

APPUNTI DI “SICUREZZA ELETTRICA”

Dipartimento D.I.I.E.S.

Università “Mediterranea” di Reggio Calabria

Docente: Rosario Carbone

INDICE

Introduzione

Capitolo 1: Elementi di elettrofisiologia e contatti elettrici pericolosi

Capitolo 2: Protezione contro i contatti diretti

Capitolo 3: Classificazione dei sistemi elettrici e protezione contro i contatti indiretti

Capitolo 5: La sicurezza elettrica negli impianti fotovoltaici

Capitolo 6: Misure per il collaudo e le verifiche degli impianti elettrici

CAPITOLO 1

Elementi di elettrofisiologia e contatti elettrici pericolosi

Introduzione

I fenomeni elettrici inerenti il corpo umano e l'analisi degli effetti su di esso provocati da una corrente elettrica esterna sono studiati da una disciplina scientifica denominata *elettrofisiologia*.

I segnali elettrici connessi con l'attività biologica del corpo umano controllano il funzionamento dei suoi vari organi; essi vengono trasmessi dai neuroni del sistema nervoso.

Uno stimolo elettrico esterno, provocato da un contatto tra una persona ed una parte in tensione di un impianto elettrico, riesce ad interferire con il normale funzionamento elettrico del corpo umano se è in grado di produrre, nella zona di contatto con il corpo, un passaggio di corrente elettrica la cui intensità e durata siano superiori ad una soglia che prende il nome di "reobase" o anche soglia di eccitabilità.

Stimoli elettrici esterni che superano la sopra indicata soglia possono influire significativamente sulle funzioni vitali e risultare pericolosi o anche mortali.

La pericolosità di questi stimoli può variare a seconda dell'intensità e della natura della corrente, della durata del contatto elettrico esterno, della costituzione fisica della persona interessata dal contatto elettrico esterno (massa corporea e stato di salute) e della frequenza della corrente elettrica causata nel corpo umano a seguito del contatto. Correnti di elevata frequenza sono meglio sopportate di quelle a bassa frequenza; la corrente continua però (corrente a frequenza zero) è meno pericolosa di quella alternata a bassa frequenza (per esempio a 50 Hz), a causa di un fenomeno che avviene nella cellula sottoposta ad uno stimolo elettrico continuo detto di "accomodazione": in presenza di uno stimolo ininterrotto la cellula si adatta alla nuova situazione aumentando la sua soglia di eccitabilità e, quindi, riducendo il pericolo.

Poiché il valore di corrente percepibile da una persona dipende da molti fattori e non è facile determinarne i valori, per stabilire quali sono i valori minimi di corrente che superano la soglia di percezione da parte di una persona si ricorre a criteri statistici e/o a metodi sperimentali.

1.1 Effetti pericolosi della corrente elettrica

Una corrente elettrica nel corpo umano con caratteristiche che la pongono al di sopra della soglia di eccitabilità può produrre effetti pericolosi, generalmente consistenti in lesioni, più o meno gravi, al sistema nervoso, ai vasi sanguigni, all'apparato visivo e uditivo, all'epidermide ecc.. ma che possono consistere anche in letali alterazioni delle funzioni vitali. Di seguito vengono brevemente riassunti gli effetti più comuni.

Tetanizzazione

I muscoli interessati al passaggio della corrente elettrica da contatto si contraggono involontariamente; risulta difficile staccarsi dalla parte in tensione con cui si è venuti in contatto, prolungando il contatto stesso e provocando, così, effetti secondari ancora più dannosi.

Il valore di corrente per cui una persona è ancora in grado di staccarsi della sorgente elettrica si chiama "corrente di rilascio" e mediamente è compreso tra i 10mA e i 15mA, per una corrente con frequenza di 50Hz. Da notare che correnti di intensità molto elevate, solitamente, non producono la tetanizzazione, perché quando il corpo entra in contatto con esse l'eccitazione muscolare è talmente elevata che i movimenti muscolari involontari generalmente sono tali da staccare quasi immediatamente il soggetto della sorgente.

