

Sicurezza elettrica

Effetti Biologici e Fisiologici della corrente nel corpo umano

La differenza di potenziale tra l'interno di una cellula e l'ambiente circostante varia da circa 70 a 100 mV. Ciò è dovuto al fatto che c'è un assorbimento diverso di ioni

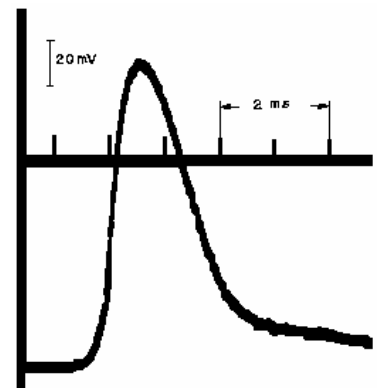
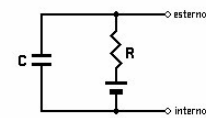
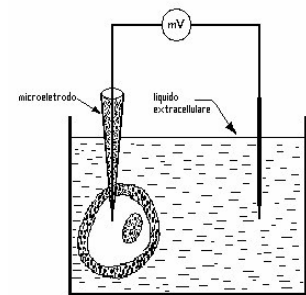
- Na^+ (sodio)
- Cl^- (cloro)
- K^+ (potassio)

Si può quindi definire un circuito equivalente che rappresenti il comportamento elettrico della cellula; in questo modello, rappresentato a lato, la capacità C varia da 1 a $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Se la condizione di riposo viene perturbata, il potenziale della cellula si inverte per poi ritornare nelle condizioni iniziali, questo andamento prende il nome di *potenziale d'azione*.

Per modificare il potenziale d'azione si possono sfruttare 2 aspetti:

- l'intensità di corrente;
- la durata.



L'intensità minima di corrente I che perduri per un tempo t capace di produrre l'eccitamento è ricavabile dalla seguente espressione:

$$I(t) = \frac{I_0}{1 - e^{-\frac{t}{H}}}$$

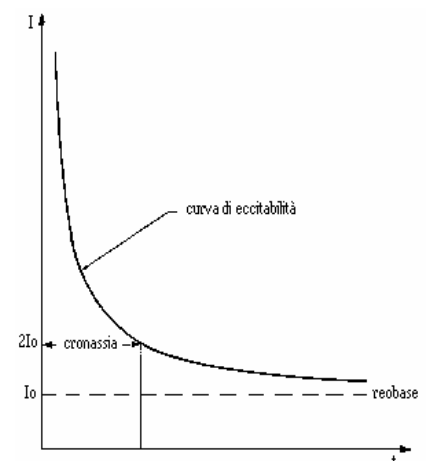
in cui:

- I_0 ed H sono costanti tipiche della cellula,
- I_0 rappresenta il valore di corrente minimo capace di produrre l'eccitamento della cellula.

La curva che si ottiene è molto vicina ad una iperbole equilatera e quindi in prima approssimazione si può dire che la cellula è sensibile alla quantità di carica elettrica scambiata tra l'interno ed l'esterno: $Q = I \cdot t$.

Come si modifica il potenziale d'azione:

- se lo stimolo sta sotto la curva la cellula non cambia il proprio potenziale;
- se l'impulso cade al di sopra della curva si innesca il potenziale d'azione;
- l'ampiezza del potenziale d'azione non dipende dall'intensità dello stimolo.



Effetti della corrente nel corpo umano

Le attività biologiche sono comandate dall'intensità delle correnti. Quando una persona viene attraversata da una corrente si altera il normale funzionamento nell'organismo e questo può in casi estremi anche causare la morte.

La folgorazione

La folgorazione è l'effetto del passaggio improvviso di una corrente elettrica nel corpo. Una corrente elettrica scorre bene nei metalli e abbastanza bene nei corpi bagnati (gli organismi viventi, il legno umido, la terra ecc.). Questi materiali sono chiamati in genere "conduttori"; scorre invece pochissimo in altri materiali (gomma, plastica, legno secco, tessuti asciutti, cuoio asciutto, ecc.) che vengono definiti "isolanti". La folgorazione può verificarsi solo se un punto qualunque del nostro corpo viene a contatto con un conduttore in tensione (filo della luce, carcassa metallica di un elettrodomestico nel quale vi sia una dispersione di corrente ecc.) e contemporaneamente con un altro punto a potenziale differente come il suolo o un altro conduttore (una cancellata, l'altro filo della luce ecc.). Nel caso più esemplificativo, dito in una presa di corrente e contatto con il suolo attraverso le scarpe, l'intensità della corrente che passa attraverso il corpo sarà determinata dal potenziale del punto e dalla resistenza del percorso dito-corpo-scarpe. La pelle umida di sudore o bagnata è un materiale conduttore, la pelle secca è più isolante; le scarpe con suola di gomma asciutta sono isolanti, una scarpa bagnata magari immersa nel fango è conduttrice. La folgorazione è pericolosa se il conduttore toccato è ad elevato potenziale. La tensione delle batterie (minore di 24 V) è troppo bassa per causare la folgorazione di una persona, mentre la tensione in casa (125 V oppure 220 V alternati) è più che sufficiente. In caso di contatto con linee elettriche in media tensione (1.000 - 30.000 V) o nel caso di fulminazioni di origine atmosferica (100.000 V) la folgorazione è causa di morte. Da questo punto di vista la corrente alternata è più pericolosa di quella continua.

La **folgorazione** rappresenta quasi sempre una disgrazia **evitabile** con il **buon senso** e la **normale prudenza**. Quando avviene, gli effetti possono essere molto variabili secondo l'intensità della corrente che passa attraverso il corpo e le sedi del contatto elettrico.

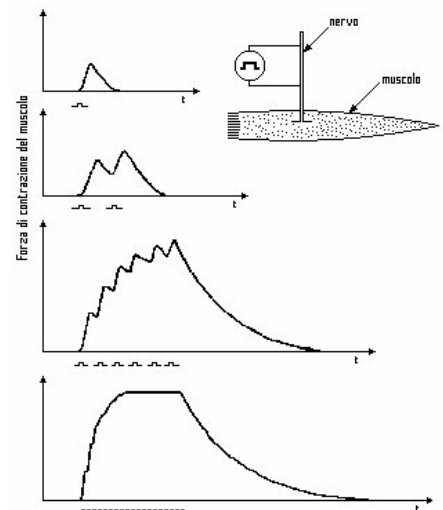
Gli effetti causati dal passaggio di una corrente elettrica nel corpo umano sono:

- tetanizzazione;
- blocco respiratorio;
- fibrillazione ventricolare;
- ustione.

Il primo effetto che si riscontra è la tetanizzazione, cioè la contrazione dei muscoli, appena lo stimolo cessa il muscolo si rilascia. Più il numero degli impulsi cresce più gli effetti della tetanizzazione aumentano.

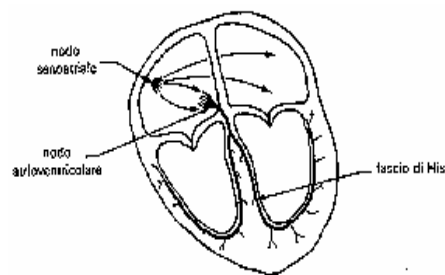
La frequenza di 50 Hz è quindi molto pericolosa a causa del fatto che si hanno molti stimoli in rapida sequenza. I limiti di corrente per la tetanizzazione sono:

- in corrente continua
 - uomini-donne 200 mA
- in corrente alternata $f = 50 \text{ Hz}$
 - uomini 15 mA
 - donne 10 mA

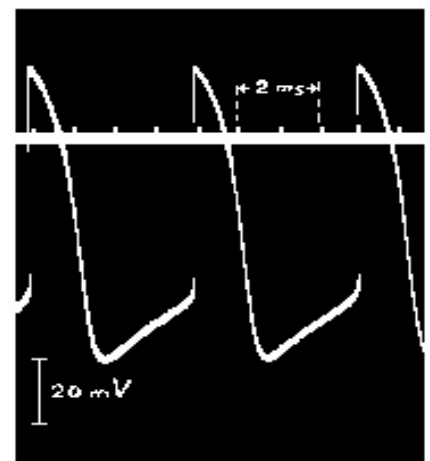


Il secondo effetto è il blocco respiratorio. I muscoli si contraggono e si rilasciano molto rapidamente. Si può avere una paralisi della rete nervosa che comanda la respirazione la quale provoca difficoltà di respirazione e segni di asfissia. Se la corrente perdura si può avere perdita di conoscenza e giungere alla morte per soffocamento.

All'aumentare dell'intensità di corrente che attraversa il corpo umano, può sopraggiungere la fibrillazione ventricolare. Il muscolo cardiaco si contrae da 60 a 100 volte al minuto. La contrazione delle fibre muscolari è prodotta da impulsi elettrici provenienti dal nodo senoatriale.

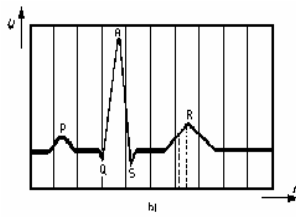


Il nodo atrioventricolare raccoglie l'impulso e lo trasmette, tramite il fascio di His, ai ventricoli. Il nodo senoatriale è un vero e proprio generatore di



impulsi elettrici i quali comandano il cuore. Se alla corrente che stimola il cuore se ne affianca un'altra maggiore il cuore si comporterà in modo disordinato dando origine alla fibrillazione, la quale può essere:

- ATRIALE (reversibile),
- VENTRICOLARE (reversibile con l'ausilio di un defibrillatore).



