali Elettriche (idroelettriche, termoelettriche, etc.);

##### **2) Linee di trasmissione ed interconnessione:**

servono ad inviare la potenza elettrica dai nodi di produzione ai punti di consumo. Normalmente i nodi di produzione sono pochi, con potenza prodotta concentrata e distanti dai punti di consumo, i quali viceversa sono numerosissimi e dislocati per tutto il territorio (più concentrati nelle aree urbane ed industriali). Le linee di trasmissione possono essere di due tipi:

a) Linee di trasmissione primarie: connettono le centrali ai nodi primari di smistamento, detti a loro volta sottostazioni di distribuzione o più semplicemente sottostazioni;

b) Linee di trasmissione secondarie: partono dalle sottostazioni ed alimentano, a livello locale, la distribuzione dell'energia elettrica;

##### **3) Linee di distribuzione:**

costituiscono la parte finale del sistema elettrico e distribuiscono l'energia a ciascun blocco di carichi.

In fig. 1.1.1 è mostrato uno schema semplificato della rete di distribuzione, interconnessione e produzione dell'energia elettrica:

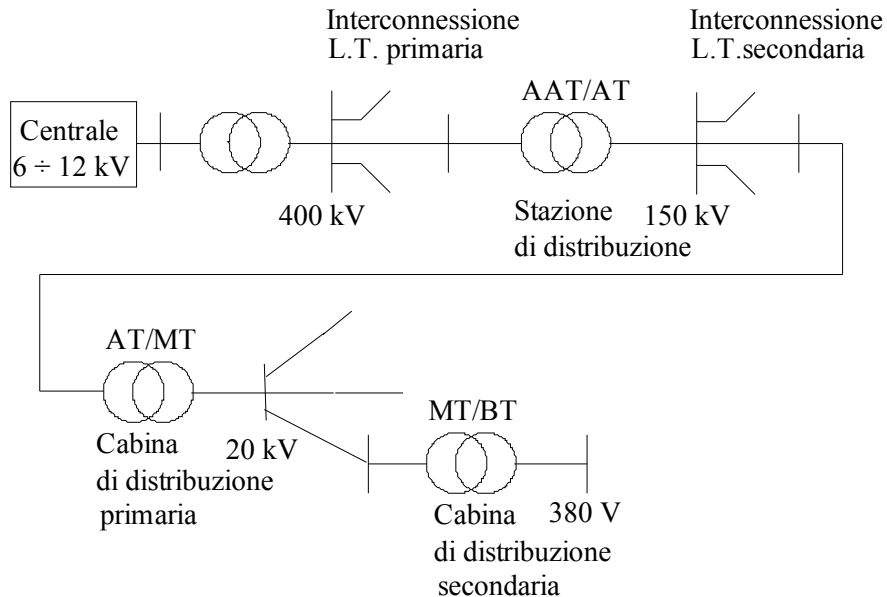


fig. 1.1.1

Normalmente le linee di trasmissione non seguono mai percorsi unicamente radiali; per avere una maggiore flessibilità della distribuzione elettrica si realizzano infatti reti magliate, in cui i nodi sono interconnessi. Quindi le linee di trasmissione sono più propriamente dette linee di trasmissione ad interconnessione, esse possono scambiare energia anche tra una centrale elettrica e l'altra. A riprova di quanto detto è il fatto che quasi tutto il sistema elettrico europeo è interconnesso.

La prima condizione necessaria perchè si possa avere un sistema elettrico interconnesso è naturalmente che la frequenza della rete di distribuzione sia la medesima per l'intero sistema ( $f = 50$  Hz in Europa,  $f = 60$  Hz in USA).

Per ottenere un elevato rendimento di trasmissione dell'energia elettrica bisogna ridurre quanto più possibile le perdite di trasmissione che possono essere di due tipi:

- 1) Perdite per effetto Joule, prodotte dalla corrente che percorre la linea;
- 2) Perdite per effetto corona, prodotte dalla tensione di linea.

Per tensioni di linea fino a circa 500 kV risultano in genere preponderanti le perdite per effetto Joule rispetto a quelle per effetto corona:

$$V \leq 500 \text{ kV} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{Joule}} \gg P_{\text{Corona}}$$

Poiché la potenza trasmessa dipende sia dalla tensione che dalla corrente, se si utilizzano per la trasmissione di una data potenza elettrica delle tensioni abbastanza alte, si ottiene una diminuzione dell'intensità della corrente di linea e proporzionalmente anche delle perdite per effetto Joule.

Questo principio viene utilizzato in maniera completa per le linee di trasmissioni primarie, in cui si lavora con le tensioni più alte possibili (in Italia  $V = 380 \text{ kV}$ ); esse sono dette linee ad altissima tensione (AAT).

Per quanto riguarda le linee di trasmissione secondarie, esse collegano punti con distanze minori rispetto alle linee AAT, ma essendo in numero assai maggiore hanno un impatto ambientale più marcato. Pertanto su queste linee si ha un livello di tensione di 150 kV; esse sono anche chiamate linee ad alta tensione (AT).

All'interno delle zone abitate si hanno linee di distribuzione in media tensione (MT), il cui livello di tensione è in via di unificazione su tutto il territorio nazionale al valore di 20 kV (a tutt'oggi esistono anche linee MT a  $V = 10-15 \text{ kV}$ ). Le linee MT, inoltre, seguono percorsi radiali.

Infine le sottostazioni o cabine di trasformazione MT/BT collegano le linee MT a linee a bassa tensione (BT) in cui si ha il 380 V trifase.

Il motivo principale per cui si ha una distribuzione dell'energia elettrica in corrente alternata e non in corrente continua è dovuto al fatto che in questo modo si possono utilizzare trasformatori e motori asincroni, che sono macchine elettriche ad alto rendimento.

Normalmente l'energia elettrica viene prodotta ad un livello di media tensione che varia tra i 6 ed i 12 kV, che in seguito viene innalzata al valore di 380 kV mediante l'utilizzo di appositi trasformatori elevatori di tensione. In fig. 1.1.1 è schematizzato un tipico percorso della rete di distribuzione ed interconnessione dalla centrale elettrica alle linee BT.

Tale sistema interconnesso deve avere un sistema di monitoraggio in tempo reale che sia in grado di misurare le potenze attive e reattive nei vari tronchi della linea e di regolare la tensione e la frequenza di

rete. Infatti in conseguenza alla continua variazione dei prelievi e delle produzioni di energia si potrebbero avere variazioni di tensione e frequenza che risulterebbero molto dannose.

Le linee di trasmissione ed interconnessione in AAT o AT sono realizzate con conduttori cordati nudi, generalmente sostenuti da tralicci metallici. Le linee di trasmissione MT che arrivano fino alle cabine di distribuzione secondarie MT/BT sono linee aeree sostenute generalmente da pali in cemento armato, metallo o legno. Nelle zone urbane si utilizzano anche linee in cavo sotterraneo.

## CAPITOLO 2

### COMPONENTI DEGLI IMPIANTI ELETTRICI DI DISTRIBUZIONE

#### 2.1) LINEE ELETTRICHE

Generalmente i conduttori utilizzati per le linee AAT ed AT sono in alluminio e/o acciaio, i conduttori per le linee MT sono in rame od alluminio. L'isolamento dei conduttori dai tralicci e dai pali si ottiene mediante gli isolatori, che sono dei sostegni in materiale ceramico o in vetro temperato; in fig. 2.1.1 se ne hanno alcuni esempi. Nel caso di linee AAT e AT sono utilizzati isolatori a cappa e perno, funzionanti a compressione e non a trazione (come nel caso degli isolatori MT rigidi), proprio a causa delle alte tensioni di linea che provocano notevoli sforzi dinamici sugli isolatori stessi. Spesso tali isolatori sono anche disposti in serie l'uno sull'altro per ottenere un più alto isolamento.

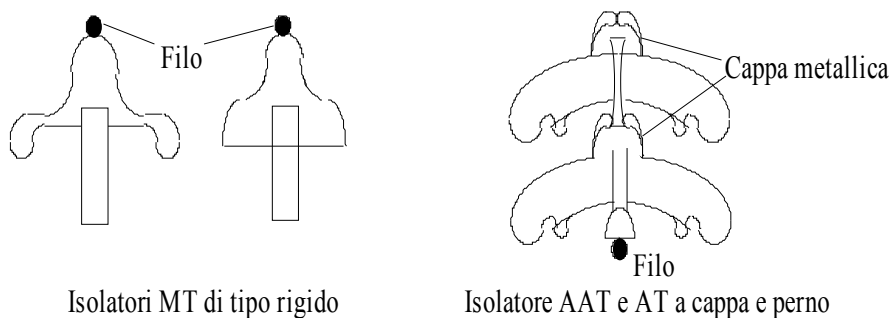


fig. 2.1.1

Altri elementi presenti vicino agli isolatori (soprattutto in AAT e AT) sono gli anelli e le corna spinterometriche (fig. 2.1.2), i primi hanno lo scopo di equalizzare e ridurre il campo elettrico nell'intorno degli isolatori in modo da ridurre al minimo possibili effetti corona indesiderati, i secondi servono come sfioratori di tensione.

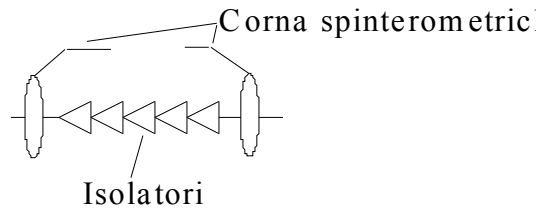


fig. 2.1.2

Nelle linee aeree sono infine presenti le funi di guardia, conduttori non in tensione anzi riferiti al potenziale di terra che, disposti in modo opportuno (fig. 2.1.3), hanno il compito di proteggere dai fulmini la linea di trasmissione (effetto gabbia di Faraday). Ciascuna fune di guardia crea un settore cilindrico di protezione al di sotto di essa avente un angolo di circa  $\frac{\pi}{3}$  radianti, quindi i conduttori sono generalmente posizionati in modo tale da essere compresi entro tale angolo.

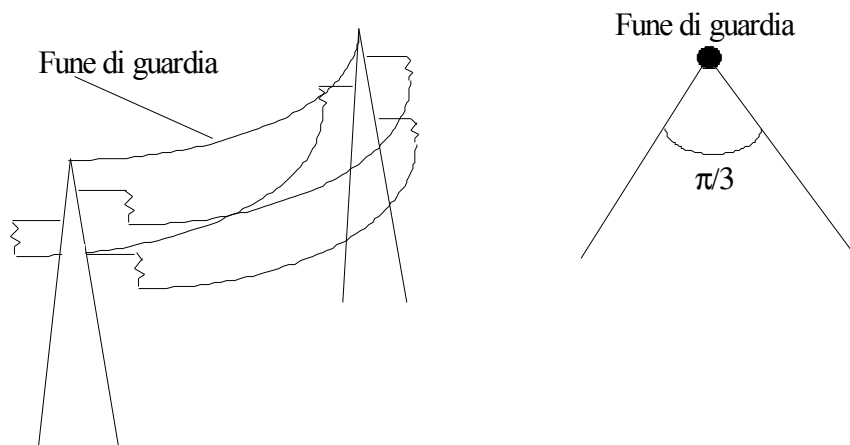


fig. 2.1.3

Settore di protezione

Le linee di distribuzione in BT sono generalmente in cavo. Un cavo è costituito da uno o più conduttori, isolati da uno o più strati di materiale dielettrico, e provvisti di uno o più rivestimenti di protezione contro le azioni meccaniche. In tal modo i cavi possono essere utilizzati in ambienti con presenza di persone e materiali vari, senza danni e pericoli. Nel caso in cui non vi sia un solo strato di materiale dielettrico e nessun altro rivestimento protettivo i cavi si

chiamano corde elettriche isolate e debbono essere posate entro opportuni cavidotti per la loro protezione meccanica.

I cavi elettrici per il trasporto e la distribuzione dell'energia, di cui ci occupiamo (esistono altri tipi di cavi per il trasporto e la distribuzione di segnali, dati ecc..) hanno sezioni di valore unificato variabile in genere da frazioni di  $\text{mm}^2$  a centinaia di  $\text{mm}^2$ . Il conduttore è un filo unico oppure, per le sezioni maggiori può essere formato da più fili riuniti insieme, in modo da essere maggiormente flessibile nella posa. I cavi hanno particolarità costruttive che possono consentire la posa in ambienti umidi o addirittura immersa. Possono essere avvolti da un nastro o da una armatura di materiale conduttore, ed in questo caso si chiamano cavi schermati. Per un cavo elettrico si definiscono le tensioni nominali di isolamento come i valori efficaci, espressi in kV delle tensioni massime applicabili fra un qualsiasi conduttore e la terra e fra due qualsiasi conduttori, alla frequenza nominale e per un funzionamento del cavo a tempo indefinito. Il dielettrico di un cavo è in generale costituito da gomma naturale o sintetica, o da materiale termoplastico, il rivestimento protettivo del cavo è in genere costituito da materiale sintetico o da gomma naturale o sintetica, PVC (polivinilcloruro), o in piombo in alluminio, che in questo caso esercitano anche la funzione di schermo. I cavi vengono anche classificati in base alla tensione di esercizio in cavi BT, cavi MT, cavi AT e cavi AAT (questi ultimi di raro impiego).

## 2.2) INTERRUTTORI E SEZIONATORI

Il sistema elettrico deve essere in grado di interrompere la distribuzione dell'energia elettrica e di poter fare manovre. A tale scopo i sistemi AAT, AT e MT utilizzano separatamente sia interruttori sia sezionatori.

Gli interruttori sono apparecchi destinati a stabilire, mantenere ed interrompere le correnti in un circuito, sia in condizioni usuali di servizio sia in condizioni anomale (per esempio nei guasti come il corto circuito), i sezionatori sono invece apparecchiature atte ad interrompere la continuità dei circuiti, in maniera visibile e stabile, solo quando non sono percorsi da corrente, pur potendo essere e rimanere in tensione.

Le sollecitazioni elettriche, termiche e meccaniche più intense si hanno negli interruttori durante le manovre di apertura. Infatti, in

generale, quando si interrompe la corrente elettrica (fig. 2.2.1), essendo l'istante di apertura dell'interruttore arbitrario, molto spesso accade che in tale istante di tempo la corrente  $i(t)$  non sia nulla, né prossima a zero.

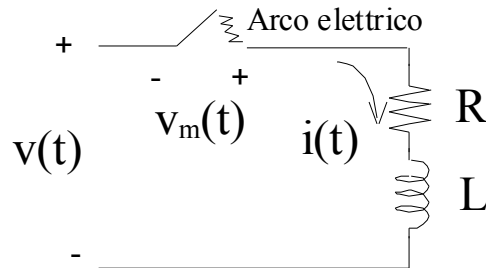


fig. 2.2.1

Tra i due punti di interruzione si crea perciò una sovratensione  $v_m(t)$ , detta sovratensione di manovra, che si ottiene dall'equazione di equilibrio nel dominio del tempo del circuito di fig. 2.2.1, e che è pari a:

$$v_m = L \frac{di}{dt} - Ri - v \quad (2.2.1)$$

Nella (2.2.1) il termine  $L \frac{di}{dt}$  può essere quello dominante nei primi attimi seguenti la chiusura e l'apertura.

Vi sono dei casi in cui la manovra di chiusura causa l'insorgere di sovracorrenti, maggiori anche di molte volte rispetto al valore nominale. Un esempio è la chiusura su un trasformatore a vuoto.

La chiusura di un circuito su un trasformatore a vuoto può essere studiata con il circuito di principio di figura 2.2.2, ove si suppone che sia  $e_g(t) = E_g \sin \omega t$ . Dopo la chiusura la tensione al primario del trasformatore risulta uguale a  $e_i(t) = e_g(t)$ . Dato che tale tensione primaria è pari alla derivata del flusso concatenato  $\phi_{\Sigma_1}(t)$ , se la chiusura avviene all'istante  $t = 0$  il flusso di induzione nel nucleo  $\phi_i(t)$  può essere espresso come:



$$\varphi_i(t) = \frac{1}{N_i} \int_0^t e_g(t) dt = \frac{E_M}{\omega N_i} (1 - \cos \omega t) = \Phi_M (1 - \cos \omega t) \quad (2.2.2)$$

avendo supposto che sia  $\varphi_i(t) = 0$  per  $t < 0$ .

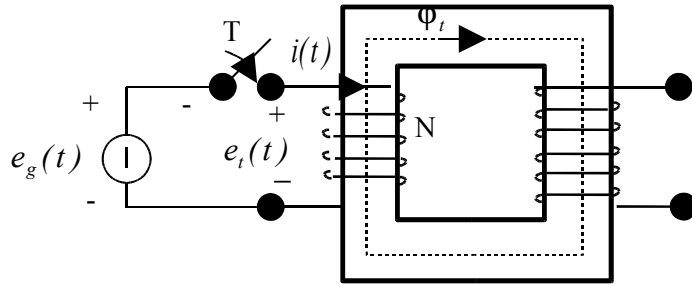


fig. 2.2.2

La (2.2.2) mostra che il flusso nel nucleo, inizialmente nullo, oscilla attorno al valore medio  $\Phi_M$ , raggiungendo un valore massimo pari a  $2\Phi_M$ . Dato che il nucleo è di materiale ferromagnetico la propria curva caratteristica di magnetizzazione ha saturazione (fig. 2.2.3a), la corrente magnetizzante assorbita presenta l'andamento indicato in figura 2.2.3b, con un valore di picco molto maggiore di quello nominale.

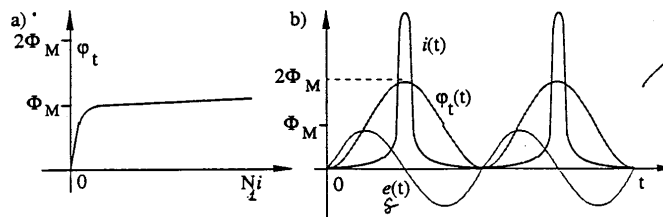


fig. 2.2.3

Tale situazione non costituisce una condizione di regime permanente, come indicherebbe la (2.2.2) perché, a causa di fenomeni dissipativi, dopo un transitorio della durata di alcuni cicli, viene raggiunta una condizione di regime di normale funzionamento, con flusso sinusoidale e corrente magnetizzante molto minore. Inoltre se la

chiusura dell'interruttore avviene quando la tensione è massima (e il flusso è nullo) non si presenta alcun transitorio, poiché tale condizione costituisce già di per se la condizione di regime permanente.

Il comportamento illustrato risulta tanto più marcato quanto più brusca è la saturazione del nucleo, come avviene in molti trasformatori, ove la corrente magnetizzante può essere anche 50 volte superiore alla corrente nominale, anche in relazione ad eventuali magnetizzazioni residue presenti nel nucleo ( $\Phi_r(t) \neq 0$  per  $t < 0$ ). Peraltro l'entità dei transienti risulta del tutto casuale, dipendendo dall'istante in cui l'interruttore si chiude.

Se la corrente viene interrotta bruscamente la sovratensione di manovra può anche assumere valori dell'ordine dei 10 kV; in conseguenza di ciò si può verificare la rottura del dielettrico interposto tra i due punti di interruzione e la generazione di un arco elettrico di scarica.

Il problema della utilizzazione di accorgimenti atti alla eliminazione dell'arco elettrico in un interruttore è molto importante se si è in AAT, AT e MT, lo è di meno in BT.

Come primo accorgimento si rendono non visibili e protetti il contatto fisso ed il contatto mobile dell'interruttore, racchiudendoli entro una camera di estinzione, come mostrato in fig. 2.2.4:

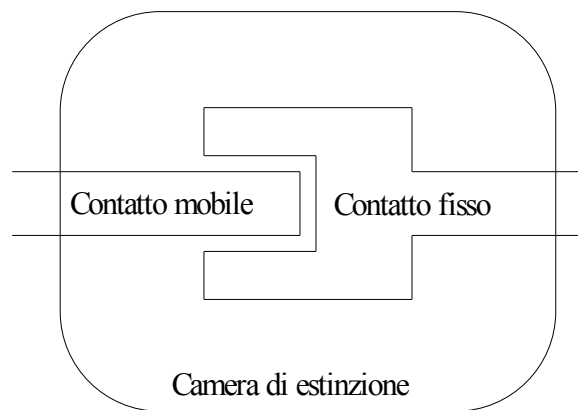


fig. 2.2.4

Tale camera di estinzione è poi riempita con opportune sostanze liquide o gassose oppure viene sottoposta all'azione di un campo

magnetico in modo tale da evitare o comunque limitare lo sviluppo dell'arco elettrico; si hanno quindi i seguenti tipi di interruttori:

- 1) Interruttori in olio: in cui l'olio ha la funzione di raffreddare, deionizzare e quindi annullare l'arco elettrico.
- 2) Interruttori ad aria compressa: al posto dell'olio viene soffiata dell'aria sui contatti, in tal modo si estingue l'arco.
- 3) Interruttori ad esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>): tale sostanza chimica ha proprietà superiori di deionizzazione rispetto alle precedenti; in questo caso la camera di estinzione deve essere ermetica, perché l'esafluoruro di zolfo in presenza di aria subisce delle trasformazioni e l'interruttore non funziona.
- 4) Interruttori a soffio magnetico: essendo l'arco elettrico un conduttore tende a modificare la propria forma in modo da concatenare la massima superficie possibile. Se l'arco viene investito da un campo magnetico perpendicolare esso tende sempre più ad allargarsi, quindi a raffreddarsi e ad estinguersi.