Arresto della respirazione

Se la corrente elettrica da contatto attraversa i muscoli che controllano il movimento dei polmoni, la loro contrazione involontaria altera il normale funzionamento del sistema respiratorio e il soggetto può morire soffocato o subire le conseguenze dei traumi dovuti all'asfissia. In questi casi il fenomeno è reversibile solo se si provvede con prontezza, anche con l'ausilio della respirazione artificiale, al soccorso dell'infortunato per evitare danni permanenti al tessuto cerebrale per mancata prolungata ossigenazione.

Fibrillazione ventricolare

E' l'effetto più pericoloso ed è dovuto alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fanno perdere il giusto ritmo al cuore. Questa anomalia è particolarmente pericolosa quando si verifica nella zona ventricolare perché diventa un fenomeno non reversibile, in quanto il fenomeno tende a persistere anche quando lo stimolo è cessato.

Meno pericolosa, grazie alla sua natura reversibile, è invece la fibrillazione atriale.

La fibrillazione ventricolare è reversibile entro i primi due o tre minuti soltanto se il cuore è sottoposto ad una scarica elettrica molto violenta capace di indurre la de-fibrillazione. Per raggiungere lo scopo viene impiegato, appunto, il "defibrillatore", un'apparecchiatura medica che applica un impulso elettrico al torace dell'infortunato tramite due elettrodi.

Il percorso della corrente elettrica da contatto nel corpo umano ha una grande influenza sulla probabilità d'innescò della fibrillazione, per questo motivo è stato definito un "fattore di percorso" che indica la pericolosità dei diversi percorsi seguiti dalla corrente, assumendo come mediamente pericoloso, quindi a riferimento, il percorso mano sinistra-piedi; più il fattore di percorso è alto più pericolosa è la corrente elettrica esterna, a parità di intensità e durata del contatto.

Tab. 1.1 - Fattori di percorso della corrente elettrica da contatto

<i>Percorso</i>	<i>Fattore di percorso</i>
Mani - Piedi	1
Mano sinistra - Piede sinistro	1
Mano sinistra - Piede destro	1
Mano sinistra - Entrambi i piedi	1
Mano sinistra - Mano destra	0,4
Mano sinistra - Dorso	0,7
Mano sinistra - Torace	1,5
Mano destra - Piede sinistro	0,8
Mano destra - Piede destro	0,8
Mano destra - Entrambi i piedi	0,8
Mano destra - Dorso	0,3
Mano destra - Torace	1,3
Glutei - Mani	0,7

Ustioni

Sono prodotte dal calore che si sviluppa per effetto Joule dalla corrente elettrica esterna che entra nel corpo attraverso il punto di contatto.

Se, per esempio, attraverso la pelle si innesca un flusso di corrente nel corpo umano la cui densità è superiore a circa 60 milliampere al mm², questa verrà carbonizzata in pochi secondi.

Da sottolineare che, carbonizzandosi la pelle aumenta la sua resistività e questo potrebbe provocare una riduzione d'intensità della corrente stessa, diminuendone la pericolosità.

1. 2. Limiti di pericolosità della corrente elettrica

I limiti convenzionali di pericolosità della corrente elettrica da contatto, sia alternata che continua, sono stati riassunti dalle norme in un grafico, in funzione della durata del contatto.

La figura seguente è esplicitamente riferita alle correnti alternate con frequenze 50Hz e 60 Hz.

Per la pericolosità della corrente continua o per correnti alternate a frequenze molto maggiori bisogna riferirsi ad appositi e distinti grafici, non riportati per brevità.

