

Dispositivi differenziali

dott. ing. Lucia FROSINI



Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Il dispositivo differenziale

Il dispositivo differenziale ha lo scopo di salvaguardare le persone sia dal manifestarsi di pericolose tensioni di contatto sulle masse metalliche accessibili degli utilizzatori e degli impianti elettrici (contatti indiretti), sia dai contatti diretti con parti attive del circuito in seguito a carenza di altre misure di sicurezza o disattenzione da parte dell'utente. Nel secondo caso, la sensibilità del dispositivo deve essere adeguata alle caratteristiche elettrofisiologiche del corpo umano.

L'elemento sensibile del differenziale è costituito da un trasformatore toroidale: tutte le fasi del circuito di alimentazione, compreso l'eventuale conduttore di neutro, sono avvolte oppure attraversano l'anello toroidale, per far sì che quest'ultimo ne rilevi il flusso magnetico risultante.

I lamierini di questo toroide sono caratterizzati da un'altissima permeabilità magnetica: la possibilità di flussi dispersi è ridotta al minimo, consentendo l'esatta rilevazione anche di minime correnti differenziali.

2

Il dispositivo differenziale

Quindi, i conduttori di linea possono essere avvolti sul nucleo magnetico toroidale, con un numero di spire esattamente uguale.

Nei casi in cui l'elevata sezione o l'elevato numero dei conduttori (come nelle esecuzioni quadripolari) non ne permettano l'avvolgimento sul toroide per motivi di spazio, i conduttori attraversano il toroide internamente.

Altre due bobine, formate da fili di sezione inferiore, si trovano avvolte sul toroide:

- la bobina di rilevazione, destinata a trasformare il flusso magnetico risultante in una f.e.m. a 50 Hz, da trasmettere ai successivi circuiti del dispositivo differenziale;
- la bobina di prova, destinata a creare nel toroide il flusso magnetico per la prova di efficienza dell'intero dispositivo.

3

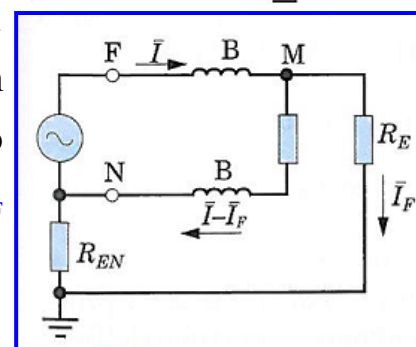
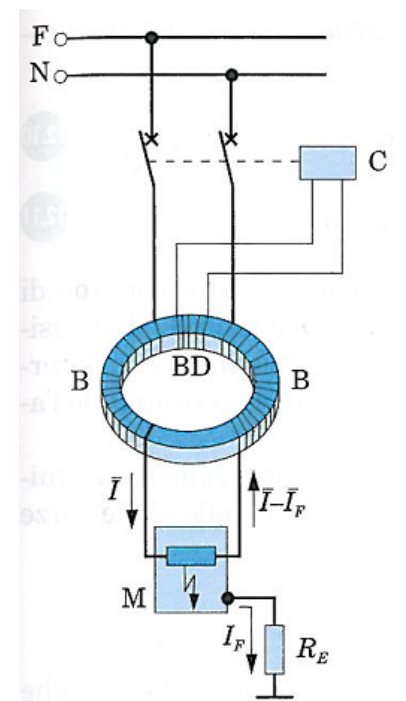
Il differenziale monofase

Nel caso monofase, sul nucleo magnetico toroidale sono montate le due bobine B in serie alla fase e al neutro e la bobina differenziale BD che agisce sull'organo di comando C.

Le due bobine B sono montate in modo tale che le forze magnetomotrici da esse prodotte agiscano in senso opposto.

In assenza di guasto a terra, la corrente I_F risulta nulla e in ciascuna delle due bobine B circola la stessa corrente.

Se ciascuna bobina B ha un numero di spire N, si creano due f.m.m. pari a NI uguali e opposte. Essendo nulla la f.m.m. risultante, non si avrà alcun effetto magnetico e il relè non interverrà. Nel caso di **cedimento dell'isolamento**, attraverso la massa M verrà convogliata a terra una corrente di guasto I_F che si richiuderà attraverso le resistenze di terra R_E e R_{EN} .