Si definisce infine potere di apertura di un interruttore, la massima corrente che l'interruttore riesce ad aprire.

Per realizzare invece l'apertura visibile di un circuito si utilizzano i sezionatori, che sono sempre abbinati ad un interruttore.

I sezionatori possono essere di vari tipi (fig. 2.2.5):

- 1) Sezionatori a coltello;
- 2) Sezionatori a pantografo;
- 3) Sezionatori rotativi.

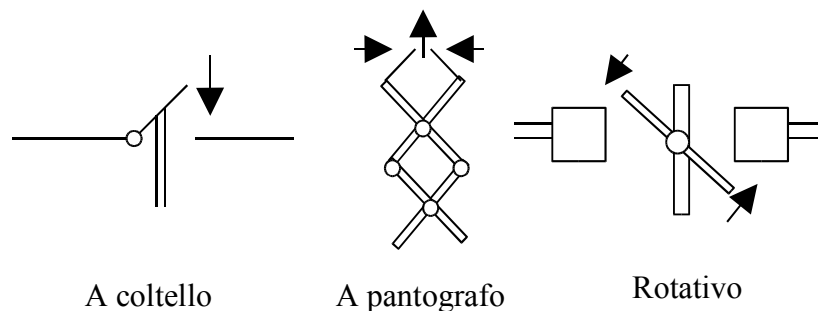


fig. 2.2.5

Le figure ne illustrano chiaramente i movimenti di apertura e chiusura

### 2.3) SCARICATORI

Gli scaricatori sono componenti di protezione contro le sovratensioni transitorie, originate da manovre di apertura e di chiusura nelle reti elettriche, o da fulminazioni, che vengono installati in prossimità delle apparecchiature da proteggere. Negli schemi impiantistici sono indicati con i simboli di fig. 2.3.1.



fig. 2.3.1

La loro versione tradizionale, di tipo spinterometrico, è costituita da due elettrodi sagomati, posti ad opportuna distanza mutua in aria, uno collegato alla linea da proteggere e l'altro a terra. Al manifestarsi di una sovratensione, tra essi si innesca un arco elettrico che provoca l'immediata riduzione della tensione. La configurazione più comune (fig. 2.3.2a) favorisce la migrazione dell'arco lungo gli elettrodi, allungandolo fino all'estinzione.

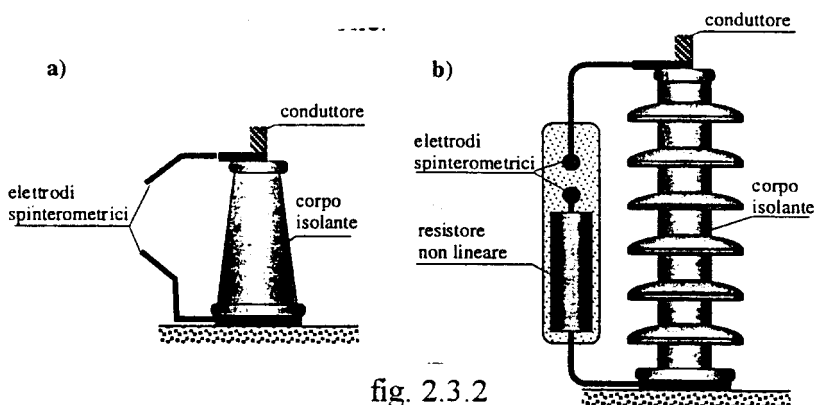


fig. 2.3.2

Nelle linee in altissima ed alta tensione sono preferiti gli scaricatori a resistenza non lineare (fig. 2.3.2b), costituiti dalla serie di uno scaricatore spinterometrico e di un resistore non lineare ad ossido di zinco ( $ZnO_2$ ). Quando si presenta una sovratensione tra i due elettrodi, si innesca un arco e il resistore, grazie alla sua non linearità, mantiene pressochè costante la tensione tra i terminali, indipendentemente dalla corrente che vi circola; non appena la tensione applicata si riduce al valore nominale, la corrente nel resistore diviene modesta e l'arco nello spinterometro si estingue ripristinando le condizioni normali.

Nei sistemi in bassa tensione che sono realizzati all'interno e con linee in conduttore isolato sono invece utilizzati circuiti scaricatori come in figura 2.3.3, posti all'interno di opportune scatole di custodia e protezione.

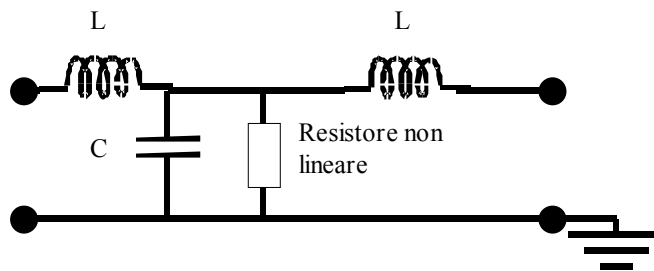


fig. 2.3.3

La protezione delle macchine e dei componenti elettrici è basata su tecniche attive e passive: in particolare gli interruttori automatici ed i fusibili sono ampiamente usati per garantire la protezione attiva contro le sovracorrenti (specialmente quelle di cortocircuito); gli scaricatori sono usati per garantire la protezione attiva contro le sovratensioni.

Peraltro tali dispositivi di protezione da soli possono non essere sufficienti a garantire l'integrità delle apparecchiature, sia per i ritardi di intervento che per i possibili mancati interventi; per questo in esse vengono anche adottate misure di protezione passiva che consistono in un sovradimensionamento idoneo a tollerare, in via transitoria, correnti e tensioni maggiori delle nominali.

Pertanto le apparecchiature elettriche devono funzionare senza danneggiarsi non solo alle condizioni nominali in regime

permanente, ma anche in condizioni che eccedono quelle nominali, in via transitoria. A tal fine le singole apparecchiature o i loro prototipi vengono sottoposti a specifiche prove di corrente e di tensione, con modalità prescritte dalle norme tecniche.

## CAPITOLO 3

### CABINE DI TRASFORMAZIONE E DISTRIBUZIONE MT/BT

In figura 3.1 è rappresentato lo schema unifilare di una cabina di distribuzione MT/BT, le sbarrette poste trasversalmente sulle linee indicano il numero di fasi, mentre la semisbarra indica la presenza del filo di neutro.

L'alimentazione del lato MT è fatta con una linea di arrivo, o proveniente con percorso radiale da un nodo della rete o con un percorso ad anello come in fig. 3.1.1; in questo ultimo modo si può avere una maggiore continuità di servizio anche in caso di disservizio di uno dei due arrivi. Ogni arrivo è provvisto di un opportuno sezionatore  $S_1$ , che ha la funzione di interrompere a vuoto e visibilmente la continuità del circuito, e di un sezionatore di messa a terra  $S_T$ , che ha il compito di mettere a terra le linee sezionate, essendo comunque possibile la presenza nel circuito di tensioni indotte pericolose.

Un altro sezionatore  $S_2$  è previsto dal punto di unione delle due linee di alimentazione verso l'interno della cabina di trasformazione, allo scopo di separare meccanicamente la cabina dall'anello, senza interrompere la continuità. Subito dopo è posto un interruttore  $T_1$ , organo al quale è affidato il compito di interrompere la continuità del circuito anche con carichi inseriti (cioè con correnti fluenti). Esso deve quindi poter interrompere la potenza che può essere richiesta dalla cabina, che nelle peggiori condizioni di guasto coincide con la potenza erogabile dalla rete a seguito di corto circuito in quel punto, valore normalmente indicato dalla società distributrice di energia.

Essendo tale interruttore non visibile, la manovra del sezionatore  $S_2$  viene resa dipendente dalla manovra dell'interruttore  $T_1$  in modo da essere certi che non venga aperto il sezionatore prima dell'interruttore. Inoltre il collegamento tra sezionatore ed interruttore può essere impiegato per inserirvi tutte le misure che si desiderano effettuare. A monte dell'interruttore  $T_1$  vengono installati i gruppi di misure, che collegano i contatori trifasi di energia attiva e reattiva mediante i riduttori amperometrici TA e voltmetrici TV.

L'uscita dell'interruttore si collega ad un sistema di sbarre, dalle quali si derivano i diversi trasformatori previsti in cabina. Tra sbarre MT e trasformatore è opportuno sempre prevedere un elemento di sezionamento: la soluzione più economica è quella di utilizzare un

sezionatore ( $S_3$ ), che si apre in caso di funzionamento a vuoto prolungato nel tempo del trasformatore, e una valvola fusibile ( $F_1$ ), che si apre in caso di sovracorrente di guasto.

I trasformatori possono funzionare in parallelo e normalmente hanno il primario collegato a triangolo ed il secondario collegato a stella o a zig-zag, con quarto morsetto per il neutro.

All'uscita dei trasformatori, sul lato BT, sono previsti degli interruttori in aria che consentono l'inserzione in parallelo dei trasformatori su un sistema di sbarre BT. Da queste si diramano le varie linee di distribuzione, ognuna dotata di un interruttore, con protezione di massima corrente, e di strumenti di misura (generalmente almeno di un amperometro).

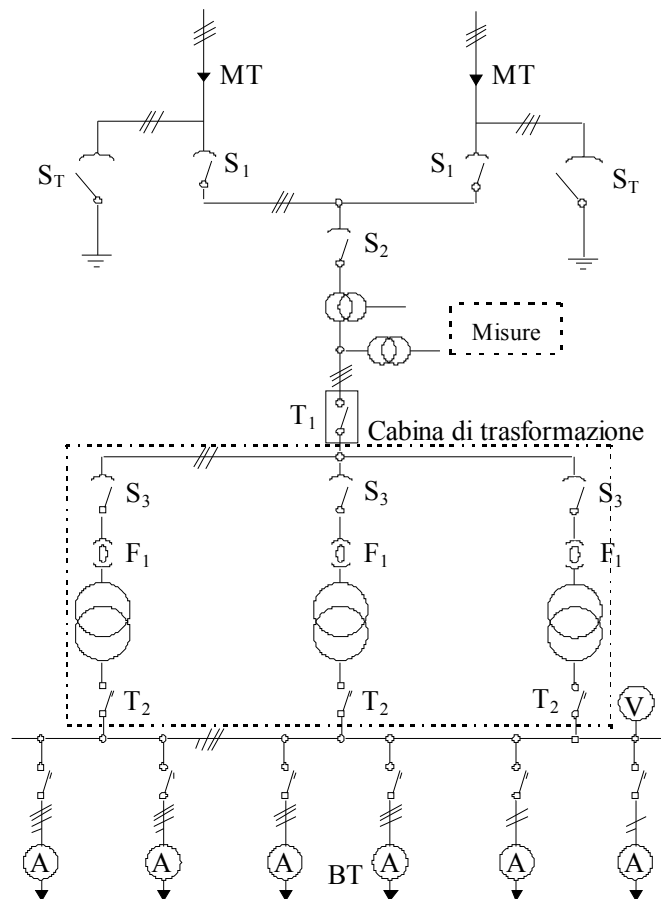


fig. 3.1.1



In ogni cabina inoltre devono essere previste opportune protezioni, imposte dalla legge, dalle normative tecniche e da esigenze di continuità di servizio e di sicurezza; tra queste si ricordano:

- Impianto di messa a terra. Tutte le parti metalliche della cabina debbono essere collegate a dispersori di terra con conduttori di sezione opportuna.
- Scaricatori. Per proteggere la cabina da eventuali sovratensioni di origine interna o esterna, è opportuno prevedere, derivati fra ogni fase delle linee in arrivo e terra, degli elementi scaricatori capaci di limitare le sovratensioni a valori non pericolosi per le apparecchiature. Il morsetto di terra degli scaricatori va collegato alle terre di protezione prima descritte.
- Relè. Per proteggere gli impianti da possibili sovracorrenti o da variazioni di tensione intollerabili, è opportuno ricorrere ai relè, dispositivi che comandano il distacco dei carichi, o istantaneamente (relè a scatto istantaneo) o dopo un tempo finito (relè a tempo).
- Protezioni meccaniche. Nelle cabine, tutte le parti in tensione, accessibili alle persone, debbono essere protette con opportune reti di protezione; esse debbono essere a maglie sottili, poste ad opportuna distanza dalle parti in tensione connesse all'impianto di terra della cabina.

Di queste protezioni attive e passive si darà maggior conto nei capitoli seguenti, in particolare per gli impianti BT.

## **CAPITOLO 4**

### **DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE LINEE DI DISTRIBUZIONE IN BASSA TENSIONE**

#### **4.1) DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA IN BT**

Gli impianti di distribuzione in BT devono distribuire efficientemente l'energia elettrica con la migliore continuità di servizio possibile, con le minori perdite di dispersione possibili e devono risultare sicuri sia per le apparecchiature che per le persone.

La distribuzione di energia elettrica in bassa tensione viene realizzata con cavi unipolari o multipolari; tale cavi si possono distinguere in cavi a doppio isolamento oppure corde isolate senza guaina di protezione, in quest'ultimo caso è necessario utilizzare cavidotti di protezione, e nel caso di cavidotti metallici essi debbono essere connessi a terra a terra.

Le linee di distribuzione in BT sono monofasi (fase + neutro) o trifasi (con e senza neutro) possono avere diversi tipi di posa:

- 1) posa in aria libera, effettuata solo per i cavi a doppio isolamento;
- 2) posa in cavidotti plastici o metallici;

inoltre, a seconda del tipo di posa, il cavo ha una più elevata o bassa capacità di smaltire il calore prodotto dal passaggio di corrente.

I sistemi di distribuzione a bassa tensione variano a seconda della destinazione d'uso, infatti per utenze ad uso civile si hanno:

- 1) Sistemi di distribuzione a circuiti indipendenti (ad esempio per le abitazioni), in cui gli elementi di protezione (fusibili, interruttori automatici, etc.) e di misura (contatori) sono ubicati nello stesso punto e le linee di uscita seguono percorsi distinti completamente indipendenti (fig. 4.1.1):

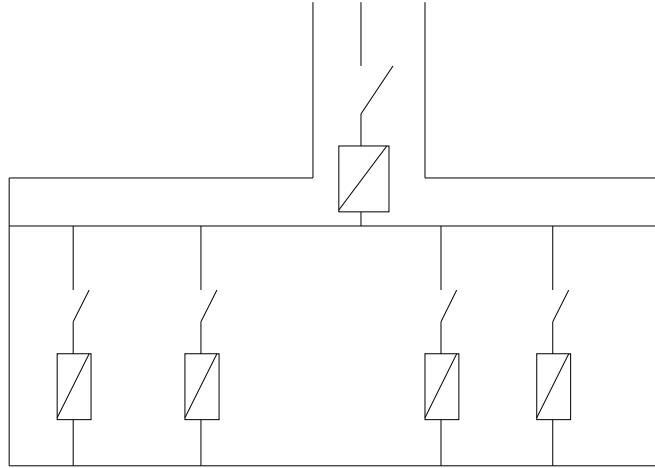


fig. 4.1.1

2) Sistemi di distribuzione a colonna montante (per utenze un po' più grandi come gli ospedali o i centri commerciali), in cui gli elementi di protezione e di misura sono ubicati in prossimità di ciascuna utenza (fig. 4.1.2):

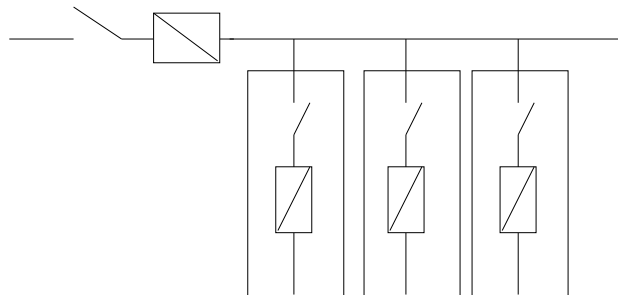


fig. 4.1.2

Per utenze industriali si hanno linee trifasi, e per potenze installate maggiori di 50, 100 kW risulta più conveniente ed opportuno prevedere una propria cabina di trasformazione, in posizione possibilmente baricentrale rispetto ai carichi. Con riferimento alla sicurezza, sia dell'esercizio che del personale, la miglior soluzione è quella di realizzare le linee in cavo.

Il dimensionamento delle linee inizia ad essere di grande importanza e bisogna tenere presente sia le esigenze termiche (portata dei cavi)

che quelle elettriche (caduta di tensione a pieno carico nel punto più lontano).

#### 4.2) VERIFICA DELLA PORTATA DEI CAVI

- Conduttore percorso da corrente

Un conduttore percorso da corrente assume una temperatura  $T_c$ , maggiore della temperatura ambiente  $T_a$ . Tale aumento di temperatura è dovuto essenzialmente al calore sviluppato per effetto joule nel conduttore, perché il calore prodotto nel dielettrico è generalmente trascurabile. Nell'ipotesi semplificativa di un conduttore cilindrico di raggio  $r_c$ , resistività elettrica  $\rho$ , percorso da una corrente uniformemente distribuita al suo interno che ha valore efficace  $I$ , avvolto da uno strato omogeneo di dielettrico di spessore  $r_a - r_c$ , e di conducibilità termica  $\sigma_T$ , uguagliando il calore prodotto dal conduttore a quello trasmesso all'esterno si ottiene:

$$T_c - T_a = \frac{I^2 \rho}{2\sigma_T \pi^2 r_c^2} \ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right) \quad (4.2.1)$$

In casi più complessi, per esempio con più conduttori e/o più spessori di dielettrico, l'aumento di temperatura è comunque proporzionale al calore prodotto, quindi al quadrato del valore efficace della corrente, ed aumenta al diminuire dello spessore dell'isolante.

Le temperature assunte dal conduttore debbono essere compatibili con il tipo di materiale isolante che riveste il conduttore stesso.

- Isolante scaldato dal conduttore

I materiali isolanti, utilizzati in genere in bassa tensione, subiscono un'ossidazione (che degrada il materiale) tanto più intensa quanto maggiore è la temperatura. Per durata di vita dell'isolante a una certa temperatura si intende il tempo per cui l'isolante può sopportare in modo continuo tale temperatura, prima che le sue caratteristiche elettriche, e soprattutto meccaniche, decadano in modo inaccettabile e provocano la rottura del componente. E' ovvio che la durata di vita diminuisce all'aumentare della temperatura.

In figura 4.2.1 sono indicate le durate di vita del polvinilcloruro (PVC) e della gomma etilenpropilenica (EPR) in funzione della temperatura (curva di vita).

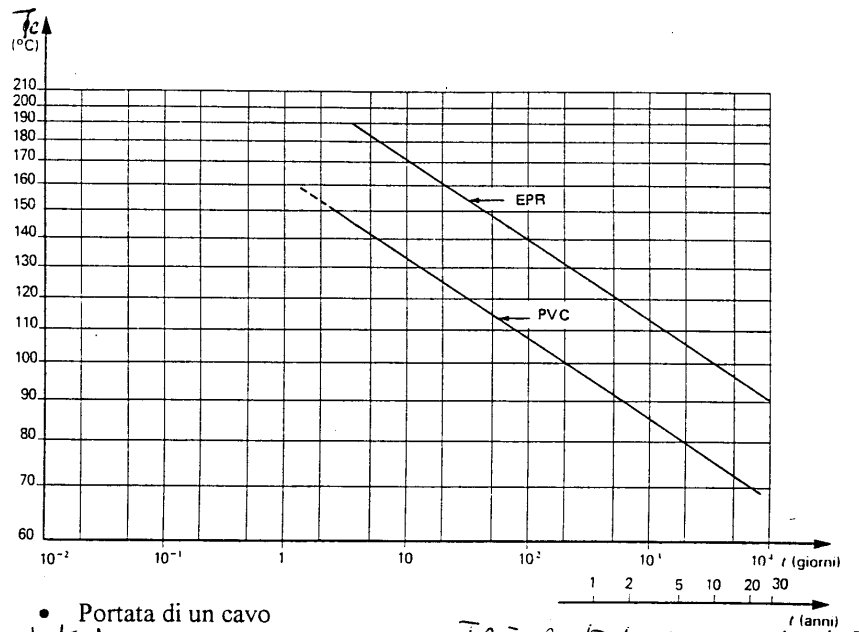


fig. 4.2.1

Per ogni tipo di isolante è definita una temperatura  $T_s$  che non deve essere superata, nel servizio ordinario, per assicurare al cavo una conveniente durata. Tale temperatura  $T_s$  prende il nome di massima temperatura di servizio.

Ad esempio per la gomma  $G_5$  (miscela a base di EPR) la massima temperatura di servizio è di 85°C, per il PVC 70°C; a queste temperature corrisponde una durata di vita di circa 30 e 20 anni rispettivamente.

