

ELEMENTI DI SICUREZZA ELETTRICA

1. DISPOSITIVI DI MANOVRA E PROTEZIONE

La gestione e la sicurezza di una rete elettrica è affidata ad una molteplicità di apparecchiature che provvedono a realizzare le manovre richieste dalle esigenze dell'utenza in condizioni di normale esercizio, e a far fronte in maniera automatica ad anomalie di funzionamento:

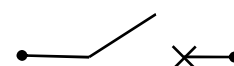
- **Sovratensioni.** Il dimensionamento e la tenuta degli isolamenti non può essere riferito alla sola tensione di normale esercizio ma deve offrire adeguata sicurezza anche nei confronti di eventuali sovratensioni, solitamente a carattere transitorio e molto più elevate dei valori nominali dell'impianto. Le sovratensioni per *cause interne* sono quelle prodotte da variazioni di regime più o meno rapide legate a manovre sugli impianti, generalmente riconducibili a chiusura o apertura di un interruttore, brusca riduzione del carico, risonanze in rete, contatto accidentale di un impianto con un altro a tensione di esercizio maggiore. Le sovratensioni per *cause esterne* sono imputabili a fenomeni di origine atmosferica. Il caso più grave è certamente quello della fulminazione diretta, quando una linea viene colpita da un fulmine.

- **Sovracorrenti.** Un *sovraccarico* è la causa più frequente di sovracorrente, consistente nel superamento del valore nominale di corrente. Si tratta solitamente di fenomeni di durata limitata, dovuti alle modalità di funzionamento di alcuni dispositivi. Un esempio tipico è costituito dalle elevate correnti di spunto dei motori asincroni in fase di avviamento, che possono essere fino a $6 \div 8$ volte superiori alle correnti nominali. I sovraccarichi hanno un effetto quasi esclusivamente termico: se sono di durata limitata e non si ripetono troppo frequentemente, sono privi di conseguenze.

Le sovracorrenti più rilevanti, e pericolose, sono quelle dovute a un cortocircuito tra due elementi dell'impianto a tensione diversa: si possono raggiungere valori elevati della corrente, limitati solo dalle caratteristiche del generatore equivalente della linea a monte della zona di guasto. La *corrente di cortocircuito* I_{cc} in un punto di un impianto elettrico rappresenta la corrente che circolerebbe in un conduttore di resistenza trascurabile che collegasse le linee in tensione.

Il normale esercizio degli impianti prevede la necessità di inserire o disinserire generatori, carichi o intere sezioni di rete. Gli apparecchi di manovra a tale scopo utilizzati presentano caratteristiche funzionali che dipendono fortemente dalla gravosità delle condizioni operative.

Interruttori. *Gli interruttori consentono la chiusura e l'apertura di una linea sotto carico anche in condizioni di cortocircuito.* Il principale parametro che caratterizza un interruttore è il *potere nominale di interruzione*, espresso dal valore della corrente di cortocircuito che un interruttore può interrompere ad una tensione superiore di non oltre il 10% rispetto a quella nominale, quando la frequenza e il fattore di potenza siano quelli nominali.



Simbolo dell'interruttore.

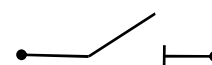
All'apertura di una rete sotto carico si manifesta quasi sempre un arco elettrico che conserva la continuità della corrente. Gli interruttori sono costruiti in modo tale da non impedire la formazione dell'arco, ma a provvedere alla sua estinzione ed impedirne il riadescamento a manovra conclusa. La necessità di far fronte a sollecitazioni meccaniche e termiche anche molto gravose rende solitamente gli interruttori ingombranti, pesanti e costosi.

Teleruttori (o contattori). *I teleruttori sono dimensionati per interrompere le sole correnti di normale esercizio, con esclusione di quelle di cortocircuito.* Rispetto ad un interruttore di uguale corrente nominale, un contattore presenta, struttura più semplice, dimensioni ridotte e costo inferiore.



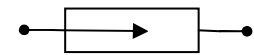
Simbolo del contattore.

