

CAPITOLO V

COMPONENTI DELL'IMPIANTO ELETTRICO SISTEMI DI PROTEZIONE

1. Generalità

Un sistema di protezione percepisce la presenza di una condizione di funzionamento anormale ed interviene al fine di contenerne le conseguenze.

Si considerano nel seguito sistemi di protezione contro le sovracorrenti e contro le sovratensioni, a seconda che la condizione di funzionamento anormale sia legata a scostamenti dei valori di corrente o tensione dai valori che garantiscono il normale funzionamento di un sistema elettrico.

Si fa riferimento esclusivamente ai sistemi di protezione per impianti elettrici in media e bassa tensione.

2. Sistemi di protezione contro le sovracorrenti

2.1 Generalità

Nel seguito, vengono analizzati alcuni esempi di possibili sistemi di protezione contro le sovracorrenti impiegati in schemi tipici degli impianti di media e bassa tensione. Lo studio viene condotto per le linee in base al livello di tensione (linee in media tensione, in bassa tensione) e per il trasformatore MT/BT.

Viene prima introdotta la definizione di selettività di un sistema di protezione; inoltre, poiché i sistemi di protezione contro le sovracorrenti presenti in un impianto elettrico a media e bassa tensione si differenziano a seconda dello schema elettrico che in esso viene impiegato, vengono premesse anche alcune brevi considerazioni sugli schemi stessi.

2.1.1 Selettività

Qualunque sia il sistema di protezione è bene osservare che esso deve avere molteplici requisiti (selettività, rapidità di intervento, affidabilità, ecc.); un sistema di protezione contro le sovracorrenti è selettivo quando, verificatasi una condizione di funzionamento anormale, esso mette fuori servizio solo il componente o la parte di impianto in cui si verifica la suddetta condizione, permettendo così alle rimanenti parti del sistema elettrico di rimanere in servizio.

2.1.2 Schemi elettrici negli impianti elettrici a media e bassa tensione

La distribuzione e l'utilizzazione dell'energia elettrica a media e bassa tensione avviene impiegando molteplici strutture, alcune tipiche della sola media tensione altre della sola bassa tensione ed altre, infine, di impiego comune. Nel seguito si farà riferimento solo alle principali strutture, dette di base. Esse si possono ricondurre essenzialmente alle seguenti tipologie:

- radiale semplice;
- radiale con richiusura;
- anello.

La struttura radiale semplice (fig.V.1) è caratterizzata da un flusso unidirezionale dell'energia elettrica. Tale struttura presenta i seguenti vantaggi:

- minimo costo dei materiali e dell'installazione;
- minore impiego di spazio;
- semplicità e chiarezza della configurazione, con ovvi vantaggi per la manutenzione e per le manovre di intervento.

Presenta, per contro, i seguenti svantaggi:

- unicità di ciascun componente;
- nessuna flessibilità di esercizio.

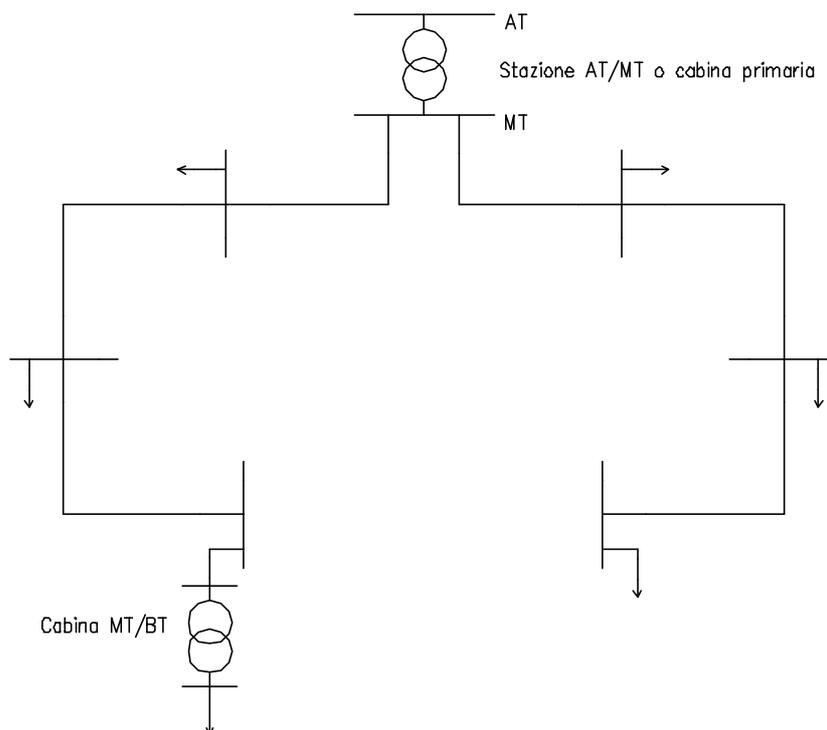


Fig. V.1 - Struttura radiale semplice

La struttura radiale con richiusura (fig.V.2) è costituita da due radiali semplici con possibilità di effettuare, in caso di corto circuito, trasferimento di carichi da un radiale all'altro; nella fig.V.2 è presente nel punto A un'apparecchiatura di manovra normalmente aperta. Ciascuna struttura radiale deve, ovviamente, essere dimensionata tenendo conto della potenza complessiva dei carichi, ma mantiene sempre la caratteristica di unidirezionalità del flusso dell'energia.

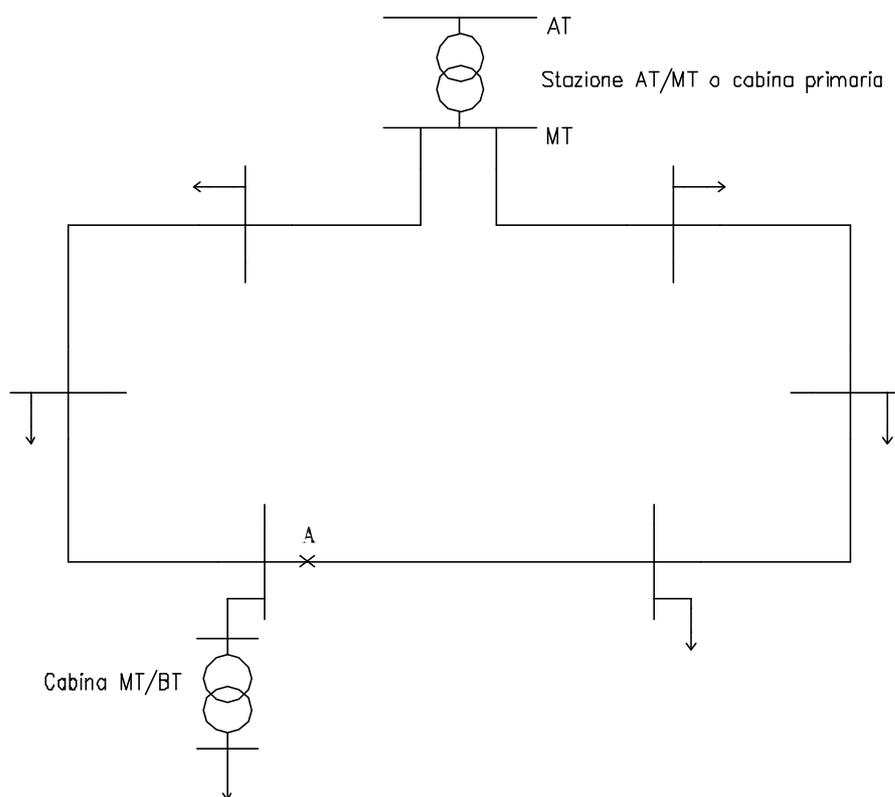


Fig. V.2 - Struttura radiale con richiusura o ad anello

La struttura ad anello (fig.V.2, in cui l'apparecchiatura di manovra nel punto A è normalmente chiusa), consente in condizioni normali l'alimentazione attraverso due possibili vie; in essa, quindi, il flusso dell'energia elettrica non è unidirezionale.

Le strutture, radiale con richiusura e ad anello, si presentano del tutto simili; la differenza consiste nel diverso modo di esercizio, in quanto, come detto, nella struttura radiale con richiusura il flusso dell'energia è sempre unidirezionale mentre in quella ad anello non lo è.

E' evidente che le strutture radiale con richiusura e ad anello presentano vantaggi rispetto allo schema radiale semplice legati alla loro maggiore flessibilità; per contro sono più difficili da gestire e più costose.

In generale negli impianti elettrici in media tensione sono impiegate sia la struttura radiale, semplice o con richiusura, che quella ad anello; nella bassa tensione è

quasi universalmente impiegata la struttura radiale semplice e solo molto raramente quella ad anello.