- Portata di un cavo

Lo strato di isolante a contatto con la superficie del conduttore assume la stessa temperatura  $T_c$  del conduttore; se  $T_l$  è la temperatura limite stabilita in base al tempo di vita desiderato deve essere allora:

$$T_c \leq T_l$$

Sostituendo  $T_c$  con  $T_l$  nella (4.2.1) si ricava la portata del cavo  $I_Z$ , cioè il più elevato valore efficace di corrente che a regime il cavo può trasmettere, in condizioni di posa determinate, senza superare la massima temperatura di servizio:

$$I_Z = \pi r_c \sqrt{\frac{2(T_s - T_a)\sigma_T}{\rho \ln(r_a/r_c)}} \quad (4.2.2)$$

Questa formula è estremamente semplificata e solo indicativa (perché non tiene conto dell'effetto pelle, dell'influenza di un conduttore sugli altri, delle perdite dielettriche, di eventuali guaine, ecc.) ma è utile per svolgere alcune considerazioni:

- la portata dipende dall'attitudine dell'isolante a sopportare la temperatura, ( $T_s$ );
- la portata dipende dai parametri che influiscono sulla produzione di calore, ( $P, r$ );
- la portata dipende dai fattori che influenzano lo scambio termico tra cavo e ambiente circostante quali: temperatura ambiente, numero e modalità di posa dei conduttori: in cunicolo, in canaletta, in condotto, in tubo, ecc., ( $T_a, \sigma_T$ );
- la portata non varia proporzionalmente alla sezione  $S$ , ma secondo una legge del tipo  $I_Z = aS^b$  dove  $b$  è un numero inferiore a uno, pari a 0,75 nel calcolo semplificato sopra esposto, in realtà pari a 0.625 secondo la norma CEI 20-21.

Nelle tabelle 4.2.1 e 4.2.2 sono indicati i valori tipici delle portate in regime permanente di cavi in rame unipolari con e senza guaina, multipolari, isolati in PVC, in gomma e polietilene reticolato, in diverse condizioni di posa, vedi figg. 4.2.2 e 4.2.3. Le portate sono riferite a una temperatura ambiente di riferimento  $T_{ar} = 30^\circ\text{C}$ , dove per ambiente si intende la zona circostante il cavo.

Se la temperatura ambiente  $T_a$  è diversa da quella di riferimento, dalla (4.2.2) si ricava immediatamente la portata  $(I_Z)_{T_{ar}}$  alla temperatura ambiente di riferimento  $T_{ar}$  (tabella 4.2.1):

$$(I_Z)_{T_a} = (I_Z)_{T_{ar}} \sqrt{\frac{T_s - T_a}{T_s - T_{ar}}}$$

dove:  $T_a$  è la temperatura ambiente,  
 $T_{ar}$  è la temperatura ambiente cui sono riferite le portate della tabella 4.2.1, pari a 30°C,  
 $(I_z)_{T_{ar}}$  è la portata alla temperatura di riferimento  $T_{ar}$ ,  
 $(I_z)_{T_a}$  è la portata alla temperatura  $T_a$ .

Tabella 4.2.1: Portata di corrente per cavi isolati in PVC

Sezione	Posa in aria entro tubi o cassette appoggiati al muro		Posa in aria libera, cavi appoggiati al muro		Posa direttamente interrata	
	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare
Area nom.	A		A		A	
mm <sup>2</sup>	A		A		A	
1,5	19,5	19,5	24	22	30	28,5
2,5	26	26	33	30	41	38
4	35	35	45	40	53	49
6	46	46	58	52	67	61
10	63	63	80	71	89	81
16	85	85	107	96	115	104
25	112	112	142	127	149	133
35	138	138	175	157	179	159
50	168	168	212	190	210	188
70	213	213	270	242	260	230
95	268	268	327	293	315	275
120	299	299	379	339	360	315
150	344	344	435	390	400	350
185	392	392	496	444	455	390
240	461	461	584	522	530	460
300	530	530	665	600	585	520
400	605	605	760	690	665	595
500	680	680	865	-	745	-
630	770	770	1000	-	835	-

N.B.: I valori riportati in tabella sono riferiti alle seguenti condizioni di esercizio e di posa:

- Temperatura di esercizio conduttore: 70°C
- Temperatura ambiente per posa in aria: 30°C
- Temperatura del terreno per posa interrata: 20°C

- Resistività termica del terreno: 100°C cm/W

**Tabella 4.2.2: Portata di corrente per cavi isolati in gomma di tipo G5**

Sezione	Posa in aria entro tubi o cassette appoggiati al muro		Posa in aria libera, cavi appoggiati al muro		Posa direttamente interrata	
	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare	3 cavi unipolari	1 cavo tripolare
mm2	A	A	A	A	A	A
1,5	15,5	15,5	19,5	17,5	26	25
2,5	21	21	26	24	37	34
4	28	28	35	32	47	43
6	36	36	46	41	60	53
10	50	50	63	57	79	71
16	68	68	85	76	102	93
25	89	89	112	101	132	120
35	111	111	138	125	158	145
50	134	134	168	151	190	172
70	171	171	213	193	230	215
95	207	207	258	232	280	250
120	239	239	299	269	315	290
150	275	275	344	309	355	325
185	314	314	392	353	405	365
240	369	369	461	415	470	430
300	420	420	530	470	520	490
400	485	485	605	540	580	555
500	550	545	690	610	660	630
630	640	-	800	-	740	-

N.B.: I valori riportati in tabella sono riferiti alle seguenti condizioni di esercizio e di posa:

- Temperatura di esercizio conduttore: 85°C
- Temperatura ambiente per posa in aria: 30°C
- Temperatura del terreno per posa interrata: 20°C
- Resistività termica del terreno: 100°C cm/W



Capitolo 4 – Dimensionamento e verifica delle linee di distribuzione in bassa tensione

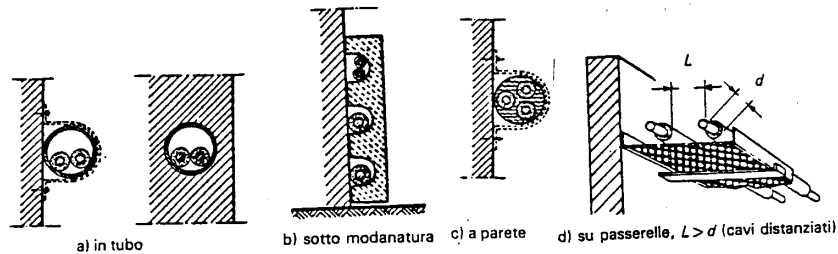


fig. 4.2.2

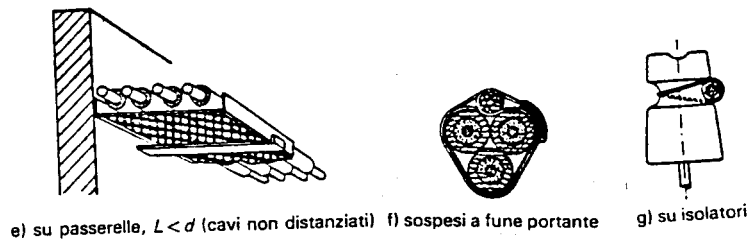


fig. 4.2.3

Bisogna verificare che il cavo abbia una sezione tale da sopportare permanentemente la corrente massima di utilizzo prevista; nella pratica esistono tabelle come le 4.2.1 e 4.2.2 che indicano la portata di corrente in funzione del tipo di cavo, della sua sezione e del tipo di posa.

Inoltre è molto importante valutare la presenza anche di altri conduttori.

Come si nota dalla tabella la densità di corrente ammissibile diminuisce con l'aumentare della corrente, ad esempio a parità di tipo di cavo e di posa si ha:

1.5 mm <sup>2</sup>	19.5 A
150 mm <sup>2</sup>	344 A (invece di 1950 A)

ciò è dovuto a due fattori:

- Il calore prodotto è funzione del quadrato del raggio del conduttore, mentre il calore smaltito è funzione lineare del raggio;

- L'effetto pelle, che aumenta all'aumentare della sezione del conduttore.

#### 4.3) TRANSITORI TERMICI DEI CAVI

Un cavo, posto nelle condizioni d'installazione a cui la portata si riferisce, se è percorso dalla corrente  $I_z$  assume nell'interfaccia conduttore - isolante, a regime termico, la massima temperatura di servizio  $T_s$ . Al verificarsi di una sovracorrente la temperatura del cavo aumenta; se la sovracorrente perdura per un tempo sufficientemente lungo, il cavo raggiunge, attraverso un transitorio termico, una nuova temperatura di regime.

Se si indica con  $T$  la temperatura assunta dal conduttore nel generico istante  $t$ , il bilancio termico (semplificato) nell'intervallo di tempo elementare  $dt$  con le stesse ipotesi viste nel paragrafo 4.2, vale:

$$\frac{\rho}{\pi r_c^2} I^2 dt = 2\sigma_T \pi r_c (T - T_a) dt + \pi r_c^2 c dT$$

dove:

- $\rho$  è la resistività del conduttore,
- $r_c$  è il raggio della sezione del conduttore,
- $l$  è la lunghezza del conduttore,
- $I$  è l'intensità di corrente,
- $\sigma_T$  è il coefficiente di conducibilità termica tra conduttore e ambiente,
- $T_a$  è la temperatura ambiente,
- $c$  è il calore specifico riferito all'unità di volume.

Se si assume, in prima e grossolana approssimazione, che  $\rho$ ,  $\sigma_T$ ,  $c$  siano costanti con la temperatura, e posto:

$$(T - T_a) = x$$

si perviene all'equazione differenziale a coefficienti costanti:

$$\frac{dx}{dt} + \delta x = \beta$$

Capitolo 4 – Dimensionamento e verifica delle linee di distribuzione in bassa tensione

dove:  $\delta = \frac{2\sigma_r}{r_c}$  e  $\beta = \frac{\rho I^2}{c\pi^2 r_c^4}$ .

Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene:

$$x = Ae^{-\delta t} + \frac{\beta}{\delta} \quad (4.3.1)$$

dove  $Ae^{-\delta t}$  è l'integrale generale dell'omogenea associata e  $\frac{\beta}{\delta}$  l'integrale particolare.

All'istante  $t = 0$  in cui inizia la sovracorrente il conduttore si trova, per ipotesi, alla massima temperatura di servizio ( $T = T_s$ ). Imponendo questa condizione iniziale nella (4.3.1), si ricava la costante di integrazione:

$$A = T_s - T_a - \frac{\beta}{\delta}$$

Per  $t = \infty$ , in pratica dopo un tempo sufficientemente lungo, il cavo raggiunge il regime termico e assume una nuova temperatura  $T_r$ . Dalla (4.3.1) per  $t = \infty$ ,  $T = T_r$  si ricava:

$$T_r - T_a = \frac{\beta}{\delta}$$

da cui:

$$A = T_s - T_r$$

e infine, la (4.3.1) assume la forma:

$$T = T_r - (T_r - T_s)e^{-\frac{2\sigma_r t}{r_c}}$$

Ovvero:

$$= T_a + \frac{\rho I^2}{2\sigma_r \pi^2 r_c^3} - \left( T_a + \frac{\rho I^2}{2\sigma_r \pi^2 r_c^3} - T_s \right) e^{-\frac{2\sigma_r t}{r_c}} \quad (4.3.2)$$

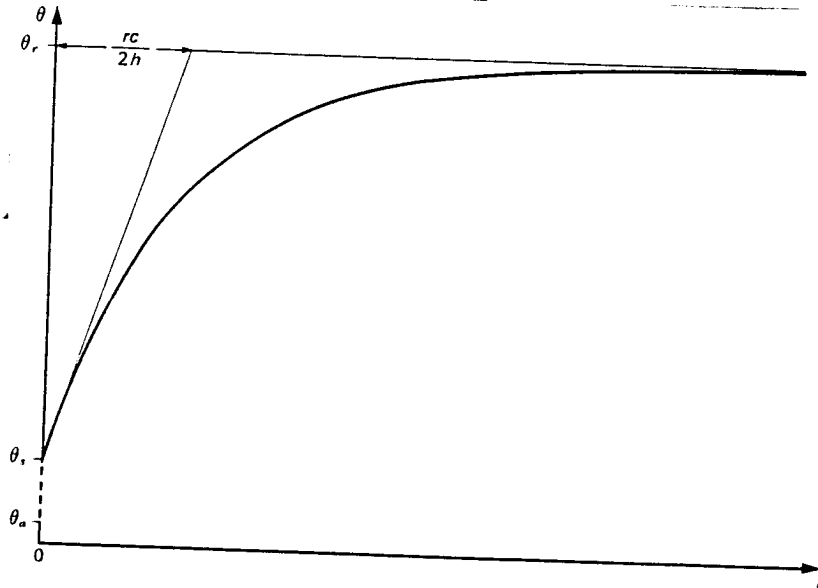


fig. 4.3.1

La figura 4.3.1 mostra l'andamento della temperatura del conduttore; il fattore  $\frac{r_c c}{2\sigma_T}$  costituisce la costante di tempo termica del cavo. In realtà i coefficienti dell'equazione differenziale non sono costanti, come supposto, ma variabili con la temperatura e il calcolo della temperatura  $T$  del conduttore è più complesso.

#### 4.4) SOVRACCARICABILITA' DI UN CAVO

Un cavo percorso a regime da una corrente pari alla sua portata  $I_Z$ , se è installato nelle condizioni cui la portata si riferisce, assume la temperatura  $T_s$ , corrispondente a una conveniente durata di vita (fig. 4.2.1). Ogni corrente superiore a  $I_Z$ , cioè ogni sovracorrente, porta il cavo a una temperatura superiore a  $T_s$  e dunque abbrevia la vita del cavo rispetto a quella corrispondente a  $T_s$ .

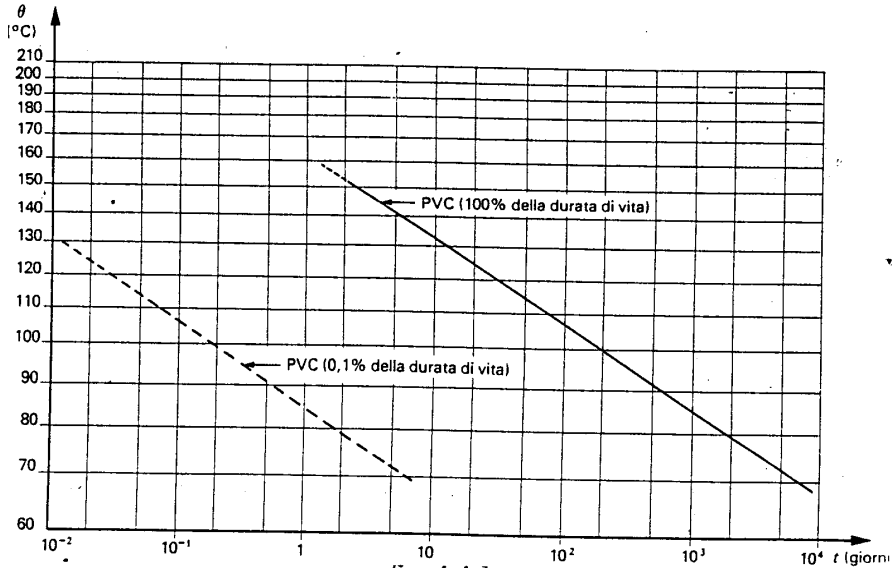


fig. 4.4.1

Una sovracorrente di intensità  $I$  che duri per il tempo  $t$ , porta il conduttore a una temperatura  $T$  individuata dalla (4.3.2).

Se la durata  $t$  della sovracorrente è sufficientemente lunga in relazione alla costante di tempo termica del cavo, il cavo raggiunge la temperatura di regime  $T_r$ ; diversamente raggiunge una temperatura  $T$  intermedia tra  $T_s$  e  $T_r$ . In entrambi i casi, a favore della sicurezza, si può assumere che la temperatura finale raggiunta dal cavo permanga per tutta la durata  $t$  della sovracorrente. Questo è tanto più vero, quanto maggiore è il rapporto tra la durata  $t$  e la costante di tempo termica del cavo.

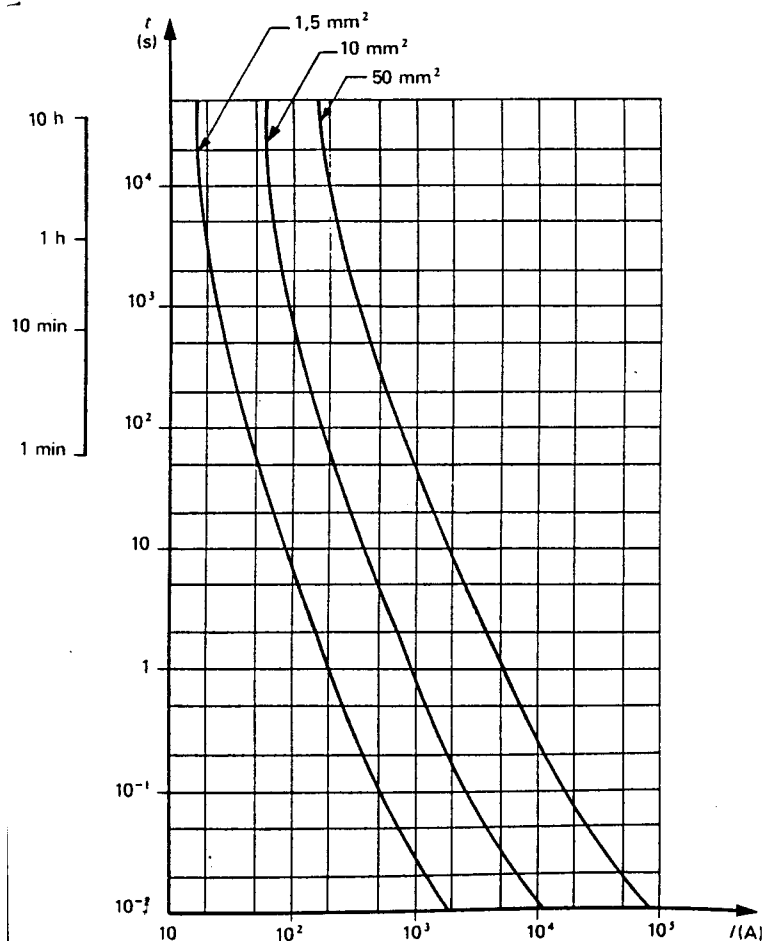


fig. 4.4.2

Una volta stabilita la relazione tra l'evento di sovracorrente ( $I, t$ ) e la sollecitazione termica ( $T, t$ ), occorre stabilire la sollecitazione termica tollerabile. Poiché, come si è detto, ogni sollecitazione termica corrisponde a una perdita di vita del cavo, rispetto a quella attesa ( $T = T_s$ ), si tratta, alla fine, di stabilire quale sia la perdita di vita accettabile.

Convenzionalmente, si ritiene tollerabile una perdita di vita del cavo del 10% per l'insieme degli eventi di sovracorrente che possono prodursi durante l'intera vita del cavo. Se si suppone che il cavo possa essere soggetto a non più di cento eventi di sovracorrente, ne consegue come accettabile una perdita di vita dello 0,1% per ogni

singolo evento di sovracorrente. In fig. 4.4.1, accanto alla retta di durata di vita (100%) di un cavo in PVC, è indicata la retta rappresentativa dello 0,1% della durata di vita. Una sovracorrente  $I$  che duri il tempo  $t$  è allora tollerabile e dà origine a una temperatura non superiore a quella corrispondente allo stesso tempo  $t$  sulla retta dello 0,1% della durata di vita (fig. 4.4.1).

In base ai principi ora indicati si può ricavare la curva di sovraccaricabilità di un cavo installato in condizioni specificate (fig. 4.4.2). Le coppie di valori  $I, t$  delle curve di fig. 4.4.2, corrispondono tramite la (4.3.2) a coppie di valori  $T, t$  che si trovano sulla retta dello 0,1% di durata della vita di fig. 4.4.1 (con l'approssimazione che la temperatura  $T_r$  duri per tutto il tempo  $t$ ).

#### 4.5) VERIFICA DELLA MASSIMA CADUTA DI TENSIONE

Bisogna verificare che il cavo non provochi una caduta di tensione a fondo linea con conseguente riduzione dell'efficienza di illuminazione (ad esempio sfarfallio della sorgente luminosa), se si tratta di una linea luce, o sovraccarico di corrente nei motori, che possono non partire e bloccarsi, se si tratta di una motrice. Dal punto di vista dinamico, minore è la caduta di tensione sul cavo, minori sono i rimbalzi di sovratensioni nella rete.