4

L'interruttore differenziale monofase

Nelle due bobine circoleranno due diverse correnti e sul nucleo agirà una f.m.m. differenziale data da:

$$\bar{F}_{MMd} = N\bar{I} - N(\bar{I} - \bar{I}_F) = N\bar{I}_F$$

Di conseguenza, nel nucleo magnetico si indurrà un flusso differenziale Φ_d proporzionale alla corrente I_F , nell'ipotesi che il materiale magnetico presenti un comportamento lineare.

Essendo la corrente I_F di tipo periodico alternato sinusoidale, di conseguenza anche il flusso differenziale avrà lo stesso andamento e ai capi della bobina differenziale si indurrà una forza elettromotrice E_d con valore efficace proporzionale al valore efficace della corrente I_F .

La f.e.m. E_d è il segnale che viene trasmesso all'organo di comando C.

Lo sganciatore differenziale è regolato come un relè di massima: superato un determinato valore di soglia, l'organo di comando interviene e apre l'interruttore.

L'interruttore differenziale monofase

Un analogo comportamento può essere ottenuto facendo passare il conduttore di fase e di neutro attraverso lo stesso nucleo magnetico toroidale, sul quale è avvolta la bobina di rilevazione BD.

Le correnti di fase e di neutro creano ciascuna attorno a sé un campo magnetico.

A causa dell'opposto verso delle correnti nei conduttori, i due flussi magnetici risultano costantemente in opposizione.

Tali flussi magnetici vengono sommati vettorialmente all'interno del nucleo magnetico: il flusso totale induce sulla bobina di rilevazione BD una f.e.m. alternata sinusoidale E_d e nella bobina scorrerà una corrente di valore proporzionale alla somma vettoriale della corrente di fase e di quella di neutro, detta corrente differenziale.

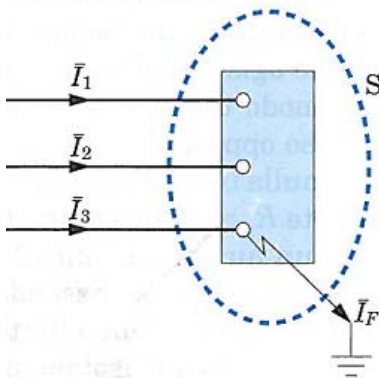
La taratura della soglia di intervento è definita corrente differenziale nominale I_{dN} .

L'interruttore differenziale trifase

Nel caso di linea trifase a tre fili, l'interruttore differenziale è predisposto in modo tale che i tre conduttori di linea attraversino il toroide, creando ognuno intorno a sé un campo magnetico proporzionale alla propria corrente.

I vettori di flusso risultano sfasati fra loro di 120° , così come i vettori delle rispettive correnti delle tre fasi. La somma vettoriale delle tre correnti risulta nulla anche con carico squilibrato e lo stesso vale per i flussi:

$$\overline{\Phi}_T = \overline{\Phi}_1 + \overline{\Phi}_2 + \overline{\Phi}_3 = 0$$



In caso di guasto a terra, l'applicazione della legge di Kirchhoff generalizzata alla superficie S dà:

$$\bar{I}_F = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 \neq 0$$

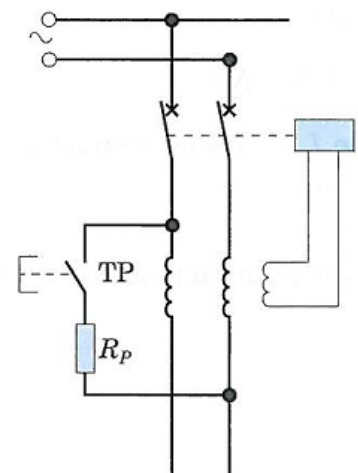
Di conseguenza anche la somma vettoriale dei tre flussi non sarà più nulla e determinerà, anche in questo caso, una f.e.m. indotta E_d e una corrente differenziale nella bobina BD.

L'interruttore differenziale trifase

Nel caso di linea trifase a quattro fili (tre fasi + neutro), l'uso del differenziale è ancora possibile, facendo in modo che tutti e quattro i fili siano abbracciati dal nucleo toroidale.

