

Fig. 22 – Schema di principio di un relè elettromagnetico.

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

Versatili ed affidabili circuiti elettronici costituiscono la struttura di base di dispositivo funzionalmente classificabili come *relè statici* per la mancanza di parti in movimento: l'apertura o la chiusura di contatti viene effettuata sfruttando le proprietà di componenti non lineari come i diodi controllati (SCR) o i transistori.

Una ulteriore suddivisione fa riferimento al valore della grandezza controllata:

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

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

La figura 23 riproduce un possibile simbolo del relè: i due terminali costituiscono l'accesso alla corrente di controllo (o eccitazione); a lato c'è un tipico schema "logico" dell'azione del relè su una molteplicità di contatti mobili, che possono essere in chiusura, in apertura o misti.

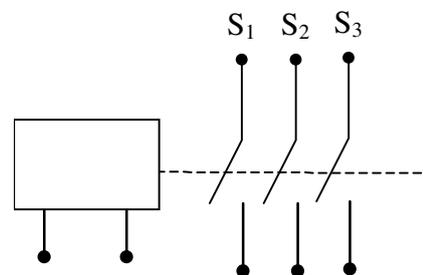


Fig. 23

Relè amperometrico

Il dispositivo elettromagnetico descritto in figura 22 appare particolarmente adatto a svolgere la funzione di relè amperometrico: la forza di attrazione sviluppata dall'elettromagnete dipende, ovviamente, dalla corrente di eccitazione.

Nello schema di figura 24 assume il ruolo di relè di massima corrente: quando la corrente I supera un valore assegnato, apre il circuito di alimentazione sconnettendo l'utilizzatore U eventualmente affetto da cortocircuito. La presenza della resistenza R (shunt) è richiesta dalla necessità di limitare la corrente i_e , nella bobina di eccitazione del relè. La caduta di tensione provocata dall'impiego di un relè amperometrico, sia inserito direttamente che in parallelo allo shunt, pone un problema di disturbo analogo all'autoconsumo degli amperometri.

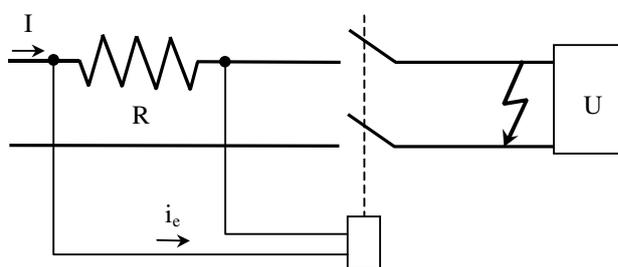


Fig. 24 – Schema di principio di relè amperometrico di massima corrente.

Relè voltmetrico

Un relè magnetoelettrico si presta molto agevolmente a svolgere la funzione di protezione a massima tensione quando venga impiegato secondo lo schema di principio di figura 25. La bobina di eccitazione viene inserita fra i due fili di linea: la resistenza addizionale R_a serve a limitare la corrente di eccitazione. Quando la tensione di alimentazione supera una soglia prefissata (eventualmente regolabile con la taratura della molla), il relè provoca l'apertura dei contatti e il disinserimento della alimentazione.

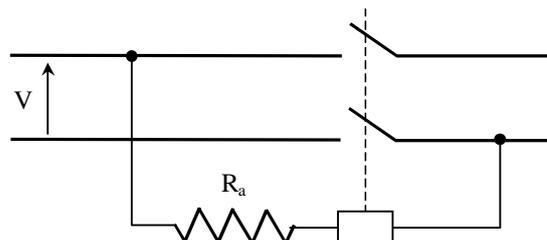


Fig. 25 – Schema di principio di relè voltmetrico di massima tensione.

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

Relè termico

Si tratta di un relè provvisto di un dispositivo di sgancio sensibile alla temperatura. Secondo la schematizzazione di figura 26, si basa sul diverso coefficiente di dilatazione termica dei due metalli che compongono la lamina bimetallica (1): la corrente I , condotta dal cavo flessibile (2), ne provoca il riscaldamento e il progressivo incurvamento, fino a determinare lo scatto del meccanismo di sgancio (3), con la conseguente apertura del circuito di alimentazione. Per il ripristino manuale del dispositivo di sgancio occorre attendere che la lamina bimetallica si sia sufficientemente raffreddata.