Gli impianti elettrici a media tensione sono alimentati da trasformatori il cui secondario è a stella con centro stella isolato o collegato a terra tramite impedenza (oggi si sta affermando sempre più l'uso di una induttanza, detta bobina di Petersen); gli impianti elettrici a bassa tensione sono alimentati da trasformatori il cui secondario è a stella con centro stella messo a terra senza interposizione di nessuna impedenza. Conoscere come il centro stella del trasformatore è collegato a terra è necessario per poter scegliere i sistemi di protezione contro i guasti che interessano la terra.

2.2 Linee in MT

Per tale tipo di linee, nel seguito viene affrontato dapprima il problema dei sistemi di protezione contro le correnti di corto circuito e poi di quelli contro il sovraccarico. Vengono considerati separatamente il caso di centro stella isolato (fig I.3.a) e di centro stella connesso a terra attraverso una induttanza (fig I.3.b).

2.2.1 Sistemi di protezione contro le correnti di corto circuito nel caso di centro stella isolato

Nel seguito viene affrontato dapprima il problema dei sistemi di protezione contro i guasti polifase (trifase e bifase) e, poi, quello dei sistemi di protezione contro i guasti monofase a terra. E' necessario in questo caso distinguere tra i due tipi di corto circuito perché in una rete a neutro isolato mentre le correnti di corto circuito polifase sono di elevato valore quelle di guasto monofase a terra sono di valore talmente piccolo da non poter essere impiegato lo stesso sistema di protezione per i due tipi di corto circuito.

a) Linee delle strutture radiale semplice e radiale con richiusura

Si faccia inizialmente riferimento al caso di una linea in MT di una struttura radiale semplice (fig.V.1), alimentata da un trasformatore AT/MT il cui secondario è caratterizzato da un collegamento a stella con centro stella isolato

Si consideri, dapprima, il caso dei guasti polifase (trifase e bifase), a cui sono associate correnti di guasto di valore significativamente più elevato di quello delle correnti di normale funzionamento.

Nel caso di una linea in media tensione con un solo carico C all'estremità di arrivo (fig.V.3), è sufficiente installare, in partenza, un sistema di protezione SP dotato di un relè a massima di corrente e di un interruttore. Nella figura, t^* rappresenta il tempo di intervento del relè; se a tale tempo si somma il tempo di interruzione dell'interruttore si ottiene il cosiddetto tempo di eliminazione del guasto, che è una grandezza caratteristica del sistema di protezione.

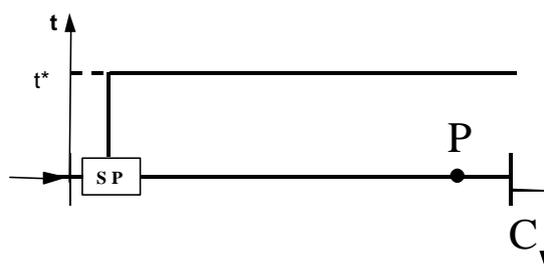


Fig. V.3 - Sistema di protezione con relè a massima di corrente di una linea MT con un solo carico

Se avviene un corto circuito polifase in un punto della linea, ad esempio nel punto P, il relè a massima di corrente percepisce la presenza della condizione di funzionamento anormale e comanda l'interruttore all'apertura.

Si consideri, adesso, il caso di più tratti di linea in serie separati da sbarre, dalle quali si dipartono altre linee o carichi elettrici; questo potrebbe essere, ad esempio, il caso della struttura radiale con richiusura (fig.V.2) nella quale si suppone che tre sbarre sono alimentate da un lato. In questo caso è necessario installare a valle di ogni sbarra un sistema di protezione del tipo di quello della fig.V.3. Per garantire la selettività, sarà necessario che i tempi di intervento dei vari relè siano adeguatamente crescenti man mano che ci si avvicina al punto di alimentazione (fig.V.4); più in particolare, è necessario che il tempo di intervento del relè del sistema di protezione SP2 (SP1) sia maggiore del tempo di intervento del relè del sistema di protezione SP3 (SP2) di un intervallo di tempo pari almeno al tempo di interruzione dell'interruttore del sistema di protezione SP3 (SP2).

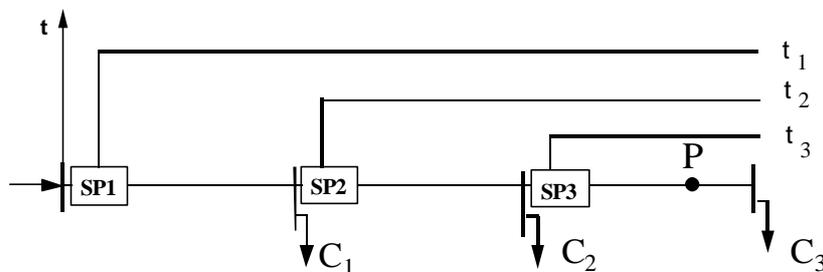


Fig. V.4 - Sistemi di protezione con relè a massima di corrente di più tratti di linea MT con più carichi

Le condizioni citate per la verifica della selettività si possono immediatamente comprendere con un semplice esempio; si supponga che avvenga un corto circuito nel punto P della fig.V.4, cioè a valle di SP3. E' evidente che tutti i relè a massima di corrente presenti a monte del punto di guasto percepiranno la presenza di una sovracorrente, ma uno solo di loro, al fine di garantire la selettività, deve comandare l'intervento del proprio interruttore: il relè installato in SP3; se ciò avviene, infatti, viene disalimentato il minor numero possibile di carichi, e cioè il carico C₃ (se, ad

esempio, il relè posto in SP2 comandasse all'apertura l'interruttore ad esso associato si avrebbe la disalimentazione anche di C_2). Perché ciò avvenga è necessario, evidentemente, che il tempo di eliminazione del guasto del sistema di protezione SP3 (somma del tempo di intervento del relè posto in SP3 e del tempo di interruzione dell'interruttore ad esso associato) sia minore del tempo di intervento del relè posto in SP2 e, conseguentemente, di quello posto in SP1; solo in tal caso, infatti, il guasto nel punto P viene eliminato prima che il relè posto in SP2, e tanto più quello posto in SP1, invii il comando di apertura all'interruttore ad esso associato.

Come mostrato nella figura V. 5, il sistema di protezione può essere installato anche solo sul primo tratto, SP1, mentre gli altri tratti sono caratterizzati dalla presenza di soli interruttori di manovra sezionatori (IMS).

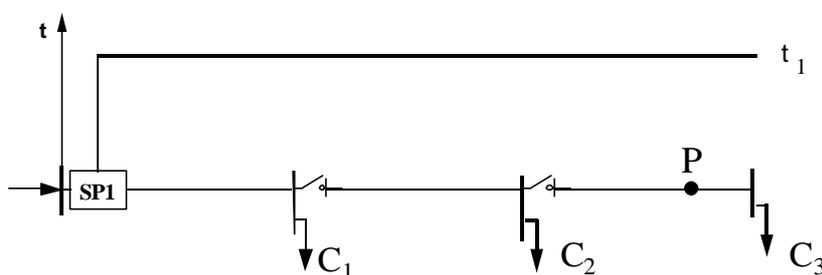


Fig. V.5 - Sistema di protezione con relè a massima di corrente solo sul primo tratto di linea MT con più carichi

Si consideri, adesso, il caso di guasto monofase a terra. A questo tipo di corto circuito, per i motivi illustrati nel seguito, non sono associate correnti di valore elevato, per cui i sistemi di protezione adottati per i guasti polifase non possono essere impiegati. Più in particolare, nel caso di corto circuito monofase la corrente di corto circuito monofase è limitata dalle capacità verso terra delle fasi non soggette a guasto per cui la sua intensità è tanto limitata da non dar luogo all'intervento del relè a massima di corrente. D'altra parte, anche se il valore della corrente di corto circuito è tanto piccola da non costituire di per sé causa di pericolo per le persone o le cose, essa va comunque rilevata ed eventualmente eliminata; a tal fine vengono impiegati sistemi di protezione dotati di relè di tensione omopolare o di relè varmetrici direzionali.

Per comprendere i motivi che portano all'impiego di suddetti relè, è necessario premettere alcune considerazioni sui fenomeni che accompagnano un corto circuito monofase in una linea in MT del tipo evidenziato in precedenza.

Si consideri inizialmente il caso di una linea in MT di una struttura radiale semplice che si diparte dalle sbarre del trasformatore AT/MT. Si assuma, per semplicità di trattazione, che le impedenze serie del trasformatore e della linea siano di valore trascurabile; si supponga, poi, che le capacità verso terra della linea siano concentrate in un sol punto.