Campo di corrente corrispondente alla attività cardiaca. Le tensioni sono misurate tra punti esterni del corpo durante il ciclo cardiaco danno origine ad un diagramma tipico dell'attività elettrica del cuore (elettrocardiogramma).

Il quarto effetto è l'ustione. Nei punti di contatto, di ingresso e di fuoriuscita della corrente dal corpo, a causa dell'alto valore della resistenza (resistenza della pelle) e dell'alto valore della corrente si possono presentare delle bruciature o ustioni causate dall'effetto joule ($R \cdot I^2$).

Zone di pericolosità della corrente elettrica

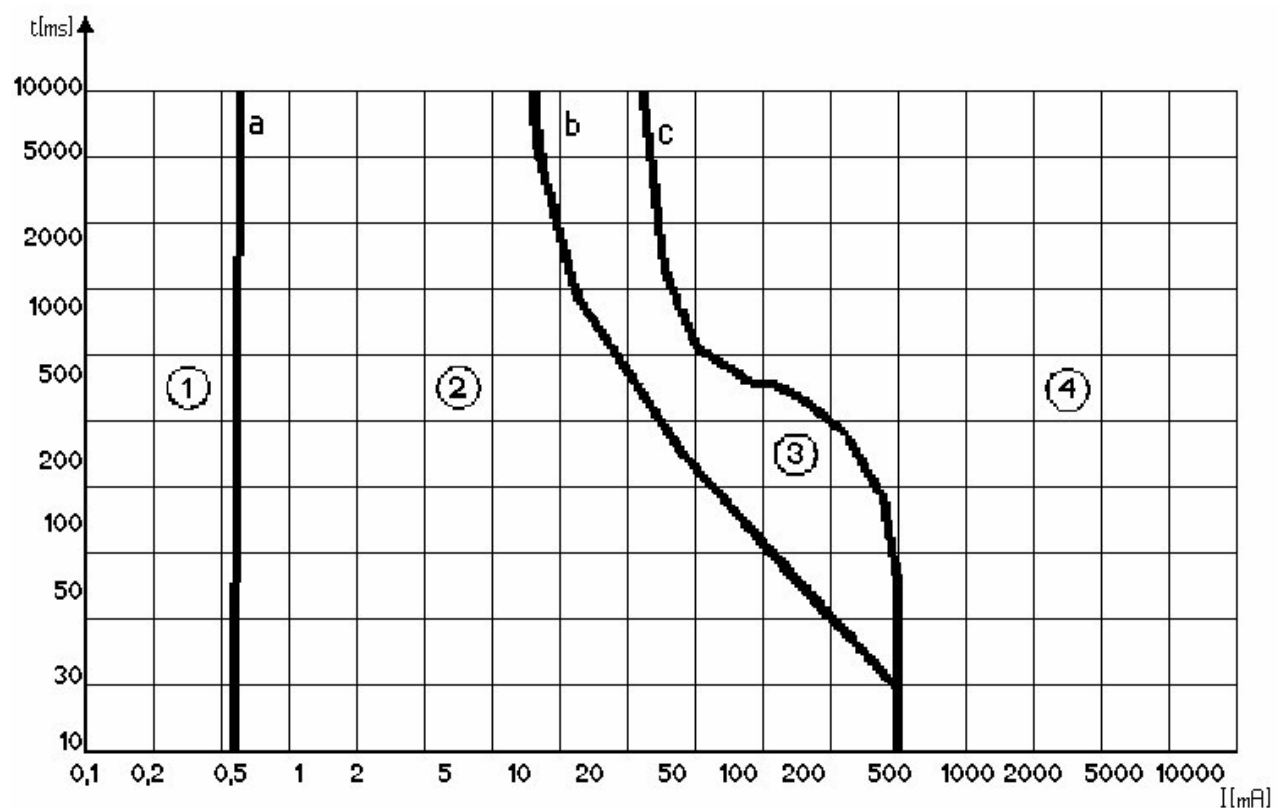


Grafico valido per frequenze comprese tra 15 Hz e 100 Hz

1. Assenza di reazioni (si arriva alla percezione)
2. Nessun effetto fisiologico (si arriva alla tetanizzazione)
3. Possono verificarsi effetti patofisiologici generalmente reversibili
4. Probabile fibrillazione ventricolare, arresto del cuore, arresto della respirazione, ustioni

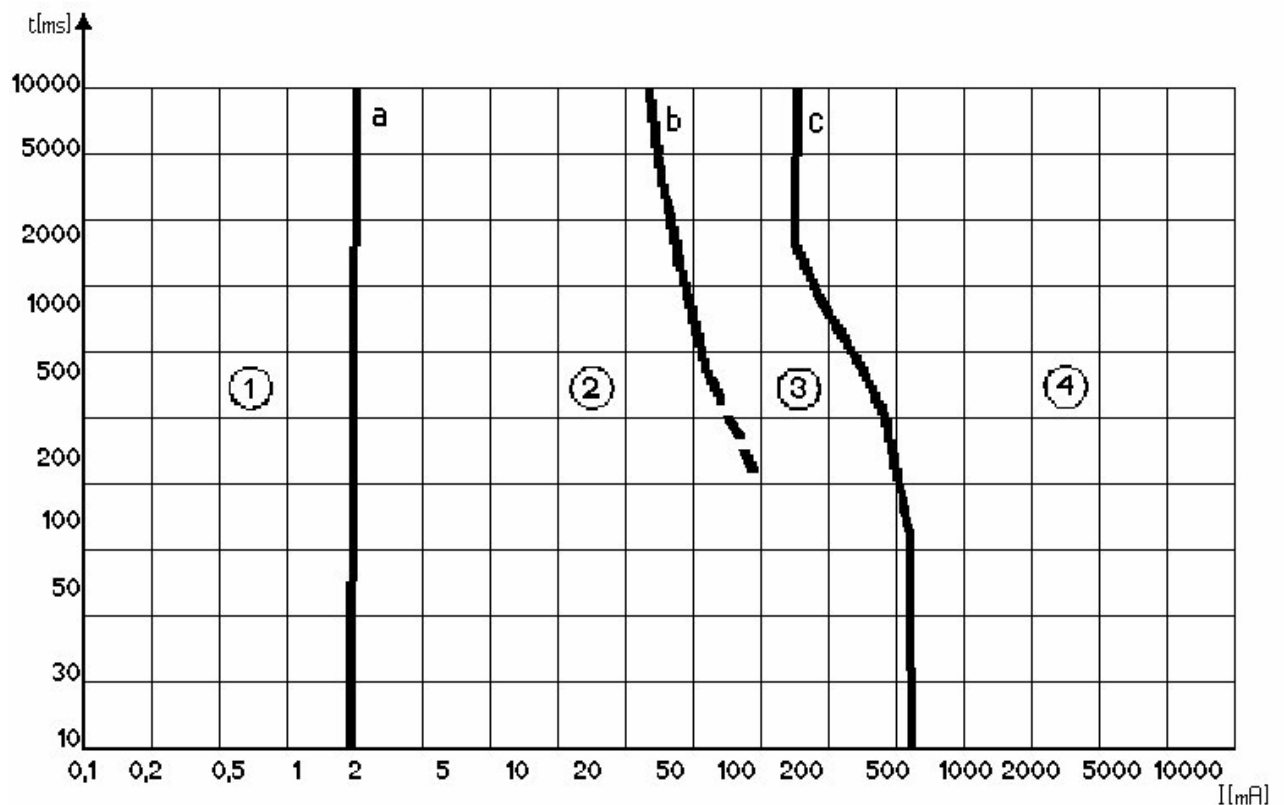


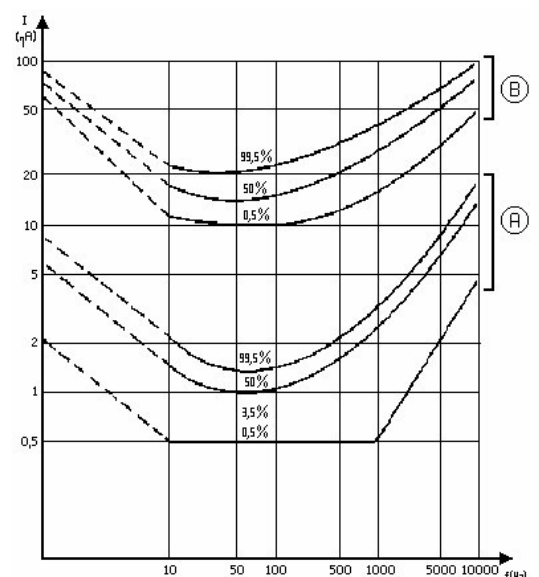
Grafico valido solo per correnti continue

1. Assenza di reazioni (si arriva alla percezione)
2. Nessun effetto fisiologico pericoloso
3. Possono verificarsi contrazioni muscolari e perturbazioni generalmente reversibili
4. Probabile fibrillazione ventricolare, arresto del cuore, arresto della respirazione, gravi ustioni.