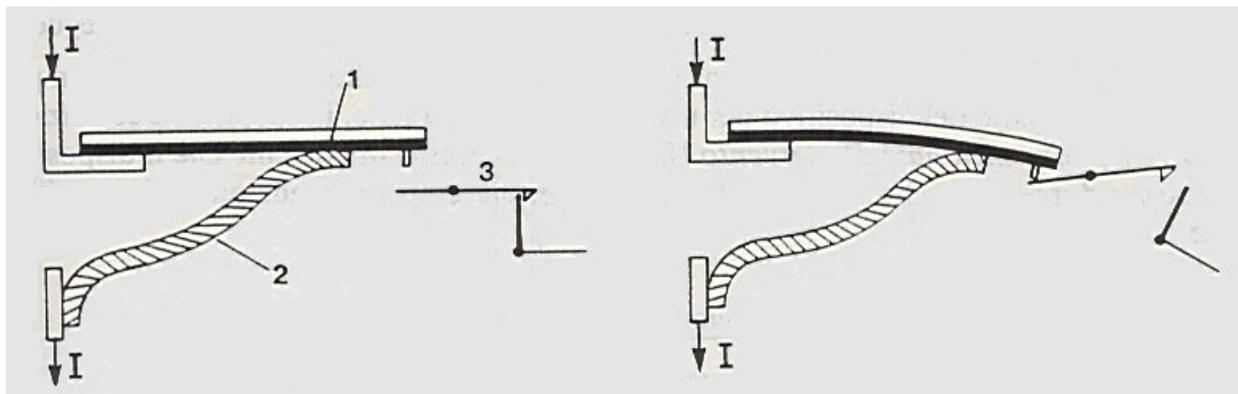


Fig. 26 – Principio di funzionamento di un relè termico: 1) lamina bimetallica, 2) cavo flessibile, 3) meccanismo di sgancio.

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

Relè magnetotermico

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

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

Una tipica caratteristica tempo-corrente, in scala doppiamente logaritmica, è quella riportata in figura 27: la zona indicata con A, corrisponde alla fascia di valori della corrente sufficientemente bassi da escludere l'intervento del relè; per sovracorrenti comprese nella fascia B interviene il relè termico: la pendenza negativa garantisce tempi di intervento inversamente proporzionali alla sovracorrente; il relè elettromagnetico, infine, interviene in tempi brevissimi per le correnti di cortocircuito della fascia C.

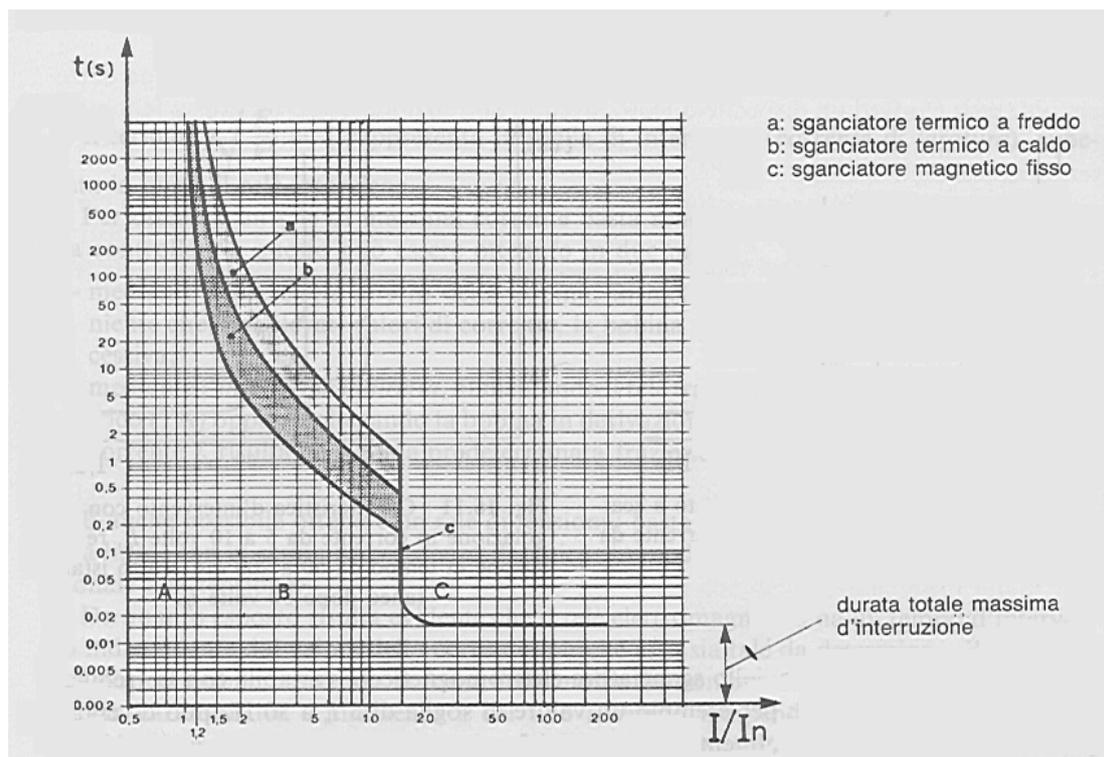


Fig. 27 - Caratteristica tempo-corrente di un relè magnetotermico.