In assenza di guasto, la somma dei flussi generati dai quattro conduttori risulta nulla, mentre, in caso di guasto verso terra, la somma dei flussi assume un valore Φ_d proporzionale alla corrente di guasto I_F , con le conseguenze già viste.

L'interruttore differenziale è sempre provvisto di un tasto di prova con il quale si può eseguire un sommario controllo dell'efficienza: chiudendo il tasto TP, si crea artificialmente una corrente differenziale di valore efficace superiore alla soglia di intervento e si verifica il funzionamento del dispositivo.



L'interruttore differenziale

Una fondamentale classificazione degli interruttori differenziali è in funzione del loro comportamento in presenza di deformazioni della forma d'onda della corrente.

I **differenziali di tipo AC** sono adatti **solo per il funzionamento con corrente differenziale alternata sinusoidale**, dato che, in presenza di deformazioni della forma d'onda che comportino componenti di tipo unidirezionale, la variazione di flusso che interessa il nucleo magnetico toroidale non è sufficiente a generare una f.e.m. in grado di provocare l'intervento del dispositivo di sgancio. Questi interruttori vengono impiegati in impianti in cui non vi sono apparecchiature elettroniche in grado di deformare l'onda sinusoidale.

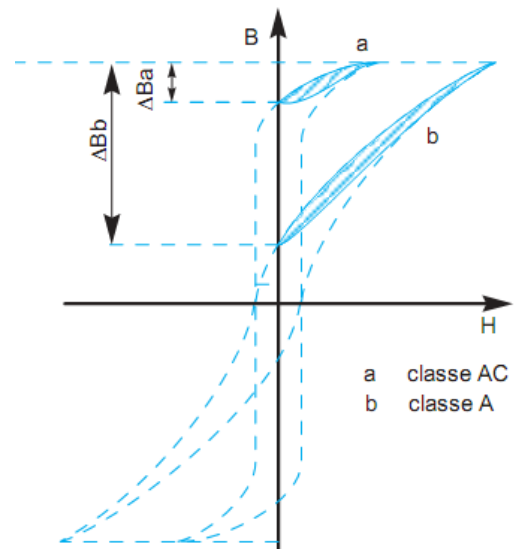
I **differenziali di tipo A** sono invece costruiti in modo tale da poter operare correttamente **sia con forma d'onda sinusoidale, sia in presenza di componenti pulsanti unidirezionali**, con componente continua non superiore a 6 mA. Questi dispositivi sono consigliabili in ambienti in cui si utilizzano apparecchi elettronici (anche nelle abitazioni, quando lavatrici, condizionatori, ecc. sono azionati tramite inverter).

L'interruttore differenziale

Il circuito magnetico dei **dispositivi in classe AC** è realizzato in materiale magnetico con ciclo di isteresi molto ripido (curva a).

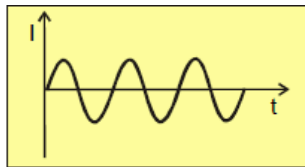
In presenza di una corrente di guasto verso terra con componente continua, il ciclo di isteresi e il segnale di guasto, proporzionale alla variazione di induzione ΔB , si riducono e di conseguenza il dispositivo differenziale non è in grado di intervenire.

Il circuito magnetico dei **dispositivi in classe A** è realizzato in materiale magnetico con ciclo di isteresi molto più inclinato e ristretto del precedente (curva b). In presenza di correnti di guasto verso terra con componenti pulsanti il ciclo non subisce variazioni sostanziali e di conseguenza il segnale di guasto è sufficiente a far intervenire il dispositivo differenziale.

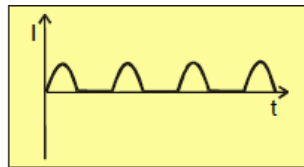


L'interruttore differenziale

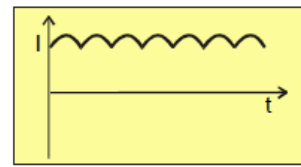
Esistono anche **differenziali di tipo B**, il cui intervento è assicurato per le correnti previste per il tipo A e inoltre per correnti continue ondulate o non ondulate e per correnti sinusoidali fino a 1000 Hz. La norma CEI 64-8 specifica che devono essere i costruttori delle apparecchiature ad indicare il tipo di differenziale da installare.