Un altro fattore che influenza la pericolosità della folgorazione è il percorso che la corrente fa all'interno del corpo, la corrente, infatti, tende a seguire il percorso più breve verso il punto a minore potenziale; per questo motivo infilando le classiche due dita nella presa, la scarica transiterà all'interno della mano o, al massimo, interesserà il braccio. Se però si dovessero infilare nella presa un dito della mano destra e uno della sinistra, la corrente attraverserà il torace con conseguenze ben più pesanti.

La pericolosità della corrente elettrica è inoltre influenzata dalla frequenza. Ad altissima frequenza la pericolosità è minore perché le cellule non riescono a seguire le variazioni di corrente (è come se non ci fossero impulsi)

- A. soglia di percezione
- B. soglia di tetanizzazione



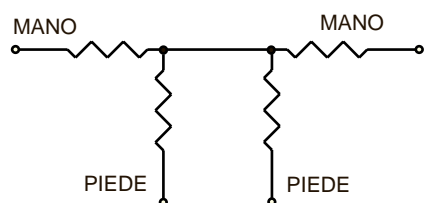
Ad altissima frequenza la corrente tende a passare all'esterno del corpo (effetto pelle) non influenzando gli organi vitali; peranto:

- la frequenza di 50 o 60 Hz, di uso comune negli impianti elettrici, è tra le più pericolose;
- a 10.000 Hz si ha una soglia di rilascio pari alla corrente continua;
- in prima approssimazione si può assumere che per frequenze superiori a 1 kHz la corrente limite di pericolosità è proporzionale alla frequenza:

$$I_{\text{LIMITE}}(f) = I_{\text{LIMITE}}(50) \cdot f$$

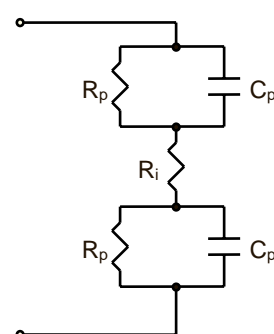
Resistenza elettrica del corpo umano

Alla frequenza di 50 Hz è lecito trascurare la capacità della pelle sia nel punto di entrata che in quello di uscita.



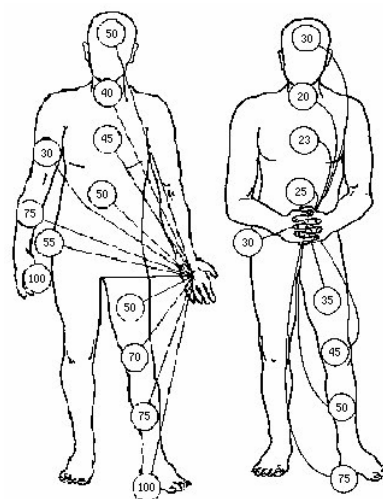
A frequenze superiori ciò non è più vero.

Il valore della resistenza della pelle è la somma della resistenza di contatto tra elettrodo e pelle e quella della pelle vera e propria.



La resistenza elettrica del corpo umano varia in funzione di:

- Stato della pelle
 - se umida è pari circa a 650 Ω
 - se secca è pari circa a 50 k Ω
- Durata del contatto
- Superficie di contatto
- Pressione di contatto
- Tensione
- Tasso di alcool nel sangue
- Frequenza



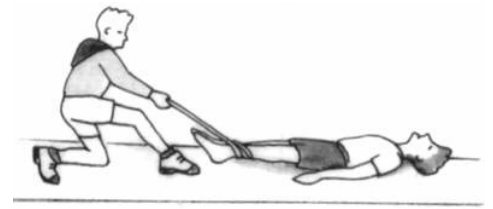
Inoltre la resistenza elettrica dipende dal percorso e può essere come somma di due termini:

$$R = R_{\text{esterna}} + R_{\text{interna}}$$

Il primo soccorso

La prima reazione istintiva è toccare l'infortunato per rendersi conto di come sta. Bisogna trattenersi, perché il corpo della vittima può essere ancora in contatto elettrico con la sorgente della scarica e la folgorazione può colpire anche il soccorritore che tocchi la vittima. In alcuni casi la situazione è evidentemente senza pericolo: ad esempio l'infortunato è caduto al suolo lontano dal contatto elettrico.

- La cosa migliore è staccare dalla sorgente della scarica: se è un elettrodomestico staccate la spina, se è un cavo togliete tensione all'impianto dall'interruttore centrale.
- Se ciò non è possibile staccate l'infortunato dal contatto elettrico senza toccarlo con le mani, ma usando un materiale isolante (una cinghia di pelle o di cuoio, un lenzuolo arrotolato, una corda asciutta, un palo di legno secco).



Attenzione però!!!



È importante che il soccorritore che esegue la manovra abbia scarpe isolanti. Si può anche cercare di allontanare il filo dal corpo dell'infortunato con i medesimi mezzi, ma è più pericoloso.

- Se la folgorazione è dovuta ad alta tensione (e quindi di solito non in casa) bisogna stare molto attenti perché il rischio che la corrente colpisca il soccorritore attraverso gli strumenti usati per staccare la vittima, è molto più grande. Ricordate che alcuni esperti del settore

sconsigliano in questi casi l'esecuzione del soccorso da parte di persone non competenti e consigliano di richiedere l'intervento dei vigili del fuoco. Attenzione: i pali che sembrano secchi spesso non lo sono; non avvicinarsi troppo al folgorato!

- Controllate respiro e battito cardiaco della vittima. Se sono assenti iniziate subito la Respirazione Artificiale

Se una persona cessa di respirare per qualunque motivo oppure presenta atti respiratori non ritmici, occorre intervenire immediatamente.

Una persona può sopravvivere senza ossigeno soltanto per 5/6 minuti!!!



Respirazione Artificiale

- Dopo aver disteso l'infortunato in posizione supina, cercare di estrarre eventuali corpi estranei dal cavo orale; poi tirare verso l'alto e indietro la mandibola, in modo da liberare i passaggi d'aria, accertandosi che la lingua dell'infortunato non ostruisca le vie respiratorie. Se, per incidente o altro, non è possibile aprirgli la bocca, si può praticare la respirazione artificiale anche attraverso il solo naso.
- Otturare le narici dell'infortunato usando pollice ed indice di una mano, inspirare e soffiare con un'azione continua nella bocca dell'infortunato (eventualmente interporre un fazzoletto o una garza). Controllare che il torace si sollevi di conseguenza. Il ritmo, per un adulto, deve essere di 15-20 soffi al minuto.

Massaggio Cardiaco

In parallelo alla respirazione artificiale può essere necessario eventualmente il Massaggio Cardiaco. Trasportate rapidamente in un pronto soccorso medico. Nell'eventualità che si debba sottoporre l'infortunato a massaggio cardiaco, occorre essere sicuri che il cuore non batta più e che non vi siano gravi traumi al torace; infatti, in questi casi, massaggiando, si rischia di peggiorare la situazione in quanto frammenti di costole potrebbero conficcarsi nel cuore. Ricordare che il massaggio cardiaco è un intervento difficile consigliato solo ad esperti (si possono procurare seri danni all'infortunato).



Con le braccia rigide, mettere il palmo di una mano sul dorso dell'altra e appoggiarsi sul cuore dell'infortunato, al centro dello sterno e premere in modo energico, eseguire questa operazione con una frequenza di circa 60 colpi al minuto.

Se il paziente respira, dedicatevi agli altri problemi. Il paziente può essere senza coscienza, o avere delle Convulsioni (sono dei movimenti involontari non coordinati e violenti degli arti, della testa o dell'intero corpo che si verificano all'improvviso e si associano a perdita di coscienza) o delle Ustioni più o meno gravi. Fate il minimo indispensabile, tenete l'infortunato al caldo, strettamente sorvegliato e trasportatelo dal medico.

Ustione

Sono le lesioni della cute e dei tessuti sottostanti provocate dal calore. Il calore eccessivo determina la morte delle cellule a partire dagli strati più superficiali e a seconda della profondità cui è giunto i danni vengono classificati in ustioni di primo, secondo e terzo grado. Saper riconoscere il grado delle ustioni è importante.

USTIONI DI:	1° GRADO	2° GRADO	3° GRADO
Aspetto della superficie ustionata	Secca, arrossata	Bolle (flittene), oppure superficie umida quando la bolla si è formata e subito si è rotta	Pallida senza bolle
Sensibilità	Dolore intenso	Dolore intenso	La superficie ustionata è insensibile per lesioni delle fibre nervose del dolore
Cause abituali	Esposizione al sole o contatto con corpi modicamente caldi	Esposizione ai liquidi caldi o fiamma per breve tempo	Prolungata esposizione a liquidi caldi o fiamma, folgorazione
Guarigione	Spontanea in 3-6 giorni	Spontanea in 10-30 giorni	Richiedono di solito un intervento chirurgico

È necessario interrompere il contatto elettrico senza toccare il folgorato. Poi:

- definite rapidamente il grado ed estensione dell'ustione;
- le ustioni di I grado di solito non richiedono trattamento. Può essere utile l'applicazione di pomate adatte;
- nelle ustioni di II grado l'applicazione immediata di ghiaccio o impacchi di acqua fredda mantenuta per 20 minuti è utile a ridurre il dolore;
- lavate abbondantemente l'ustione per allontanare i detriti con un disinfettante non alcolico;
- le bolle possono essere lasciate integre. Le più grandi conviene che siano punte con un ago sterilizzato alla fiamma;

- coprite l'ustione con garza grassa o non aderente, al di sopra della quale ponete abbondanti garze o cotone. La medicazione deve essere fermata con cerotti se è poco estesa, o meglio fasciate con una benda;
- le ustioni che necessitano di trattamento medico devono essere solo temporaneamente coperte con garze pulite imbevute di acqua;
- le ustioni estese (II e III grado superiori al 10% della superficie corporea) possono determinare gravissime disidratazioni: è bene far bere abbondantemente (acqua con un cucchiaino da tè di sale da cucina per litro) in attesa dell'arrivo in ospedale;
- la medicazione deve essere rifatta ogni due giorni mettendo a nudo la cute, disinfettando e ricoprendo nella maniera già detta;
- l'evoluzione delle bolle va accuratamente sorvegliata: quando si infettano diventano torbide e giallastre e vanno lacerate per far fuoriuscire il pus; poi medicate.