L'ampia variabilità dei parametri di dimensionamento rende questo tipo di protezione estremamente adattabile ai casi specifici. La possibilità di regolare la soglia attiva allo sganciatore elettromagnetico ne aumenta, poi, la flessibilità d'uso.

Relè differenziale

La linea tratteggiata di figura 28 delimita i componenti che costituiscono lo schema di principio di un relè differenziale monofase. Intorno ad un nucleo magnetico toroidale vengono controavvolti due avvolgimenti di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione all'impedenza di carico Z_c . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi di induzione prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo.

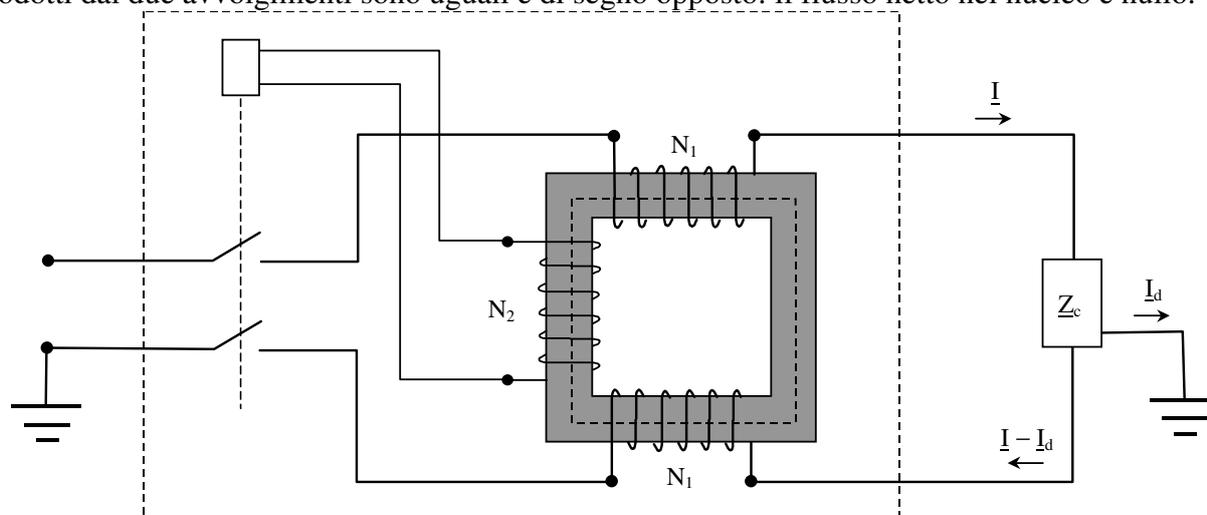


Fig. 28 - Schema di principio di relè differenziale monofase.

Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_d , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_d$, altera il precedente equilibrio fra i flussi di induzione: si

manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una f.e.m. indotta e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione.

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

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

La protezione descritta nello schema di figura 28 risulta utilizzabile esclusivamente in regime sinusoidale. Possono essere tuttavia concepite protezioni differenziali "magnetiche" anche in regime stazionario e dinamico.

ELEMENTI DI SICUREZZA ELETTRICA

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

1. Per *elettrocuzione* (o *folgorazione*) si verificano in Italia circa 40 infortuni mortali all'anno;
2. circa il 5% degli incidenti elettrici finisce per avere esito mortale;
3. la maggior parte degli infortuni domestici ha luogo nel bagno;
4. circa il 15% degli incendi ha cause di natura elettrica.

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

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

EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

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

Il passaggio di una corrente elettrica nei tessuti umani ha effetti fisiologici largamente variabili, dipendenti dal valore della corrente, dalla sua frequenza, dalla durata del contatto, dalla sensibilità individuale e dalla zona del corpo in cui il fenomeno ha luogo. La *soglia di sensibilità* può variare da alcune decine di μA , per la lingua, a poco più di una decina di mA. L’influenza della durata del contatto viene descritta nella *curva di pericolosità corrente - tempo* di figura 29.a, ad andamento approssimativamente iperbolico.