Tipo AC



Tipo A



Tipo B

Un'altra classificazione degli interruttori differenziali è in base al ritardo di apertura:

- 📌 Tipo generale G: privo di ritardo intenzionale, in quanto l'apertura avviene istantaneamente, solo con il ritardo dovuto alla velocità di allontanamento dei contatti.
- 📌 Tipo selettivo S: con intervento intenzionalmente ritardato, per esigenze di selettività dell'intervento tra dispositivi posti in cascata. Il tempo minimo di non intervento assume valori normalizzati.

L'interruttore differenziale

Le prestazioni degli interruttori differenziali sono definite da grandezze caratteristiche:

- ⚡ Tensione nominale: valore efficace di tensione del sistema elettrico per il quale l'interruttore è destinato a funzionare.
- ⚡ Corrente nominale: valore efficace di corrente che l'apparecchio è in grado di condurre ininterrottamente (dipende dal valore efficace della corrente di impiego del circuito).
- ⚡ Corrente differenziale nominale di intervento I_{dN} : valore minimo della corrente differenziale che determina l'apertura dei contatti entro i tempi specificati dalle norme. In base al valore assunto da I_{dN} , gli interruttori differenziali si distinguono in differenziali a **bassa sensibilità** ($I_{dN} > 0,03 \text{ A}$) e ad **alta sensibilità** ($I_{dN} \leq 0,03 \text{ A}$). La scelta della corrente differenziale nominale dipende dal tipo di protezione voluta (contatti diretti o indiretti) e, nel caso di contatti indiretti, dalle caratteristiche dell'impianto di terra.

L'interruttore differenziale

✚ Corrente differenziale nominale di NON intervento I_{dN0} : valore massimo della corrente differenziale che certamente non provoca l'apertura dei contatti dell'interruttore. Anche se sono ammessi altri valori, normalmente si ha:

$$I_{dN0} = 0,5 I_{dN}$$

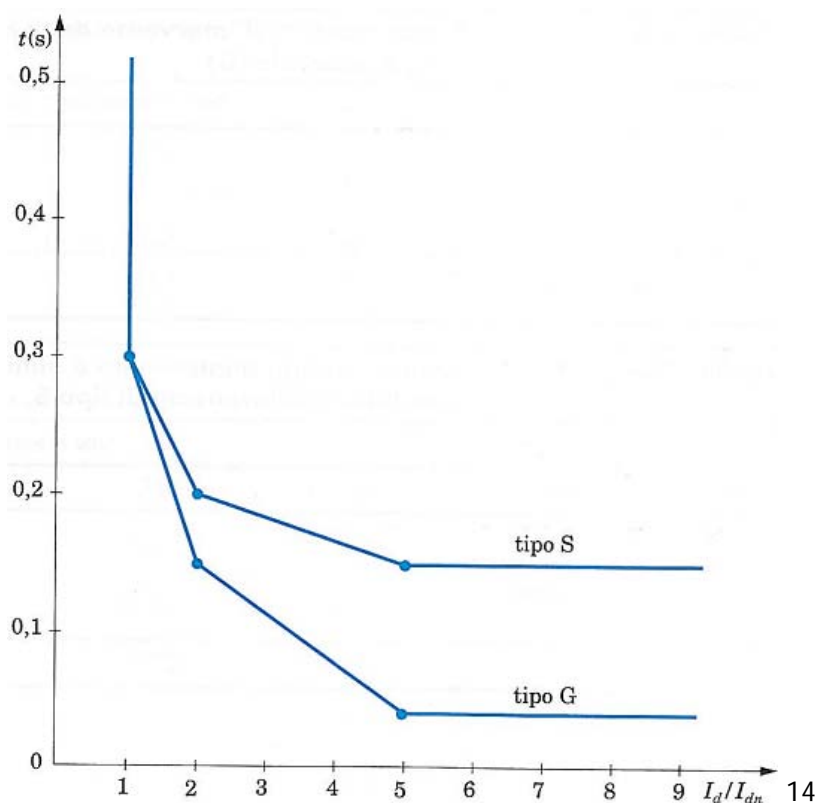
Nell'intervallo tra I_{dN0} e I_{dN} vi è una zona di incertezza, in cui il dispositivo potrebbe intervenire oppure no.