Prevenzione

Una gran parte degli incidenti è dovuta a fili scoperti, interruttori o spine rotte, guasti agli apparecchi elettrici, uso improprio degli stessi e attività elettriche eseguite da inesperti. Le folgorazioni ad alta tensione possono avvenire accidentalmente (caduta di un filo) ma anche per imprudenza nell'avvicinarsi agli stessi, le disgrazie dovute ad un fulmine possono essere evitate in gran parte dei casi con una condotta razionale.

Cosa non fare

- Toccare con le mani la vittima se questa è ancora sotto tensione.
- Far rialzare a forza la vittima; si deve lasciare che riprenda le forze lasciandola sdraiata, meglio se coperta e isolata dal terreno.
- Cercare di somministrare alla vittima alcol o farmaci di qualsiasi genere.
- Non rivolgersi al medico se c'è stata una perdita di conoscenza

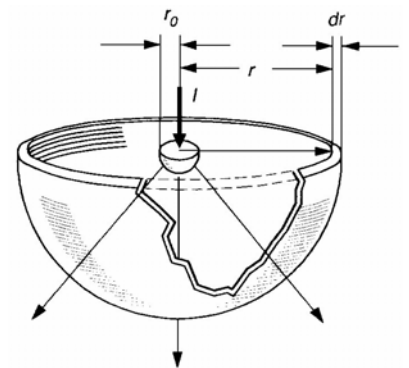
Impianti di terra

La corrente elettrica quando attraversa il corpo umano generalmente si richiude tramite il terreno, tranne il caso in cui una persona isolata dallo stesso si trovi in contatto simultaneo con due punti a diverso potenziale. La terra è anche coinvolta, direttamente o indirettamente, in molti sistemi di protezione.

Resistenza del terreno

Gli elettrodi immersi nel terreno prendono il nome di dispersori. Se si considera un dispersore emisferico, sufficientemente lontano dall'elettrodo di ritorno, per ogni strato di terreno di spessore dr vale la relazione:

$$dR = \rho \cdot \frac{dr}{2\pi r^2}$$



La resistenza dR di uno strato di spessore dr è tanto più piccola quanto più è lontana dal dispersore (sezione maggiore). Per ottenere la resistenza totale R_T del terreno, si deve integrare dR da r_0 a ∞ :

$$R_T = \rho \int_0^{\infty} \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

La resistenza del terreno si concentra quasi tutta in prossimità del dispersore; infatti tra r_0 e $2r_0$ si ha la metà della resistenza totale di terra:

$$R_T = \rho \int_{r_0}^{2r_0} \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{1}{2} R_T$$

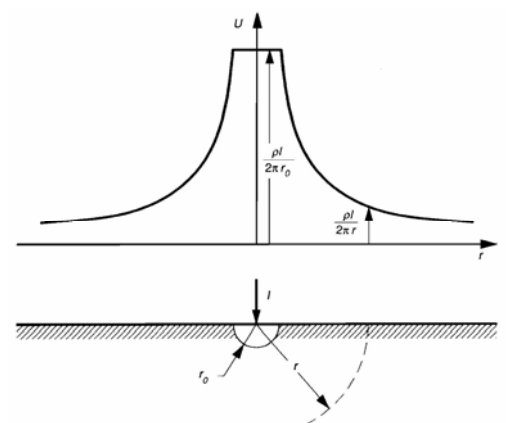
Tutti i dispersori vengono generalmente ricondotti a quello emisferico, considerando un raggio equivalente pari a:

$$r_e = \frac{\rho}{2\pi R_T}$$

Potenziale del terreno

La c.d.t. causata da una corrente I che percorre il dispersore vale:

$$U = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

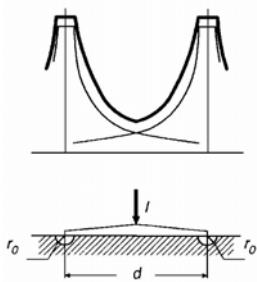


ponendo nullo il potenziale all'infinito. Per cui in prossimità del dispersore il terreno assume il potenziale più elevato.

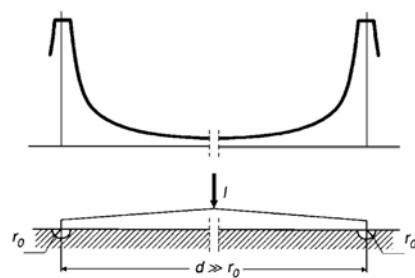
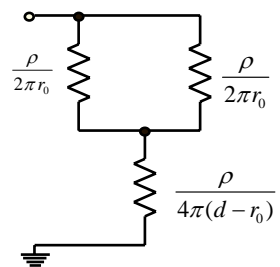
Dispersori in parallelo

Se nel terreno sono presenti due dispersori posti alla distanza d tra loro e percorsi dalla stessa corrente, essi assumeranno il medesimo potenziale pari a:

$$U = \frac{I}{2} \cdot \frac{\rho}{2\pi r_0} + \frac{I}{2} \cdot \frac{\rho}{2\pi(d-r_0)}$$



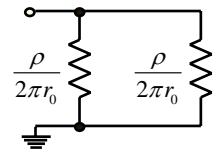
Se i due dispersori sono vicini fra loro, ognuno influenzerà il potenziale dell'altro, cioè il potenziale assunto da ogni dispersore è maggiore di quello che avrebbe se fosse solo.



Viceversa, nel caso in cui i due dispersori siano molto lontani,

cioè $d \gg r_0$, allora il termine $\frac{\rho}{2\pi(d-r_0)}$

diventa trascurabile, per cui i due potenziali si possono considerare indipendenti. In queste condizioni le due resistenze si possono considerare in parallelo tra loro.



Resistenza verso terra di una persona

La resistenza del contatto piede-terreno può essere approssimata a quella di una piastra circolare di raggio r_p , quindi esprimibile mediante la relazione:

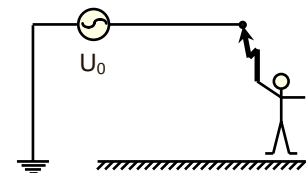
$$R_T = \frac{2\rho}{4r_p}$$

Se si approssima la superficie del piede a quella di una piastra di raggio pari a 0,1 m, si ottiene una resistenza di contatto di valore:

$$R_T = 4\rho$$

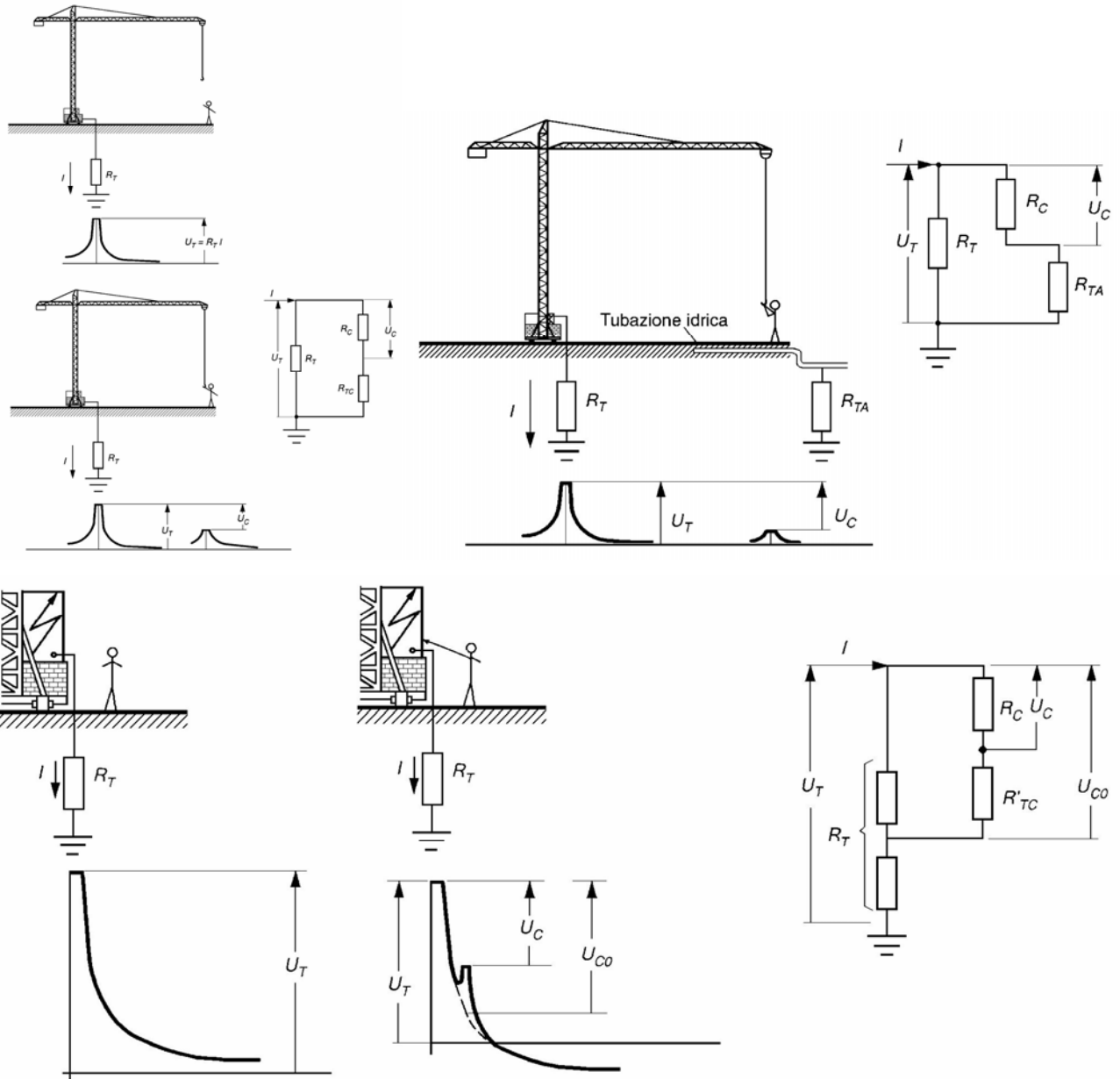
con ρ espressa in $\Omega \cdot m$. poiché i due piedi si possono considerare in parallelo, la resistenza verso terra complessivamente vale:

$$R_{TC} = 2\rho$$



Tensione di contatto

Si definisce *tensione totale* U_T il prodotto della resistenza di terra R_T per la corrente di guasto I . La *tensione di contatto* U_C è invece la tensione alla quale il corpo umano è soggetto in caso di guasto. Alcuni esempi in cui una persona può essere sottoposta ad una tensione in caso di guasto sono i seguenti:



Se il contatto avviene vicino al dispersore, la tensione a cui è sottoposta una persona è minore di quella che si avrebbe nel caso in cui il contatto avvenisse lontano.

Tensione di passo

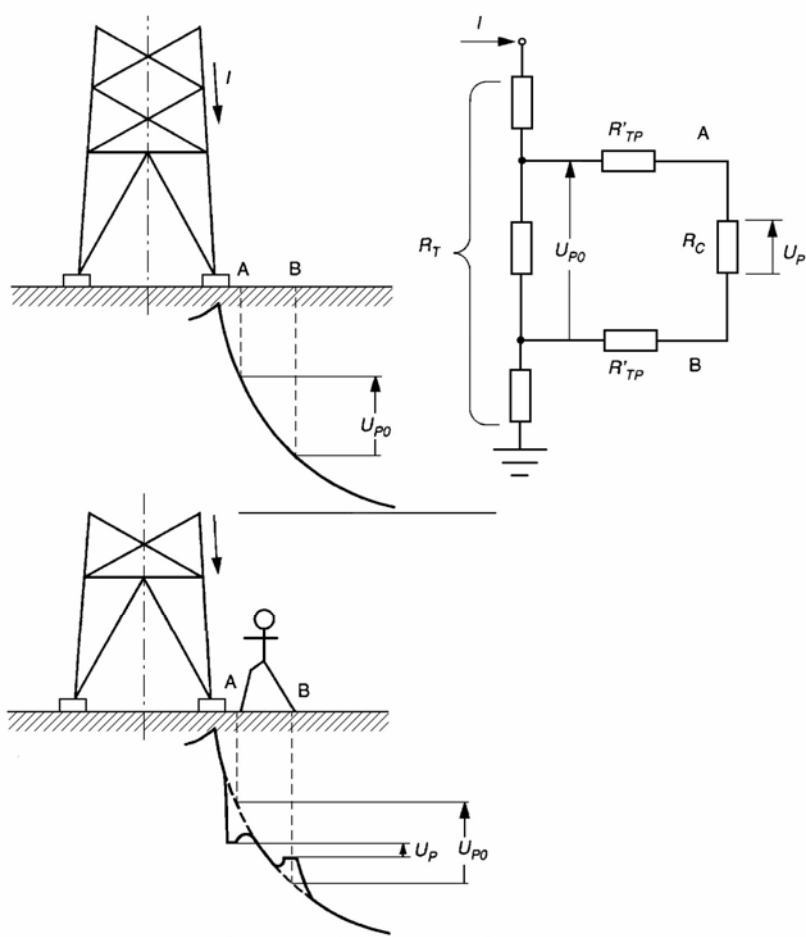
Come si è visto in precedenza, in caso di guasto attorno al dispersore si ha un gradiente di potenziale. Se la corrente di guasto fosse molto elevata, una persona che si trovi in prossimità del

dispersore potrebbe trovarsi in pericolo poiché calpesterebbe due punti a potenziale diverso. Si definisce *tensione di passo* il valore della d.d.p. tra due punti del terreno posti a distanza di 1 m

U_{p0} tensione di passo a vuoto

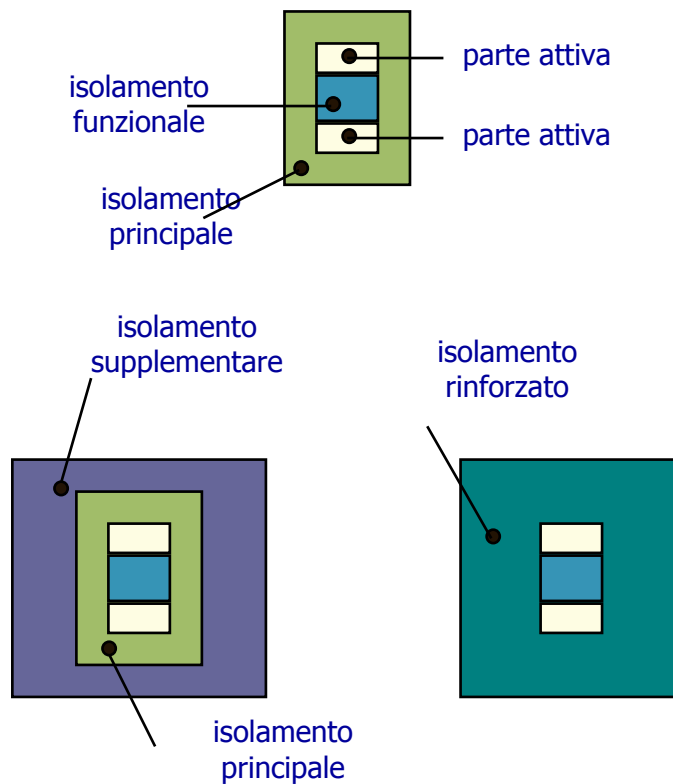
U_p tensione di passo

R_{TP} resistenza del terreno tra il piede e il dispersore



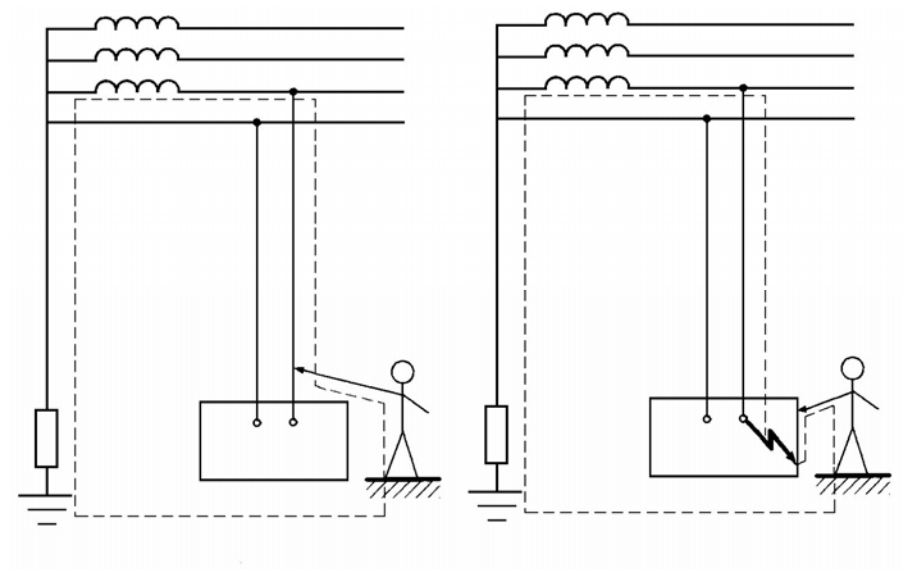
Modalità d'isolamento

Per evitare il contatto tra parti attive di un sistema elettrico si usa del materiale isolante che prende il nome di isolamento funzionale. L'isolamento che viene usato per proteggere le persone si chiama isolamento principale, per rendere il sistema ancora più sicuro si usa un isolamento supplementare (doppio isolamento) e l'isolamento rinforzato.