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

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

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

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

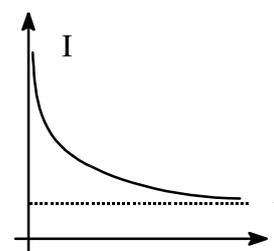


Figura 29.a

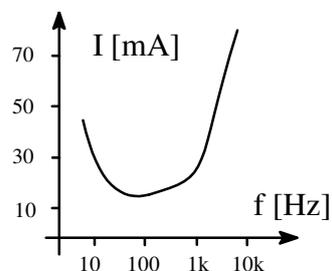


Figura 29.b

La curva (corrente di rilascio - frequenza) di figura 29.b, evidenzia un minimo (corrispondente ad un massimo di pericolosità) proprio al valore di 50 Hz, coincidente con la frequenza industriale europea, per poi decrescere abbastanza nettamente al crescere della frequenza.

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

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

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

1. *Tetanizzazione*: a causa dello stimolo elettrico sulle singole cellule, si manifesta la contrazione di un intero fascio muscolare, con una sintomatologia non diversa da quella del tetano (da cui il nome). Particolarmente pericoloso un contatto in corrente alternata: i tessuti muscolari sono

interessati da una serie di stimoli che si ripetono in maniera regolare determinando uno stato di contrazione permanente che impedisce all'fortunato di interrompere il contatto. La massima corrente che attraversi il corpo e consenta ancora di "lasciare la presa" viene definita *corrente di rilascio*.

2. *Blocco respiratorio*: per valori piuttosto elevati di corrente (che accentuano i sintomi di contrazione muscolare) e soprattutto se la zona interessata è quella toracica, comprendente i muscoli respiratori, si può subire un danno da paralisi respiratoria, causa di danni irreversibili al cervello se tale blocco supera i 2 ÷ 3 minuti. È questo tipo di fenomeno la causa del colorito cianotico che presentano le vittime dell'elettrocuzione.
3. *Fibrillazione ventricolare*: i disturbi legati a cause elettriche investono anche il muscolo cardiaco, regolato nel suo pulsare da stimoli elettrici. Se a questi si sovrappongono altri stimoli esterni, di intensità adeguatamente alta, si può pervenire ad una perdita completa di quel coordinamento che rende possibile l'attività cardiaca. A seguito di una stimolazione intensa ed incoerente, ciascuna delle fibre del ventricolo risulta soggetta a contrazioni disordinate, il cui persistere finisce per diventare letale.
4. *Ustioni*: bastano densità di corrente di pochi mA/mm² per qualche secondo per provocare ustioni apprezzabili, soprattutto sulle zone dotate di maggiore resistività, come la pelle. Oltre i 40 ÷ 50 mA/mm² si ha una carbonizzazione dei tessuti interessati, che, aumentando notevolmente la resistenza locale, può avere un effetto paradossalmente protettivo nei confronti di ulteriori più gravi danni.

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

1. *I punti di ingresso e di uscita* della corrente: il valore più alto si raggiunge per il contatto fra le due mani e diminuisce del 25% fra una mano ed i due piedi e del 50% nel contatto fra le due mani ed i due piedi.
2. L'aumento della *pressione di contatto* fa diminuire la resistenza.
3. La resistenza è inversamente proporzionale alla *superficie di contatto*.
4. La resistenza tende a diminuire con la *durata del contatto*: solo una eventuale carbonizzazione da ustione ne provoca un aumento.
5. La consistenza e lo stato della pelle sono decisive: a tensione non superiore a 50 V, la resistenza corporea si riduce del 25% se la pelle è bagnata con acqua; la riduzione arriva al 50% se la pelle è bagnata con soluzioni conduttrici (come ad esempio molti detergenti).
6. La resistenza del corpo umano dipende in maniera inversa dalla *tensione applicata*. Una epidermide asciutta, soprattutto nelle zone callose, determina una resistenza di 10 ÷ 100 kΩ ad una tensione di 50 V, che scende però ad appena 1 kΩ quando la tensione sale a 500 V. In caso di lesioni cutanee estese la resistenza scende fino a 500 Ω

L'International Electrotechnical Commission (IEC) (Publ. 364-4-41) ha individuato una curva di sicurezza, riportata nella figura 30, che fornisce, in corrispondenza ad ogni valore di tensione di contatto* (la curva si riferisce al valore efficace della tensione supposta in c.a) il tempo massimo che un dispositivo di protezione può impiegare per interrompere il contatto stesso, affinché non vi sia pericolo per la persona soggetta al contatto. La curva mostra come tensioni aventi un valore

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

efficace inferiore a 50 V possano permanere indefinitamente nel tempo senza provocare pericolo per le persone. Tale valore di tensione viene denominato tensione di contatto limite ed usualmente indicato con il simbolo U_L . In condizioni ambientali particolari (cantieri, locali agricoli, piscine) la tendenza normativa è di ridurre la tensione di contatto limite U_L a 25 V.