✚ Tempo di intervento: intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui la corrente differenziale assume il valore I_{dN} e l'istante in cui avviene l'apertura dei contatti; indica quindi il tempo necessario affinché il dispositivo intervenga. Il suo valore dipende dall'intensità della corrente differenziale ed è stabilito dalle norme, in funzione del tipo di apparecchio.

L'interruttore differenziale

La caratteristica di intervento è la curva che lega il tempo di intervento del dispositivo alla corrente differenziale.

Il tempo minimo di non intervento, previsto anche per gli interruttori di tipo G, è il minimo intervallo di tempo per il quale i contatti non si aprono, anche se la corrente differenziale supera la soglia che dovrebbe determinarne l'intervento.



L'interruttore differenziale

Gli interruttori differenziali possono essere soggetti a interventi di apertura provocati, oltre che da effettivi guasti a terra, da disturbi impulsivi sulle linee di alimentazione (ad esempio sovratensioni atmosferiche e brusche manovre di interruttori).

Episodi di questo tipo, che sono causa di disservizi e malfunzionamenti con conseguenze economiche a volte molto gravi, possono essere prevenuti installando gli interruttori differenziali dotati di SRD (riarmo automatico). Questi dispositivi sono costituiti da un interruttore differenziale e da un blocco elettronico-meccanico che permette la richiusura automatica dell'interruttore.

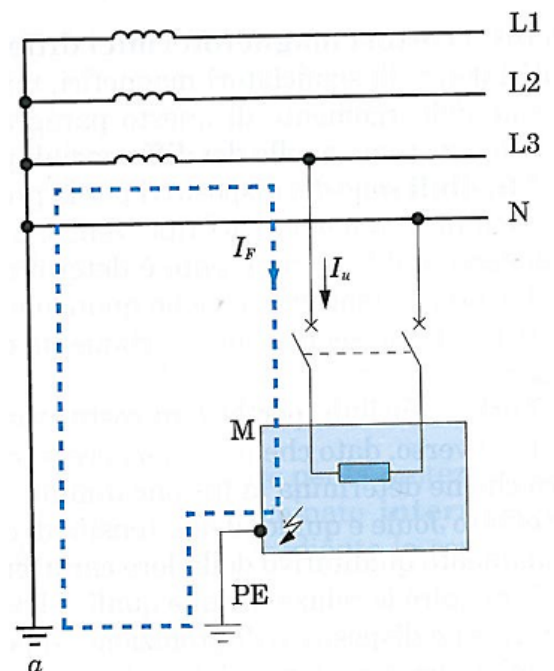
In presenza di uno scatto del differenziale, il dispositivo effettua, dopo alcuni istanti, una prima richiusura. Se l'interruttore rimane chiuso, il dispositivo ritorna in posizione di riposo/attesa. Se invece il differenziale scatta nuovamente, l'interruttore effettua una seconda ed eventualmente una terza richiusura. Dopo il terzo tentativo, l'interruttore rimane aperto, garantendo la normale protezione prevista in caso di guasto di tipo permanente.

L'interruttore differenziale nel sistema TT

Il metodo più diffuso per la protezione delle persone contro i contatti indiretti è quello denominato **interruzione automatica dell'alimentazione**, realizzato mediante la combinazione tra l'impianto di terra e un dispositivo che apre il circuito in occasione del guasto.

Le loro caratteristiche devono essere coordinate opportunamente.

Consideriamo il sistema TT in cui la massa M di un apparecchio collegato a terra, per un difetto dell'isolamento, tocca il conduttore di fase, senza che nessuna persona sia in contatto con la massa stessa.



L'interruttore differenziale nel sistema TT

Il circuito equivalente è il seguente, in cui:

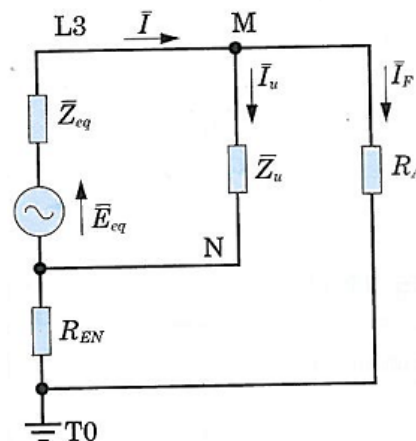
E_{eq} e Z_{eq} sono la tensione e l'impedenza del generatore equivalente di Thévenin della rete di alimentazione dell'apparecchiatura in cui si verifica il guasto;