Sezionatori. *I sezionatori sono destinati ad interrompere la continuità elettrica per le sole linee a vuoto.* I loro contatti sono generalmente visibili e forniscono quindi una sorta di assicurazione visiva sullo stato di apertura della linea. La manovra dei sezionatori è sempre subordinata a quella degli interruttori, in modo che i sezionatori operino sempre a vuoto.



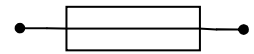
Simbolo del sezionatore.

Scaricatori. Gli scaricatori sono i più semplici dispositivi di protezione contro le sovratensioni. Nella versione spinterometrica, sono costituiti da due elettrodi in aria. Quando il campo elettrico fra gli elettrodi supera la rigidità dielettrica dell'aria, si innesca la scarica (arco) che impedisce l'ulteriore aumento della tensione: la distanza fra gli elettrodi è scelta in base al valore di limitazione della tensione



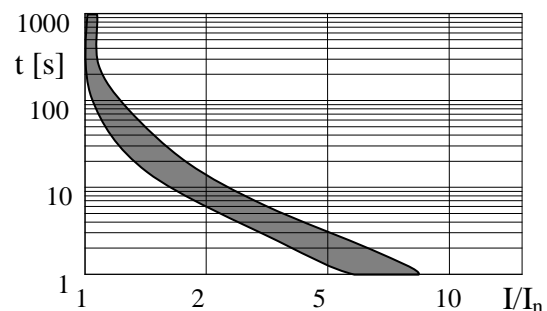
Simbolo dello scaricatore.

Fusibili. I fusibili rappresentano i più semplici dispositivi di protezione dalle sovracorrenti. Sono costituiti da un conduttore a basso punto di fusione alloggiato al centro di un contenitore isolante. Il tempo di intervento dipende esclusivamente dal raggiungimento del regime termico che ne determina la fusione e decresce all'aumentare della corrente.

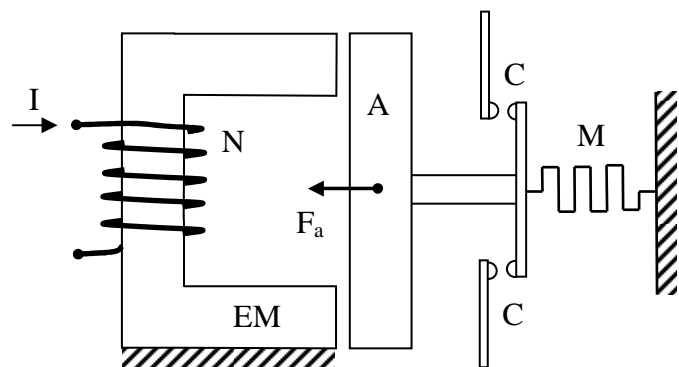


Simbolo del fusibile.

Indicando con R la resistenza del conduttore, il fusibile interviene interrompendo il circuito quando l'energia dissipata RI^2t supera il calore di fusione. In realtà, le condizioni di intervento di un fusibile sono determinate solo entro una fascia di incertezza, indicata in figura. La zona di intervento del fusibile, che rappresenta l'insieme dei punti di sicura fusione, è la parete del piano sopra la fascia di incertezza.



Relè. Il termine relè è stato inizialmente utilizzato per designare un dispositivo, con funzioni sia di protezione che di manovra, costituito come in figura. In tale relè elettromagnetico, eccitato da una corrente I , la forza di attrazione F_a sviluppata dall'elettromagnete EM vince la resistenza di una molla antagonista M e sposta una ancora A mobile capace di operare un azionamento meccanico (ad esempio, chiudere i contatti C)^(*).



Schema del relè elettromagnetico.