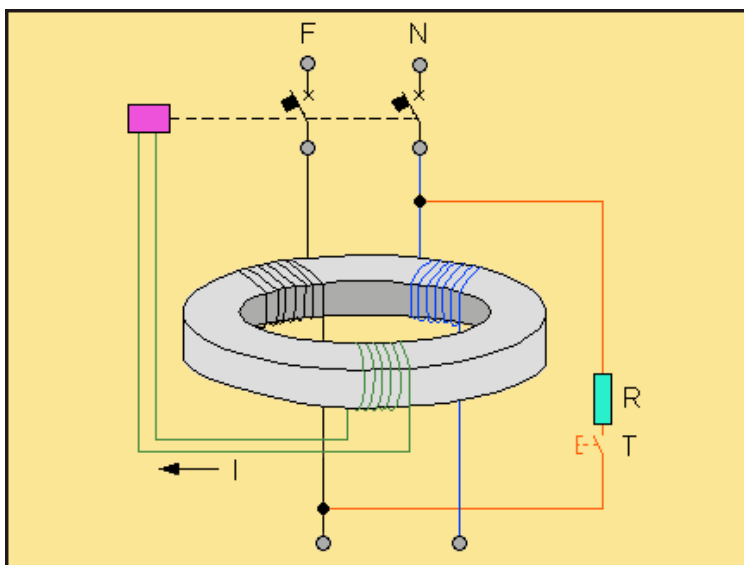
Contatti diretti ed indiretti

Se si entra in contatto con una parte dell'impianto normalmente in tensione (conduttore, fusibile) che è diventato casualmente accessibile si parla di contatto diretto. Si dice contatto indiretto se una persona va in contatto con una massa o con una parte metallica connessa ad essa durante un guasto dell'isolamento. Il secondo è sicuramente il più pericoloso.

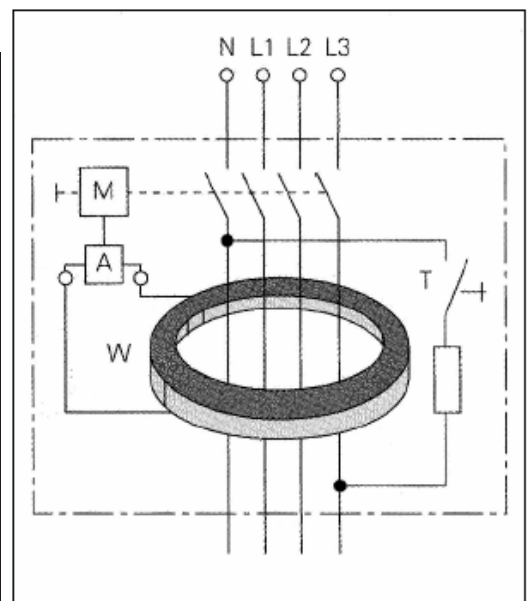


Protezione Differenziale

L'interruttore differenziale è un dispositivo amperometrico di protezione che interviene solo quando l'impianto ha un guasto di corrente verso terra. Questo dispositivo, sensibile alla corrente omopolare, esegue in continuazione la somma vettoriale delle correnti di linea del sistema monofase o trifase con neutro a terra e finché questa somma è uguale a zero, consente l'alimentazione elettrica dell'utenza; la interrompe invece rapidamente quando la risultante supera un valore prefissato secondo la sensibilità dell'apparecchio.



Interruttori differenziali: monofase



trifase

La protezione data dagli interruttori differenziali contro le tensioni di contatto e il pericolo di elettrocuzione, oltre ad essere fondamentale in tutte le comuni applicazioni impiantistiche, risulta indispensabile in particolari situazioni per le quali i fattori di rischio possono incrementarsi; in tal senso si ricordano alcuni dei più significativi impieghi specifici:

- protezione dei locali ad uso medico (norma CEI 64-4), riguardante non solo i grandi complessi ospedalieri, le case di cura e gli ambulatori, ma anche i gabinetti medici e dentistici, i locali per trattamento idro e fisio-terapeutico, i complessi per cure termali, ecc.
- protezione degli utenti e dei manutentori di ascensori e montacarichi
- protezione dei cantieri edili - protezione dei locali di balneazione pubblici e privati (docce, bagni, piscine, saune) - protezione degli utenti di apparecchi portatili non a doppio isolamento e di apparecchi da giardinaggio
- protezione degli utenti di campeggi.

Tra i vantaggi derivanti dall'utilizzo degli interruttori differenziali non va infine dimenticata la protezione che tali apparecchi offrono contro gli incendi innescabili da dispersioni a terra non rilevate dai normali interruttori automatici.

Classificazione

In base alla sensibilità di intervento i differenziali si suddividono in:

- differenziali a bassa sensibilità (0,3A - 0,5A - 1 A)
- differenziali ad alta sensibilità (0,01 A - 0,03A).

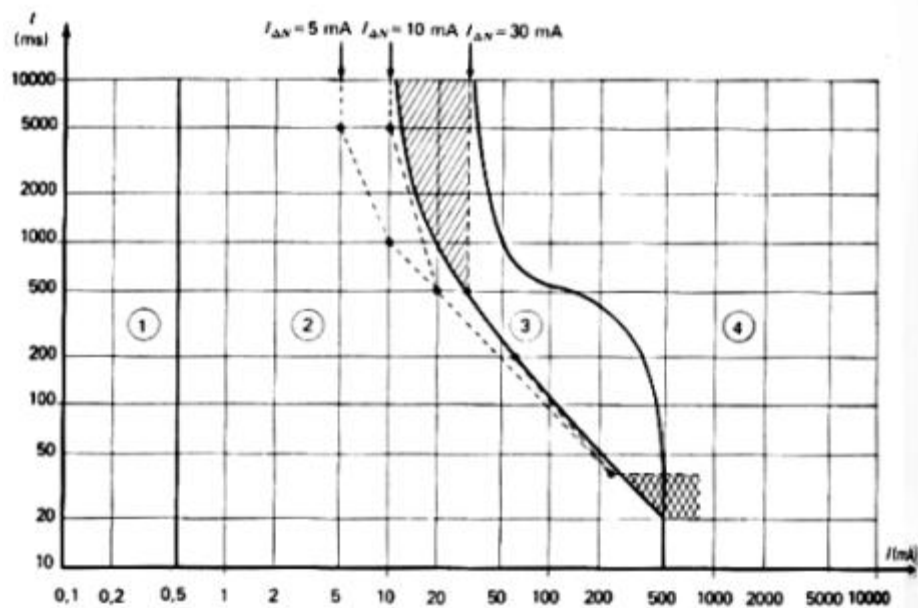
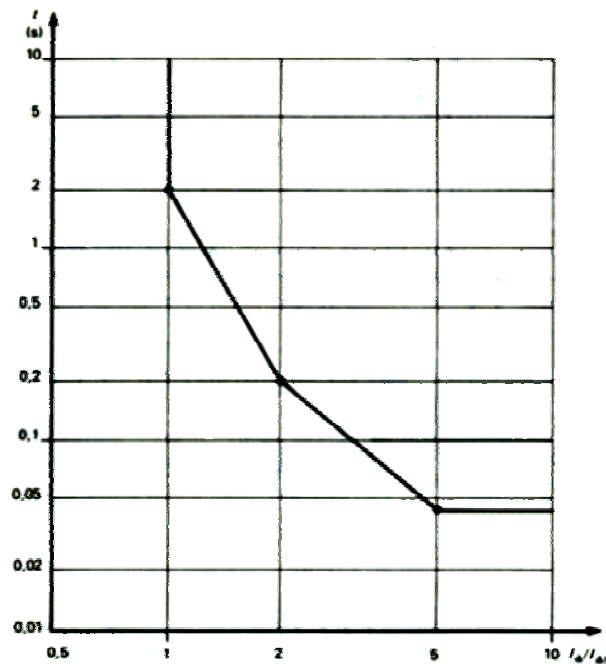
I differenziali a bassa sensibilità vengono coordinati con la resistenza dell'impianto di terra (sistema TT) secondo la formula $I_{\Delta n} \leq 50/R_T$ (norma CEI per impianti elettrici utilizzatori CEI 64-8 par. 5.4.06) per realizzare la protezione contro i contatti indiretti, per evitare cioè che una massa metallica accessibile, normalmente isolata, possa andare in tensione per un guasto dell'isolamento. I differenziali ad alta sensibilità sono impiegati per la protezione contro i contatti diretti. Vengono anche detti a sensibilità fisiologica perché l'utente che inavvertitamente tocca una parte in tensione (un filo spelato, un morsetto di un apparecchio con calotta di protezione rotta, ecc.) oppone al passaggio della corrente verso terra unicamente la resistenza ohmica del suo corpo.

L'interruttore differenziale deve quindi intervenire non appena questa corrente supera il valore di sicurezza ed interromperla in un tempo brevissimo. Questo tipo di protezione è particolarmente adatto per l'uso domestico ed in tutti quei casi in cui è presente il rischio di contatto elettrico diretto con parti in tensione. La norma CEI 64-8;V1 rende questi apparecchi obbligatori in tutti i locali da bagno, docce e piscine per uso privato e pubblico, nelle zone dove è possibile installare prese a spina e non si dispone di trasformatori di isolamento o di bassissima tensione di sicurezza. A maggior ragione i differenziali ad alta sensibilità, realizzano contemporaneamente anche la protezione contro i contatti indiretti.