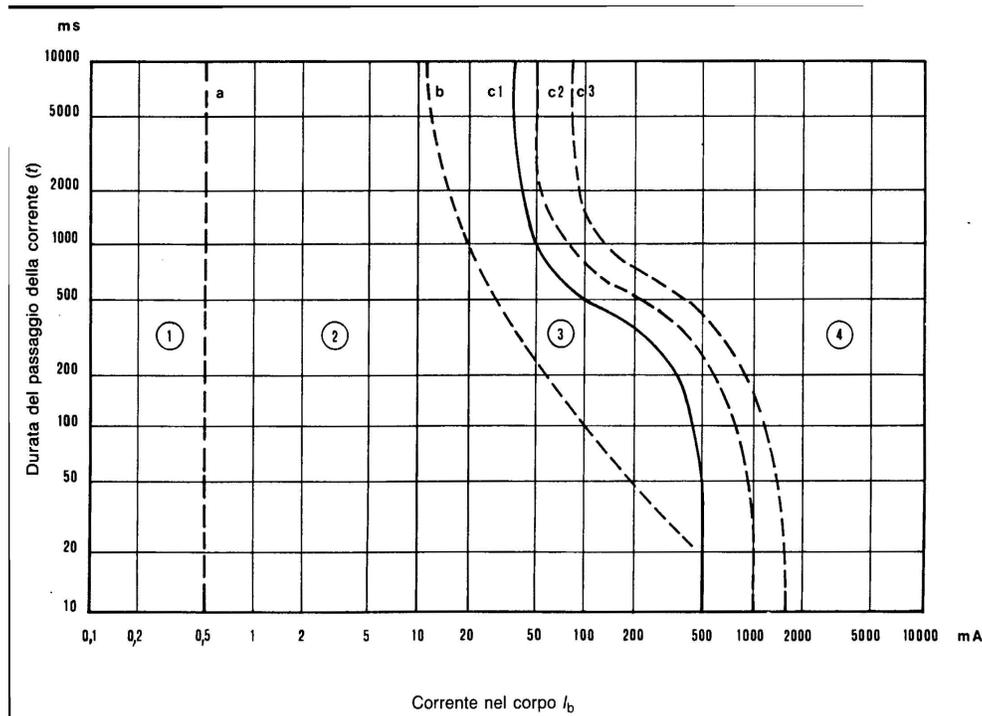


Fig. 1.1 Zone di pericolosità convenzionali della corrente elettrica alternata con frequenza compresa tra 15 e 100 Hz che fluisce lungo il percorso "mano sinistra - piedi".

Il piano tempo corrente risulta suddiviso in quattro zone.

Zona 1 – E' quella a sinistra della retta di equazione $I=0.5\text{mA}$, in cui normalmente non si hanno effetti dannosi ma solo, eventualmente, la percezione del passaggio della corrente elettrica esterna.

Zona 2 – E' compresa tra la zona 1 e la curva di equazione $I=10+10/t$ [mA], con asintoto verticale $I=10$ mA; non si hanno normalmente effetti fisiopatologici pericolosi ma il passaggio della corrente elettrica esterna è percepito, anche con un certo fastidio.

Zona 3 – Si trova tra la zona 2 ed una curva denominata "soglia di fibrillazione ventricolare"; possono verificarsi effetti pericolosi anche se quasi sempre reversibili. Essi possono divenire molto pericolosi e/o mortali se a causa del fenomeno della tetanizzazione, che impedisce il rilascio e prolunga la durata del contatto, dalla zona 3 ci si porta nella zona 4.

Zona 4 - La pericolosità è molto grande ed aumenta allontanandosi dalla "soglia di fibrillazione ventricolare" prima descritta. E' molto probabile l'innesco della fibrillazione, con

conseguente arresto cardiaco o arresto della respirazione; la probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta fino a circa il **5% (curva c1)**, al **50% (curva c2)**, al **95%** al di là della curva c3; molto probabili anche le ustioni.

Nella figura 1.2 sono riportate le curve di pericolosità della corrente continua.