La verifica della massima caduta di tensione deve tener conto del fatto che il circuito sia monofase o trifase, e del fattore di potenza dei circuiti:

- Circuiti monofasi

si ha il problema illustrato in fig. 4.5.1. Bisogna verificare che la caduta di tensione non superi i seguenti valori:

$$\Delta V = \left| \dot{V}_i - \dot{V}_f \right| \leq \begin{cases} 3\% \text{ per le linee luce} \\ 5\% \text{ per le linee forza motrice} \end{cases}$$

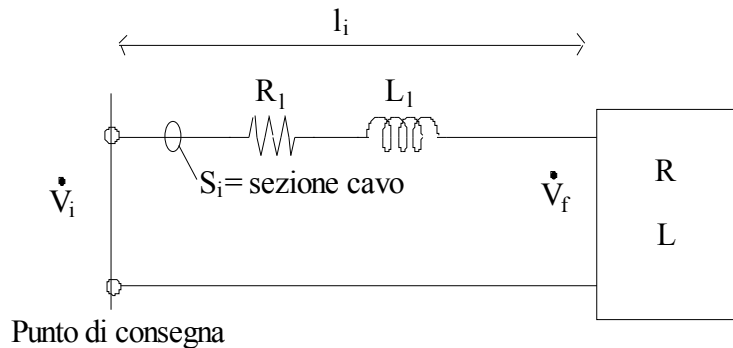


fig. 4.5.1

Per il circuito monofase si è visto che la caduta di tensione scalare risulta essere:

$$\Delta V = R_1 I \cos \varphi + X_1 I \sin \varphi \quad (4.5.1)$$

Normalmente nei circuiti in bassa tensione risulta  $X_1 < R_1$  ed i carichi sono rifasati, perciò si trascura il secondo addendo della (4.5.1) ed essendo  $\cos \varphi > \sin \varphi$ , si ha:

$$\Delta V \cong R_1 I \cos \varphi \quad (4.5.2)$$

Detta  $\rho$  la resistività del cavo, se la linea è data dalla somma di  $n$  tronchi di lunghezza  $l_i$  e sezione  $S_i$ , ognuno dei quali è percorso dalla stessa corrente, deve essere verificata la seguente equazione:

$$2 \cdot \sum_{i=1}^n \rho \frac{l_i}{S_i} I \cos \varphi_i \leq \Delta V \quad (4.5.3)$$

Spesso il valore di  $\cos \varphi_i$  è vicino ad 1 ed allora, anche in favore della sicurezza si può trascurare il valore dei  $\cos \varphi_i$  nella (4.5.3).

- Circuiti trifasi

In questo caso non è più valida la semplificazione fatta nel caso di circuito monofase, inoltre si deve distinguere tra distribuzione a sbalzo o radiale e distribuzione ad anello e bisogna verificare che la



caduta di tensione massima per fase ( $\Delta E$ ) non superi un valore pari all'incirca all'8% della tensione nominale.

a) Distribuzione a sbalzo.

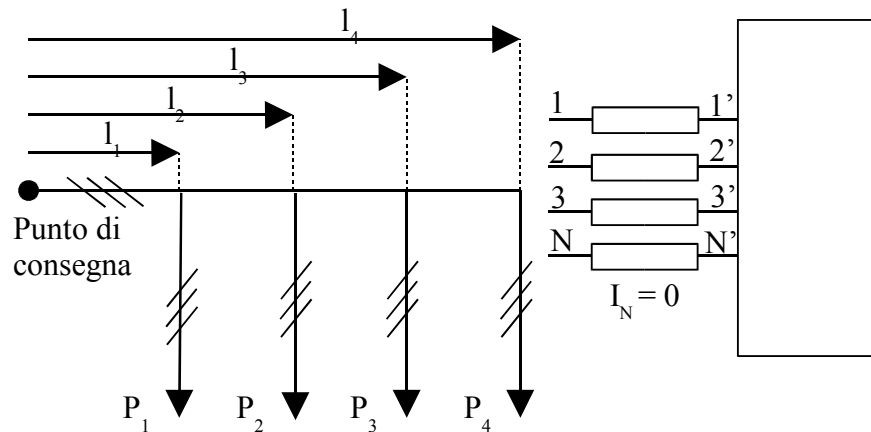


fig. 4.5.2

Considerando la fig. 4.5.2 si suppone che i carichi funzionino tutti contemporaneamente (funzionamento a pieno carico); il calcolo della caduta di tensione nel punto più lontano diventa abbastanza complicato in quanto si ha una somma vettoriale di fasori sfasati tra di loro. Si opera una semplificazione considerando ancora la (4.5.2) e quindi le parti attive delle correnti assorbite dai carichi (fig. 4.5.3), di modo che risulti, considerando una delle tre fasi:

$$I_i \cong I_i \cos \varphi_i$$

$$\Delta E_i = R I_i \cos \varphi_i$$

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n \Delta E_i = \sum_{i=1}^n \rho \frac{l_i}{S_l} I_i \cos \varphi_i$$

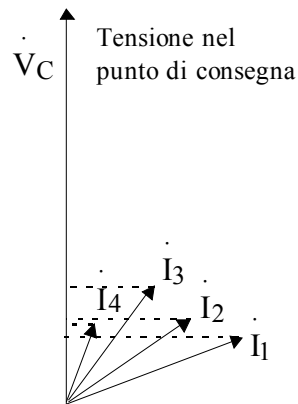


fig. 4.5.3

Le correnti attive assorbite dai carichi, note la tensione nominale  $V$ , le potenze ed i fattori di potenza di ciascun carico, si ottengono dalla:

$$I_i = \frac{P_i}{\sqrt{3}V} \quad (4.5.4)$$

Per il carico trifase a quattro fili di fig. 4.5.2, la caduta di tensione sul tratto 1-1' è  $\Delta E_1$ , sul tratto 2-2' è  $\Delta E_2$  e così via, essendo  $\Delta V = \sqrt{3} \Delta E$  (fig. 4.5.4) risulta anche:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta E}{E} \quad (4.5.5)$$

quindi nel circuito trifase è come se ci fosse il solo filo di andata ( $I_N = 0$ ) ed il coefficiente 2 presente nel caso monofase deve essere ommesso.

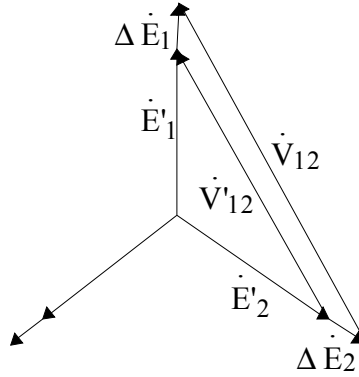


fig. 4.5.4

Applicando ora quanto detto ai quattro carichi di figura 4.5.2 si ottiene:

$$\Delta V = \frac{\rho}{S} [l_1(I_1 + I_2 + I_3 + I_4) + (l_2 - l_1)(I_2 + I_3 + I_4) + (l_3 - l_2)(I_3 + I_4) + (l_4 - l_3)I_4] \quad (4.5.6)$$

Mettendo in evidenza  $l_1, l_2, l_3,$  e  $l_4$  si ha:

$$\Delta V = \frac{\rho}{S} \sum_{i=1}^n l_i I_i \leq \Delta E \cong 8\% \quad (4.5.7)$$

La (4.5.7) è simile all'equazione di equilibrio di una trave (momento all'incastro dei carichi elettrici nel punto di consegna) e per questo è detta metodo dei momenti elettrici.

b) Distribuzione ad anello.

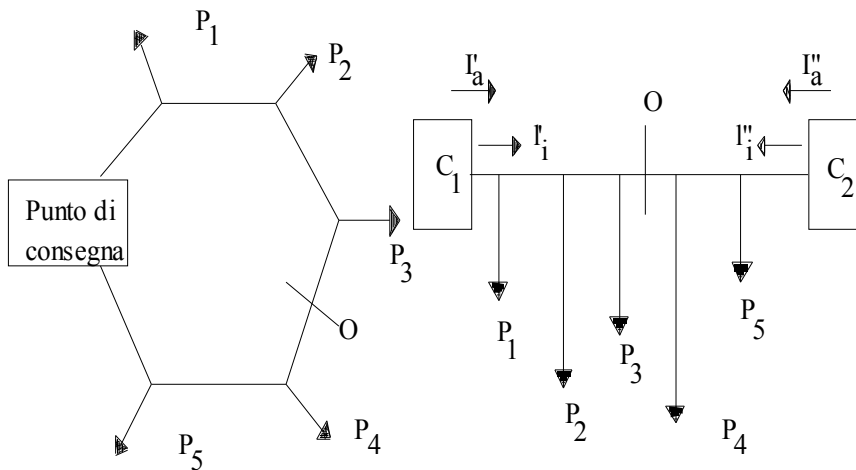


fig. 4.5.5

Nel caso di distribuzione ad anello si trova il punto di inversione  $O$  dell'alimentazione (linea tratteggiata di fig. 4.5.5) e si trasforma l'anello in due linee a sbalzo; in tal modo si separano i carichi alimentati da destra ( $I'_a$ ), da quelli alimentati da sinistra ( $I''_a$ ). Se la sezione  $S$  del cavo è costante, il punto di inversione può essere individuato con il bilanciamento dei momenti elettrici:

$$\Delta V_{C_1 C_2} = 0 \rightarrow M'_a = M''_a = 0$$

$$M'_a = I'_a l - \sum_{i=1}^n I_i l'_i = 0 \quad ; \quad M''_a = I''_a l - \sum_{i=1}^n I_i l''_i = 0$$

da cui si ottiene:

$$I'_a = \sum_{i=1}^n \frac{l''_i I_i}{l} \quad ; \quad I''_a = \sum_{i=1}^n \frac{l'_i I_i}{l} \quad (4.5.8)$$

una volta individuato il punto di inserzione  $O$  si procede come nel caso di distribuzione a sbalzo.

## CAPITOLO 5

### PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI DI BT DA SOVRACCARICHI E GUASTI

#### 5.1) SOVRACORRENTI

In generale sia la linea elettrica che il carico utilizzatore devono essere protetti elettricamente:

la massima corrente di funzionamento deve essere minore della portata  $I_Z$  del cavo, cioè il più elevato valore di corrente che a regime il cavo può trasmettere. Tale corrente è stabilita dai dati di targa del carico:

$$I_{Max} < I_Z \quad (5.1.1)$$

Se ci sono più carichi si effettua una media delle correnti in relazione al funzionamento contemporaneo o meno dei carichi, individuando la condizione più gravosa di trasporto dell'energia a cui corrisponde la  $I_{Max}$ .

Se i valori di corrente sono inferiori alla portata del cavo, non sussiste ovviamente alcun problema. Quando invece i valori di corrente superano la  $I_Z$  si verifica il fenomeno della sovracorrente, deleterio in quanto può provocare un repentino deterioramento delle caratteristiche meccaniche e dielettriche dell'isolante nonché un danneggiamento del carico; esistono due tipi di sovracorrenti, che vengono rispettivamente classificate sovraccarico e guasto.

1) Sovraccarico: si ha quando l'assorbimento di corrente dovuto al prelievo di potenza è maggiore di quello previsto nominalmente, ad esempio quando per errore si fa funzionare contemporaneamente un numero di utilizzatori maggiore di quello per il quale la linea stessa è stata progettata.

2) Guasto: si ha quando si verifica un corto circuito tra due o più fasi tra di loro e/o tra una fase ed il neutro e/o tra una fase e la terra, che provoca una sovracorrente. La causa del guasto può essere ad esempio un difetto di isolamento dei conduttori.

Il guasto più grave è il guasto trifase netto (corto circuito delle tre fasi) all'inizio della linea (fig. 5.1.1), per cui si ha una impedenza di collegamento nulla e la massima corrente di corto circuito.

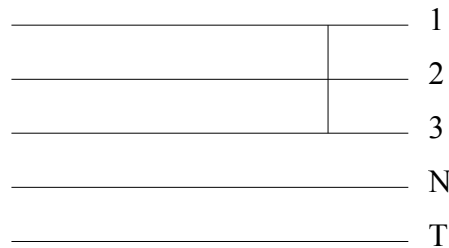


fig. 5.1.1

Invece la minima corrente di corto circuito si verifica generalmente quando una delle fasi si richiude sul neutro o sulla terra alla fine della linea (fig. 5.1.2)

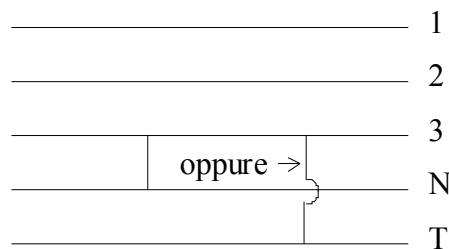


fig. 5.1.2

La corrente di corto circuito è la risultante di due componenti: una è permanente sinusoidale con frequenza  $f$  uguale alla frequenza di rete, l'altra è transiente (di tipo aperiodico smorzato o periodico oscillatorio smorzato) con frequenza maggiore di quella di rete. Il calcolo della componente transiente si effettua analizzando il sistema nel dominio del tempo. Tale analisi non è in generale agevole. Pertanto, per avere una stima dell'ampiezza massima di tale corrente si moltiplica la componente permanente della corrente di corto circuito per un fattore  $k$  dipendente dalle caratteristiche della rete e dal tipo di guasto ipotizzato.

Una volta definita la portata del cavo il sistema deve essere in grado di scollegarsi se la corrente supera un dato valore di sicurezza. Mentre nel caso di sollecitazioni lentamente variabili il fenomeno di

trasporto di calore all'esterno riveste un ruolo fondamentale nell'equilibrio del cavo, e determina quindi in pratica la corrente di funzionamento e di sovraccarico lentamente variabile. Nel caso di guasto come il corto circuito la costante di tempo (vedi par. 4.3) è di valore assai ridotto e quindi la durata del fenomeno è assai lunga, anche superiore alla decina o centinaia di secondi. In pratica il fenomeno termico si può considerare di tipo adiabatico e l'aumento di temperatura per un dato cavo (ma un ragionamento analogo può essere fatto anche per altri componenti elettrici) è circa proporzionale solamente al calore prodotto nell'unità di tempo moltiplicato per il tempo di permanenza della corrente. Quindi se si definisce Energia Specifica Passante l'integrale della potenza elettrica dissipata nel cavo o nell'utilizzatore:

$$\text{Energia Specifica Passante} = I^2 t \quad (5.1.2)$$

questa è la grandezza che è proporzionale al salto di temperatura nel dielettrico e quindi è quella che interessa nel caso di sovraccarichi veloci o guasti. Quindi in caso di sollecitazione dinamica si può definire un grafico come quello di figura 5.1.3 che definisce, per un dato componente elettrico, per esempio un cavo, la curva di rottura dinamica.

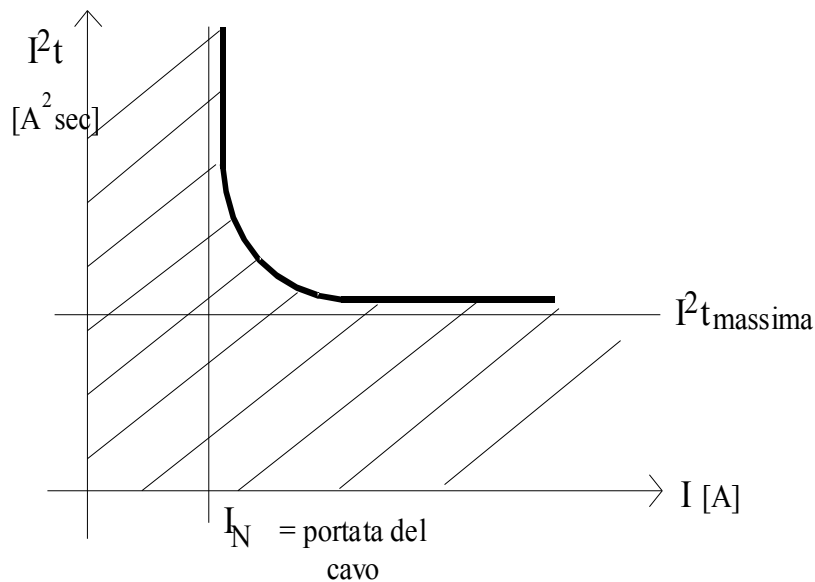


fig. 5.1.3

Se la corrente  $I$  passante nel cavo è all'incirca uguale alla portata del cavo  $I_N$  si ha una rottura statica del cavo stesso, se invece  $I > I_N$  interessa sapere per quanto tempo tale corrente scorre nel cavo, in tal caso si ha una rottura dinamica del cavo. Detta  $R$  la resistenza del cavo per unità di lunghezza,  $W$  l'energia per unità di lunghezza si ha:

$$RI^2t = W \quad (5.1.3)$$

ed essendo  $R$  costante per un dato cavo risulta che  $I^2t$  è direttamente proporzionale a  $W$  quindi a  $\Delta t$ .

Nel grafico di fig. 5.1.3 la zona tratteggiata è la zona di sicurezza in cui non vi sono problemi; l'asintoto verticale riguarda la rottura statica del cavo, quello orizzontale la rottura dinamica.

Una adeguata protezione da fenomeni di sovraccarico e cortocircuito può essere garantita dall'interruttore automatico magnetotermico (fig. 5.2.1).

## 5.2) INTERRUTTORI AUTOMATICI

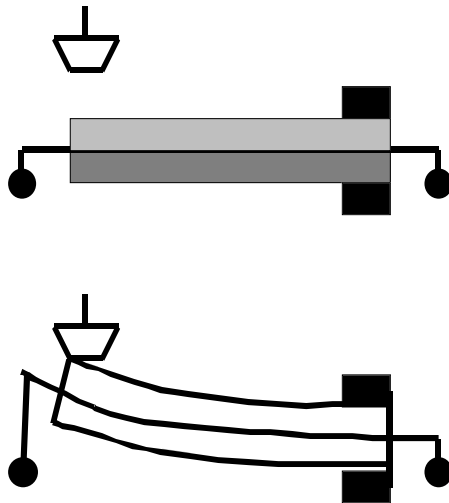


fig. 5.2.1



Un interruttore automatico è composto da uno sganciatore termico accoppiato ad uno sganciatore elettromagnetico. Lo sganciatore termico è costituito da una lamina bimetallica (vedi fig. 5.2.1) che viene riscaldata dal passaggio di corrente, si dilata e sgancia la leva, provocando l'apertura dell'interruttore. A causa della sua stessa natura lo sganciatore termico ha un tempo di intervento inversamente proporzionale all'entità della sovracorrente. Lo sganciatore elettromagnetico è costituito da una bobina di attrazione o repulsione che produce un campo magnetico proporzionale alla corrente che vi fluisce, all'interno della quale è libero di muoversi un corpo metallico collegato allo sganciatore. L'effetto elettromagnetico di attrazione del corpo metallico all'interno della bobina è contrastato da una molla antagonista, opportunamente tarata. Il normale valore di corrente per il quale è stato costruito l'interruttore non è sufficiente a provocare lo sgancio del dispositivo; valori di corrente più elevati fanno sì che la forza esercitata dall'avvolgimento vinca l'opposizione della molla antagonista e provochi la rottura dei contatti in tempi molto brevi.

Ogni interruttore è caratterizzato da una propria corrente nominale  $I_N$ , che viene normalmente definita come quella corrente che l'interruttore può sopportare in servizio ininterrotto senza intervenire.

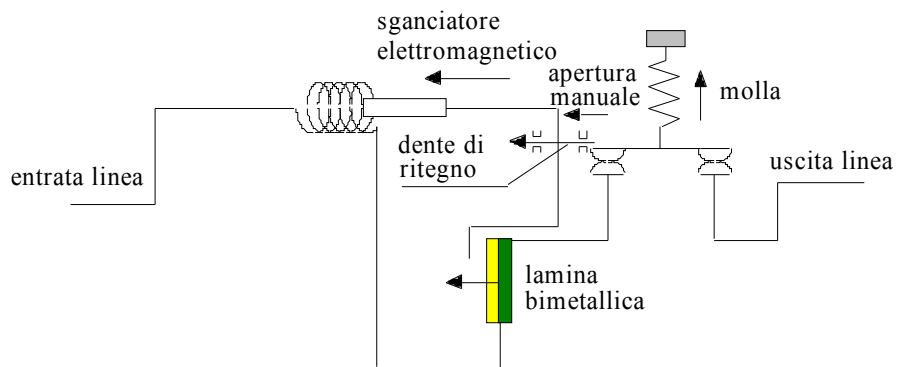


fig. 5.2.2

Altra caratteristica di un interruttore è la sua corrente convenzionale di funzionamento, che viene definita come quel valore di corrente che provoca sicuramente lo sgancio automatico entro un intervallo di tempo determinato.

In fig. 5.2.3 è evidenziata la caratteristica di intervento di un interruttore automatico magnetotermico.

Fino ad un valore determinato, multiplo della  $I_N$ , interviene lo sganciatore termico in un tempo inversamente proporzionale al valore di corrente. Oltre tale valore interviene lo sganciatore magnetico in un tempo sempre costante legato solo alla velocità del dispositivo di sgancio e comunque minore di quello di dilatazione termica.

Come si evince dalla fig. 5.2.3, la caratteristica di intervento non è delimitata da una linea ma da un fascio di valori possibili. Ciò perchè il funzionamento dell'interruttore è subordinato anche alla temperatura dell'ambiente in cui esso è posizionato.