In condizioni di funzionamento normali (fig.V.6), le tensioni delle fasi rispetto a terra V_i^t e quelle delle fasi rispetto al centro stella del secondario del trasformatore AT/MT V_i sono uguali tra loro, perché il centro stella N è allo stesso potenziale di terra T. Ne consegue, ovviamente, che la somma delle tensioni delle fasi rispetto a terra è uguale a zero.

In condizioni di corto circuito monofase a terra (fig.V.7), ad esempio della fase 3, la fase guasta si porta al potenziale di terra (per semplicità si assume che l'impedenza del guasto è nulla), mentre le due fasi non affette da guasto assumono verso terra un valore di tensione pari alla tensione concatenata. Ne consegue che la somma delle tensioni delle fasi rispetto a terra non è più nulla, ma pari alla somma vettoriale di due tensioni concatenate.

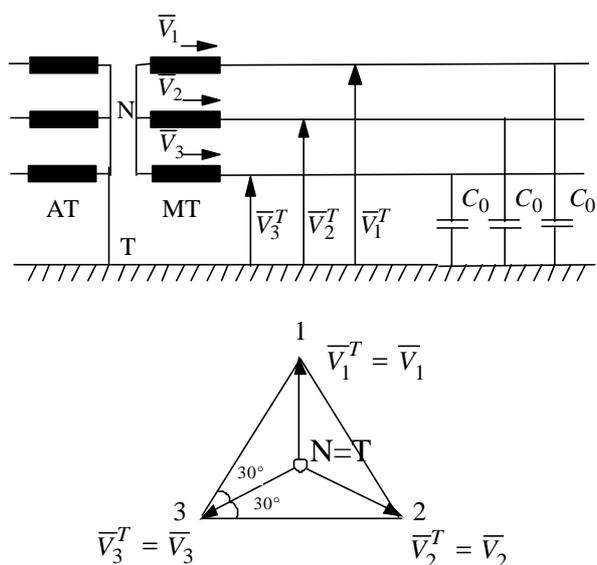


Fig. V.6 - Rappresentazione schematica di una linea in MT con centro stella isolato e diagramma fasoriale delle tensioni in condizioni di funzionamento normali

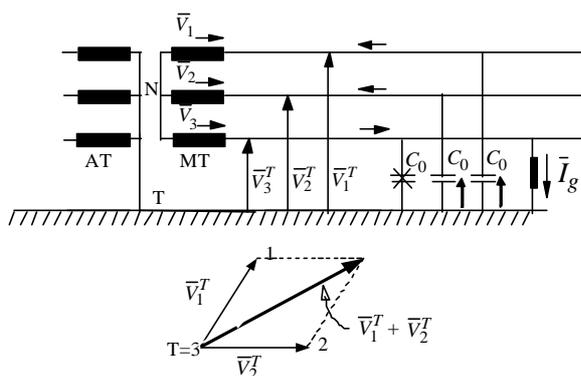


Fig. V.7 - Rappresentazione schematica di una linea in MT con centro stella isolato e diagramma fasoriale delle tensioni in condizioni di corto circuito monofase a terra della fase 3

Da quanto evidenziato in precedenza appare chiaro che la grandezza da tenere sotto controllo per discriminare la presenza di un corto circuito monofase è proprio la somma delle tensioni delle fasi rispetto a terra: tale grandezza è uguale a zero in

condizioni normali ed assume un valore significativamente diverso da zero in condizioni di guasto monofase a terra.

Il sistema di protezione che può essere impiegato nel caso in esame per la protezione contro i guasti monofase è allora costituito dall'insieme di un relè voltmetrico a massima di tensione (fig.V.8) e di un interruttore o di un dispositivo segnalatore di guasto. Il relè voltmetrico della fig.V.8 è alimentato da un trasformatore che ha il secondario a triangolo aperto ed il primario a stella con centro stella a terra.

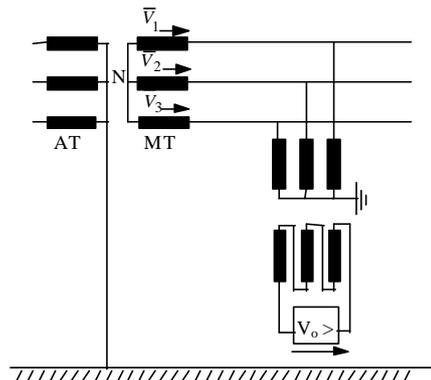


Fig. V.8 - Relè voltmetrico per la protezione contro i corto circuiti monofase in una linea in MT con centro stella isolato.

Il relè a massima di tensione della fig.V.8 non è, però, in grado di garantire la selettività quando dal secondario del trasformatore AT/MT si dipartono più linee (due linee nel caso semplice della fig.V.9). Infatti, quando avviene un corto circuito monofase a terra in un punto di una qualunque delle linee in MT della fig.V.9, la sbarra che alimenta la fase guasta (nella fig.V.9, la sbarra S_3) si porta al potenziale di terra, per cui la somma delle tre tensioni delle fasi verso terra di tutte le linee che da essa si dipartono sarà pari alla somma vettoriale di due tensioni concatenate. Tutti i relè voltmetrici eventualmente posti in partenza delle linee avvertirebbero, pertanto, la presenza di un guasto e segnalerebbero il guasto o comanderebbero i propri interruttori ad intervenire: verrebbe, così, disalimentata non solo la linea su cui è presente il guasto, ma anche tutte le altre sane.

Il problema di garantire la selettività nelle reti in MT del tipo della fig.V.9 si può risolvere impiegando, al posto dei relè voltmetrici, i relè varmetrici direzionali, detti anche relè direzionali di terra.

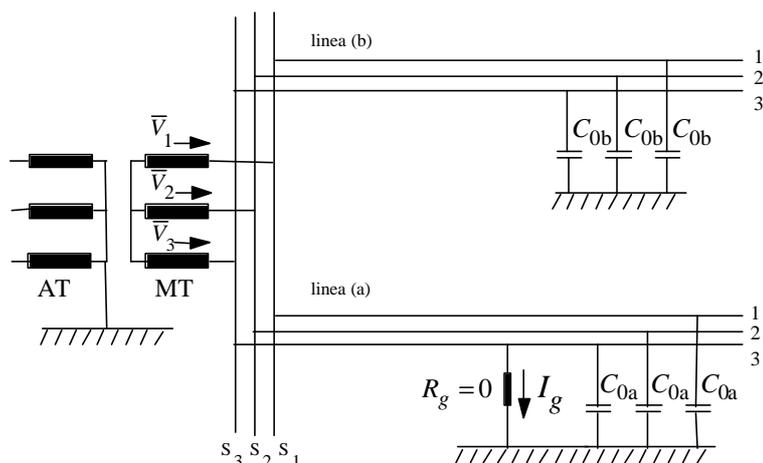


Fig. V.9 - Rappresentazione schematica di più linee in MT che si dipartono dal secondario di un trasformatore AT/MT con centro stella isolato, in condizioni di corto circuito monofase a terra.

Per comprendere il motivo per cui si ricorre a tale soluzione si faccia riferimento alla fig.V.10, in cui è evidenziato il percorso della corrente di corto circuito monofase. Essendo cortocircuitate dal guasto tutte le capacità verso terra delle fasi collegate alla sbarra S_3 , la corrente di corto circuito monofase si richiude attraverso le capacità delle fasi sane di tutte e due le linee e ritorna al punto di guasto attraverso il secondario del trasformatore AT/MT.

Appare evidente che il vettore somma delle correnti che si dipartono dalle sbarre S_1 , S_2 ed S_3 verso la linea (a), e cioè \bar{I}_1 , dove è materialmente presente il guasto è uguale in modulo, ma in opposizione di fase, rispetto al vettore somma delle correnti che si dipartono dalle sbarre verso la linea (b), e cioè \bar{I}_2 , dove non è presente il guasto; ambedue questi vettori sono, poi, in quadratura con il vettore somma delle tensioni delle fasi verso terra, uguale per tutte e due le linee. Ne consegue che si possono impiegare per discriminare la presenza del guasto dei relè varmetrici direzionali, del tipo riportato nella fig.V.11; le voltmetriche dei relè sono alimentate dalla somma delle tensioni verso terra mentre le amperometriche dalla somma delle correnti che si dipartono dalle sbarre. Ovviamente, le potenze reattive misurate dai due relè posti in partenza delle linee saranno di segno opposto.