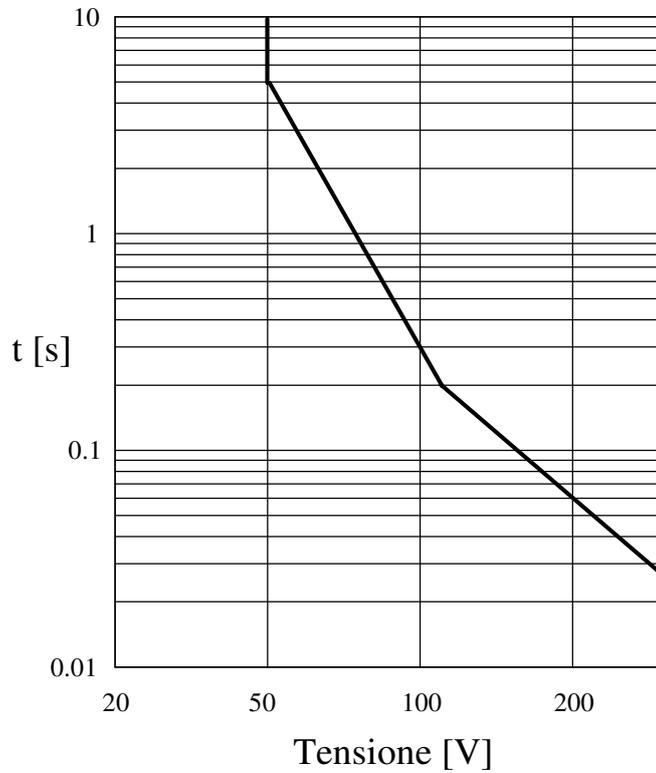


Figura 30

TIPDI DI CONTATTO ED ISOLAMENTI

Gli incidenti di tipo elettrico vengono classificati in due categorie:

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

Gli isolamenti vengono classificati in quattro categorie:

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

PROTEZIONI DAL CONTATTO INDIRETTO

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

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

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

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

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

IMPIANTO DI TERRA

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

Al fine di chiarire quanto definito sopra, si consideri un dispersore emisferico (vedi figura 31) di raggio R_0 che disperda in un terreno omogeneo, di conducibilità σ , una corrente I . A causa della caduta di tensione lungo il terreno, la tensione misurabile tra l'elettrodo ed i punti del terreno aumenta con la distanza r , in tutte le direzioni radiali. Per punti infinitamente lontani la differenza di potenziale tra l'elettrodo ed il terreno è massima

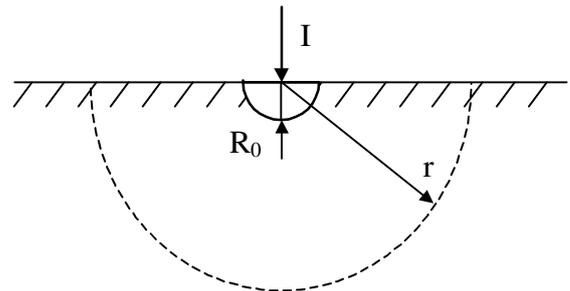


Fig. 31. – Dispersore di terra emisferico.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Il dispersore di terra risulta quindi rappresentabile con lo schema elettrico illustrato in figura 32, dove E indica l'elettrodo e TO il punto di terra a potenziale zero. Questo consente di conglobare nella resistenza R_t tutta l'opposizione incontrata dalla corrente I dispersa a terra.

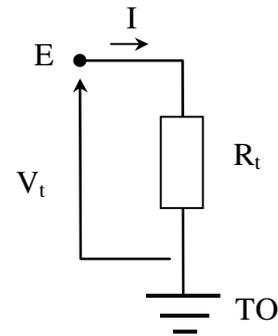


Fig. 32. – Schema elettrico equivalente del dispersore di terra.