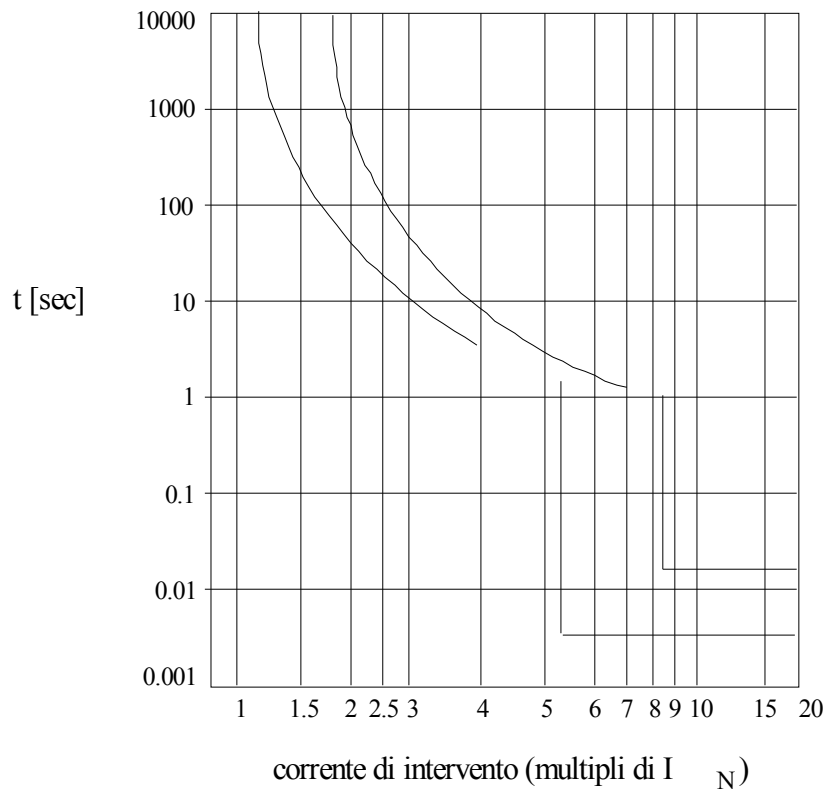


fig. 5.2.3

La fig. 5.2.4 mostra la caratteristica ( $I^2t/I_{cc}$ ) cioè l'energia specifica passante attraverso un interruttore magnetotermico in funzione della

corrente di corto circuito. Essa si ricava dalla caratteristica di intervento dell'interruttore magnetotermico.

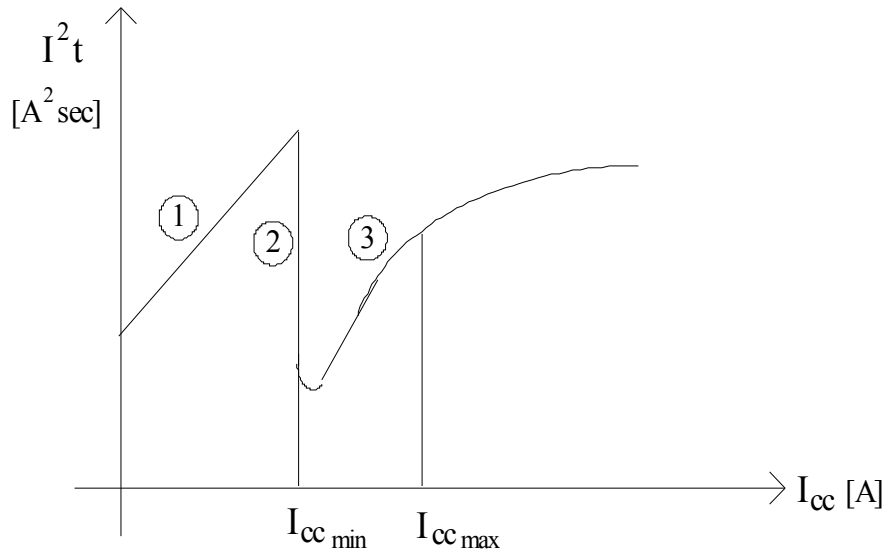


fig. 5.2.4

L'energia termica ( $RI^2$ ) che viene scambiata tra la lamina bimetallica dell'interruttore e l'ambiente esterno è di intensità proporzionale ad  $I^2$ . Se si considera il tratto iperbolico di fig. 5.2.3 per cui risulta:

$$It \cong k = costante \quad (5.2.1)$$

allora si ricava:

$$I^2t = k \cdot I \quad (5.2.2)$$

La (5.2.2) corrisponde al tratto rettilineo (1) della fig. 5.2.4 detto anche tratto di intervento termico dell'interruttore.

Quando poi nell'interruttore interviene l'effetto elettromagnetico di apertura del relè, si ha un tratto della caratteristica di intervento (vedi fig. 5.2.3) per cui risulta:

$$I = costante \quad \forall t \quad (5.2.3)$$

e di conseguenza:

$$I^2 t|_{I^*} = k' \cdot t \quad (5.2.4)$$

dove  $I^*$  è il valore di corrente per cui si ha la caduta verticale nella caratteristica di intervento; la (5.2.4) corrisponde al tratto (2) della fig. 5.2.4.

Infine quando nella caratteristica di intervento si ha:

$$t = \text{costante} \quad (5.2.5)$$

risulta:

$$I^2 t = k'' \cdot I^2 \quad (5.2.6)$$

che corrisponde all'arco di parabola (3) di fig. (5.2.4).

Per essere sicuri che il cavo sia protetto dall'interruttore bisogna effettuare una interpolazione tra la caratteristica di intervento dell'interruttore (fig. 5.2.4) e la curva dell'energia specifica passante ammessa dal cavo (fig. 5.1.3). Da ciò è possibile calcolare i valori della corrente di guasto minima e massima per cui l'interruttore assicura la protezione del cavo stesso.

### 5.3) FUSIBILI

I fusibili sono dispositivi ancora molto in uso per la protezione da sovraccarico e da cortocircuito, sia per il suo costo contenuto che per il suo elevatissimo potere di interruzione.

Essi si compongono essenzialmente di un elemento metallico fusibile immerso in una massa granulosa, che svolge funzione raffreddante e deionizzante, in grado di soffocare l'esplosione del filo. Tra i vari tipi di fusibili esistenti sul mercato (creati ognuno con caratteristiche specifiche) uno dei più diffusi è il fusibile a cartuccia, del quale è mostrato uno spaccato in fig. 5.3.1.

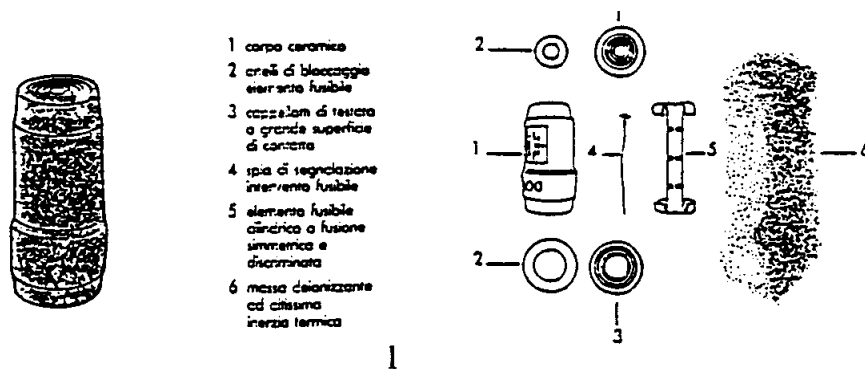


Fig. 5.3.1

La cartuccia è in ceramica o plastica ed ha la funzione di attenuare l'effetto di dilatazione termica.

L'elemento fusibile è in grado di sopportare un certo valore di corrente per il quale viene tarato, per valori superiori tale elemento metallico si scalda rapidamente fino alla fusione e si realizza l'interruzione del circuito. Anche il fusibile è caratterizzato da alcuni parametri specifici, tra i quali il più importanti è la corrente nominale  $I_N$ , ossia quel valore di corrente che l'elemento è in grado di sopportare per un tempo indeterminato senza fondere. C'è poi la corrente convenzionale di fusione, che è quel valore di corrente che sicuramente provoca l'intervento del fusibile entro un tempo determinato.

In fig. 5.3.2 è evidenziata la curva di intervento di un fusibile avente corrente nominale compresa tra i 10 ed i 25 ampere. E' possibile notare come il tempo di intervento sia in questo caso sempre inversamente proporzionale al valore di corrente, perciò per alti valori di corrente (cortocircuito) si hanno dei tempi di intervento ridottissimi; l'andamento è simile a quello dello sganciatore termico dell'interruttore magnetotermico ma risulta avere una pendenza più pronunciata.

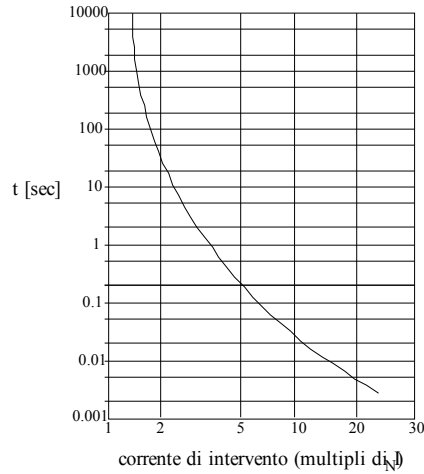


fig. 5.3.2

#### 5.4) PROTEZIONE CONTRO I SOVRACCARICHI

Per una corretta scelta del dispositivo di protezione contro i sovraccarichi devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

1. la corrente nominale ( $I_n$ ) del dispositivo deve essere sempre maggiore o al massimo uguale alla corrente di impiego ( $I_b$ ) transitante nel cavo;
2. la corrente nominale ( $I_n$ ) non deve essere superiore alla portata del cavo ( $I_z$ );
3. la corrente convenzionale di funzionamento (o di fusione) ( $I_f$ ) del dispositivo deve essere sempre inferiore o al massimo uguale a 1.45 volte la portata del cavo ( $I_z$ ).

Le condizioni sopra citate sono schematicamente rappresentate nella fig. 5.4.1.

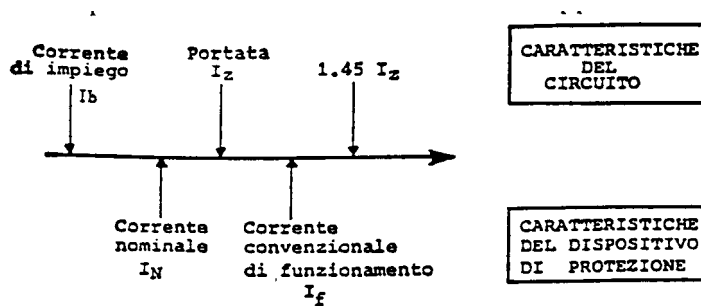


Fig. 5.4.1

In altri termini, la protezione contro i sovraccarichi è garantita quando il coordinamento tra dispositivo di protezione e cavo da proteggere è effettuato nel rispetto delle due relazioni:

$$I_b \leq I_n \leq I_z \qquad I_f \leq 1.45I_z$$

### 5.5) PROTEZIONE CONTRO IL CORTOCIRCUITO

Il fenomeno del cortocircuito, come già visto in precedenza, è caratterizzato da un valore di corrente generalmente elevato; pertanto il suo evolversi comporta una situazione completamente diversa da quella che si manifesta nel sovraccarico.

Infatti, in quest'ultimo caso, il conduttore percorso dalla corrente di sovraccarico trova comunque il suo equilibrio termico (calore smaltito = calore prodotto).

Durante il cortocircuito, per la notevole corrente sviluppata e per la rapidità del fenomeno, il cavo non ha tempo di cedere calore all'esterno: tutta l'energia termica sviluppata contribuisce perciò ad innalzare la temperatura del conduttore con possibilità di compromettere l'isolante e conseguentemente di distruggere il cavo.

Per una efficace protezione dal cortocircuito, non potendo intervenire sulla corrente, che ovviamente dipende dalle caratteristiche dell'impianto, occorrerà ridurre il più possibile l'energia termica sviluppata, installando all'inizio della condotta, e comunque entro i primi 3 metri, dispositivi in grado di intervenire in un tempo sufficientemente breve.

### 5.6) VALUTAZIONI DELLA CORRENTE DI CORTOCIRCUITO

Per un utente alimentato in bassa tensione, la corrente di cortocircuito che potrebbe svilupparsi immediatamente a valle del punto di consegna dipende ovviamente dalle caratteristiche delle linee di distribuzione dell'Ente Erogatore. Solo quest'ultimo è in grado di rendere noto all'utente detto valore, che, in linea teorica, dovrebbe essere calcolato di volta in volta.

Peraltro la tipologia e le taglie di trasformatori utilizzati dall'Ente medesimo nonché la conformazione delle reti di distribuzione contribuiscono a far sì che nei punti di consegna dell'energia non si

abbiano, di solito, correnti di cortocircuito superiori ai seguenti valori:

4500 A per utenze monofase

6000 A per utenze trifase

(tali valori sono da ritenersi validi per le forniture in bassa tensione con potenza impegnata fino a 30 kW).

La prima caratteristica che un dispositivo di protezione è chiamato ad avere sarà allora la capacità di interrompere tali correnti, che corrispondono alla massima  $I_{cc}$  riscontrabile nell'impianto. Il dispositivo dovrà quindi avere un adeguato potere di interruzione.

#### 5.7) VALUTAZIONE DELLA MINIMA CORRENTE DI CORTOCIRCUITO IN UNA CONDUTTURA

Per la determinazione della corrente di cortocircuito che si sviluppa in una conduttura si ricorre, una volta stabilito il punto in cui si verifica il guasto, a formule semplificate.

Ad esempio: si abbia a valle del dispositivo di protezione una conduttura monofase con sezione  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) alimentata alla tensione  $E$  (V), di lunghezza pari a  $l$  m, e si ipotizzi un cortocircuito a fondo linea.

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{R_l^2 + X_l^2}}$$

nell'ipotesi che, durante il cortocircuito, non si verifichino abbassamenti di tensione.

Essendo normalmente la reattanza di linea  $X_l$  del tutto trascurabile rispetto alla resistenza di linea  $R_l$ , la  $I_{cc}$  potrà essere data da:

$$I_{cc} = \frac{E}{R_l}$$

In effetti i dati ricavati dal conteggio non tengono conto di alcuni fattori importanti, che durante il cortocircuito contribuiscono a limitare la corrente, come ad esempio l'abbassamento di tensione in linea, dovuto al cortocircuito stesso, e l'aumento di resistenza del



conduttore dovuto all'innalzamento della temperatura. Inoltre la componente transiente viene qui trascurata.

Una formula che tiene conto della variazione di questi parametri, anche se i valori ottenuti con tale formula servono per la verifica della tempestività di intervento dei dispositivi di protezione, ma non per la determinazione del potere di interruzione, è la seguente (valida per linee monofase):

$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot E \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot 2l}$$

dove:

**0,8 è un fattore che tiene conto del presumibile abbassamento della tensione per effetto del cortocircuito, ed 1,5 è un fattore per cui si moltiplica la resistenza della conduttura calcolata a 20 °C per tenere conto dell'aumento della temperatura,  $\rho$  è la resistività elettrica del conduttore a 20 °C in  $\Omega \cdot mm^2 / m$ , 2 è il fattore per cui si moltiplica la lunghezza della conduttura in quanto monofase**

Se usiamo tale formula per ricalcolare la  $I_{cc}$  si ottengono valori inferiori di corrente, per effetto dei coefficienti di correzione introdotti dalla formula stessa e certamente più vicini alla realtà.

**Per condutture trifasi si considera sempre ai fini della determinazione della "corrente minima" di cortocircuito il guasto monofase assumendo per E:**

- in assenza del conduttore di neutro la tensione concatenata;
- in presenza del conduttore di neutro la tensione di fase. Se il conduttore di neutro ha sezione pari a  $S/2$  il valore di  $I_{cc}$  si ottiene moltiplicando per 0,67 il risultato ottenuto

## CAPITOLO 6

### PROTEZIONE DELLE PERSONE

#### 6.1) EFFETTI FISIOLGICI E PATOLOGICI DELLA CORRENTE

Considerando i valori di corrente ed i tempi massimi che un individuo medio si presume sia in grado di sopportare, sono state definite le zone degli effetti che la corrente alternata (AC) a 50 o 60 Hz provoca nell'uomo adulto. La fig. 6.1.1 riporta gli effetti del passaggio di corrente attraverso il corpo umano in base alla sua intensità ed al tempo di esposizione:

- Zona 1: abitualmente nessun effetto;
- Zona 2: abitualmente nessun effetto fisiopatologico pericoloso;
- Zona 3: abitualmente nessun pericolo di fibrillazione cardiaca;
- Zona 4: pericolo di possibile fibrillazione cardiaca (probabilità fino al 50%);
- Zona 5: pericolo di fibrillazione (probabilità superiore al 50%).

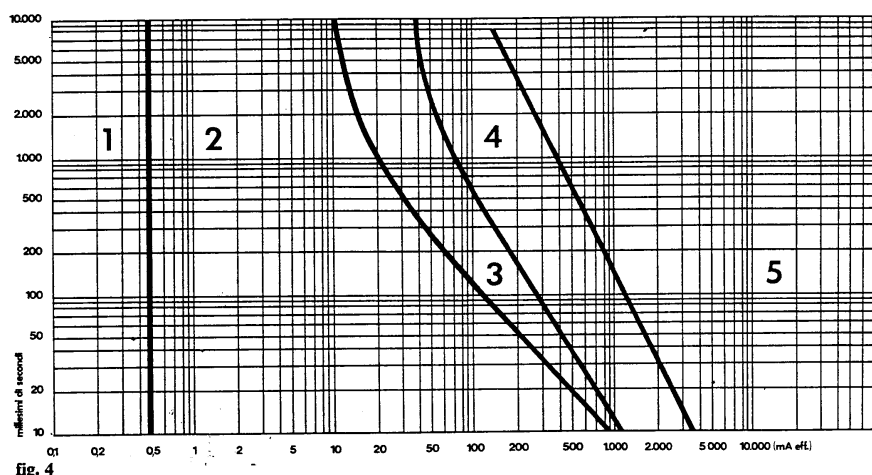


fig. 6.1.1

Esistono altri grafici analoghi a quello di fig. 6.1.1 che indicano le zone degli effetti prodotti sull'uomo dalla corrente elettrica continua (DC) e da quella impulsiva (PC), inoltre per quanto riguarda la corrente alternata si ha una suddivisione in corrente alternata a bassa

frequenza (LF, < 100 Hz) e corrente alternata ad alta frequenza (HF, > 100 Hz).

L'effetto della corrente DC sul corpo umano è differente da quello della corrente AC LF ed HF. Infatti il corpo umano è un pessimo conduttore e si comporta in modo diverso a seconda della frequenza della corrente che lo attraversa. Ad esempio la corrente continua non ha effetto pelle e “vede” solo la resistenza R del corpo, mentre la corrente alternata LF ha un piccolo effetto pelle, che cresce al crescere della frequenza, per raggiungere il massimo alle HF. In pratica questo comporta il fatto che sia la corrente continua che la corrente alternata a bassa frequenza penetrano di più all'interno del corpo umano rispetto alla corrente ad alta frequenza, provocando immancabilmente molti più danni agli organi vitali.

Inoltre il corpo umano ha minori danni, a parità di intensità, al passaggio della corrente continua che a quello della corrente alternata LF, in quanto le pulsazioni a frequenza 50 Hz risultano particolarmente dannose per il sistema nervoso (provocano la tetanizzazione dei muscoli), mentre la corrente continua ha quasi esclusivamente un effetto di riscaldamento resistivo dei tessuti.

In definitiva le correnti alternate a bassa frequenza sono le più pericolose per l'uomo.

Un altro fattore molto importante, che non viene considerato nel grafico di fig. 6.1.1 è il percorso che effettua la corrente nel corpo umano. Esso influisce sul valore della corrente che interessa la zona cardiaca ed individua anche la direzione del campo elettrico che agisce sul cuore; e la probabilità di innesco della fibrillazione ventricolare varia con la direzione del campo elettrico. Nella seguente tabella sono indicati i fattori di percorso F definiti come il rapporto tra la corrente di riferimento nel percorso di riferimento (ad esempio mano sinistra-piedi) e la corrente che scorre nel corpo umano nel percorso che si considera.

<i>Percorso</i>	<i>F</i>
Mani-piedi	1
Mano sinistra-piede sinistro	1
Mano sinistra-piede destro	1
Mano sinistra-piedi	1
Mano sinistra-mano destra	0.4
Mano sinistra-dorso	0.7
Mano sinistra-torace	1.5

Mano destra-piede sinistro	0.8
Mano destra-piede destro	0.8
Mano destra-piedi	0.8
Mano destra-dorso	0.3
Mano destra-torace	1.3

Dalla tabella si nota come il percorso più pericoloso nei confronti della fibrillazione ventricolare è quello mano sinistra-torace.

Per quanto riguarda la corrente è stato definito come limite di sicurezza un valore di 30 mA mantenuti per un tempo massimo di 0.5 secondi. Tale valore è il risultato di un compromesso tra la limitazione della probabilità di danno alle persone ed i limiti tecnologici delle apparecchiature elettriche di interruzione.

Poichè nella pratica risulta più comodo riferirsi a valori di tensione anzichè di corrente è necessario introdurre un altro parametro: la resistenza del corpo umano; essa è molto variabile e dipende tra l'altro dalla tensione applicata, dalla conformazione della pelle e dal tipo di contatto elettrico, perciò viene definita come la resistenza media di un individuo del peso di almeno 50 kg ed in condizioni fisiche buone ed ha un valore di 3 k $\Omega$ .