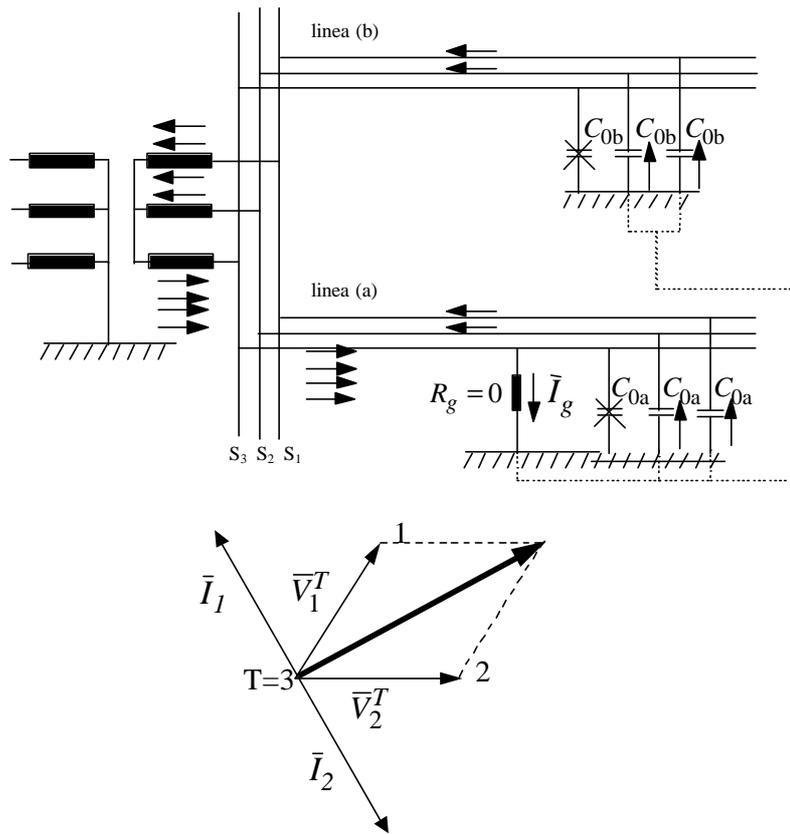


Fig. V.10 - Rappresentazione schematica di più linee in MT che si dipartono dal secondario di un trasformatore AT/MT con centro stella isolato, in condizioni di corto circuito monofase a terra: percorso della corrente di guasto e diagramma fasoriale.

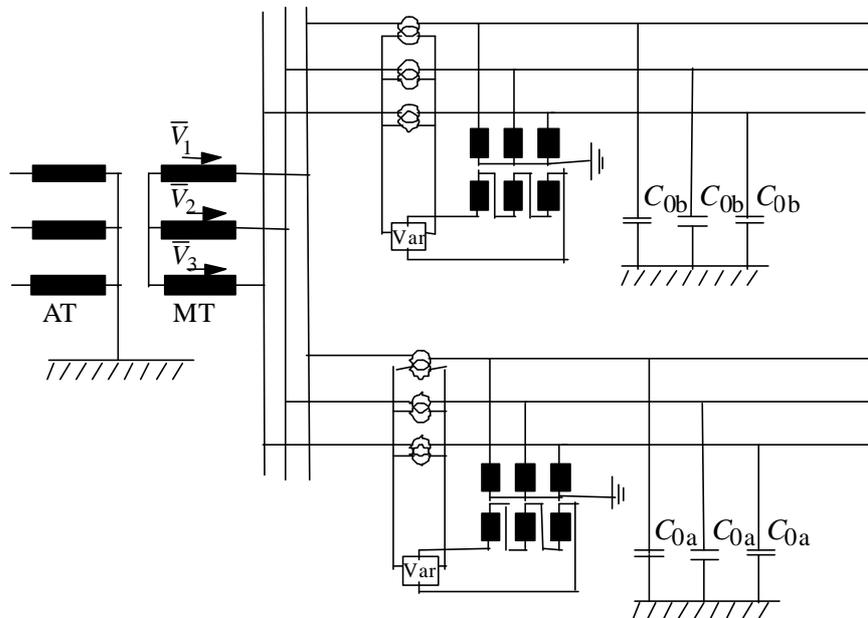


Fig. V.11 - Relè varmetrici direzionali per la protezione contro i corto circuiti monofase di più linee in MT con centro stella isolato.

b) Linee della struttura ad anello

Si consideri adesso il caso in cui la struttura della rete è ad anello.

Per quanto riguarda la protezione contro i guasti polifase, poichè nelle reti ad anello il flusso dell'energia non è unidirezionale, fig.V.12, è necessario installare, sia a monte che a valle di ciascuna sbarra da cui sono derivate linee o carichi, sistemi di protezione oltre che con relè a massima di corrente anche con relè direzionale; solo così facendo, infatti, se avviene un corto circuito in un punto qualsiasi di una di linea si è sicuri di garantire la selettività dei sistemi di protezione. Se, ad esempio, si ipotizza un corto circuito nel punto P della fig.V.12 interverranno SP2a ed SP2b, con la conseguenza che i carichi presenti in B e C continueranno, a valle dell'intervento dei suddetti sistemi di protezione, ad essere ugualmente alimentati. La necessità della ulteriore presenza di relè direzionali e non a massima di corrente è, ovviamente, legata al fatto che in loro assenza i due relè a massima di corrente a monte ed a valle di ciascuna sbarra misurerebbero la stessa corrente ed interverrebbero con un tempo di intervento minore, con conseguente inutile disalimentazione del carico alimentato dalla sbarra presso cui essi sono installati.

Per quanto riguarda la protezione contro i guasti monofase, valgono, di larga massima, considerazioni analoghe a quelle fatte per la struttura radiale. Per guasto monofase in P sulla linea B-C una corrente omopolare dalle sbarre A interessa il sistema di protezione SP2a così come una corrente omopolare fornita dalle sbarre D interessa il sistema di protezione SP2b; si può proteggere l'intera rete con relè varmetrici direzionali, detti relè direzionali di terra, di tipo temporizzato.

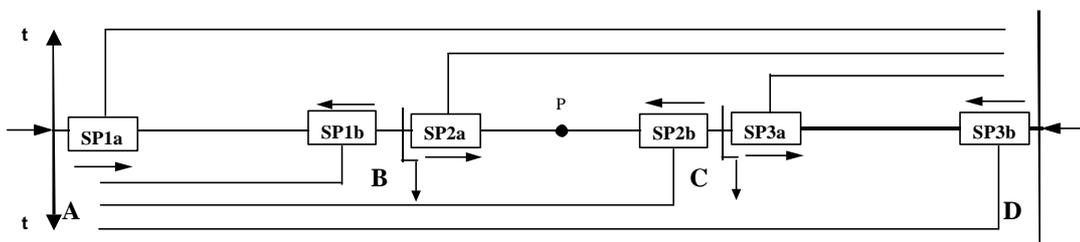


Fig. V.12 - Sistemi di protezione per guasti polifase e monofase

2.2.2 Sistemi di protezione contro le correnti di corto circuito nel caso di centro stella connesso a terra tramite una induttanza (bobina di Petersen).

Nel seguito viene affrontato solo il problema dei sistemi di protezione contro i guasti monofase, in quanto la connessione del centro stella a terra tramite una induttanza, per ovvi motivi, non modifica il comportamento della linea nel caso di corto circuito polifase rispetto al caso del centro stella isolato; nei due casi, pertanto, vengono impiegati gli stessi sistemi di protezione contro i corto circuiti trifase e bifase. Non verrà, poi, considerato il caso delle linee con struttura ad anello.

Si faccia, inizialmente, riferimento al caso di una linea di una struttura radiale semplice (fig. V.13) alimentata da un trasformatore AT/MT il cui secondario ha il

centro stella connesso a terra tramite una induttanza. Il motivo principale per cui si ricorre all'uso di tale induttanza è che, grazie ad essa, come si vedrà tra breve, è possibile la autoestinzione di quasi la totalità dei guasti monofase a terra (quelli che non sono di natura permanente), con ovvi benefici sulla continuità di esercizio della linea.

