

ELEMENTI DI SICUREZZA ELETTRICA

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 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 e secondo criteri di sicurezza. Quanto segue si riferisce essenzialmente agli impianti in bassa tensione a frequenza industriale (norma CEI 64-8).

1. EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

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/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 la carbonizzazione dei tessuti interessati.

In corrente alternata a 50 Hz, il limite di pericolosità convenzionale I_p (in mA) viene legato alla durata della circolazione nei tessuti corporei t (in secondi) 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 detergenti). Infine la resistenza del corpo umano dipende in maniera inversa dalla tensione. Un'epidermide asciutta, soprattutto nelle zone callose, determina una resistenza di 10 ÷ 100 k Ω ad una tensione di 50 V, che scende però ad appena 1 k Ω quando la tensione sale a 500 V.

Se si fissa la resistenza del corpo al valore convenzionale di 2 k Ω e si assume come non pericolosa una corrente non superiore a 25 ÷ 30 mA, risultano non pericolose le tensioni fino a circa 50 ÷ 60 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.

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

2. TIPI DI CONTATTO E PROTEZIONI

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

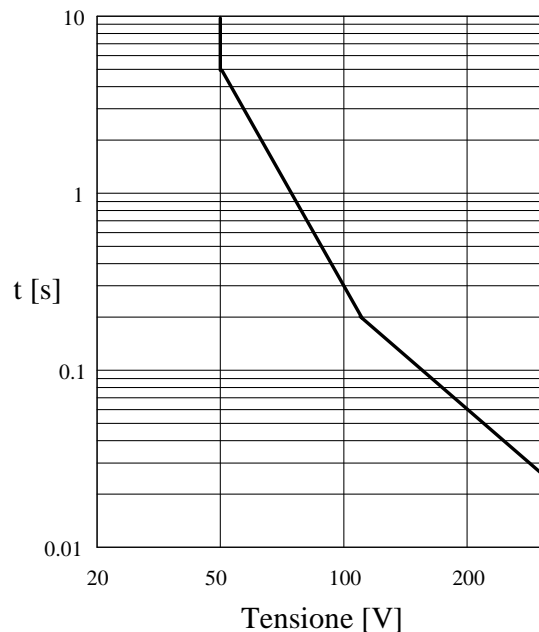
Protezioni dal contatto diretto

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 protezione 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. 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.

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

^(*) 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.

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 morsetto dove collegare il conduttore di protezione; esso viene denominato *apparecchio di classe I*.

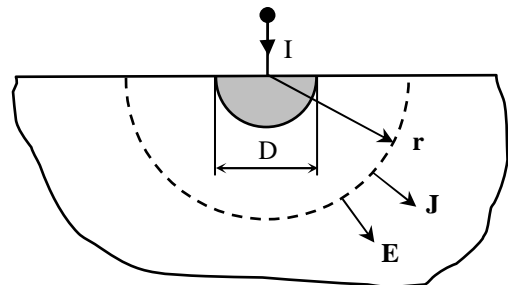
Misure di protezione passive contro i contatti indiretti (non prevedono l'interruzione del circuito):

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*.
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.

3. 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 disperdervi 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. Per punti infinitamente lontani la tensione tra l'elettrodo ed il terreno è massima.



Dispersore di terra emisferico.

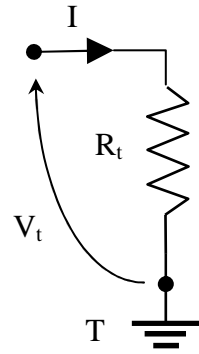
Per poter stabilire il circuito equivalente del dispersore è necessario determinarne la caratteristica tensione-corrente. Supponendo valide le ipotesi del passaggio dai campi ai circuiti, si consideri quindi la Legge di Ampere applicata alla superficie emisferica di raggio $r = \|\mathbf{r}\|$. Dato che la densità di corrente \mathbf{J} è radiale si ha $I = 2\pi r^2 \mathbf{J}(\mathbf{r})$, e quindi $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = I/(2\pi r^2)$. Il campo elettrico nel terreno, anch'esso radiale, è quindi: $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r})/\sigma = I/(2\pi\sigma r^2)$. Pertanto, la tensione $v_{r,\infty}$ tra un punto sulla superficie emisferica di raggio r ed un punto sulla superficie emisferica di raggio tendente all'infinito si ottiene integrando il campo elettrico, rispetto al raggio, tra r ed ∞ , ovvero:

$$v_{r,\infty} = \int_r^\infty \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = \int_r^\infty E dr = \frac{I}{2\pi\sigma} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{2\pi\sigma} \left[\frac{-1}{r} \right]_r^\infty = \frac{I}{2\pi\sigma r}$$

Si è posta a zero la tensione 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, 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.