Z_u è l'impedenza del carico;

R_{EN} è la resistenza dell'impianto di terra del neutro;

R_A è la resistenza complessiva del collegamento a terra della massa, ossia la resistenza tra il punto M e quello convenzionale a potenziale zero. Se la resistenza del conduttore di protezione può essere ritenuta trascurabile rispetto a quella di terra, è possibile approssimare:

$$R_A = R_E + R_{PE} \cong R_E$$



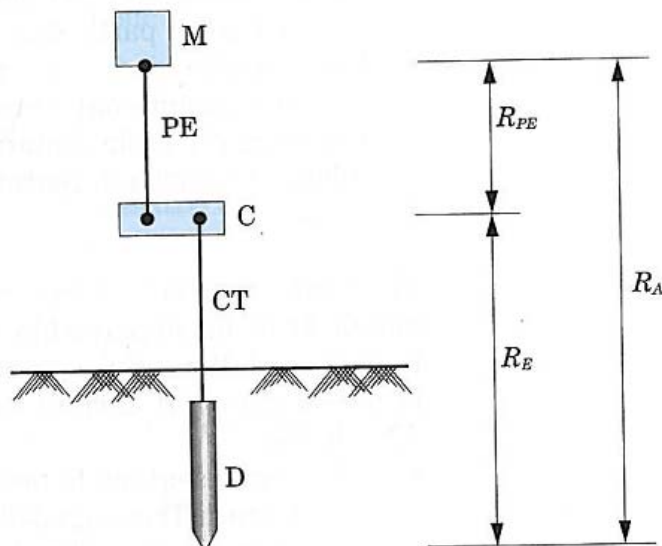
L'interruttore differenziale nel sistema TT

La tensione di contatto a vuoto, esistente tra la massa e il punto convenzionale a potenziale zero, è data dall'espressione:

$$U_{ST} = R_A I_F$$

dove I_F è la corrente di guasto a terra che percorre la resistenza R_A .

Nel caso di dispositivo di protezione differenziale, la corrente di guasto I_F è proprio quella corrente differenziale che, superata la soglia di intervento, fa intervenire il dispositivo, interrompendo l'alimentazione.



L'interruttore differenziale nel sistema TT

La norma CEI 64-8 assume come tensione di contatto a vuoto massima il valore della tensione di contatto limite convenzionale U_L .

Pertanto, la condizione da soddisfare diventa la seguente:

$$R_A I_F \leq U_L$$

Con riferimento agli impianti a corrente alternata con tensione nominale fino a 1000 V, sostituendo a U_L i valori indicati nella curva di sicurezza, la condizione precedente diventa:

per i luoghi ordinari: $R_A I_F \leq 50 \text{ V}$

per gli ambienti particolari: $R_A I_F \leq 25 \text{ V}$

Queste due relazioni sono fondamentali per il coordinamento delle protezioni nel sistema TT.

L'interruttore differenziale nel sistema TT

Il complesso delle protezioni, costituito dall'impianto di terra e dal dispositivo di interruzione, è efficace solo quando assicura il permanere di una tensione di contatto a vuoto non superiore a quella di contatto limite convenzionale.

Usando un interruttore automatico differenziale, si ha:

per i luoghi ordinari: $R_A \leq 50/I_{dn}$

per gli ambienti particolari: $R_A \leq 25/I_{dn}$

Inserendo i valori normalizzati di I_{dn} , si ottengono, per i luoghi ordinari, i seguenti limiti della resistenza di terra:

$I_{dn} [\text{A}]$	0,005	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	3	5	10
$R_A [\Omega]$	10000	5000	1667	500	167	100	50	16,7	10	5

L'interruttore differenziale nel sistema TT

Dalla tabella precedente si osserva che, anche utilizzando differenziali a bassa sensibilità ($I_{dn} > 0,03 \text{ A}$) si consegue una protezione adeguata alla normativa con elevati valori della resistenza di terra, facilmente realizzabili. In pratica, per la protezione dai contatti indiretti, si utilizzano differenziali con I_{dn} da 0,1 A a 1 A.