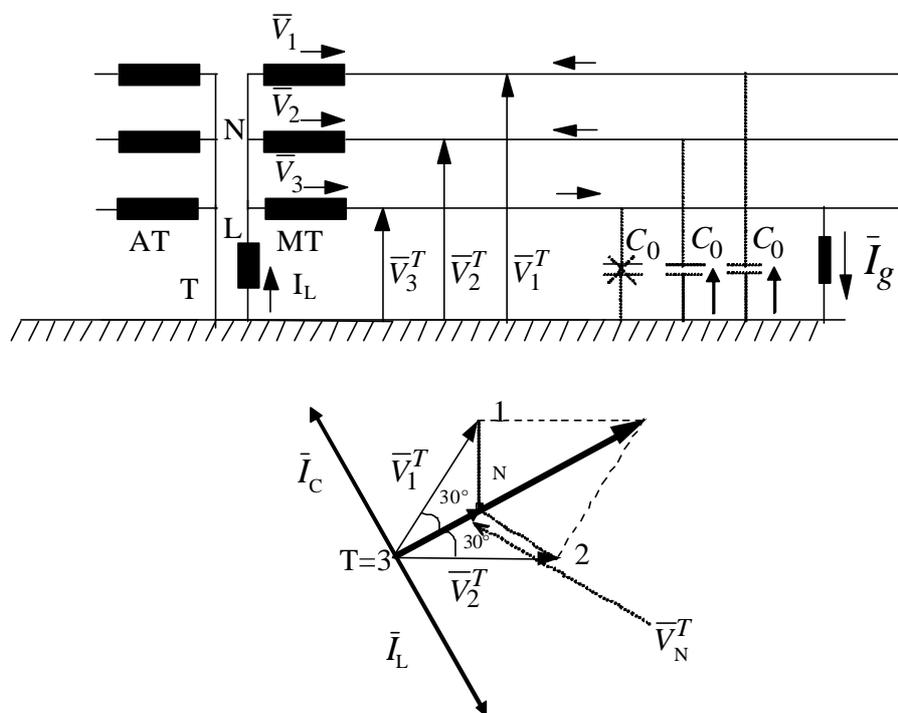


Fig. V.13 - Rappresentazione schematica di una linea in MT con bobina di Petersen e diagramma fasoriale delle tensioni in condizioni di corto circuito monofase a terra della fase 3.

In condizioni di funzionamento normali vale sempre il diagramma fasoriale delle tensioni riportato nella fig.V.6.

Quando si verifica un corto circuito monofase, ad esempio della fase 3, se, per semplicità, si trascurano le componenti transitorie, la corrente di guasto \bar{I}_g è somma di due componenti sinusoidali: la prima \bar{I}_L che si richiude attraverso l'induttanza e la seconda \bar{I}_C che si richiude attraverso le capacità verso terra delle fasi non affette da guasto.

Se si sceglie il valore dell'induttanza opportunamente, si può fare in modo che le due correnti citate in precedenza in opposizione di fase siano, almeno teoricamente, uguali in modulo, in modo tale che la corrente di guasto \bar{I}_g (somma delle due componenti succitate) risulti in valore nullo, con la conseguenza che, se il guasto è di natura transitoria, esso si autoestingue.

Si può calcolare il valore dell'induttanza necessaria a verificare tale condizione grazie al circuito semplificato riportato nella fig. V.14. In tale circuito si sono trascurate le impedenze serie del trasformatore e della linea e si è ipotizzato un corto circuito netto.

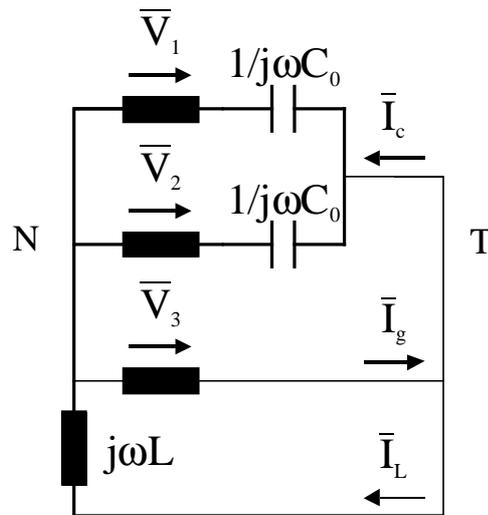


Fig. V.14 - Circuito equivalente per il calcolo dell'induttanza della bobina di Petersen

Dall'analisi del circuito della fig. V.14 risulta che affinché sia nulla la corrente risultante \bar{I}_g , la cui espressione sarà determinata nel capitolo riguardante il calcolo della corrente di corto circuito (cap. VIII), è necessario che sia:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (V.1)$$

Se la condizione (V.1) risulta soddisfatta, si verifica la auspicata autoestinzione, ed è questo il motivo per cui la Bobina di Petersen viene chiamata anche bobina di estinzione.

E' evidente che nel punto di guasto, anche se l'induttanza è scelta in base alla (V.1), circolerà comunque una corrente residua; essa è dovuta alle varie ipotesi fatte nel ricavare la (V.1) ed anche al fatto che, per ovvi motivi, la capacità C_0 può modificarsi nel tempo (ad esempio per aggiunta di nuovi tronchi di linea). La corrente residua è, comunque, in genere inferiore ai 10-20 A, per cui il guasto di natura non permanente si autoestingue ugualmente (si è verificato sperimentalmente che ciò accade fino a correnti residue dell'ordine di 30-40 A).

Per quanto riguarda i sistemi di protezione, il guasto monofase a terra può ancora essere discriminato misurando la somma delle tensioni delle fasi rispetto a terra; si ricorre, quindi, al solito relè voltmetrico (fig. V.8). Alternativamente, si può misurare la corrente che circola nell'induttanza L.

Se si considera, adesso, il caso di più linee in partenza dal trasformatore AT/MT, si ha che per individuare la linea guasta si può ricorrere a relè wattmetrici direzionali sensibili alle componenti delle correnti in fase con le tensioni; queste correnti, che sono comunque di valore abbastanza piccolo, non sono compensate dalla presenza della

bobina e sono presenti, tra l'altro, a causa delle perdite della bobina e della resistenza dell'impianto di terra a cui la bobina stessa è collegata.

2.2.3 Sistemi di protezione contro le correnti di sovraccarico

Per quanto riguarda i sistemi di protezione contro le correnti di sovraccarico, essi si potrebbero installare in qualunque punto della linea, in quanto la linea in questo caso risulta sana. Essi sono in genere costituiti da:

- un relè a massima di corrente a tempo indipendente, nel caso di linee di scarsa importanza;
- un relè a massima di corrente a tempo dipendente, nel caso di linee di una certa importanza;
- un interruttore.

Rispetto ai relè a massima di corrente per le correnti di corto circuito, i relè a massima di corrente per le correnti di sovraccarico sono tarati per correnti minori e per tempi di intervento maggiori, figura V. 15

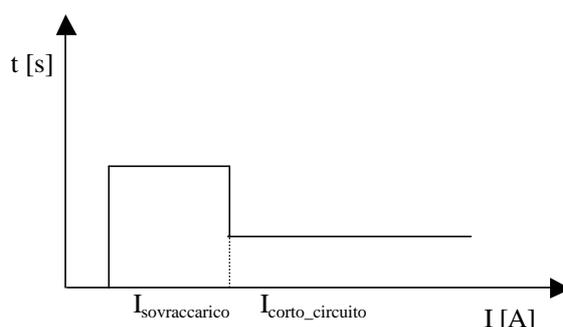


Fig. V.15 - Relè a massima di corrente per le correnti di corto circuito e relè a massima di corrente per le correnti di sovraccarico: caratteristiche di intervento

2.3 Linee in BT

Il più semplice sistema di protezione contro le sovracorrenti è costituito normalmente da un interruttore e da un relè; nella parte dell'impianto a media tensione questi due componenti sono separati, nella parte dell'impianto a bassa tensione questi due componenti trovano posto in uno stesso involucro e il sistema di protezione prende il nome di interruttore automatico, il cui simbolo è riportato nella fig. V.16 a) in generale e nella figura V.16 b) se dotato di relè di tipo magneto-termico.

Le principali caratteristiche di un interruttore automatico sono, oltre il potere di chiusura e di interruzione, la caratteristica di intervento e l'integrale di Joule o I^2t . Nel caso di relè di tipo magneto-termico la caratteristica di intervento e l'andamento dell'integrale di Joule sono riportate nella fig. V.1 c e d.

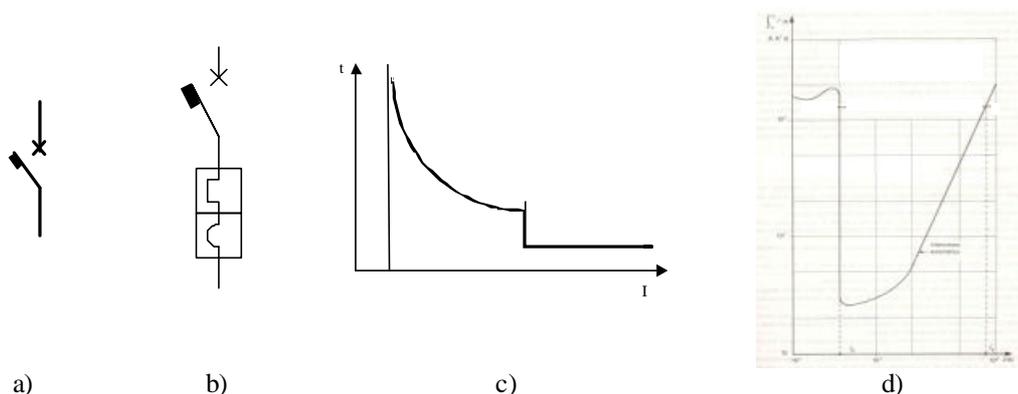


Fig. V.16 - Interruttore automatico: a) Simbolo CEI; b) interruttore magnetotermico; c) caratteristica di intervento; d) integrale di Joule

Come già detto, salvo casi rari, sulla bassa tensione è quasi universalmente impiegata la struttura radiale semplice.