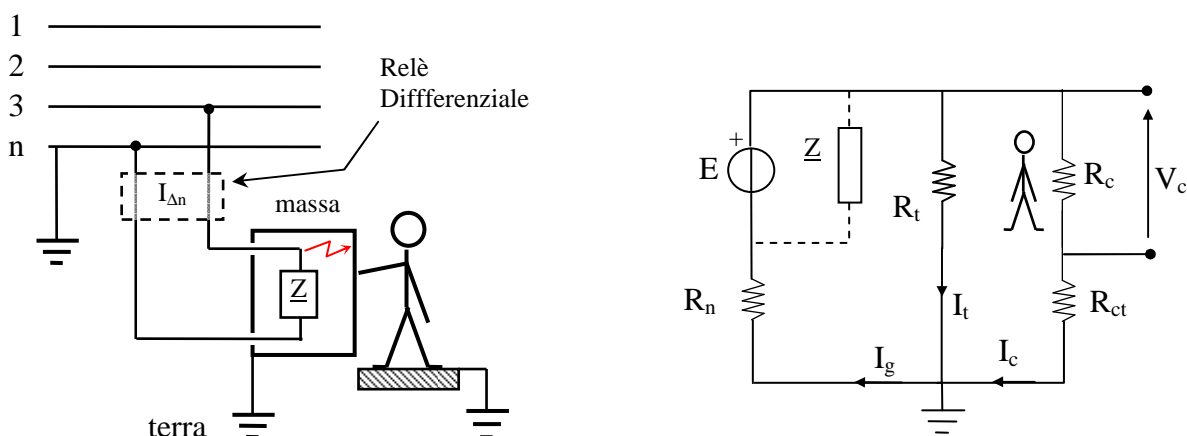


Bipolo equivalente del dispersore di terra.

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 ora il caso 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).

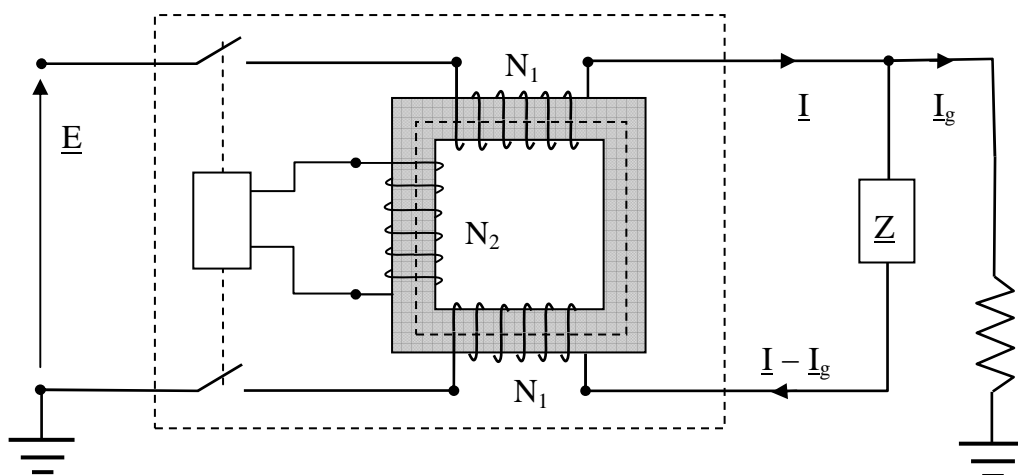


Dal circuito equivalente si ricava per la corrente I_c il valore:

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

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. Nel caso monofase viene realizzato con un nucleo magnetico toroidale su cui sono contro-avvolti due avvolgimenti di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione all'impedenza di carico Z . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo. Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_g , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_g$, altera il precedente equilibrio fra i flussi: si manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una tensione che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione. Questo dispositivo è caratterizzato dalla sensibilità nominale $I_{\Delta n}$, definita come il valore minimo del valore efficace della differenza fra le correnti (in ingresso ed in uscita) sufficiente a provocare l'apertura del circuito.



La sensibilità dell'interruttore differenziale viene scelta sulla base del valore della R_t . La limitazione della tensione di contatto a 50 V imposta dalle Norme può essere espressa in funzione della corrente $I_{\Delta n}$ 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.