Tenendo conto dei diversi fattori, sono stati previste tabelle di valori massimi ammissibili per la tensione di contatto in funzione della rapidità di sgancio dell'interruttore, valori che partono da 50 V in su. Tali valori sono considerati per gli impianti a bassa tensione situati in luoghi normalmente bagnati o molto umidi o nella prossimità di grandi masse metalliche. Il DPR 547 non riporta alcuna indicazione per i valori massimi ammissibili della tensione di contatto in ambienti normali.

La normativa prevede due condizioni di contatto elettrico pericolose per la persona:

- **CONTATTO DIRETTO:** si verifica quando la persona tocca direttamente un polo in tensione, sia volontariamente, ma senza conoscerne il pericolo, sia involontariamente (fig. 6.1.2). Sono esclusi dai contatti diretti quelli che sono fatti volontariamente da persone che ne conoscono il pericolo.

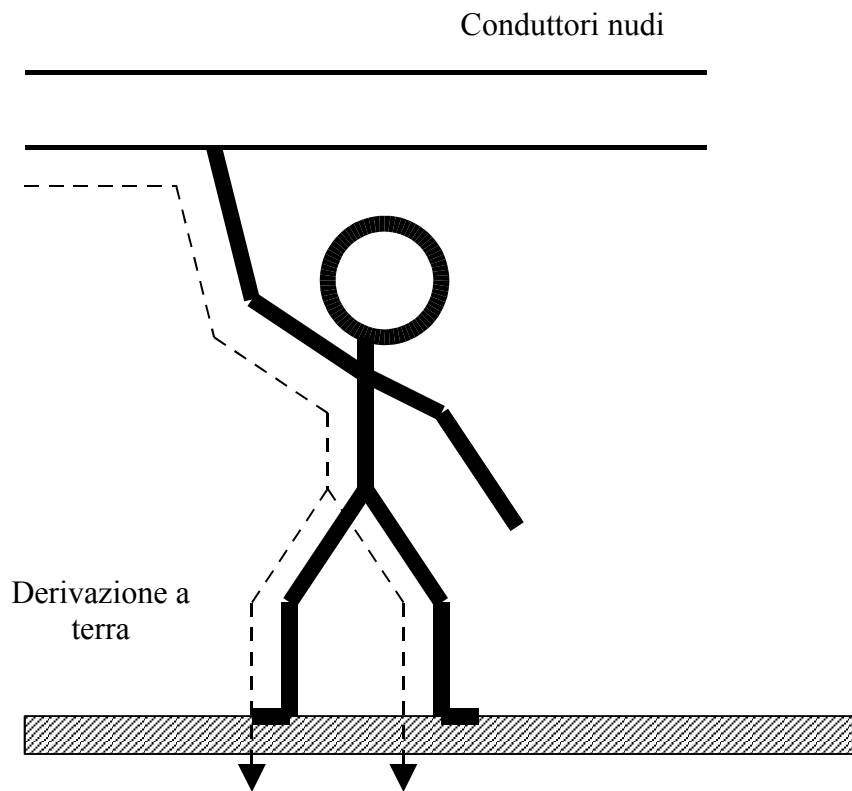


fig. 6.1.2

- **CONTATTO INDIRETTO:** si verifica quando la persona tocca parti normalmente non in tensione ma che possono, in caso di guasto o di difetto di isolamento, trovarsi in tensione (fig. 6.1.3). Questo tipo di contatto è molto più pericoloso del precedente nel senso che normalmente non si adottano le precauzioni che anche le persone inesperte usano, invece, verso elementi dell'impianto elettrico normalmente in tensione, come cavi, interruttori etc.

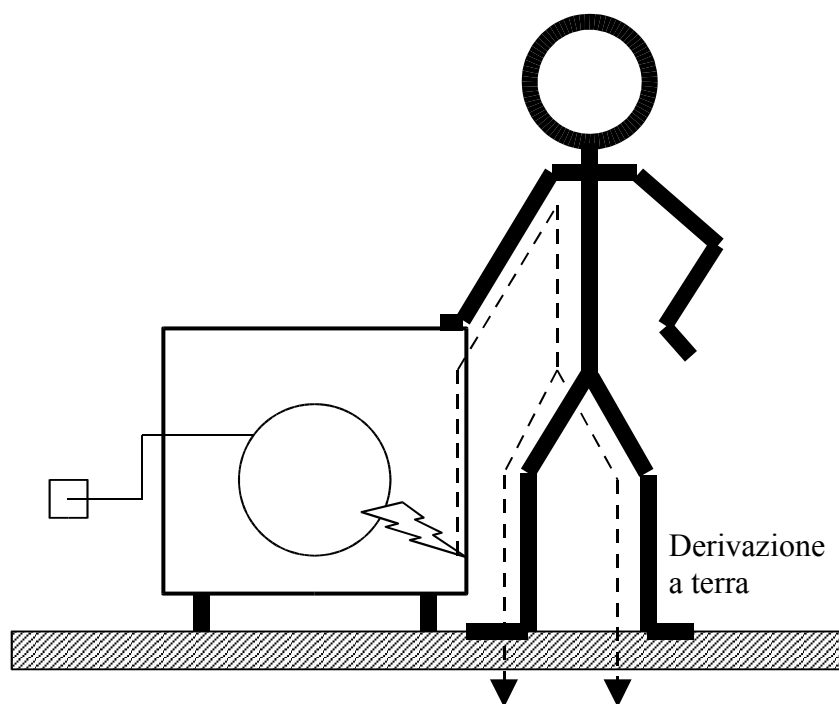


fig. 6.1.3

## 6.2) IMPIANTI DI TERRA ED EQUIPOTENZIALI

Gli impianti di messa a terra ed equipotenziali non servono solo per la sicurezza della persona ma hanno anche altre funzioni.

In figura 6.2.1 è raffigurato lo schema generico di un impianto di messa a terra di un edificio.

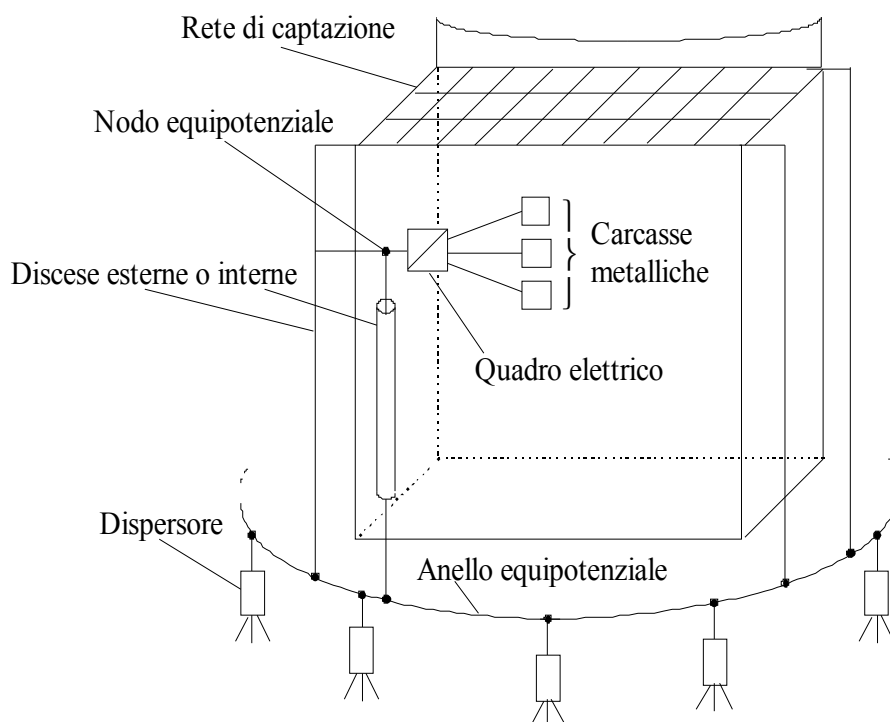


fig. 6.2.1

L'impianto di messa a terra si può dividere in tre parti:

- 1) Rete di captazione: è una griglia o gabbia di Faraday che protegge l'edificio dalle fulminazioni e dalle radiazioni elettromagnetiche;
- 2) Collegamenti equipotenziali;
- 3) Dispersori.

L'anello equipotenziale è collegato al sistema dei. Le discese esterne collegano a terra la rete di captazione e formano l'impianto di parafulmine; le discese interne invece collegano a terra le carcasse metalliche al cui interno vi sono impianti elettrici presenti nell'edificio. Tali collegamenti avvengono generalmente attraverso conduttori isolati con guaina giallo-verde, colore destinato unicamente a questo tipo di conduttori per non confonderli con altri tipi. I conduttori equipotenziali hanno generalmente percorsi comuni con altri conduttori.

Vengono collegate a terra anche le grosse masse metalliche, come ad esempio i cancelli, in tal caso si ottiene un impianto di terra equipotenziale.

L'impianto di messa a terra ha vari tipi di funzione:

- Ritorno elettrico attraverso il terreno, come negli impianti di telecomunicazione, elettronici, di elaborazione dati, di trazione elettrica (attraverso i binari);
- Protezione contro i contatti indiretti: masse metalliche abitualmente non in tensione che possono assumere potenziali pericolosi, difettosità nell'isolamento, tensioni indotte;
- Vincolo del potenziale: il neutro dei trasformatori di potenza (ad esempio nelle cabine di trasformazione MT-BT) e di misura è messo a terra;
- Dispersione delle sovracorrenti: in caso di guasto, manovra o di fulminazione delle linee di trasmissioni la sovracorrente si scarica a terra attraverso un resistore variabile; le linee telefoniche sono ad esempio protette con filtri del tipo mostrato in fig. 6.2.2.

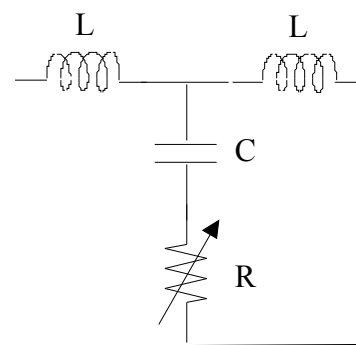


fig. 6.2.2

- Lavori di riparazione e manutenzione: parti normalmente in tensione e messe temporaneamente fuori servizio vengono messe a terra.

Il dispersore è un corpo metallico costituito da un elettrodo immerso nel terreno ed è utilizzato per ottenere una voluta resistenza tra l'anello equipotenziale e il punto all'infinito. Esistono varie tipologie



di dispersore la cui resistenza equivalente si ricava da formule di dimensionamento tipiche:

- Dispersore semisferico

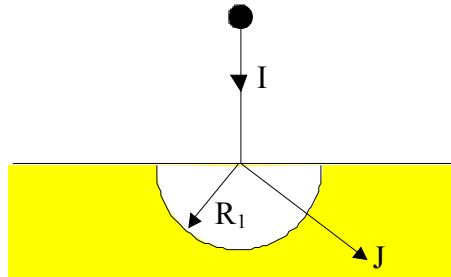


fig. 6.2.3

La densità di corrente J ad una generica distanza r è data da:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6.2.1)$$

dove I è la corrente che si irradia all'infinito ed essendo il campo elettrico dato da:

$$E = \rho J \quad (6.2.2)$$

dove  $\rho$  è la resistività del terreno supposta costante, si ottiene il potenziale del dispersore:

$$V = - \int_{R_1}^{\infty} E dr = - \int_{R_1}^{\infty} \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr \quad (6.2.3)$$

La resistenza equivalente del dispersore riferita al punto all'infinito è allora data da:

$$R = \frac{V}{I} = - \int_{R_1}^{\infty} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho}{2\pi R_1} \quad (6.2.4)$$

In definitiva la resistenza aumenta all'aumentare di  $\rho$  e diminuisce al diminuire del raggio  $R_1$  del dispersore.

- Dispersore cilindrico

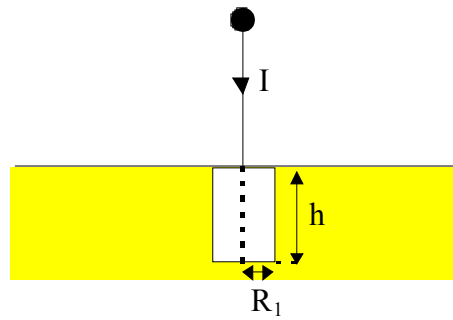


fig. 6.2.4

Nell'ipotesi che  $h \gg R_1$ , si ottiene:

$$R \cong \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{2h}{R_1} \quad (6.2.5)$$

- Dispersore a disco

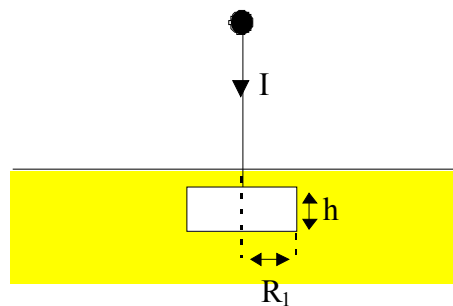


fig. 6.2.5

Nell'ipotesi che  $h \ll R_1$ , si ottiene:

$$R \cong \frac{\rho}{4 R_1} \quad (6.2.6)$$

- Dispersore a graticcio

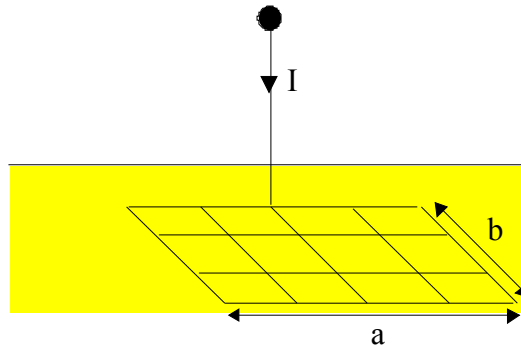


fig. 6.2.6

Detto  $\sum_i l_i$  lo sviluppo completo di tutto il conduttore impiegato per realizzare la rete di dispersione, si ottiene la seguente formula:

$$R \cong \frac{\pi \rho}{4(a+b)} + \frac{\rho}{\sum_i l_i} \quad (6.2.7)$$

La (6.2.7) è una formula binomia in cui il primo addendo dipende dal perimetro del graticcio, mentre il secondo dipende dallo sviluppo del conduttore.

Le formule ottenute per la resistenza equivalente dei vari tipi di dispersore sono di tipo empirico. In realtà la resistività del terreno è esternamente variabile sia con la profondità, sia muovendosi lungo la superficie del terreno. Tale variazione di resistività è inoltre più forte nei primi strati del terreno, e varia a seconda delle condizioni climatiche e stagionali. Pertanto le formule fin qui viste sono di scarsa utilità per il dimensionamento dell'impianto di terra. Quello che conta in realtà è la misura della resistenza del dispersore: le norme prevedono per tale misura il metodo cosiddetto "volt-amperometrico".

#### 6.4) MISURA DELLA RESISTENZA DI TERRA DI UN DISPERSORE

Il metodo volt-amperometrico consiste nel misurare sia la corrente iniettata nel dispersore  $I_D$  sia la tensione che conseguentemente il dispersore assume rispetto ad un punto all'infinito  $V_{D\infty}$ ; dal rapporto tra queste due grandezze si determina quindi la resistenza di terra del dispersore:

$$R_D = \frac{V_{D\infty}}{I_D} = \frac{V_t}{I_D} \quad (6.4.1)$$

Dato il basso valore di conducibilità del terreno in confronto a quello di un conduttore metallico, gli effetti induttivi delle correnti sul terreno sono trascurabili e l'impedenza è costituita unicamente dalla resistenza, anche per frequenze di 50 – 60 Hz. Quindi le misure possono essere fatte sia in d.c che in a.c.

Poichè nella pratica non è accessibile il punto all'infinito, per la determinazione di  $R_D$  si adotta lo schema indicato in figura 6.4.1, dove D è il dispersore di cui si vuol conoscere la resistenza, A è un elettrodo ausiliario ed S un elettrodo mobile che si infigge nel terreno lungo la congiungente DA.

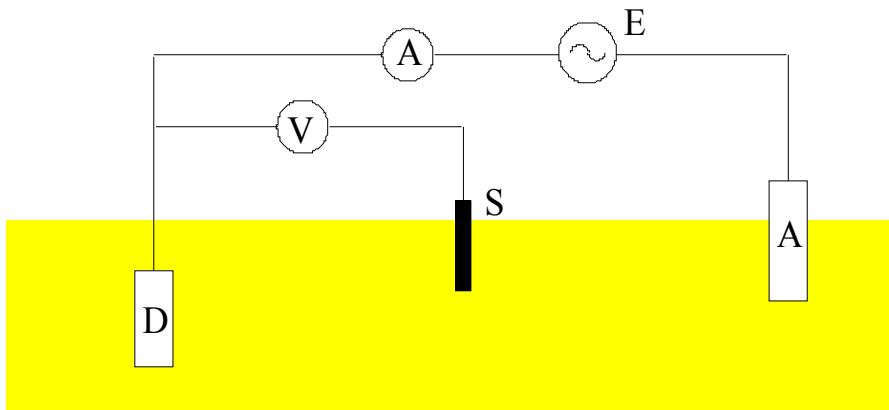


fig. 6.4.1

L'elettrodo ausiliario A deve essere posto elettricamente lontano dal dispersore, in modo da permettere la dispersione all'infinito della

corrente  $I_D$ . Con tale accorgimento si riesce ad ottenere una configurazione delle linee di corrente nel terreno del tipo rappresentato in fig. 6.4.2.

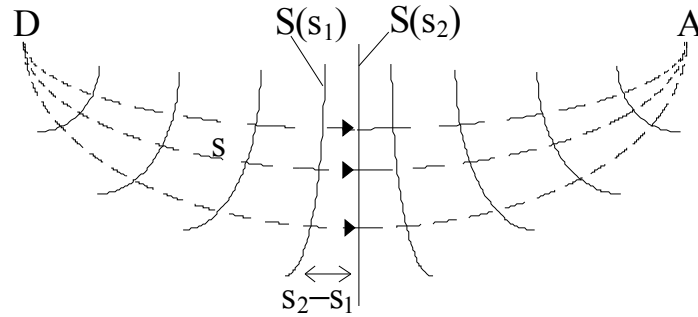


fig. 6.4.2

Muovendosi lungo una aliquota mediana curvilinea  $s$  ci si sposta da  $D$  ad  $A$  e si può definire una superficie equipotenziale  $S(s)$ , perpendicolare alle linee di corrente e che varia in funzione di  $s$ . Considerando due di tali superfici molto vicine tra loro  $S(s_1)$  e  $S(s_2)$ , la variazione della resistenza di terra tra di esse può essere stimata dalla formula:

$$\Delta R_{s_1 s_2} = \rho \frac{s_2 - s_1}{S} \quad (6.4.2)$$

dove  $\rho$  è la resistività del terreno. Dalla (9.8.2) si ottiene che, al tendere della superficie  $S$  all'infinito,  $\Delta R \rightarrow 0$ ; osservando le superfici equipotenziali si nota che una di esse passa per il punto all'infinito ( $S(s_2)$  in fig. 6.4.2) e quindi è al potenziale all'infinito  $V_\infty$ .

Per determinare la superficie al potenziale  $V_\infty$  si utilizza lo schema di fig. 6.4.1; utilizzando un voltmetro si inizia a sondare il terreno e si misura il potenziale del punto  $S$  rispetto a quello del punto  $D$  ottenendo dei valori di  $V_{SD}$  che hanno un andamento rispetto alla distanza tra  $S$  e  $D$  del tipo di figura 6.4.3.

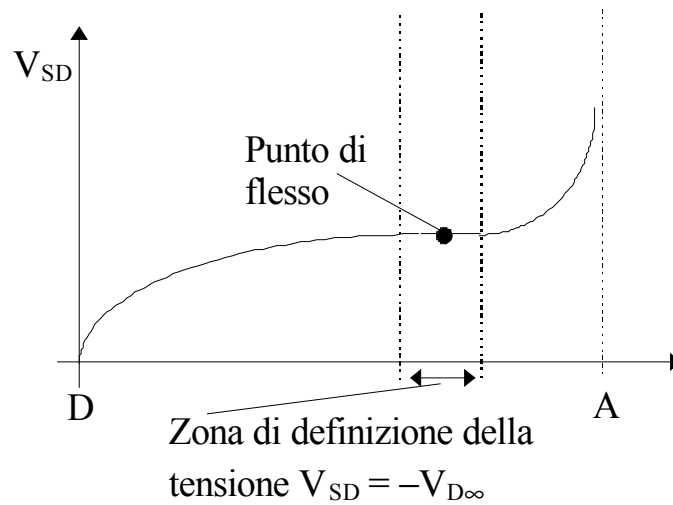
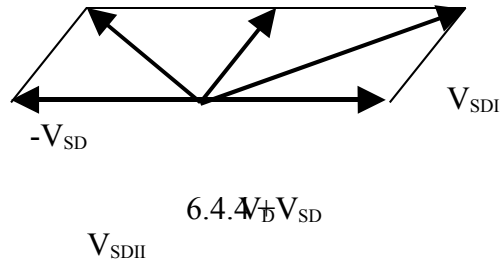


fig. 6.4.3

Una volta trovato il punto di flesso orizzontale (se A è elettricamente lontano da D esso deve essere necessariamente compreso tra i due elettrodi) si è automaticamente misurato il potenziale  $V_{D\infty}$  e, misurata la corrente  $I_D$ , si trova la resistenza del dispersore. E' possibile che vi siano delle correnti nel terreno che disturbano le misure, per esempio nelle vicinanze di un sistema di trazione elettrica. In questo caso se si effettua la misura in d.c. basta invertire la polarità del generatore, misurare le due tensioni  $V_{SD+}$  e  $V_{SD-}$  con le due differenti polarità ed ottenere le tensioni di misura depurate dal disturbo semplicemente dalla  $V_{SD} = (V_{SD+} + V_{SD-}) / 2$ . Nel caso di corrente alternata facendo l'ipotesi che il disturbo non vari nel tempo si ottiene, considerando il diagramma delle fasi nella figura 6.4.4,

$$V_{SD} = \sqrt{\frac{V_{SDI}^2}{2} + \frac{V_{SDII}^2}{2} - V_D^2}$$



### 6.5) PROTEZIONE CONTRO I CONTATTI DIRETTI

Gli impianti e gli apparecchi elettrici devono essere isolati e protetti in modo che le persone non possano venire in contatto con parti in tensione senza deliberato proposito.