In conseguenza della presenza del collegamento a terra del centro stella del secondario del trasformatore MT/BT, anche i cortocircuiti monofase sono caratterizzati da elevati valori di corrente, per cui per le linee in BT viene impiegato un unico sistema di protezione per tutti i tipi di corto circuito (monofase e polifase).

I sistemi di protezione contro le correnti di corto circuito (monofase e polifase) e contro le correnti di sovraccarico impiegati sono:

- interruttori automatici, dotati di relè magnetotermici;
- fusibili a cartuccia.

Quando più sistemi di protezione sono disposti in serie, si pone anche in bassa tensione il problema di garantire la selettività. Nel caso specifico della bassa tensione, facendo, ad esempio, riferimento al caso di interruttori automatici in serie, per ottenere una selettività totale il sistema di protezione a valle avrà una caratteristica d'intervento¹ opportunamente traslata rispetto a quella del sistema di protezione a monte; la traslazione viene ottenuta in senso verticale (selettività cronometrica) (fig. V.17) o in senso orizzontale (selettività amperometrica) (fig. V.18).

In certi casi può essere ammissibile che i due dispositivi di protezione in serie presentino un campo di selettività delimitato (fig. V.19) da una corrente limite di selettività I_s . Dal valore di corrente di corto circuito uguale a I_s non si sa quale interruttore interviene. Si parla allora di selettività parziale.

¹ Le norme non stabiliscono la forma che deve avere la caratteristica d'intervento, ma solo alcune porte entro cui deve essere contenuta. Una di queste porte è delimitata dalla corrente convenzionale di non intervento (I_{nf}) e dalla corrente convenzionale di intervento (I_f).

La corrente convenzionale di non intervento, I_{nf} , è quel valore specificato di corrente che non provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore per un intervallo di tempo convenzionale.

La corrente convenzionale di intervento, I_f , è quel valore specificato di corrente che provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore entro un intervallo di tempo convenzionale.

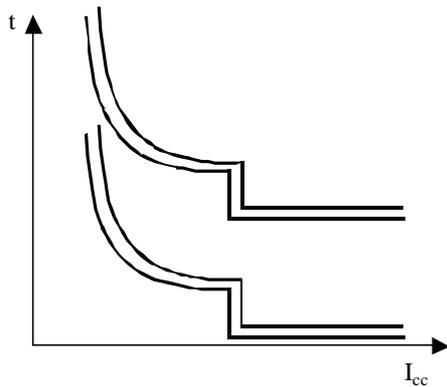


Fig. V.17 - Esempio di selettività cronometrica

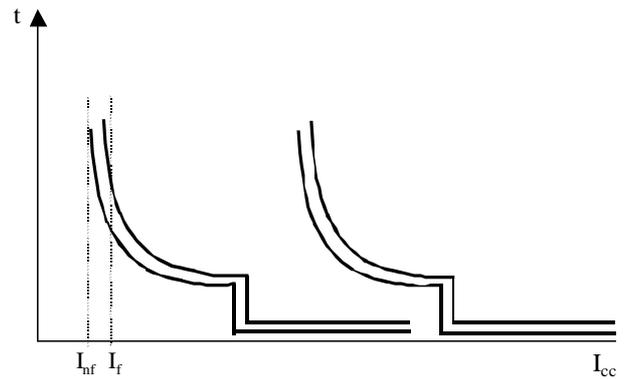


Fig. V.18 - Esempio di selettività amperometrica

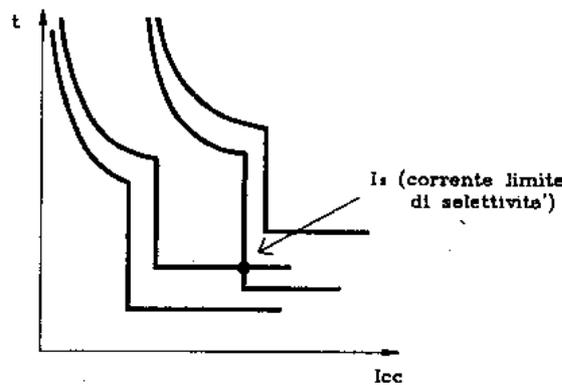


Fig. V.19 - Esempio di selettività parziale

Sia la selettività amperometrica che quella cronometrica hanno dei limiti.

La prima è applicabile in BT in quanto le impedenze delle linee hanno valori significativi e comportano correnti di cortocircuito abbastanza variabili dalla sorgente ai punti periferici. In MT la selettività amperometrica si utilizza soltanto fra le protezioni poste a monte e a valle dei trasformatori (fra di esse risulta in questo caso interposta la impedenza del trasformatore).

La selettività cronometrica, come già detto, si ottiene praticando temporizzazioni tanto più lunghe quanto più le apparecchiature sono prossime alla sorgente di energia. Tale ritardo può risultare eccessivo in quanto è spesso incompatibile con le imposizioni dell'Ente Distributore dell'energia (che richiede un tempo di intervento ridotto a livello di interruttore automatico generale dell'utente).

Per ovviare agli inconvenienti che si verificano con la scelta di selettività amperometriche e cronometriche possono adoperarsi unità programmabili a microprocessore che gestiscono più interruttori in cascata. In questo caso infatti a ciascun interruttore è associato un relè (relè logico) in grado di emettere e ricevere un ordine di attesa logica. Quando nasce una corrente di guasto ogni relè logico a monte del punto di guasto emette un ordine di attesa logica verso quello installato immediatamente a monte, il relè logico posto subito a monte del guasto provoca

l'intervento dell'interruttore associato non ricevendo l'ordine di attesa logica da quello posto a valle. Con tale sistema (selettività logica) le temporizzazioni possono essere ridotte al minimo e non sono condizionate dai vincoli della selettività cronometrica.

Tale tecnica di protezione è applicabile con successo sia ai sistemi BT che a quelli MT, sia per strutture radiali che ad anello accoppiandola ovviamente, in quest'ultimo caso, a relè direzionali.

Nella fig. V.20 è rappresentato un esempio di realizzazione di selettività logica.

Talvolta può essere ammesso l'impiego di un interruttore con un potere di interruzione inferiore alla massima corrente presunta di cortocircuito nel punto di installazione. Sarà allora necessario che a monte vi sia un altro sistema di protezione avente il necessario potere di interruzione (protezione in serie o back-up).

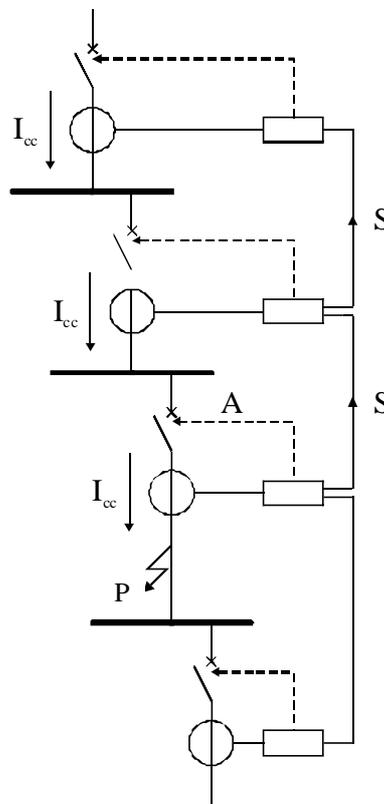


Fig. V.20 - Esempio di selettività logica

2.4 Trasformatori MT/BT

La protezione contro i corto circuiti avviene tramite fusibili (molto diffusa negli Stati Uniti e non particolarmente in Europa) o interruttori con relè. Nel seguito vengono presi in esame i sistemi di protezione con interruttori e relè.

Nel sistema di protezione, disposto sul lato MT (fig V.21), vi è un relè a massima di corrente regolato per valori di corrente tali da non intervenire nel caso di cortocircuito sul lato bassa tensione e durante l'inserzione del trasformatore; è anche presente un relè di massima corrente omopolare per la protezione contro i cortocircuiti

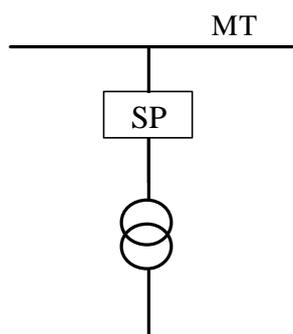


Fig. V.21 - Sistemi di protezione con interruttori e relè per trasformatori

monofase a terra quando la media tensione è esercita a neutro isolato o con induttanza.