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

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

La conduzione entro il terreno costituisce un fenomeno di natura essenzialmente elettrolitica: ciò spiega la sensibile dipendenza della sua resistività

Tipo di dispersore	Resistenza di terra
▪ a picchetto (di lunghezza L)	$R_t = \rho/L$
▪ ad anello orizzontale (di perimetro P)	$R_t = 2 \rho/P$
▪ a maglia (L = somma di tutti i lati)	$R_t = \rho/L$
<i>Mezzo disperdente</i>	ρ [$\Omega \cdot m$]
sabbia marina	0.3÷3
acqua marina	1
argille, marne umide	30÷150

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

$$v(\mathbf{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|} \quad , \text{ per } \|\mathbf{r}\| > R_0 \quad \left| \quad v(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|} \quad , \text{ per } \|\mathbf{r}\| > R_0$$

dalla presenza di acqua nei vari tipi di terreni. Si fornisce di seguito una tabella delle resistività dei terreni più comuni.	acqua dolce	50÷100
	torba (o sabbia) umida	200÷300
	granito, basalto, calcestruzzo	1000÷3000
	sabbia secca	2000÷5000

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

LE RETI DI DISTRIBUZIONE E IL COLLEGAMENTO A TERRA

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

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

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

- Nei sistemi **TT** il neutro e le masse sono collegate a terra, ciascuno con un suo impianto di terra autonomo (vedi figura 33).

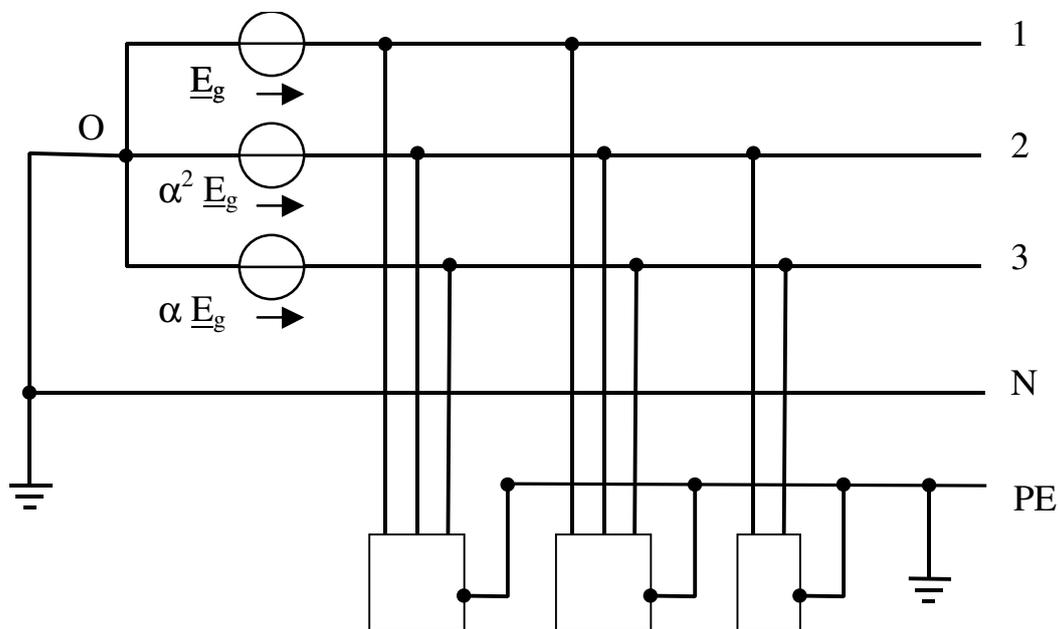


Fig. 33 – Schema di sistema TT.

- I sistemi **TN**, con il neutro collegato direttamente a terra (vedi figura 34), si diversificano, inoltre, in
 - sistema **TN-C**, nel quale le masse sono direttamente collegate al conduttore di neutro (PEN) 5
 - sistema **TN-S**, nel quale ciascuna delle masse è collegata al neutro mediante un proprio conduttore di protezione (PE).