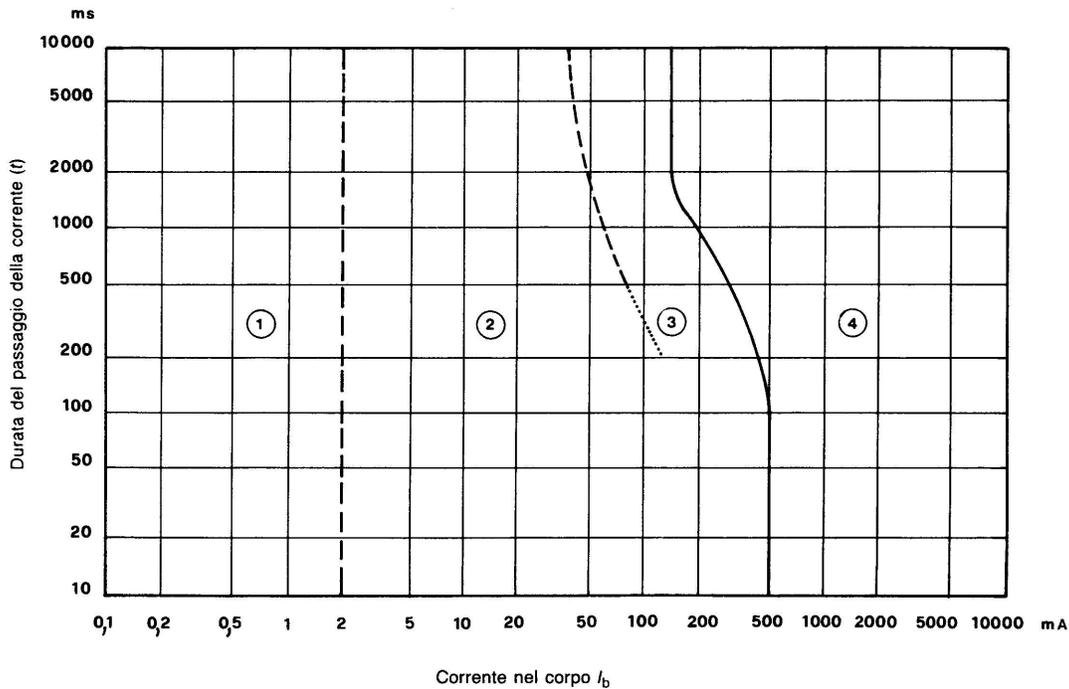


Fig. 1.2 Zone di pericolosità convenzionali della corrente continua, lungo il percorso "mano sinistra - piedi".

Il significato delle zone 1, 2, 3 e 4 rimane lo stesso della precedente figura relativa alla corrente alternata di frequenza 15-100 Hz.

La minore pericolosità della corrente continua, rispetto alla corrente alternata di frequenza compresa tra 15-100 Hz si può esprimere in modo sintetico attraverso l'introduzione del cosiddetto "fattore di equivalenza", k , ossia il rapporto tra la corrente continua ed il valore efficace della corrente alternata che comportano la stessa probabilità di innescare la fibrillazione ventricolare.

Esso risulta, con buona approssimazione, pari a (norma CEI 64, Fascicolo 11634, "Effetti della corrente attraverso il corpo umano"):

$$k = 3.75 .$$

Anche le correnti ad alta frequenza risultano, via via, meno pericolose di quelle di frequenza compresa tra 15-100 Hz; nella figura 1.3 sono indicate le variazioni della soglia di fibrillazione ventricolare per frequenze che vanno da 50/60 Hz a 1000 Hz, durate di contatto superiori a un periodo cardiaco e percorsi di corrente longitudinale attraverso il tronco del corpo. Correnti di frequenze ancora superiori risultano di pericolosità ulteriormente decrescente (soglia di fibrillazione ulteriormente incrementata).

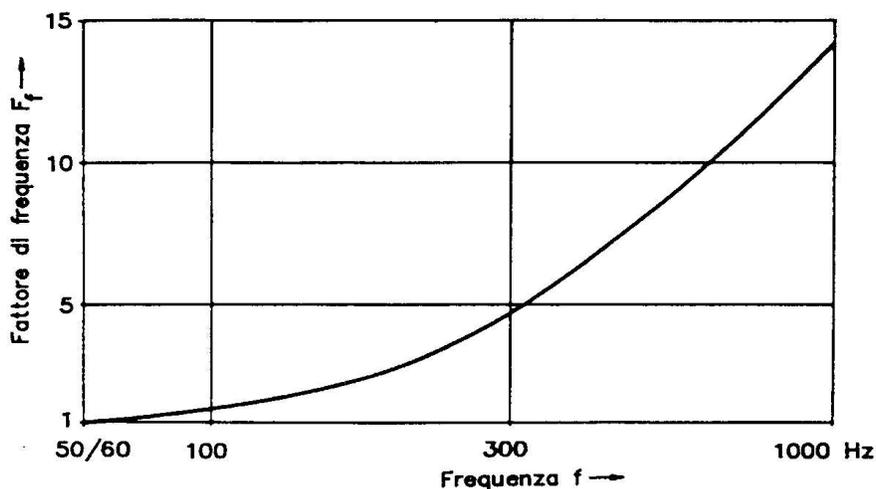


Fig. 1.3 Variazioni della soglia di fibrillazione ventricolare per frequenze che vanno da 50/60 Hz a 1000 Hz