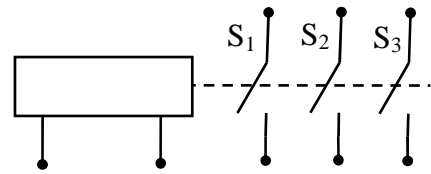
Attualmente il termine relè designa una gamma più ampia di dispositivi ai quali viene accoppiata una molteplicità di dispositivi di comando o di segnalazione, in funzione dell'andamento di una o più grandezze. A seconda della grandezza alla quale sono sensibili, i relè sono classificati come voltmetrici, amperometrici, wattmetrici, ecc. L'impiego di trasduttori consente la realizzazione di relè sensibili anche a grandezze non elettriche come temperatura, pressione, posizione, ecc. Una ulteriore suddivisione fa riferimento al valore della grandezza controllata:

- i relè di massima intervengono quando la grandezza supera un valore prefissato;
- i relè di minima intervengono quando la grandezza scende al di sotto di un valore prefissato;

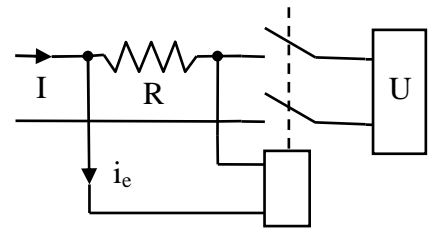
^(*) Per determinare la forza F_a esercitata sull'ancora in direzione ortogonale alle superfici dei traferri (poli dell'elettromagnete), si consideri la sua equilibrante F , esterna al sistema. Si assegni all'ancora uno spostamento dx , ove x indica la distanza fra i poli dell'elettromagnete e l'ancora, valutata a partire dalla superficie dei poli. Il bilancio energetico associato a tale spostamento è $I d\Phi_c + F dx = dW_m$. Sostituendo $\Phi_c = LI$ e $W_m = LI^2/2$ e semplificando, si ottiene $F = - (I^2/2) dL/dx = - F_a$. Ricordando che $L = N^2/\mathcal{R}$, dove $\mathcal{R} = 2x/\mu_0 S$, la legge di Hopkinson $NI = \mathcal{R} \phi$ e la relazione $\phi = BS$, si ha infine: $F_a = (B^2/2\mu_0)(2S)$. Quindi F_a è sempre una forza di attrazione tra ancora ed elettromagnete. Per quanto concerne il suo valore, si osserva che esso risulta espresso dal prodotto della superficie $2S$ dei poli dell'elettromagnete per la grandezza $(B^2/2\mu_0)$ che ha le dimensioni di una pressione e viene solitamente indicata come "pressione magnetica".

- i *relè differenziali* sono sensibili alla differenza fra due grandezze, ad esempio tra quella di ingresso e quella di uscita da un certo dispositivo;

La figura 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.

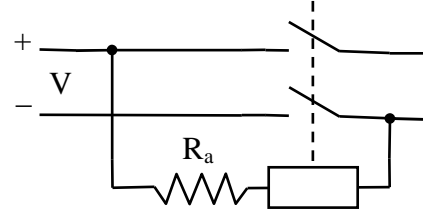


Relè amperometrico. Nello schema di figura il relè assume il ruolo di relè a massima corrente: quando la corrente I supera un valore assegnato, apre il circuito di alimentazione sconnettendo l'utilizzatore U eventualmente affetto da cortocircuito. La presenza del resistore R (shunt) è richiesta dalla necessità di limitare la corrente i_e , nella bobina di eccitazione del relè.



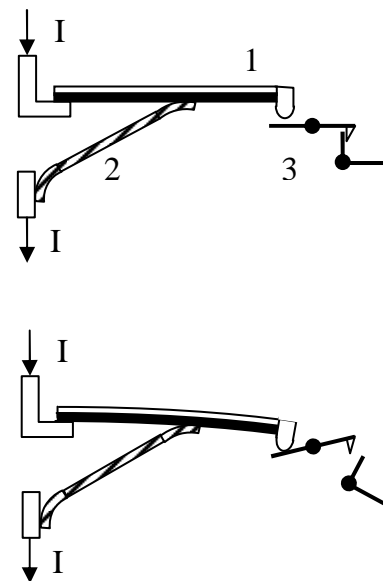
Relè amperometrico di massima corrente.