Le misure di protezione contro i contatti diretti possono suddividersi in:

1) Protezioni di grado totale (contro il contatto volontario) che sono ottenute mediante:

- a) Isolamento delle parti attive senza possibilità di rimozione;
- b) Involucri o barriere che sono rimovibili mediante utensili, interblocchi, barriere intermedie.

2) Protezioni di grado parziale (contro il contatto involontario) che sono ottenute mediante:

- a) Ostacoli rimovibili senza utensili;
- b) Allontanamento delle parti a tensione diversa simultaneamente accessibili.

3) Protezioni aggiuntive che sono ottenute utilizzando relè differenziali ad alta sensibilità ( $I_{Dmax} = 30 \text{ mA}$ ).

Il grado di protezione di un involucro o barriera è identificato in sede IEC dalle lettere IP (International Protection) seguite da due o al massimo da 3 cifre: la prima cifra indica il grado di protezione dell'involucro o della barriera rispetto ai corpi solidi, la seconda quello rispetto ai liquidi e la terza rispetto alle sostanze aeriformi.

Quando si vuole indicare solo uno o due tipi di protezione, le cifre mancanti sono sostituite dalla lettera X. Nella seguente tabella sono riportati alcuni esempi di gradi di protezione e delle prove corrispondenti a ciascuna cifra, al crescere della cifra cresce il grado di protezione.

<i>Grado di protezione</i>	<i>Tipo di prova</i>
IP0	Nessuna protezione
IP1X	Entra il dito di prova
IP2X	Il dito di prova non riesce a toccare la polarità in tensione
IP3X	Non entra un filo di acciaio di diametro 2.5 mm
IP4X	Non entra un filo di acciaio di diametro 1 mm
IP5X	Dispositivo stagno alla polvere, si inizia a tenere in conto la seconda cifra
IP54	Nessuna resistenza al liquido
IP55	Non penetra liquido che goccia
IP65	Protezione reale dall'acqua gocciolante
IP66	Protezione dall'acqua spruzzata ma non dall'immersione
IP777	Dispositivo antideflagrante

Le parti attive devono essere poste entro involucri, o dietro barriere, tali da assicurare almeno il grado di protezione IP2X, salvo le eccezioni previste per alcuni apparecchi per i quali le norme relative richiedono un grado inferiore di protezione.

In fig. 6.5.1 sono infine indicate le distanze minime di sicurezza in presenza di linee o parti attive non isolate.



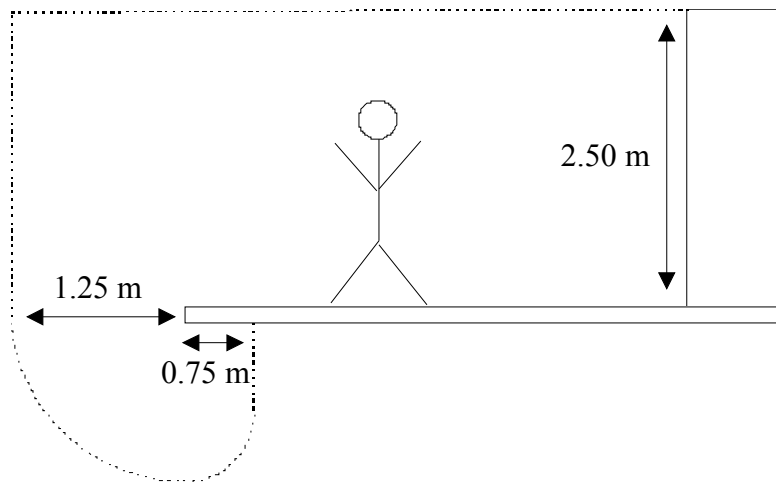


fig. 6.5.1

#### 6.6) INTERRUTTORE DIFFERENZIALE AD ALTA SENSIBILITÀ

Le misure di protezione contro i contatti diretti, indicate nel precedente paragrafo, tendono ad evitare il contatto (protezione passiva).

Se tuttavia si verifica un contatto diretto, la corrente che attraversa il corpo umano non è comunque sufficiente per provocare l'intervento dei dispositivi di protezione a massima corrente (interruttori magnetotermici, fusibili). L'unico dispositivo in grado di intervenire in casi del genere è l'interruttore differenziale, che viene definito ad alta sensibilità se la corrente nominale differenziale di intervento  $I_D$  non supera i 30 mA.

Il principio di funzionamento dell'interruttore differenziale è schematizzato in figura 6.6.1. Esso è costituito essenzialmente da un circuito magnetico toroidale con due avvolgimenti uguali e percorsi da correnti uguali e contrarie, che nel funzionamento normale producono un flusso magnetico totale nullo, infatti indicando rispettivamente con  $\dot{I}_1$  ed  $\dot{I}_2$  i fasori rappresentativi della corrente entrante e della corrente uscente dal circuito e con  $\dot{\Phi}$  il fasore rappresentativo del flusso magnetico totale prodotto, si ha:

$$\dot{\Phi} = \frac{N\dot{I}_1 - N\dot{I}_2}{\mathcal{R}} \quad (6.6.1)$$

se non vi è dispersione risulta  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$  e quindi  $\dot{\Phi} = 0$  ed il segnale in uscita dall'avvolgimento rivelatore differenziale che viene inviato al relè polarizzato, che a sua volta comanda lo sgancio dell'interruttore, risulta nullo.

Se al contrario vi è una corrente di dispersione  $\dot{I}_D$  nella linea, allora il flusso magnetico totale non è più nullo in quanto si ha:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 + \dot{I}_D \\ \dot{\Phi} &= \frac{N\dot{I}_D}{\mathcal{R}} \end{aligned} \quad (6.6.2)$$

e conseguentemente si verifica lo sgancio dell'interruttore.

Lo sgancio è rapidissimo, dell'ordine dei 20, 30 o al più 50 msec, quindi con un valore di taratura dell'interruttore differenziale di 30 mA si ha una sicura protezione.

Esistono anche interruttori differenziali trifasi che sono costituiti da un circuito toroidale con tre avvolgimenti relativi alle tre fasi; se la linea è a quattro fili bisogna naturalmente aggiungere il filo di neutro. Esistono anche relè differenziali di tipo elettronico, che riescono a funzionare anche quando la forma d'onda non è sinusoidale, ad esempio nel caso di correnti unidirezionali.

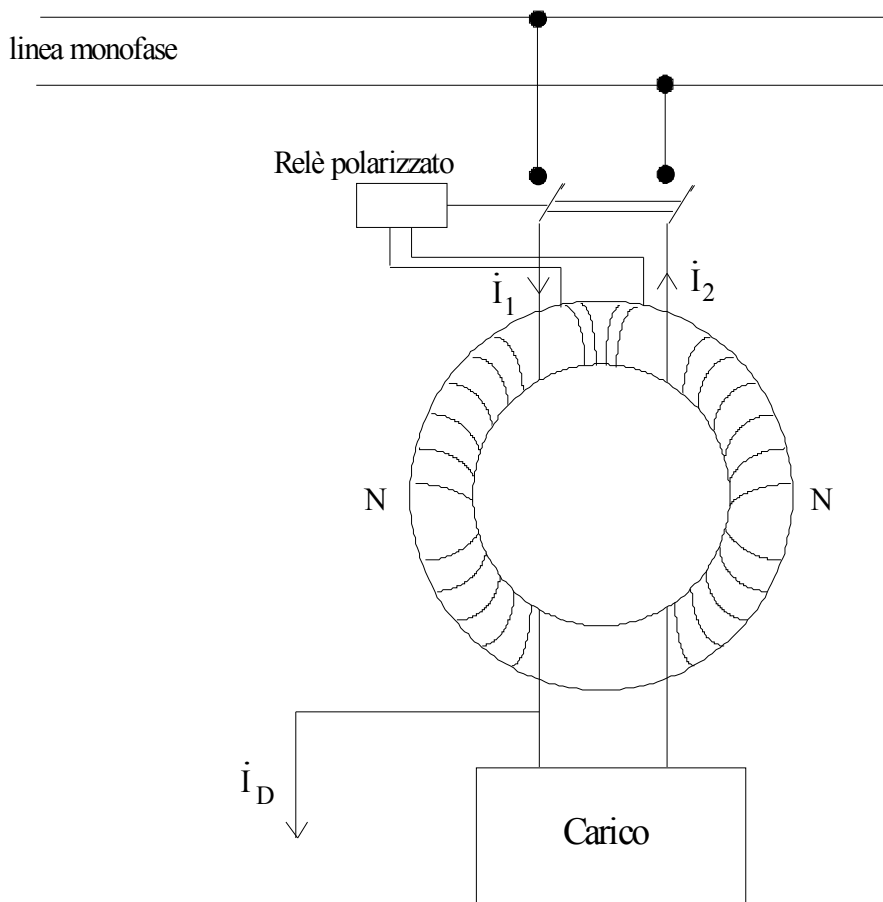


fig. 6.6.1

### 6.7) PROTEZIONE CONTRO I CONTATTI INDIRETTI

Il primo passo da adottare per avere una adeguata protezione contro i contatti indiretti è dotare le apparecchiature di un efficiente sistema di messa a terra.

Tuttavia il ruolo del sistema di terra ed equipotenziale è differente a seconda del sistema di distribuzione utilizzato.

Il generico sistema di distribuzione in BT posto a valle della cabina di trasformazione MT/BT (fig. 6.7.1) è composto da tre conduttori di fase più un conduttore di neutro collegato al centro stella del trasformatore.

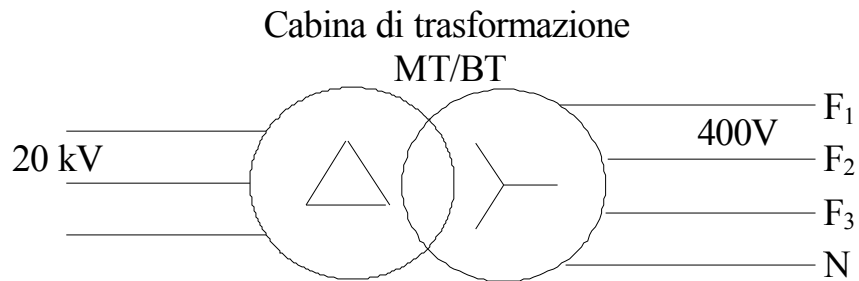


fig. 6.7.1

In relazione allo stato del neutro e alla situazione delle masse i sistemi elettrici sono individuati con due lettere. La prima lettera indica lo stato del neutro:

T = neutro connesso a terra;

I = neutro isolato da terra.

La seconda lettera indica la situazione delle masse metalliche:

T = masse collegate a terra;

N = masse collegate al neutro.

Si distinguono perciò tre tipi diversi di sistemi di distribuzione:

•) SISTEMA TT

Nel sistema TT il neutro è collegato direttamente a terra e le masse sono collegate ad un impianto di terra locale, elettricamente indipendente da quello del neutro (vedi fig. 6.7.2).

Normalmente la resistenza terra-neutro  $R_{TN}$  è molto minore della resistenza terra-utilizzatore  $R_{TU}$ . Tale sistema è utilizzato nella alimentazione della rete pubblica.

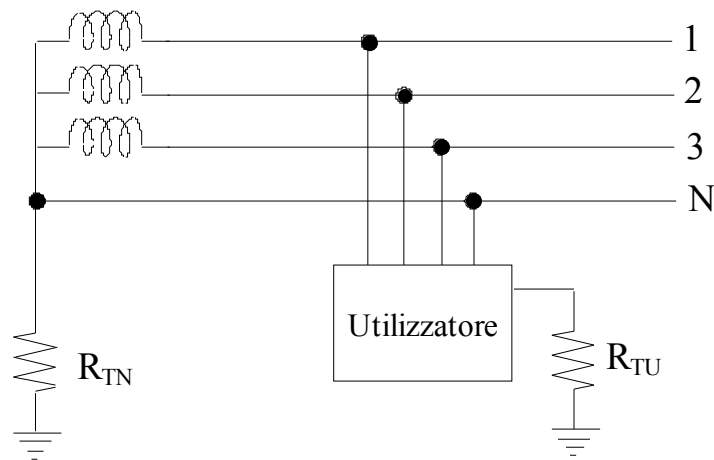


fig. 6.7.2

#### •) SISTEMA TN

Nel sistema TN il neutro è collegato direttamente a terra, mentre le masse sono collegate al conduttore di neutro. Si distinguono i seguenti tipi di sistemi TN, a seconda che i conduttori di neutro e di protezione siano separati o meno:

TN-C: i conduttori di neutro e di protezione sono in comune (vedi fig. 6.7.3.a);

TN-S: i conduttori di neutro e di protezione sono separati (vedi fig. 6.7.3.b);

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

Il conduttore che svolge la funzione sia di conduttore di neutro (N) che di conduttore di protezione equipotenziale (PE) assume la denominazione di conduttore PEN.

Il sistema di distribuzione TN è tipico degli impianti aventi una propria cabina di trasformazione.

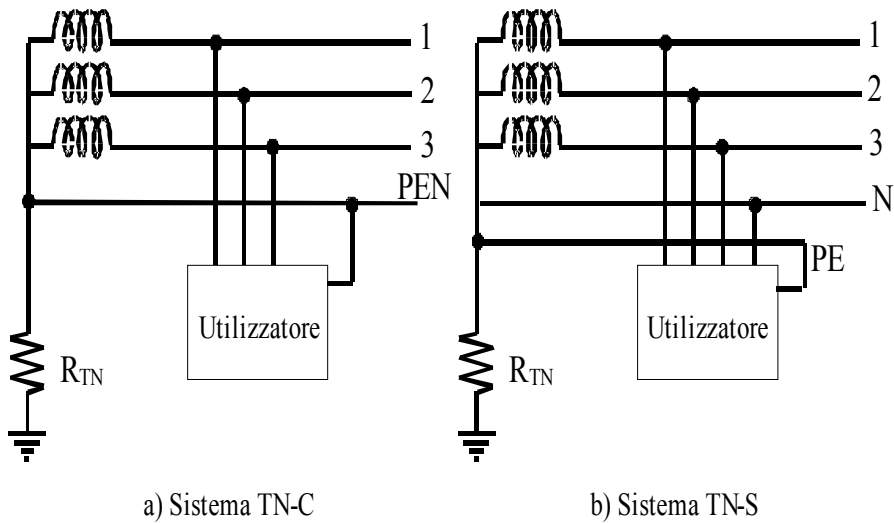


fig. 6.7.3

•) SISTEMA IT

Il sistema elettrico IT ha il neutro isolato da terra mentre le masse sono collegate a terra (fig. 6.7.4).

Tale sistema è tipico delle utenze nelle sale di chirurgia od in cui sono presenti apparecchi elettromedicali che possono entrare in contatto con il corpo umano, mentre è di uso all'estero per utenze industriali.

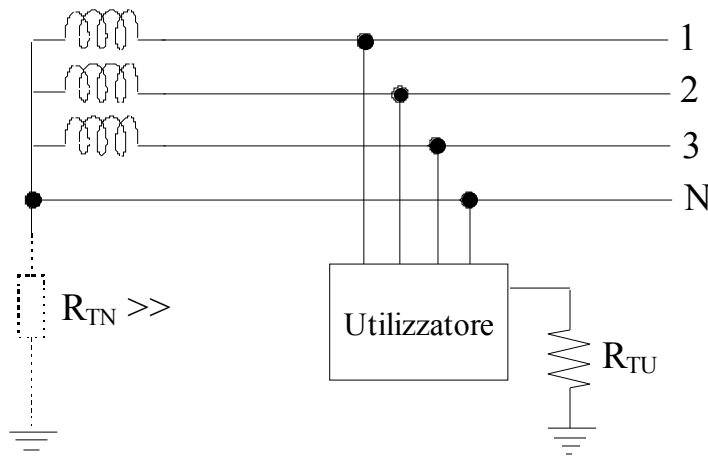


fig. 6.7.4

6.8) COMPORTAMENTO DI UN SISTEMA TT IN CASO DI GUASTO DELL'ISOLAMENTO

In fig. 6.8.1 è indicato il circuito di guasto franco a terra in un utilizzatore alimentato da un sistema TT. La corrente di guasto  $I_g$  si richiude attraverso le resistenze  $R_{TU}$  e  $R_{TN}$ .

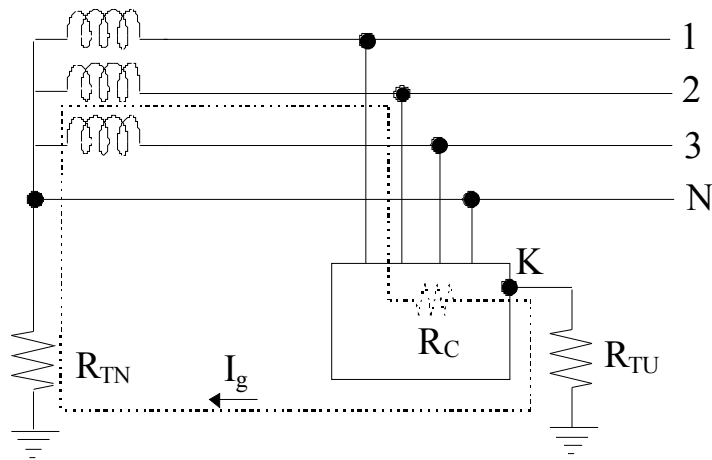


fig. 6.8.1

Il circuito equivalente dell'anello di guasto e della persona che viene in contatto è mostrato in fig. 6.8.2:

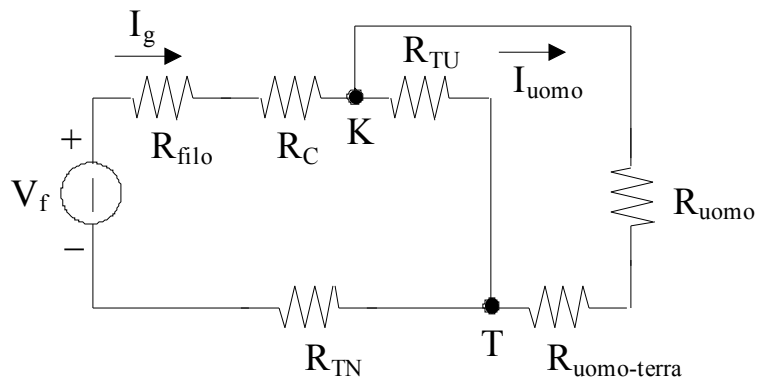


fig. 6.8.2

dove  $V_f$  è il valore efficace della tensione di fase ed  $R_C$  è la resistenza di contatto.

Considerando che  $R_{TN} + R_C + R_{filo} \ll R_{TU}$ , la massima corrente di guasto, in assenza di contatto umano, è:

$$I_{g \max} \leq \frac{V_f}{R_{TU}} \quad (6.8.1)$$

tale corrente deve essere abbastanza elevata da permettere l'intervento del dispositivo di protezione automatico, quindi deve essere  $R_{TU} \ll$ , mentre se vi è contatto la corrente che attraversa l'uomo è data da:

$$I_{uomo} = \frac{V_{KT}}{R_{uomo} + R_{uomo-terra}} \quad (6.8.2)$$

dove  $V_{KT}$  è la tensione della carcassa metallica.

Si hanno due ipotesi contrapposte:

- a)  $R_{TU} \ll R_{uomo} + R_{uomo-terra}$ , per cui la corrente si richiude prevalentemente sulla resistenza terra-utilizzatore;
- b)  $R_{uomo} \ll R_{uomo-terra}$ , che risulta essere il caso peggiore.

Per un tempo di intervento di scatto dell'interruttore minore od uguale a 5 secondi le norme indicano come massima tensione di contatto:

$$V_{K\infty} = V_{KT} \leq 50 \text{ V} \quad (6.8.3)$$

e quindi, per avere una sicura protezione dalla tensione di contatto, la resistenza di terra deve essere tale che:

$$R_{TU} \leq \frac{50}{I_s} \quad (6.8.4)$$

dove  $I_s$  è la corrente di intervento del dispositivo a massima corrente per un tempo inferiore od uguale a 5 secondi. In tal modo tra i punti K e T non ci sarà mai una differenza di potenziale maggiore di 50 V.