Al contrario, se come dispositivo di interruzione si utilizza un dispositivo di massima corrente (interruttore automatico magnetotermico o fusibile), il valore di I_a dipenderà dalla corrente nominale dell'interruttore I_n e dalla soglia che provoca l'apertura del circuito.

Se per es. si ha $I_n = 16 \text{ A}$ e $I_a = 3I_n = 48 \text{ A}$, l'applicazione della relazione per i luoghi ordinari diventa:

$$R_A \leq 50/48 \cong 1 \Omega$$

che è un valore molto basso, difficilmente realizzabile nei comuni impianti utilizzatori.

L'interruttore differenziale nel sistema TT

La situazione non migliora utilizzando fusibili, anch'essi con soglie dello stesso ordine di grandezza degli interruttori automatici magnetotermici.

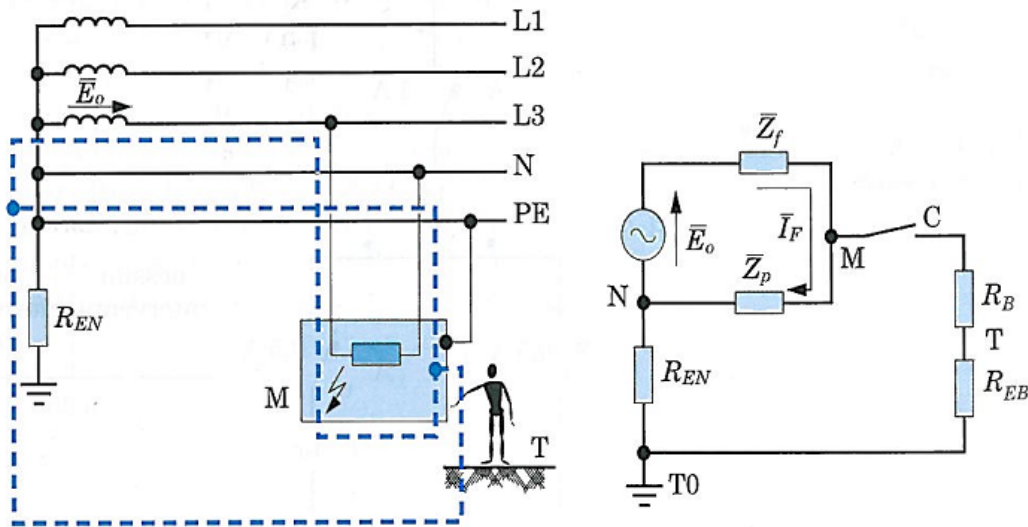
Pertanto, usando dispositivi di massima corrente, ben difficilmente è possibile realizzare una protezione dai contatti indiretti in un sistema TT, a meno di potenziare l'impianto di terra, con costi eccessivi e talvolta praticamente irrealizzabili.

Questo nasce da un motivo di fondo: i dispositivi di massima corrente sono scelti con caratteristiche tali da proteggere i cavi e le apparecchiature dalle sovracorrenti e non per proteggere le persone.

È meglio scindere le due funzioni protettive, usando l'interruttore differenziale per la protezione dai contatti indiretti.

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

Consideriamo un contatto indiretto in un sistema TN-S, per cedimento dell'isolamento di una massa M alimentata tra la fase L3 e il neutro N.



23

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

Si definiscono:

- Z_f l'impedenza della fase L3 fino al punto di alimentazione;
- Z_p l'impedenza del conduttore di protezione;
- R_B la resistenza del corpo umano;
- R_{EB} la resistenza totale verso terra della persona;
- R_{EN} la resistenza di terra del neutro.

Si dice che il guasto è considerato “franco”, ossia di impedenza nulla.

24

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

In assenza di contatto, il ramo contenente la persona risulta aperto e nell'anello di guasto formato da Z_f e Z_p circola la corrente di guasto:

$$\bar{I}_F = \frac{\bar{E}_0}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_p} = \frac{\bar{E}_0}{\bar{Z}_s}$$

dove: $\bar{Z}_s = \bar{Z}_f + \bar{Z}_p$ è l'impedenza del circuito di guasto.