Nei trasformatori ad olio è, poi, presente il relè Buchholz. Il sistema di protezione con relè Buchholz (che è un relè di tipo meccanico) è inserito nella tubazione che collega il cassone del trasformatore al conservatore dell'olio (fig.V.22); esso è costituito da una camera con due galleggianti che azionano il primo un segnale di allarme ed il secondo un interruttore. Questo sistema di protezione rileva la presenza di gas all'interno del trasformatore e, quindi, protegge lo stesso da tutte le condizioni di funzionamento anormali che provocano surriscaldamento e decomposizione dell'olio.

Quando comincia a svilupparsi gas all'interno del cassone, esso si raccoglie nella camera del relè Buchholz, ed in particolare nella parte superiore della stessa, il che determina un abbassamento del livello dell'olio ivi presente; ne consegue l'abbassamento del primo galleggiante con cui è associato un segnale di allarme. In caso di sviluppo violento di gas, situazione tipica di un corto circuito, i violenti moti vorticosi che ne conseguono determinano l'intervento del secondo galleggiante che comanda l'interruttore a distaccare il trasformatore.

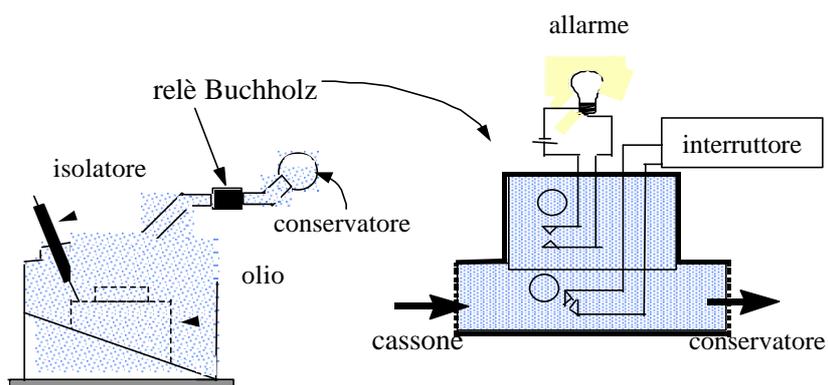


Fig. V.22 - Sistema di protezione con relè Buchholz di un trasformatore ad olio

Considerando i sistemi di protezione precedentemente analizzati gli schemi presentati nelle figg V.1 e V.2 sono riproposti di seguito nelle figg V. 23, V.24 e V.25 con i relativi sistemi di protezione sulla MT.

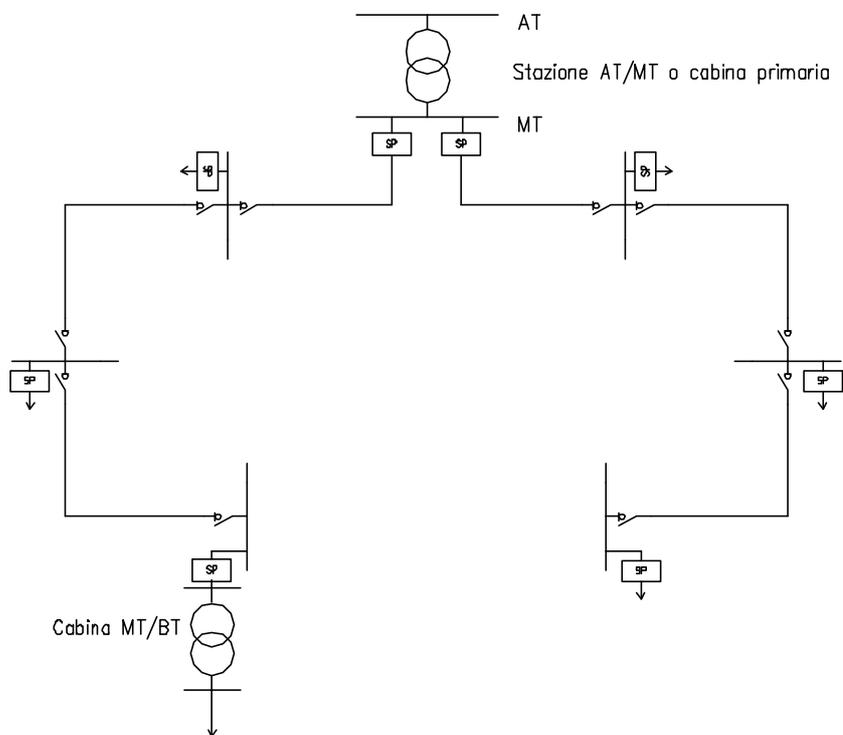


Fig. V.23 - Struttura radiale semplice con sistema di protezione solo sul primo tratto di linea MT.

Nelle fig. V.23 potevano essere considerati anche i sistemi di protezione su tutti i tratti di linea MT, in partenza.

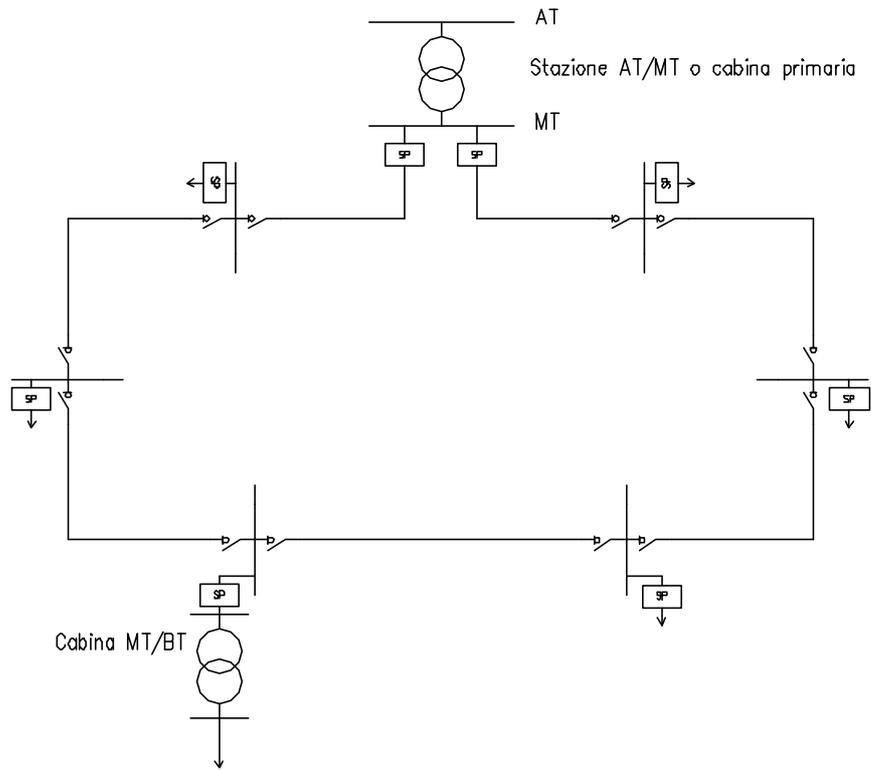


Fig. V.24 - Struttura radiale con richiusura con sistema di protezione solo sui due primi tratti di linea MT.

Nelle fig. V.24 potevano essere considerati anche i sistemi di protezione su tutti i tratti di linea MT.

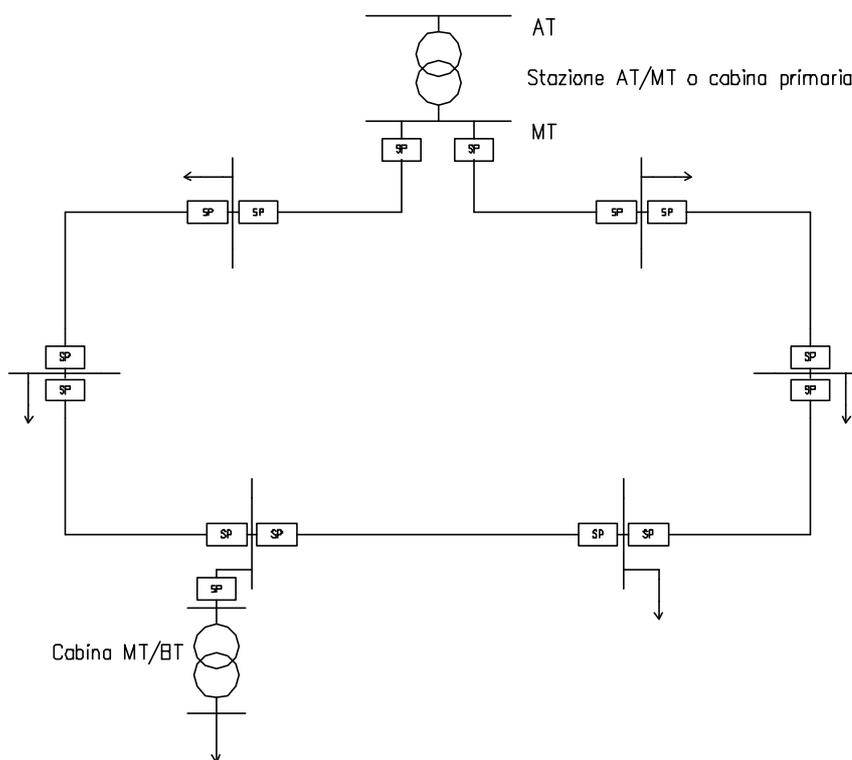


Fig. V.25 - Struttura ad anello con sistemi di protezione.