Relè voltmetrico. Nello schema di figura il relè assume il ruolo di relè a massima tensione. 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 (regolabile con la taratura della molla), il relè provoca l'apertura dei contatti.



Relè voltmetrico di massima tensione.

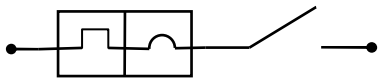
Relè termico (relè di sovraccarico). Si tratta di un relè provvisto di un dispositivo di sgancio sensibile alla temperatura. Secondo la schematizzazione di figura, si basa sul diverso coefficiente di dilatazione termica dei due metalli che compongono la lamina bimetallica (1): la corrente I , condotta dal il 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 raffreddata. 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 previene interruzioni indesiderate del circuito di alimentazione ma assicura la protezione nel caso di una sovracorrente protratta nel tempo.



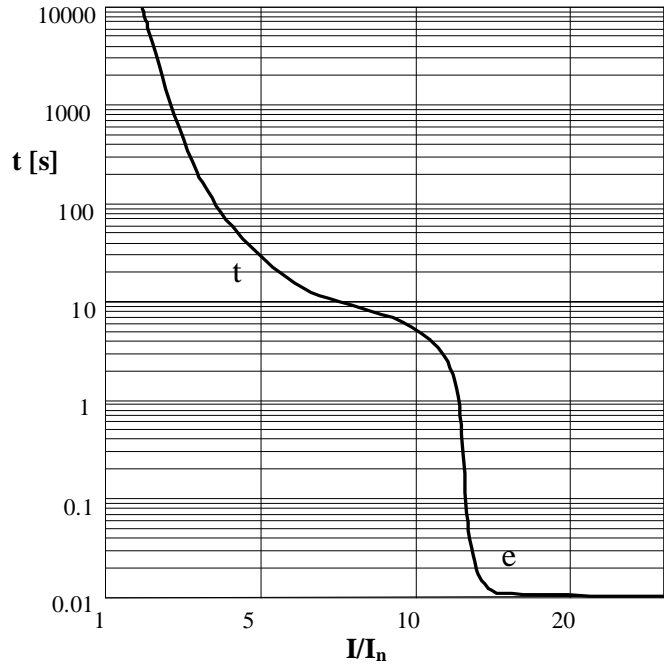
Principio di funzionamento del relè termico.

Relè magneto-termico. Risulta dalla serie 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 ("t" in figura);
- per correnti superiori interviene il relè elettromagnetico ("e" in figura).

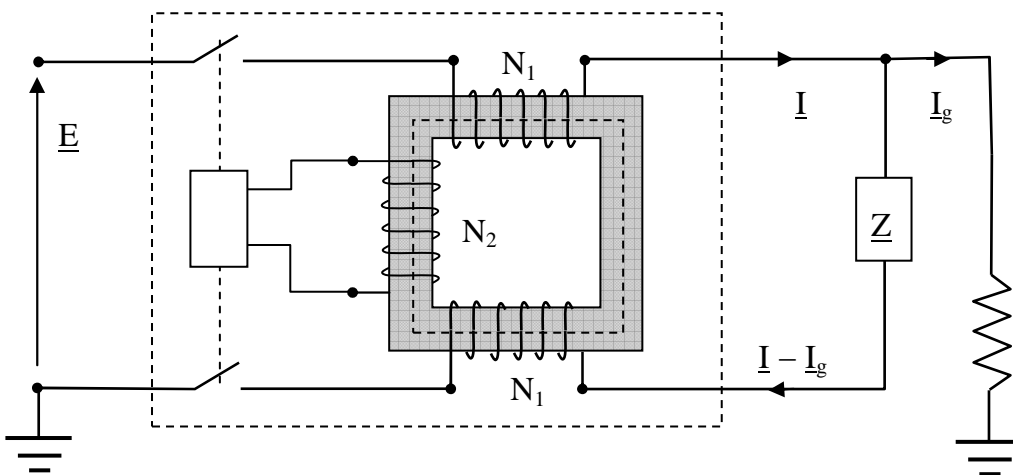


Simbolo del relè magneto-termico.