1.3. Limiti di pericolosità della tensione elettrica

Ai fini pratici, in alternativa ai limiti di pericolosità della corrente elettrica da contatto, è più conveniente riferirsi ai valori di tensione da contatto che sono in grado di far circolare una corrente pericolosa nel corpo umano; tali valori individuano, evidentemente, i limiti di pericolosità della tensione elettrica.

Si può pervenire a delle curve di pericolosità della tensione elettrica esterna sul corpo umano, a partire da una stima - statistica - del valore della resistenza elettrica di quest'ultimo, ma non solo.

Evitando, per brevità, approfondimenti più complessi, è importante sottolineare che, a causa di un contatto elettrico, una corrente elettrica esterna può fluire nel corpo umano, senza o con il coinvolgimento del terreno, noto per essere un buon conduttore di fatto.

Se il contatto elettrico si stabilisce tra due parti diverse del corpo umano (per esempio, tra mano sinistra e mano destra), evidentemente, la corrente elettrica pericolosa può fluire nel corpo umano senza il coinvolgimento del terreno.

Se il contatto elettrico si stabilisce con una sola parte del corpo umano (per esempio una mano), la corrente elettrica pericolosa può fluire nel corpo umano se almeno una sua seconda parte (per esempio i piedi) sono in contatto intimo anche con il terreno.

Rimane evidente che, nel primo caso, il valore di tensione da contatto che è capace di far fluire nel corpo umano una corrente pericolosa è funzione solo del valore dell'impedenza equivalente che il corpo umano mostra tra le sue due diverse parti in contatto con l'impianto.

Nel secondo caso, invece, la pericolosità della tensione dipenderà, oltre che dall'impedenza del corpo umano, tra la parte in contatto con l'impianto (mano) e la parte in contatto con il terreno (piedi), anche dall'impedenza equivalente che il terreno mostrerà alla corrente, a partire dal punto di contatto tra uomo e terreno. Questo secondo valore di impedenza dipende esclusivamente dalle cosiddette "caratteristiche ambientali" che caratterizzano, appunto, l'ambiente esterno al corpo umano ed attraverso il quale esso stesso viene in contatto con il terreno.

Quanto sopra riassunto dovrebbe aver chiarito che, allora, ai fini della determinazione della pericolosità della tensione elettrica è necessario stimare - statisticamente - non solo l'impedenza propria del corpo umano lungo ognuno dei possibili percorsi per la corrente, ma anche l'impedenza interposta tra il corpo umano ed il terreno.

La problematica è tutt'altro che di semplice soluzione; basti pensare che già la stima della resistenza propria del corpo umano comporta problemi non di poco conto legati tanto alla estrema variabilità di quest'ultima al variare delle peculiarità delle singole persone (la resistenza del corpo umano di un

uomo adulto è molto diversa da quella di un bambino, o di una donna; ulteriori differenze significative vi sono al variare della razza ma persino dello status mentale di tristezza, euforia, ... per non parlare delle influenze che può avere la differenza dello status della pelle degli arti di un operaio edile rispetto a quelle di un chirurgo e via discorrendo).

Nella figura 1.4 viene evidenziato come la resistenza del corpo umano sia, peraltro, composta da tre "componenti", una in serie all'altra: una prima componente corrispondente alla zona di entrata della corrente elettrica nel corpo umano, direttamente correlabile al comportamento sia resistivo che capacitivo della pelle (R_p e C_p), una seconda componente, solo resistiva (R_i), corrispondente all'interno del corpo umano, ed una terza componente corrispondente alla zona di uscita della corrente elettrica dal corpo umano, nuovamente correlabile al comportamento sia resistivo che capacitivo della pelle (R_p e C_p).