Ad esempio assumendo per la resistenza del corpo umano un valore di  $3000 \Omega$  si ha una corrente pari a  $\frac{50}{3000} \cong 16.6 \text{ mA}$  che è al di sotto della soglia di  $30 \text{ mA}$  indicata dalle norme.

Per correnti di guasto inferiori ad  $I_s$  il dispositivo di protezione impiega tempi lunghi ad aprire il circuito o potrebbe anche non intervenire, ma se la (6.8.4) è soddisfatta, la tensione assunta dalle masse è inferiore a  $50 \text{ V}$ . Per correnti di guasto superiori ad  $I_s$  le tensioni sulle masse superano i  $50 \text{ V}$  ma il dispositivo apre il circuito in tempi sufficienti per la sicurezza delle persone.

Tuttavia soddisfare la condizione (6.8.4) non è affatto facile. Infatti la corrente  $I_s$  corrisponde nella pratica a diversi multipli della corrente nominale, sia per i fusibili che per gli interruttori magnetotermici automatici. Ciò comporta un valore della resistenza di terra molto basso, in genere inferiore all'ohm, non facilmente ottenibile negli impianti in bassa tensione.

Per questo motivo e poichè, comunque sia, i dispositivi a massima corrente nascono per la protezione del circuito contro le sovracorrenti e non per intervenire in qualsiasi situazione anomala del circuito, come quella del guasto a terra, si adottano sistemi aggiuntivi di sicurezza, come l'utilizzo dell'interruttore differenziale ad alta sensibilità o del relè di massima tensione.

Nel primo caso si ha quindi una messa a terra diretta più una protezione differenziale come mostrato in figura 6.8.3.

La corrente di intervento del relè differenziale è, come già visto, data da:

$$I_d = |I_f - I_n| \quad (6.8.5)$$

e per la protezione dalla tensione di contatto sarebbe sufficiente che fosse verificata la seguente condizione:

$$R_{TU} \leq \frac{50}{I_d} \quad (6.8.6)$$

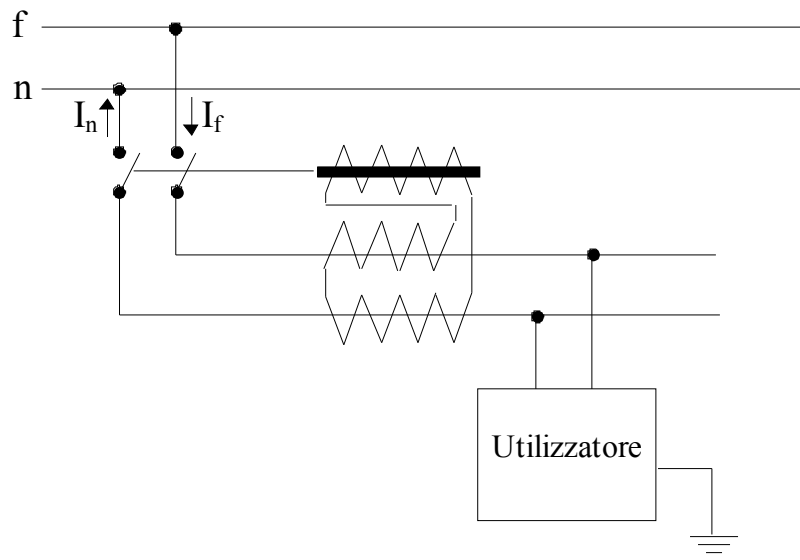


fig. 6.8.3

tuttavia è consigliabile che anche in questo caso sia verificata la condizione (6.8.4), la quale assicura la protezione dalla tensione di contatto anche in caso di malfunzionamento dell'interruttore differenziale.

Un altro sistema adottato per la protezione dai contatti indiretti è quello del coordinamento tra la messa a terra e dispositivi atti ad interrompere l'alimentazione in caso di guasto, come ad esempio i relè di massima tensione. In figura 6.8.4 è mostrato lo schema di funzionamento di questo sistema.

Per avere la protezione dalla tensione di contatto, la tensione di intervento  $V_i$  del relè di tensione non deve superare i 50 V:  $V_i \leq 50 \text{ V}$ , in tal modo si ritorna alla condizione (6.8.4):

$$R_{TU} \leq \frac{V_i}{I_s} = \frac{50}{I_s} \quad (6.8.7)$$

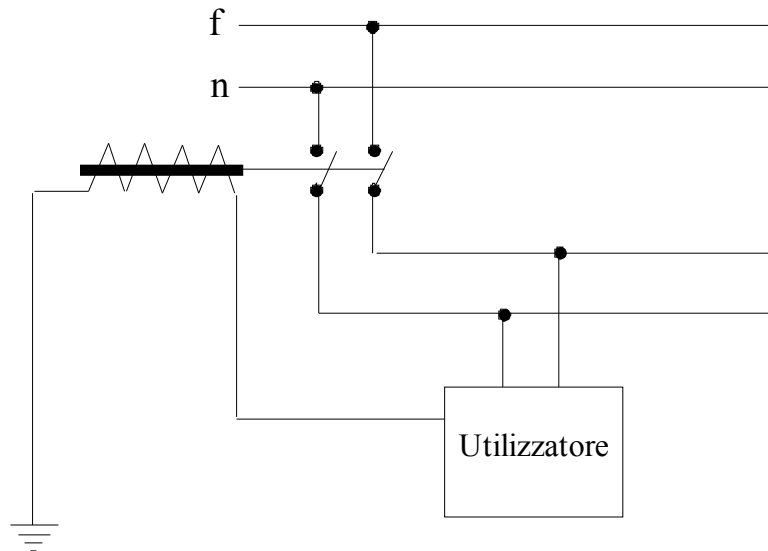


fig. 6.8.4

#### 6.9) COMPORTAMENTO DI UN SISTEMA TN IN CASO DI GUASTO DELL'ISOLAMENTO

Il sistema TN è migliorativo rispetto al sistema TT, in quanto, come si vedrà, ha il vantaggio di poter utilizzare unicamente i dispositivi a massima corrente per la protezione contro i contatti indiretti. La normativa prevede l'obbligo di adozione del sistema TN per impianti elettrici aventi una propria cabina di trasformazione.

Si consideri ad esempio il caso di guasto a terra in un sistema TN-S, con conduttore di protezione equipotenziale completamente distinto dal conduttore di neutro (vedi fig. 6.9.1).

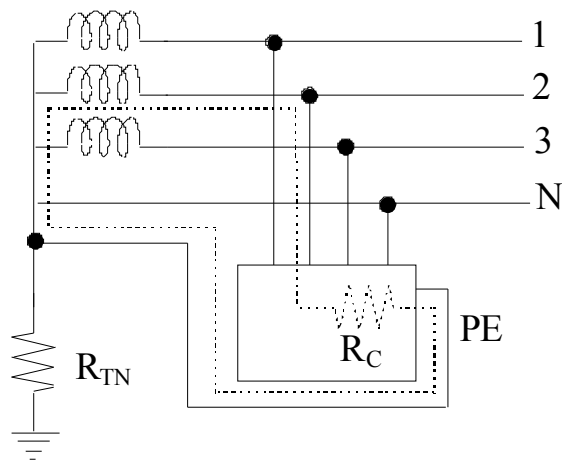


fig. 6.9.1

La corrente di guasto  $I_g$  non passa in questo caso attraverso la terra, ma si richiude nel centro stella dei trasformatori attraverso il conduttore PE ed è data da:

$$I_g = \frac{V_f}{Z_f + Z_{PE} + R_C} \cong I_{ccT} \quad (6.9.1)$$

dove  $V_f$  è il valore efficace della tensione di fase,  $Z_f$  e  $Z_{PE}$  sono rispettivamente le impedenze del conduttore di fase e del conduttore di protezione equipotenziale ed  $R_C$  è la resistenza di contatto.

Inoltre tale corrente risulta dello stesso ordine di grandezza della corrente di corto circuito a terra  $I_{ccT}$ , in pratica è molto più alta rispetto alla corrente di guasto che si verifica nel sistema TT e l'interruttore magnetotermico basta da solo ad assicurare l'apertura del circuito.

Indicando con  $Z_g$  l'impedenza dell'anello di guasto:

$$Z_g = Z_f + Z_{PE} + R_C \quad (6.9.2)$$

e con  $I_s$  la corrente di intervento entro cinque secondi del dispositivo di protezione a massima corrente, secondo le norme CEI la condizione da rispettare in caso di guasto franco a terra è che:

$$I_s \leq \frac{V_f}{Z_g} \quad (6.9.3)$$

in tal modo si assicura sempre l'apertura del circuito entro 5 secondi dal verificarsi del guasto.

Il sistema TN-S ha inoltre un vantaggio rispetto al sistema TN-C, in quanto eventuali tensioni che hanno origine sul conduttore di neutro (in caso di correnti di squilibrio importanti, corto circuito fase-neutro, interruzione del conduttore di neutro) non portano in tensione la carcassa dell'utilizzatore, essendo il neutro separato dal conduttore PE.

Comunque sia si ha un mal funzionamento se il conduttore di neutro viene interrotto senza interrompere i conduttori di fase perché in caso di cedimento dell'isolamento la carcassa metallica andrebbe al potenziale di fase. Per questo motivo le norme indicano l'utilizzo di interruttori onnipolari in grado di aprire contemporaneamente le fasi ed il neutro.

#### 6.10) COMPORTAMENTO DI UN SISTEMA IT IN CASO DI GUASTO DELL'ISOLAMENTO

Nel sistema IT, in caso di guasto a terra, si determina il passaggio di una corrente  $I_g$  molto modesta che è composta da una componente capacitiva, che è predominante, e da una componente di dispersione resistiva. Tuttavia per impianti aventi conduttori che non si estendono oltre i 1000 metri tale corrente risulta molto modesta, mentre, al contrario, per lunghezze di linea più grandi risulta impossibile effettuare l'isolamento del centro stella del trasformatore, poichè l'accoppiamento capacitivo inizia ad essere non più trascurabile.

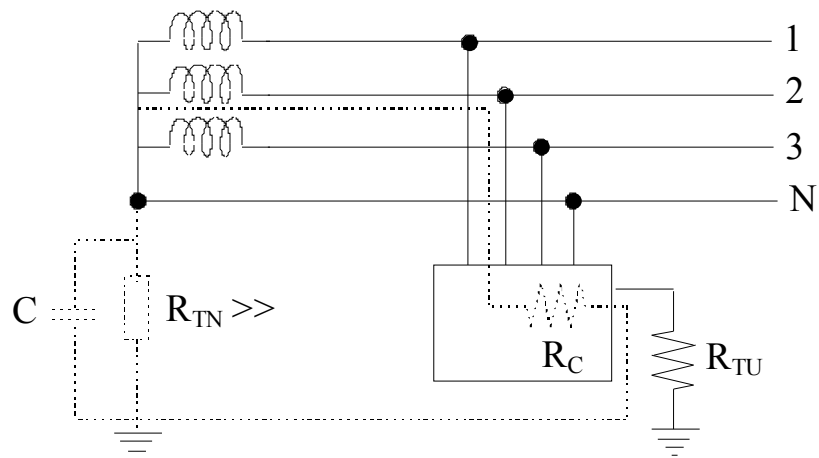


fig. 6.10.1

In presenza di contatto non si hanno problemi in quanto, come si è detto  $I_g \cong 0$ , la corrente non si richiude nel centro stella, anche se la carcassa dell'utilizzatore arriva al potenziale della fase. Grossi problemi si hanno dopo il primo guasto poiché l'isolamento si abbassa velocemente ( $R_{TN} \ll$ ) ed il sistema IT diventa in pratica un sistema TT od un sistema TN, a seconda che le masse siano connesse rispettivamente ad impianti di terra separati o ad un impianto di terra unico, che al verificarsi di un secondo guasto permettono la richiusura della corrente nel centro stella. Il sistema TT richiederebbe protezioni differenziali; si trova molto più pratico ed economico realizzare un impianto di terra unico e generale, per convertire, al primo guasto, il sistema IT in un sistema TN.

Data la corrente di guasto  $I_g$ , la resistenza dell'impianto di terra deve soddisfare alla condizione:

$$R_{TU} \leq \frac{V_C}{I_g} \quad (6.10.1)$$

dove  $V_C$  è la tensione di contatto. Se si tratta di sale chirurgiche o comunque provviste di apparecchi elettromedicali inseriti sempre nel corpo umano, tale tensione non deve superare il limite di 25 V al primo guasto.

Al secondo guasto a terra i dispositivi di protezione dovrebbero aprire il circuito entro cinque secondi, ma per il progettista non è possibile verificare che questa condizione sia soddisfatta in un

impianto complesso, dove il doppio guasto può coinvolgere due circuiti qualsiasi. Allora non resta che considerare il sistema IT con il neutro idealmente a terra (sistema TN) ed imporre per ogni circuito che sia soddisfatta la condizione (cfr. 6.9.3):

$$Z_g \leq \beta \frac{V_f}{I_s} \quad (6.10.2)$$

dove  $\beta$  è un coefficiente inferiore ad 1, allo studio in sede internazionale. Esso deve essere tale che, una volta soddisfatta la (6.10.2) per ogni circuito, garantisca l'interruzione della corrente di doppio guasto entro cinque secondi, qualunque siano i due circuiti coinvolti.

#### 6.11) PROTEZIONI PASSIVE CONTRO I CONTATTI INDIRETTI

Fin qui si è trattato della protezione attiva contro i contatti indiretti, cioè si è ricorso all'apertura automatica del circuito di guasto per limitare il periodo di tempo nel quale si manifesta la tensione pericolosa sulle carcasse degli utilizzatori e quindi la corrente attraverso il corpo umano. In questo paragrafo si esamineranno i sistemi di protezione passivi atti a limitare, per mezzo di accorgimenti circuitali od ambientali, non il tempo ma la corrente che potrebbe scorrere nel corpo umano in caso di cedimento dell'isolamento principale. Tra i principali tipi di protezione passiva si distinguono:

- Protezione passiva mediante l'utilizzo di apparecchi di classe II o a doppio isolamento.

Tali dispositivi sono provvisti di doppio isolamento di modo che tra i poli in tensione e la superficie accessibile si hanno due strati di isolamento di per sè sufficienti per la protezione, essi inoltre non devono essere connessi a terra. Risulta molto difficile e costoso nella pratica realizzare impianti a doppio isolamento, basti pensare che tutti gli utilizzatori di tale impianto dovrebbero essere del tipo a doppio isolamento.

- Protezione passiva mediante locali isolati.

In questo caso i locali sono dotati di pavimento e pareti isolate, in modo che in caso di contatto con una parte in tensione, la persona non sia comunque percorsa da corrente. La difficoltà di questo sistema consiste, così come per il sistema precedentemente esaminato, nel garantire nel tempo le caratteristiche di isolamento, anche in considerazione di interventi di manutenzione o ristrutturazione negli impianti e nelle strutture.

- ) Protezione mediante sistemi elettrici a tensione di sicurezza.

I sistemi elettrici a tensione nominale minore od uguale a 50 V in corrente alternata e a 75 V in corrente continua alimentati da una sorgente autonoma o da un trasformatore di sicurezza o da altre sorgenti con analoghe caratteristiche di sicurezza, quando sono separati da altri sistemi elettrici con un grado di isolamento non inferiore a quello previsto tra primario e secondario del trasformatore di sicurezza, vengono denominati sistemi di categoria OS (bassissima tensione di sicurezza). In questi sistemi nessun punto del secondario è connesso a terra. Questi sistemi vengono adoperati in casi speciali per l'alimentazione di giocattoli, apparecchi elettromedicali, apparecchi che si trovino in zone pericolose, etc. (apparecchi in classe III)

## 6.12) MISURA DELLE TENSIONI DI PASSO E CONTATTO

In alcuni casi particolari non è possibile utilizzare la condizione (6.8.6) in impianti TT. Si pensi ad esempio ad un impianto alimentato da una linea trifase MT che ha una protezione con corrente di sgancio elevata. Non si riesce a realizzare realisticamente una resistenza di terra al di sotto di certi valori. Ci si deve accontentare in questo caso di verificare che in ogni punto dell'area dove è ubicato l'impianto, accessibile alle persone, nelle peggiori condizioni di dispersione, cioè per corrente a terra uguale a quella di sgancio, la tensione di contatto sia superiore al valore indicato sulla tabella di cui si è parlato nel paragrafo 6.1. La misura delle tensioni di passo e di contatto si rende necessaria allorquando si misura un valore della resistenza di terra:



$$R_T > \frac{V_P}{I_g} \quad (6.12.1)$$

Si definisce convenzionalmente tensione di passo  $V_P$  quella tensione che durante il funzionamento di un impianto di terra può risultare applicata tra i piedi di una persona posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro, mentre si definisce tensione di contatto  $V_C$  quella tensione alla quale può essere soggetta una persona in seguito al contatto con le carcasse e le strutture meccaniche, normalmente non in tensione, delle macchine e delle apparecchiature.

La misura delle tensioni di passo e contatto viene effettuata in scala ridotta; si invia cioè nell'impianto di terra una corrente di prova che è una frazione della corrente di guasto  $I_g$  che l'impianto deve disperdere, ed il cui valore viene generalmente fornito dall'ente distributore di energia elettrica. Occorre comunque utilizzare una corrente di prova non inferiore all'1% della corrente di guasto, con un minimo di 5A per le cabine di trasformazione MT/BT e di 50 A per le stazioni AT ed AAT. Le tensioni di contatto e di passo ricercate si ottengono moltiplicando quelle misurate per il rapporto di riduzione tra le correnti, potendo essere considerato il fenomeno lineare entro ampi limiti.

Nella pratica bisogna che la corrente di prova sia la più alta possibile in modo che le tensioni di disturbo (tensioni di passo e contatto misurate in assenza di corrente di prova) siano trascurabili rispetto alle tensioni misurate quando la corrente di prova viene dispersa. Se le tensioni di disturbo sono costanti nel tempo è possibile depurarle dalla misura. Per far questo si adottano i criteri visti al paragrafo 6.4 dell'inversione della polarità.

Il dispersore ausiliario utilizzato per inviare la corrente di prova deve essere posto rispetto all'impianto di terra ad una distanza che va dalle 3 alle cinque volte il diametro massimo dell'impianto stesso.

La tensione di passo si misura tra due punti del terreno ad un metro di distanza tra loro, gli elettrodi verso terra devono avere una superficie di contatto di 200 cm<sup>2</sup> ed essere premuti con una forza di 250 N (vedi fig. 6.12.1).

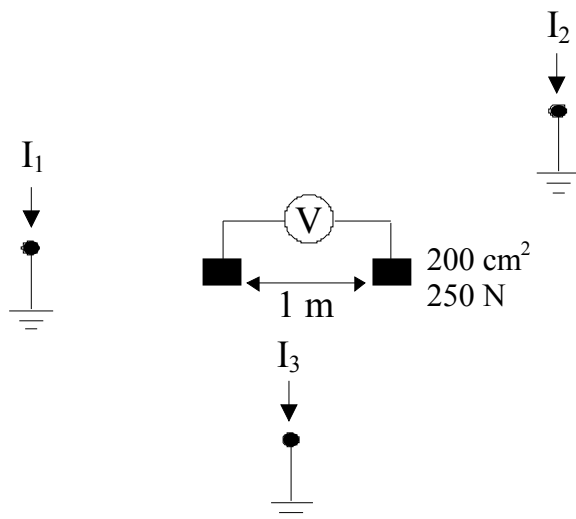


fig. 6.12.1

La tensione di contatto va misurata ad un metro di distanza dalla massa tra la massa stessa e i due elettrodi ausiliari posti in parallelo l'uno vicino all'altro (vedi fig. 6.12.2).

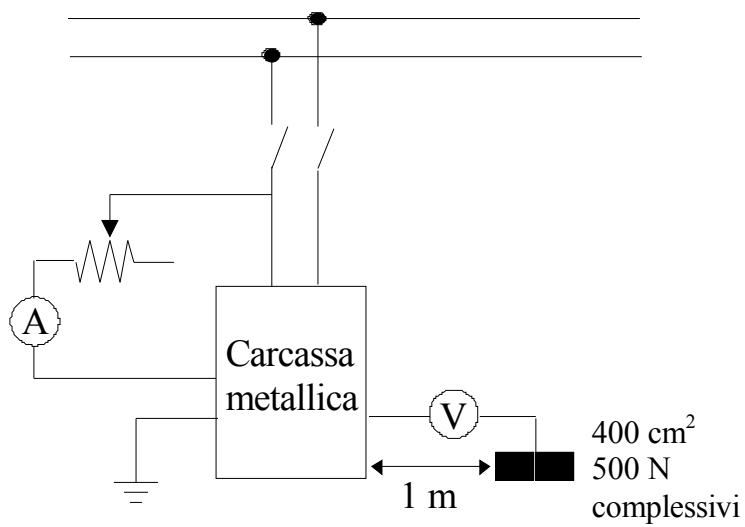


fig. 6.12.2