Caratteristica di intervento del relè magneto-termico.

Relè differenziale. La linea tratteggiata in figura delimita 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 induzione prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo. Se invece 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 tensione indotta e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione. Il relè differenziale è caratterizzato da una sensibilità nominale $I_{\Delta n}$, definita come il valore minimo della differenza fra i valori efficaci delle correnti sufficiente a provocare l'apertura del circuito.



Schema di relè differenziale monofase.

2. SICUREZZA DEGLI UTENTI

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. La formulazione di Normative di Sicurezza atte a prevenire od a minimizzare il pericolo viene affidata ad appositi enti nazionali ed internazionali. Nel caso dell'Italia tale attività viene svolta dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). L'adeguamento degli impianti alle norme CEI costituisce una condizione sufficiente, anche se non necessaria, al soddisfacimento delle condizioni sull'esecuzione a regola d'arte. Quanto segue si riferisce essenzialmente agli impianti in bassa tensione a frequenza industriale (norma CEI 64-8).

Il passaggio di una corrente elettrica nei tessuti umani (elettrocuzione) 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 (o di percezione)* può variare da alcune decine di μA , per la lingua, a poco più di una decina di mA. L'elettrocuzione risulta pericolosa a causa dei seguenti fenomeni fisiologici:

1. *Contrazione muscolare involontaria*: il passaggio di corrente causa la contrazione del muscolo coinvolto. Particolarmente pericoloso un contatto in AC: il muscolo è interessato da una serie di stimoli che si ripetono in maniera regolare determinando uno stato di contrazione permanente che impedisce all'infortunato di interrompere il contatto^(o). La massima corrente che attraversi il corpo e consenta ancora di "lasciare la presa" viene definita *corrente di rilascio*.
2. *Ustioni*: bastano densità di corrente di pochi mA/mm^2 per qualche secondo per provocare ustioni apprezzabili, soprattutto sulle zone dotate di maggiore resistività, come la pelle. Oltre i $40 \div 50 \text{ mA}/\text{mm}^2$ si ha la carbonizzazione dei tessuti interessati.

In corrente alternata a 50 Hz, il limite di pericolosità convenzionale I_p viene legato alla durata della circolazione nei tessuti corporei t dalla relazione: $I_p [\text{mA}] = 10 + 10/t[\text{s}]$.

La resistenza del corpo umano, che generalmente compete alla pelle, dipende da: 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), pressione di contatto, superficie di contatto e durata del contatto. 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 molti detersivi). Infine la resistenza del corpo umano dipende in maniera inversa dalla tensione. Un'epidermide asciutta determina una resistenza di $10 \div 100 \text{ k}\Omega$ ad una tensione di 50 V, che scende però ad appena $1 \text{ k}\Omega$ quando la tensione sale a 500 V.

Se si fissa la resistenza del corpo al valore convenzionale di $2 \text{ k}\Omega$ e si assume come non pericolosa una corrente non superiore a $25 \div 30 \text{ mA}$, risultano non pericolose le tensioni fino a circa $50 \div 60 \text{ V}$: è sulla base di queste considerazioni che le Norme pongono un limite al livello di tensione sopportabile senza che intervenga qualche forma di protezione.

2.1 TIPI DI CONTATTO E PROTEZIONI

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 parti metalliche normalmente non in tensione (*massa*), che possono però essere in tensione per un difetto di isolamento.

Protezioni dal contatto diretto: Le prescrizioni delle Norme intese ad evitare che si verifichi il contatto diretto sono di tipo essenzialmente passivo. A tale scopo occorre adottare misure di prote-

^(o) Se la zona interessata è quella toracica si può subire un danno causato dalla paralisi respiratoria oppure dalla perdita della funzionalità cardiaca.