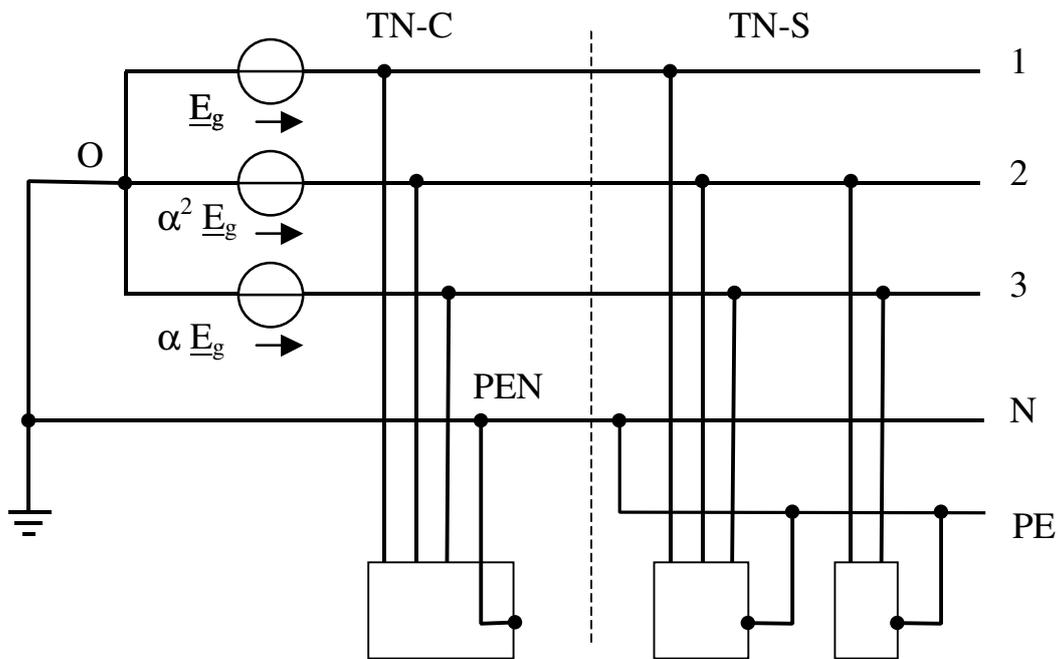


Fig. 34 – Schemi dei sistemi TN-C e TN-S.

- Nei sistemi IT le parti elettriche attive sono isolate da terra o sono collegate a terra tramite una impedenza non trascurabile; le masse sono poste a terra ciascuna con un proprio conduttore di protezione (PE) (vedi figura 35).

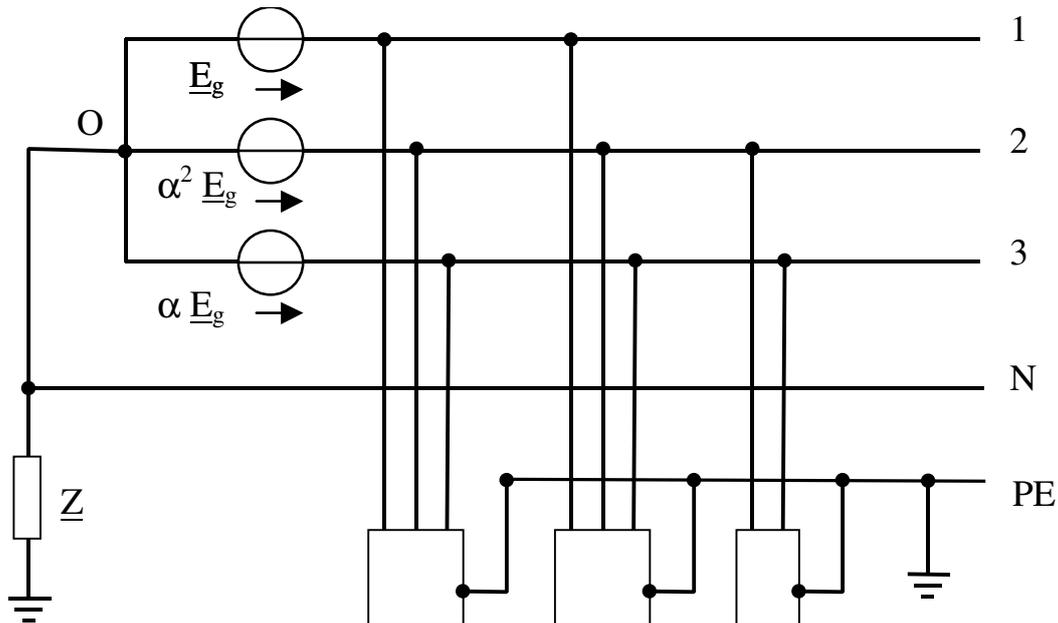


Fig. 35 – Schema di sistema IT.

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

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

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

Si consideri un sistema in bassa tensione del tipo TT. Tale sistema è l'unico consentito dalla norma CEI 64-8, nel caso in cui l'utilizzatore della energia elettrica sia diverso dal distributore della stessa. E' il caso quindi di tutti gli ambienti domestici. Si consideri ora il caso (vedi figura 36.a) di una persona che tocca una massa collegata ad un dispersore di terra nel momento in cui si disperde una corrente I. Nell'ipotesi di trascurare tutti i parametri non resistivi, si può valutare la corrente che attraversa l'infortunato dall'analisi del circuito elettrico della corrente di guasto mostrato nella figura 36.b, dove R_c è la resistenza del corpo umano, R_{ct} è la resistenza tra corpo e terra (calze, scarpe, pavimento), R_n la resistenza di terra del dispersore di terra del neutro, E la tensione principale di fase (220 V per il sistema di distribuzione in bassa tensione adottato in Europa).