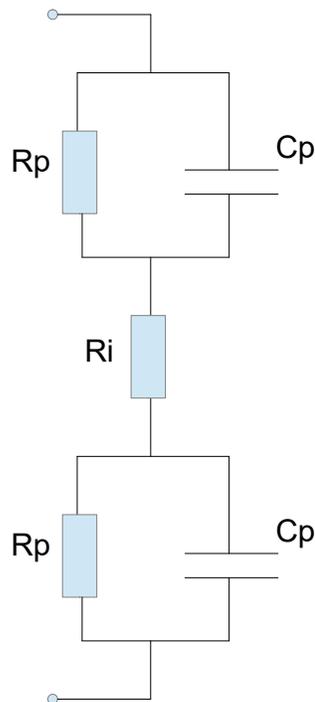


Fig. 1.4 Comportamento Ohmico-capacitivo del corpo umano

Nella pratica, per stime di correnti nel corpo umano alternate con frequenza 50 Hz l'effetto capacitivo può essere trascurato e l'impedenza del corpo umano può essere rappresentata con un unico valore di resistenza complessiva.

Evitando, per brevità, ulteriori approfondimenti e considerazioni sulle modalità di stima di tali valori di resistenza, nella figura 1.4 sono riportate le curve relative ai valori statistici dell'impedenza totale del corpo umano per esseri viventi, dovuti al percorso mano-mano o mano-piede, per tensioni di contatto fino a 5000 V (la figura è estratta dalla norma CEI 64, Fascicolo 11634, "Effetti della corrente attraverso il corpo umano"). Le curve indicano i valori di impedenza che non sono superati dal 95%, dal 50% e dal 5% della popolazione, al variare della tensione di contatto.

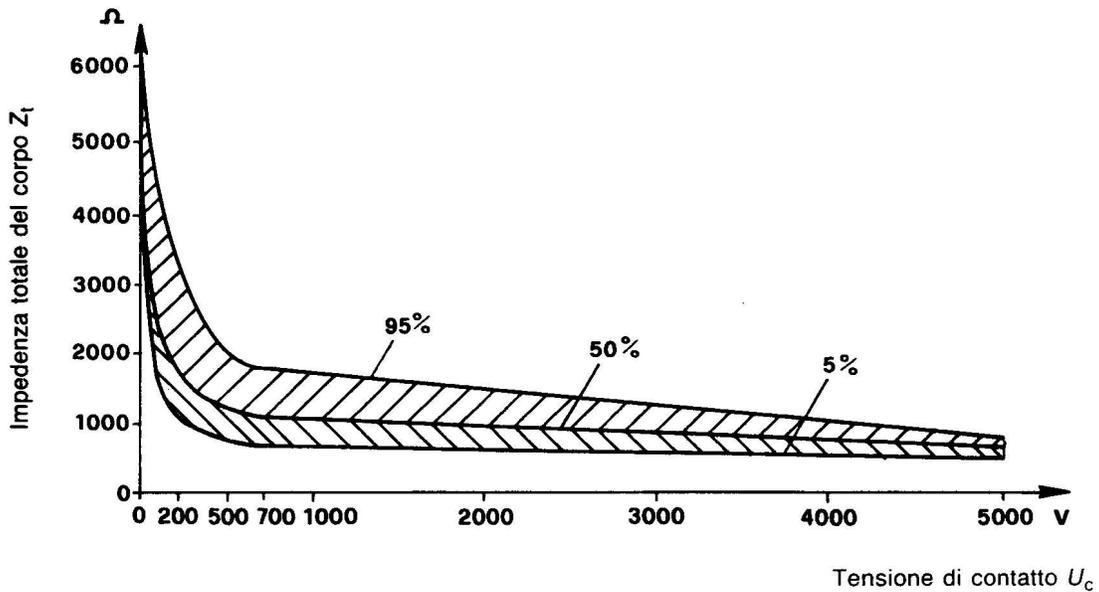


Fig.1.4 Valori statistici dell'impedenza totale del corpo umano per esseri viventi, dovuti al percorso mano-mano o mano-piede

Dalle curve si evince che per tensioni di contatto prossime al valore nominale della tensione verso terra degli impianti elettrici utilizzatori di bassa tensione, pari a 230 V, l'impedenza che del corpo umano che non viene superata dal 5% della popolazione mondiale è pari a circa 1000 Ω .