3. Sistemi di protezione contro le sovratensioni

I sistemi di protezione contro le sovratensioni sono normalmente classificati in:

- preventivi, che agiscono in modo da contenere preventivamente l'entità delle sovratensioni che si possono presentare nei sistemi elettrici;
- repressivi, che, invece, sono destinati a convogliare a terra le sovratensioni che eccedono i livelli di isolamento, evitando che esse si propaghino con tutta la loro intensità lungo il sistema elettrico.

I provvedimenti di tipo preventivo contro le sovratensioni di origine interna sono, ad esempio, la messa a terra del neutro, l'adozione di resistenze di smorzamento negli interruttori e l'utilizzo di sistemi di eccitazione rapidi dei generatori sincroni. Contro le sovratensioni di origine esterna si adottano le funi di guardia, la messa a terra di sostegni nelle linee aeree e la schermatura nelle stazioni.

La messa a terra del neutro, come si vedrà nel seguito, permette, tra l'altro, di vincolare la tensione verso terra delle fasi di un sistema elettrico.

Le resistenze di smorzamento negli interruttori intervengono a smorzare opportunamente le tensioni di ristabilimento in modo da rendere meno probabile l'intersezione con la tensione di ripristino della rigidità dielettrica.

I sistemi di eccitazione possono contenere gli aumenti di tensione dovuti, ad esempio, ai bruschi distacchi di carico.

Le funi di guardia producono un effetto schermante sui conduttori di potenza nei riguardi dei fulmini. Affinchè ciò avvenga occorre che esse siano disposte in posizione elevata rispetto ai conduttori di potenza in modo tale che l'angolo, detto angolo di protezione, compreso tra la verticale passante per la fune di guardia e la retta congiungente la fune e il conduttore di potenza più esterno, e quindi più esposto, non superi i 30° . Le funi di guardia consentono, inoltre, di ridurre anche le sovratensioni nel caso di fulminazione dei sostegni, in quanto introducono tra il sostegno colpito e la terra tanti altri circuiti in parallelo (gli altri sostegni collegati attraverso la fune di guardia) che sottraggono al sostegno colpito corrente di scarica.

La messa a terra dei sostegni si effettua mediante un conduttore interrato ad una profondità di circa 1 m, collegato ai montanti e disposto ad anello attorno al sostegno in modo da ottenere un basso valore della resistenza di terra dei sostegni stessi.

La schermatura delle stazioni ha lo scopo di evitare le fulminazioni dirette nelle stazioni, dove si trovano i trasformatori e le apparecchiature.

Per un'efficace protezione preventiva contro i vari tipi di sovratensione occorre, infine, coordinare l'isolamento dei diversi componenti del sistema. Ogni componente si trova, infatti, esposto in modo diverso ai differenti tipi di sovratensione ed ha un'influenza diversa sulla continuità del servizio di fornitura dell'energia elettrica. Ad esempio, le linee con conduttori nudi sono i componenti più esposti alle sovratensioni di origine esterna, mentre quelle di origine interna interessano tutti i componenti del sistema. I terminali delle linee, siano esse con conduttori nudi o in cavo, e gli apparati collegati sono, inoltre, particolarmente interessati alle sovratensioni che si hanno nel funzionamento a vuoto.

Una volta stabilito il livello di isolamento da assegnare a ciascun componente occorrerà ricorrere ad opportuni apparati di protezione contro quelle sovratensioni che superano, in ampiezza, tale livello, realizzando la cosiddetta protezione di tipo repressivo. Tali apparati sono gli spinterometri e gli scaricatori che hanno caratteristiche tali per cui, al verificarsi di sovratensioni prossime al livello di isolamento previsto, la scarica avviene a terra attraverso di loro piuttosto che attraverso gli altri componenti del sistema.

Gli spinterometri, di cui la fig.V.26 è un esempio, è, in genere, costituito da due elettrodi metallici collegati tra parte in tensione e terra. La distanza in aria tra gli elettrodi è tale che la differenza di potenziale ad essi applicata in condizioni di funzionamento normali non è sufficiente ad innescare l'arco, che, invece, si innesca all'atto di una opportuna sovratensione. Questi componenti possono provocare disservizi in quanto non sono sempre in grado di interrompere la corrente a frequenza industriale che fa seguito a quella ad impulso associata alla scarica, per cui ogni loro intervento può provocare un corto circuito monofase a terra con conseguente interruzione del servizio per intervento dei sistemi di protezione contro le sovracorrenti. Esistono, comunque, in commercio spinterometri autoestinguenti, che sono in grado di estinguere il corto circuito che si instaura al momento della scarica.

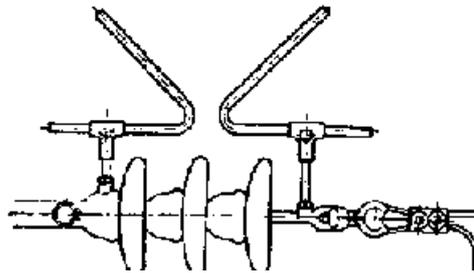


Fig. V.26 - Spinterometro

Gli scaricatori, invece, superano, con opportuni accorgimenti costruttivi, i problemi degli spinterometri. I principali tipi di scaricatore sono quelli a resistore non lineare.

Gli scaricatori a resistore non lineare sono costituiti da materiali porosi semiconduttori (ad esempio, la resorbite) ottenuti per impasto e cottura di materiale ceramico isolante e materiale conduttore (carburo di silicio) oppure, più recentemente, da ossido di zinco. Il principio di funzionamento degli scaricatori si basa sul fatto che i suddetti materiali presentano una resistenza che diminuisce all'aumentare della corrente di scarica con legge praticamente iperbolica. Il funzionamento dello scaricatore avviene allora nel seguente modo (fig.V.27):

- in assenza di sovratensioni, lo scaricatore ha resistenza infinita e quindi è un circuito aperto;
- quando si verifica una sovratensione lo scaricatore si innesca, cioè avviene una scarica con formazione di archi tra le varie resistenze componenti (il valore V_i di tensione al quale inizia la scarica è detto tensione di innesco dello scaricatore);
- a causa della caratteristica resistenza-corrente di scarica, la tensione V_s ai capi dello scaricatore, durante la scarica, è praticamente costante e poco discosta da V_i ; lo scaricatore limita, quindi, la sovratensione nel punto in cui è inserito praticamente al valore della tensione di innesco, scaricando a terra la tensione eccedente V_i ;
- al diminuire della sovratensione (coda dell'onda impulsiva) la corrente di scarica diminuisce rapidamente, provocando un altrettanto rapido aumento della resistenza con conseguente disinnesco dello scaricatore.

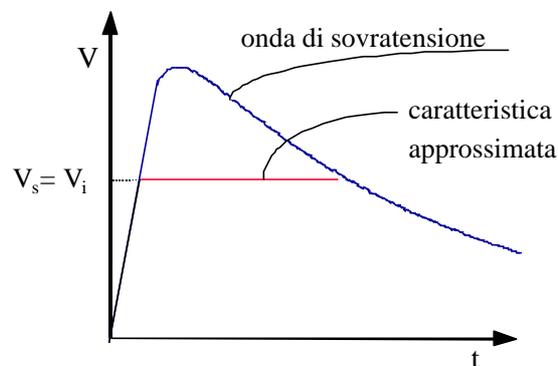


Fig. V.27 - Caratteristica di uno scaricatore a resistore non lineare

Per applicazioni in bassa tensione, oltre agli spinterometri autoestinguenti e agli scaricatori a resistenza non lineare (varistori) sono impiegati anche scaricatori elettronici costituiti, in pratica, da diodi Zener che hanno caratteristiche simili ai varistori ma prestazioni inferiori.

Gli spinterometri non si distribuiscono di solito lungo le linee, ma soltanto ai terminali di partenza e di arrivo delle linee stesse; gli scaricatori tra i singoli conduttori di linea e la terra in vicinanza dei trasformatori. Nel caso della bassa tensione, gli scaricatori vengono inseriti tra i conduttori attivi e la terra.