La tensione di contatto a vuoto corrisponde alla differenza di potenziale tra i punti M e N con C aperto ed è pari a:

$$\bar{U}_{ST} = \bar{Z}_p \bar{I}_F = \frac{\bar{Z}_p}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_p} \bar{E}_0 = \frac{1}{\frac{\bar{Z}_f}{\bar{Z}_p} + 1} \bar{E}_0$$

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

La U_{ST} risulta pertanto proporzionale a E_0 tramite il rapporto Z_f/Z_p : se i conduttori di fase e di protezione hanno la stessa sezione, può verificarsi la condizione $Z_f = Z_p$, da cui $U_{ST} = E_0/2$.

Nel sistema TN il guasto a terra è un vero e proprio corto circuito e la corrente I_F che ne consegue, limitata solo dalle impedenze dei conduttori e del guasto, può assumere valori elevati.

Aumentando la distanza tra il punto di guasto e la cabina, la somma Z_f+Z_p aumenta, mentre il loro rapporto rimane costante: ne consegue che I_F diminuisce, mentre U_{ST} rimane costante.

Se l'interruzione del circuito è affidata a un dispositivo di massima corrente, la pericolosità del contatto aumenta, perché al diminuire di I_F aumenta il tempo di intervento del dispositivo.

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

Dall'equazione precedente si deduce che il valore della U_{ST} non è facilmente determinabile in sede di progetto dell'impianto, perché dipende dal rapporto Z_f/Z_p per i vari punti possibili di guasto.

Per questa ragione la norma CEI 64-8 considera la tensione nominale verso terra e la corrente di intervento automatico del dispositivo, prescrivendo che sia soddisfatta la seguente relazione:

$$Z_s I_a \leq U_0$$

dove:

- Z_s è l'impedenza dell'anello di guasto, comprendente la sorgente, il conduttore attivo fino al punto di guasto e il conduttore di protezione tra il punto di guasto e la sorgente;
- I_a è la corrente che provoca l'apertura automatica del dispositivo di protezione;
- U_0 è il valore efficace tra fase e terra della tensione nominale (= tensione di fase).

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

I tempi massimi di interruzione dei dispositivi di protezione sono definiti in funzione di U_0 e in particolare, per correnti alternate:

■ $t_{\max} = 0,4 \text{ s}$ per $U_0 = 230 \text{ V}$;

■ $t_{\max} = 0,2$ per $U_0 = 400 \text{ V}$.

I dispositivi di protezione che possono essere utilizzati sono:

- dispositivi di protezione contro le sovracorrenti (fusibili e interruttori automatici);
- dispositivi di protezione a corrente differenziale.

Questi ultimi non possono essere utilizzati nei sistemi TN-C, mentre possono essere utilizzati nei sistemi TN-S.

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

A differenza del sistema TT, il dispositivo di massima corrente è in questo caso spesso adatto anche alla protezione dai contatti indiretti.

Per esempio, un interruttore automatico con $I_n = 16$ A, inserito in un sistema con tensione nominale verso terra 230 V, è adatto alla protezione se si ha:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_a}$$

con un tempo di intervento massimo pari a 0,4 s.

In commercio esistono interruttori che intervengono in tale tempo con corrente $4 \cdot I_n$.

Nel caso in esame si ha:

$$Z_s \leq \frac{230}{4 \cdot 16} = 3,59 \Omega$$

che è un valore normalmente ottenibile in questo tipo di impianti.

Protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN

Quando l'impedenza dell'anello di guasto è tale per cui la condizione precedente non viene soddisfatta dai dispositivi di massima corrente, si può ridurre I_a impiegando interruttori differenziali, per i quali deve essere:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_{dn}}$$

Ad es., con $I_{dn} = 1$ A e $U_0 = 230$ V, deve essere $Z_s \leq 230 \Omega$, condizione ampiamente verificata.

L'uso del differenziale nei sistemi TN, pur non essendo indispensabile come nel sistema TT, migliora la sicurezza per due motivi:

- ▶ nel caso di elevato valore di I_F , il dispositivo interviene in tempi brevi, riducendo la pericolosità della tensione di contatto;
- ▶ nel caso di guasto non franco, in cui l'impedenza di guasto limita la corrente I_F , il differenziale interviene comunque, avendo una I_{dn} sicuramente inferiore a I_F .