Le prestazioni di questi dispositivi sono definite da alcune grandezze caratteristiche:

- Numero dei poli - 2P, 3P, 4P;
- Tensione nominale - valore di tensione per la quale l'interruttore è destinato a funzionare;
- Corrente nominale (I_n) - valore di corrente che l'apparecchio è in grado di portare ininterrottamente;
- Corrente differenziale nominale d'intervento $I_{\Delta n}$ (Norme CEI EN 61008-1 e CEI EN 61009-1) - minimo valore della corrente differenziale che determina l'apertura dei contatti entro tempi specificati. I valori normalizzati sono 0,01-0,03-0,1-0,3-0,5-1A;
- Corrente differenziale nominale di non intervento $I_{\Delta n0}$ (Norme CEI EN 61008-1 e CEI EN 61009-1) - valore massimo della corrente differenziale che non provoca l'apertura dei contatti. Il valore normalizzato, anche se sono ammessi tempi diversi, è $I_{\Delta n0} = 0,5 I_{\Delta n}$;

- Caratteristiche d'intervento - definiscono i valori corrente differenziale/tempo d'intervento che caratterizzano il funzionamento del dispositivo:



In figura, le caratteristiche di intervento di interruttori differenziali con $I_{dN} = 5$ mA, $I_{dN} = 10$ mA e $I_{dN} = 30$ mA, sono messe a confronto con le zone di pericolosità della corrente in funzione del tempo. La zona quadrettata sfugge all'azione protettiva degli interruttori differenziali, qualunque sia I_{dN} . La protezione manca anche nella zona tratteggiata, ma solo per gli interruttori con $I_{dN} = 30$ mA

Protezione dai contatti indiretti

La protezione contro i contatti indiretti consiste nel prendere le misure intese a proteggere le persone contro i pericoli risultanti dal contatto con parti conduttrici che possono andare in tensione in caso di cedimento dell'isolamento principale.

I metodi di protezione contro i contatti indiretti sono classificati come segue:

- Protezione mediante interruzione automatica dell'alimentazione;
- Protezione senza interruzione automatica del circuito (doppio isolamento, separazione elettrica, locali isolati, locali equipotenziali);
- Alimentazione a bassissima tensione.

La protezione mediante l'interruzione automatica dell'alimentazione è richiesta quando, a causa di un guasto, si possono verificare sulle masse tensioni di contatto di durata e valore tali da rendersi pericolose per le persone.

Le prescrizioni da ottemperare per conseguire la protezione contro i contatti indiretti sono stabilite dalle norme CEI 64-8 per gli impianti elettrici a tensione non superiore a 1000V in corrente alternata e a 1500V in corrente continua e dalle norme CEI 11-8 per gli impianti utilizzatori in media e alta tensione.

Sistemi di distribuzione

I tipi di sistemi di distribuzione sono definiti in funzione del loro sistema di conduttori attivi e del loro modo di collegamento a terra. I sistemi di conduttori attivi considerati dalla norma CEI 64-8 sono: monofase in corrente alternata a 2 o 3 conduttori, trifase in corrente alternata a 3 o 4 conduttori, in corrente continua a 2 o 3 conduttori. I modi di collegamento a terra sono classificati secondo i seguenti codici: Prima lettera: situazione del sistema di alimentazione verso terra: T = collegamento diretto a terra di un punto, in c.a. in genere il neutro; I = isolamento da terra, oppure collegamento a terra di un punto, in c.a. in genere il neutro, tramite un'impedenza. Seconda lettera: situazione delle masse dell'impianto elettrico rispetto a terra: T = masse collegate direttamente a terra; N = masse collegate al punto messo a terra del sistema di alimentazione. Eventuali lettere successive: disposizione dei conduttori di neutro e di protezione: S = funzioni di neutro e di protezione svolte da conduttori separati; C = funzioni di neutro e di protezione svolte da un unico conduttore (conduttore PEN).

Sistema di distribuzione TT

Il sistema TT ha un punto collegato direttamente a terra e le masse dell'impianto collegate ad un impianto di terra elettricamente indipendente da quello del collegamento a terra del sistema di alimentazione. In caso di guasto a terra, il circuito percorso dalla corrente si richiude attraverso il terreno, in quanto il neutro del sistema e la massa interessata dal guasto fanno capo a dispersori separati; il valore della corrente di guasto può essere molto contenuto. La norma CEI 64-8 nel caso di sistemi TT prevede che per attuare la protezione dai contatti indiretti deve essere soddisfatta la condizione:

$$R_A \leq \frac{50V}{I_a}$$

in cui:

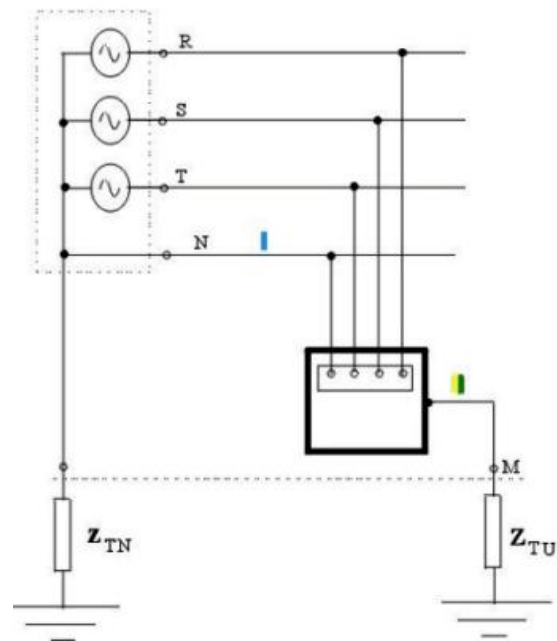
- R_A è la somma delle resistenze di terra dei conduttori e dei dispersori;
- I_a è la corrente che provoca l'intervento automatico del dispositivo di protezione.

Se il dispositivo di protezione è di tipo differenziale, I_a è la corrente nominale differenziale $I_{\Delta n}$.

Quando il dispositivo di protezione è un dispositivo contro le sovracorrenti, esso deve essere:

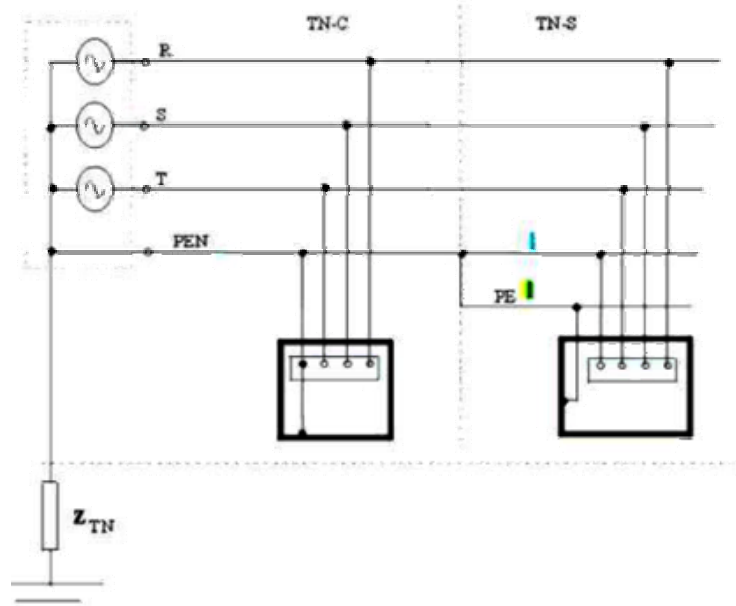
- Un dispositivo avente una caratteristica di funzionamento a tempo inverso, ed in questo caso I_a deve essere la corrente che ne provoca l'intervento automatico entro 5 s;
- Un dispositivo con una caratteristica di funzionamento a scatto istantaneo ed in questo caso I_a deve essere la corrente minima che ne provoca lo scatto.

Da ciò deriva che il valore di R_T risulta notevolmente diverso impiegando relè magnetotermici o relè differenziali. Infatti con i primi si richiedono valori di resistenza totale di terra molto bassi, anche inferiori all'ohm, mentre per i secondi si possono realizzare impianti di terra con resistenza anche dell'ordine del migliaio di ohm. Considerando la grande difficoltà per ottenere e mantenere nel tempo livelli di R_T così bassi da garantire la protezione con interruttori automatici magnetotermici, l'impiego del differenziale diventa pressoché indispensabile.



Sistema di distribuzione TN

Il sistema TN ha un punto direttamente collegato a terra mentre le masse dell'impianto sono collegate allo stesso punto per mezzo del conduttore di protezione. In caso di guasto a terra del sistema, il circuito percorso dalla corrente di guasto risulta costituito dai soli conduttori metallici, senza interessare l'impianto di dispersione a terra; il valore della corrente di guasto può essere molto elevato.



Si distinguono i seguenti tipi di sistemi TN, a seconda della disposizione dei conduttori di neutro:

- TN-S: il conduttore di neutro e di protezione sono separati;
- TN-C: le funzioni di neutro e di protezione sono combinate in un unico conduttore (PEN);
- TN-C-S: le funzioni di neutro e di protezione sono combinate in un unico conduttore solo in una parte del sistema.