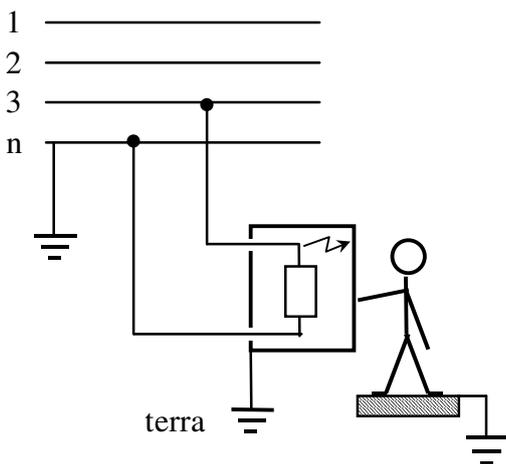


Fig. 36.a

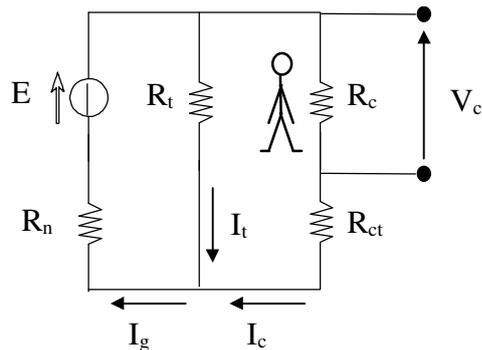


Fig. 36.b

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

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

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

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

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

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

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

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

UN CASO PERICOLOSO

Nel caso di un impianto di terra comune a più utenze, va segnalato per una pericolosità potenzialmente elevata il caso in cui anche una sola delle utenze non sia dotata di protezione differenziale. Facendo riferimento, infatti, alla figura 37, si supponga che tutti i carichi siano provvisti di relè differenziale con la usuale alta sensibilità nominale $I_{\Delta N} = 30$ mA, con la sola eccezione del carico 1, protetto soltanto da un interruttore automatico magnetotermico con $I_n = 32$ A e $I_{Ss} = 3 I_n = 96$ A.

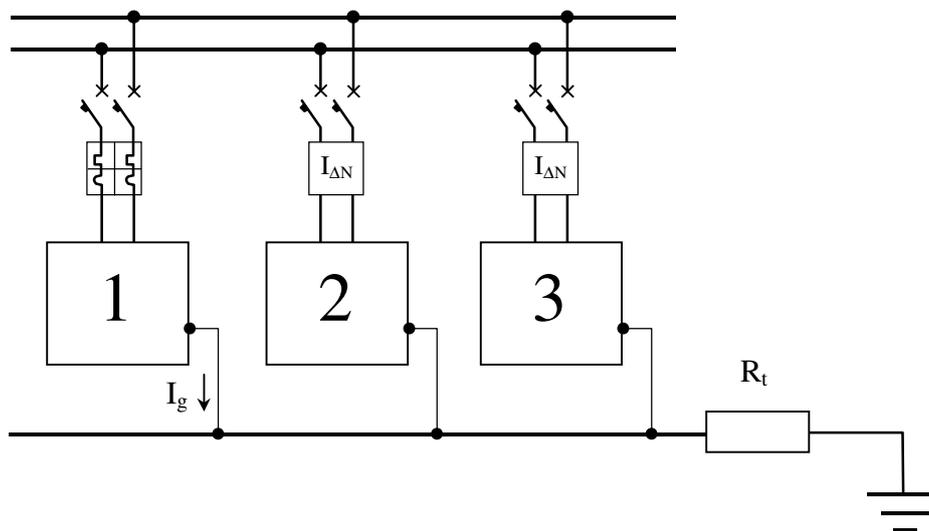


Fig. 37

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

viene così completamente vanificata e rischia, anzi, di indurre soltanto un mal riposto senso di sicurezza.

Tale situazione, fino a dieci anni fa estremamente diffusa nei condomini, è stata quasi completamente sanata dalla applicazione della legge 46/90, contenente Norme per la sicurezza degli impianti, tra le quali l'obbligo di installazione generalizzata della protezione differenziale con corrente di intervento differenziale $I_{\Delta N} < 30 \text{ mA}$.

PROTEZIONI DAL CONTATTO DIRETTO

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

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

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

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

ULTERIORI MISURE DI SICUREZZA

L'elettricità statica

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

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

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

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

I gruppi di continuità

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

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