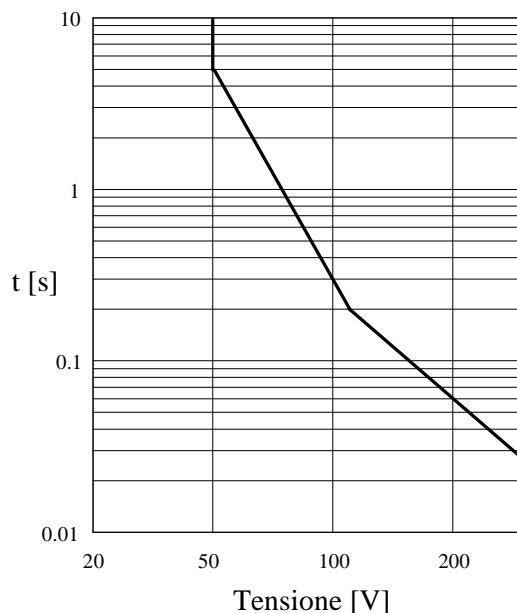
zione totale nei luoghi accessibili a persone non consapevoli del rischio elettrico: tutte le parti attive devono essere contenute entro involucri capaci di garantire la protezione in tutte le direzioni. Ove questo non sia possibile, occorre che siano rese inaccessibili con sbarramenti adeguati^(*).

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. 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.

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 di guasto. Quindi, i dispositivi di interruzione automatica del circuito devono intervenire in un tempo tanto più breve quanto maggiore è la tensione sulle masse, secondo una curva limite tensione - tempo compatibile con la protezione del corpo umano. In figura è illustrata la curva di sicurezza IEC 364.

La tensione corrispondente a 5s è denominata tensione di contatto limite U_L . In condizioni normali $U_L = 50V$, tuttavia, in condizioni ambientali particolari (ad esempio piscine e cantieri) la tendenza normativa è ridurre la tensione di contatto limite a 25V. Una tensione inferiore a U_L può essere sopportata per un tempo illimitato. Una tensione di valore più alto può essere sopportata per un tempo che è tanto più breve quanto più elevato è il suo valore. Il dispositivo di interruzione automatica deve intervenire non appena la tensione sulla massa supera il valore U_L , in un tempo massimo di 5s, e la sua caratteristica di intervento deve soddisfare 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 terminale dove collegare il conduttore di protezione; esso viene denominato *apparecchio di classe I*.



Curva di sicurezza IEC 364

Misure di protezione passive contro i contatti indiretti (non prevedono l'interruzione del circuito):

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 di questi tipo è denominato *di classe II*.
2. *Bassissima tensione di sicurezza:* Il dispositivo è alimentato da a tensione non superiore al limite di sicurezza, e sono presi provvedimenti affinché tale limite non venga superato. Non occorrono quindi altre misure di protezione dai i contatti indiretti. Un apparecchio di questi tipo è denominato *di classe III*.

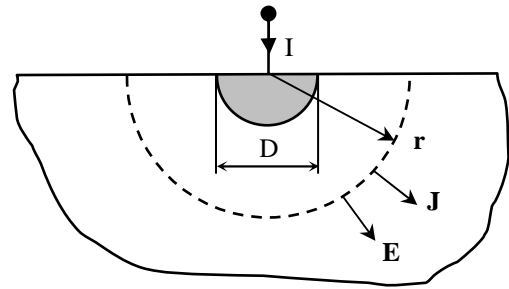
^(*) Eventuali eccezioni riguardano dispositivi che, per la loro specifica natura, non possono essere protetti nella maniera descritta (ad esempio la parte metallica di un portalampada). Le Norme ammettono l'apertura degli involucri isolanti, per ragioni di esercizio o di manutenzione, a patto che sia 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.

3. *Separazione dei circuiti*: Il dispositivo è alimentato 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 non è pericoloso per le persone.