La norma CEI 64-8, nel caso di sistema TN, per attuare la protezione mediante dispositivi di massima corrente a tempo inverso o dispositivi differenziali richiede soltanto che sia soddisfatta, in qualsiasi punto del circuito, la seguente condizione:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0$$

dove:

- U_0 è la tensione nominale verso terra dell'impianto, in volt
- Z_s è l'impedenza dell'anello di guasto, in ohm, per guasto franco a massa.
- I_a è il valore, in ampere, della corrente che provoca l'intervento del dispositivo di protezione, entro il tempo di seguito definito:
 - Correnti terminali che alimentano, tramite o senza prese a spina, componenti elettrici mobili, portatili o trasportabili. I tempi massimi di interruzione sono definiti nella seguente tabella:

U_0 [V]	Tempo di interruzione [s]
120	0,8
230	0,4
400	0,2
> 400	0,1

- Correnti di distribuzione: il tempo massimo di interruzione è di 5 s;
- Correnti terminali che alimentano componenti elettrici fissi: il tempo massimo di interruzione è di 5 s purché siano verificate alcune condizioni analizzate all'art. 413.1.3.5 della norma CEI 64-8, in caso contrario si ricava mediante la tabella riportata precedentemente.

Poiché nei sistemi TN un guasto franco a massa si traduce in un corto circuito in quanto la corrente di guasto percorre i conduttori di fase e di protezione non interessando in pratica l'impianto di terra, le correnti di corto circuito possono assumere valori elevati nel qual caso la protezione contro i contatti indiretti può essere assicurata da interruttori solo magnetotermici.

La quantità U_0/Z_s deve essere valutata nel caso peggiore, cioè con l'impedenza di guasto di valore massimo, a cui corrisponde la corrente di corto circuito minima:

$$\frac{U_0}{Z_s} = I_{cc \min}$$

nel caso in cui la condizione di protezione non fosse soddisfatta con l'impiego di interruttori magnetotermici, è necessario ricorrere a dispositivi differenziali.

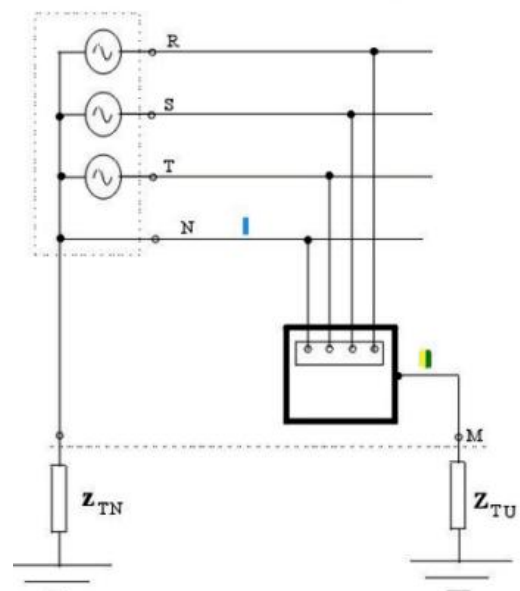
L'impiego di dispositivi differenziali soddisfa generalmente la condizione di protezione e non richiede il calcolo dell'impedenza totale dell'impianto Z_s . I relè differenziali non presentano alcun problema di coordinamento, in quanto per I_{An} elevate (3 A) ammettono impedenze dell'anello di guasto dell'ordine di diverse decine di Ω , che non si realizzano mai.

Per evitare interventi intempestivi dei dispositivi differenziali conviene installare sui circuiti di distribuzione apparecchi di tipo regolabile, impostando la massima corrente nominale differenziale ed il massimo ritardo; sui circuiti terminali è preferibile installare invece apparecchi istantanei con la massima sensibilità consentita.

Sistema di distribuzione IT

Gli impianti di tipo IT, isolati da terra (detti anche "flottanti" perché, in assenza di un riferimento, hanno un valore di tensione verso terra indeterminato) vengono impiegati dove sia ritenuto necessario usufruire di uno o più dei 5 vantaggi particolari che se ne possono ottenere e che possiamo schematicamente così riassumere:

1. sicurezza dell'operatore contro i contatti diretti o indiretti (mancando il ritorno attraverso la terra la



corrente non può circolare attraverso il corpo dell'operatore che entrasse in contatto con una parte attiva). Questo beneficio è limitato dalle capacità equivalenti di dispersione verso terra della linea che possono costituire una chiusura del circuito adatta anche a portate consistenti in caso di linee particolarmente lunghe.

2. continuità di servizio anche in caso di un primo guasto a terra. Attraverso la resistenza di guasto (quand'anche nulla) non circola una corrente significativa essendo il circuito aperto: si può quindi continuare ad operare fino a quando non si dovesse verificare un secondo guasto.
3. eliminazione di "punti caldi" che possono generare, in certi ambienti, pericoli d'incendio o d'esplosione. Per modesti cedimenti o deterioramenti dell'isolamento verso terra, in caso di impianti elettrici di tipo TN o TT si potrebbero verificare dispersioni di modesto valore, non sufficienti a provocare l'intervento delle protezioni automatiche (fusibili o interruttori). In questo caso in piccole aree di isolamento deteriorato si potrebbero raggiungere alti valori di corrente specifica con effetto di un riscaldamento concentrato pericoloso,
4. più agevole messa a terra delle carcasse metalliche. La normativa ammette, per i circuiti di tipo IT, valori più elevati di resistenza nella messa a terra.
5. possibilità di programmare la manutenzione degli impianti elettrici per quanto riguarda lo stato dell'isolamento verso terra.

I vantaggi di un sistema IT sono assicurati da un buon controllo dell'isolamento.

I 5 vantaggi offerti dal sistema IT hanno evidentemente una diversa valenza a seconda dell'applicazione. In linea generale la prestazione di gran lunga più usufruita è la garanzia di continuità di servizio anche in caso di primo guasto a terra, spesso fondamentale in impianti complessi o costosi o critici dove l'interruzione del servizio comporta conseguenze gravosissime in termini di sicurezza (si considerino gli ospedali, i mezzi di trasporto pubblico, ecc.) o in termini di costi (per interruzione di servizio nei settori di pubblica utilità, per arresti di produzione con scarti di materiale e costi di riavviamento, per mancata alimentazione di centri d'elaborazione di dati, ecc. ecc.).

La sicurezza dell'operatore (e dell'utente) può diventare di pari importanza in applicazioni come quelle ospedaliere (in questi casi la lunghezza della rete viene ridotta al minimo indispensabile per evitare l'effetto delle dispersioni attraverso le capacità distribuite). La riduzione dei punti caldi diventa importante negli impianti in luoghi con pericolo d'incendio o d'esplosione. La più agevole messa a terra delle carcasse può interessare ad esempio gli utilizzatori di generatori mobili, impiegati nelle più disparate condizioni ambientali. Il controllo permanente dello stato dell'isolamento permette, in tutte le applicazioni, la manutenzione programmata con i conseguenti risparmi in termini di tempo e di costi.

Poiché i vantaggi finora elencati sono disponibili solo se il circuito è effettivamente isolato, il livello dell'isolamento di un circuito IT deve essere permanentemente tenuto sotto controllo con attivazione di un allarme in caso di discesa sotto un valore di soglia prefissato. L'apparecchio per il controllo dell'isolamento dispone spesso di regolabilità della soglia dall'allarme, di una seconda soglia di preallarme e di segnalazione del valore d'isolamento misurato: si può allora tenere sotto controllo l'andamento del deterioramento progressivo dell'isolamento, studiarne le cause e soprattutto predisporre e programmare una manutenzione preventiva che permetta di intervenire strategicamente riducendo il rischio di dover interrompere il servizio inaspettatamente per il verificarsi di un secondo guasto a terra.

Le più complete e moderne misure di sorveglianza dell'isolamento nei circuiti IT prevedono inoltre sistemi, manuali o automatici, per la localizzazione dei punti di guasto o di basso isolamento, facilitando la diagnosi e l'intervento di manutenzione.

Con la sorveglianza continua si conoscono in anticipo i deterioramenti progressivi (anche "fisiologici") dell'isolamento o i collegamenti a diramazioni difettose con un tempestivo riconoscimento di ogni tipo di dispersione pericolosa per la rete controllata. Viene così resa concretamente possibile la manutenzione preventiva e programmata. Naturalmente il vantaggio di poter tempestivamente essere informati sullo stato di isolamento verso terra di un impianto elettrico è tanto maggiore quanto più affidabile è la misura effettuata dagli strumenti. I controllori d'isolamento (IMD = insulation monitor device) nel caso di circuiti IT devono essere realizzati con caratteristiche tecniche opportune per fornire informazioni attendibili ed accurate.

A titolo esemplificativo si possono considerare i circuiti che comprendano azionamenti per motori a velocità variabile o sistemi di alimentazione d'emergenza con convertitori. Sono queste situazioni sempre più frequenti in sistemi di automazione o in circuiti dove è richiesta la continuità nell'alimentazione. Ebbene, gli "inverter" presenti in tali reti elettriche rendono particolarmente delicato il rilevamento delle dispersioni poiché ci si trova in presenza di parti di circuito in corrente alternata, parti in corrente continua e parti con corrente pulsante o deformata con intense sorgenti di disturbi.

In questi casi il controllore d'isolamento deve essere di tipo attivo, sovraimporre alla rete tenuta sotto controllo un segnale codificato variabile in funzione delle capacità distribuite della linea, avere valori di soglia d'allarme e un ritardo di risposta regolabili. Gli strumenti devono permettere la lettura dei valori misurati e attivare allarmi ottici locali e contatti per indicazione remota.