2.2 IMPIANTO DI TERRA E DIFFERENZIALE

Con il termine *terra* si indica la massa del terreno assunta convenzionalmente a potenziale nullo ovunque. 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. Il *conduttore di terra* (o di protezione) provvede a realizzare il collegamento fra le parti da proteggere ed il dispersore di terra. 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) di diametro D 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 il dispersore ed i punti del terreno aumenta con la distanza r , in tutte le direzioni radiali. È possibile dimostrare che, nel caso considerato, la tensione è espressa da: $v(r) = I/(2\pi\sigma r)$.^(#)

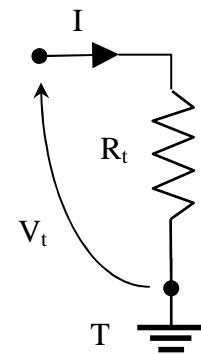


Dispersore di terra emisferico.

Si è posta a zero la tensione dei punti infinitamente lontani dal dispersore. 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, dove $r = D/2$, il valore della tensione è: $V_t = I/(\pi\sigma D)$. V_t è detta *tensione totale di terra* e rappresenta la tensione tra il terminale ed il punto a potenziale zero. La *resistenza totale di terra* si calcola quindi eseguendo il rapporto:

$$R_t = V_t/I = 1/(\pi\sigma D)$$

Il dispersore di terra risulta quindi rappresentabile con lo schema elettrico illustrato in figura, dove T indica il punto di terra a potenziale zero.



Bipolo equivalente del dispersore di terra.

In linea di principio, qualunque oggetto metallico che risulti posto in 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; Un metodo efficace per abbassare 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 quello dell'edificio protetto.

^(#) Si consideri infatti la Legge di Ampere applicata alla superficie emisferica di raggio r . Dato che la densità di corrente J è radiale si ha: $I = 2\pi r^2 J$. Il campo elettrico nel terreno, anch'esso radiale, è quindi: $E = J/\sigma = I/(2\pi\sigma r^2)$. Pertanto, la tensione v tra un punto sulla superficie emisferica di raggio r ed un punto sulla superficie emisferica di raggio tendente all'infinito si ottiene integrando E , rispetto al raggio, tra r ed ∞ . Il risultato è dunque: $v = I/(2\pi\sigma r)$.

Si consideri ora il caso (vedi figura) 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 assumendo che sia: R_c la resistenza equivalente del corpo umano, R_{ct} una resistenza aggiuntiva tra corpo e terra (calze, scarpe, pavimento), R_n la resistenza equivalente del neutro verso terra, E la tensione di fase (230 V per il sistema di distribuzione in bassa tensione adottato in Europa).

Dal circuito equivalente si ricava per la corrente di elettrocuzione I_c il valore (approssimato per eccesso):

$$I_c = E \frac{R_t}{R_n(R_t + R_c + R_{ct}) + R_t(R_c + R_{ct})}$$

Si conclude dunque che una resistenza di terra molto piccola offre un elevato grado di sicurezza, assorbendo la maggior aliquota della corrente di guasto. Inoltre, ad un basso valore della resistenza di terra è associata una corrente di guasto I_g tendenzialmente abbastanza elevata da provocare l'intervento di un interruttore automatico di massima corrente. Occorre aggiungere, però, che se la R_n tende a zero, la corrente I_c non dipende più da R_t vanificando così la messa a terra. L'efficacia della messa a terra dipende pertanto anche dalla presenza di una resistenza non nulla tra il neutro e la terra.

L'interruzione automatica del circuito di guasto è tipicamente affidata a un relè differenziale. (posto tra la linea ed il carico), la cui sensibilità può essere scelta sulla base del valore della R_t effettivamente disponibile. La limitazione della tensione di contatto a 50 V imposta dalle Norme può essere espressa in funzione della corrente differenziale $I_{\Delta n}$ che determina l'intervento dell'interruttore automatico: $R_t I_{\Delta n} < 50$.

Si deduce che una protezione differenziale è efficace anche per resistenza di terra relativamente elevata, come indica sinteticamente la tabella seguente, nella quale si è fatto riferimento ad alcuni dei valori più comuni di sensibilità $I_{\Delta n}$.

$I_{\Delta n}$ [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 del relè (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.