In modo equivalente, uno "zoom" di tali andamenti può essere riassunto nella tabella seguente:

Tab. 1.2 – Valori indicativi della resistenza totale del corpo umano [Ω], al variare della tensione

Tensione (V)	Valori di R_B che non sono sorpassati dal		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
Valore asintotico	650	750	850

Per quanto attiene al possibile contributo del terreno alla circolazione di corrente elettrica nel corpo umano, è opportuno analizzare, almeno per grandi linee, le modalità secondo le quali una corrente elettrica può disperdersi nel terreno. Per farlo ci si riferisce al caso, poco realistico ma semplice, in cui il dispersore abbia forma "semi-sferica" ed il terreno abbia resistività, ρ , costante (terreno omogeneo). In questo caso, se ipotizziamo di "iniettare" nel terreno una corrente di intensità pari a I , il potenziale elettrico del terreno, U , si distribuirà (a partire dalla superficie esterna del dispersore semisferico di raggio r e per tutto lo spazio che lo circonda) secondo la legge:

$$U = (\rho I)/(2\pi r) .$$

Tale distribuzione di potenziale può essere raffigurata come nella figura 1.5.

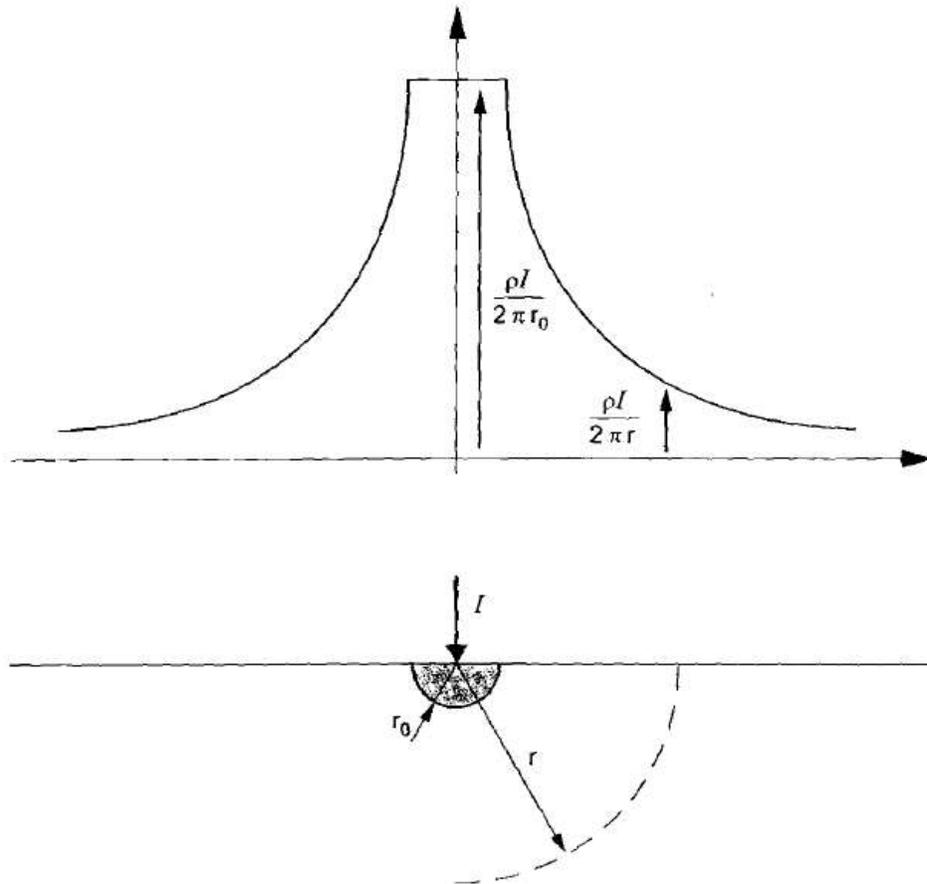


Fig.1.5 Andamento del potenziale nel terreno, per una corrente di intensità I dispersa da un dispersore semisferico di raggio r_0

E' evidente come il potenziale: assuma valore massimo, $(\rho I)/(2\pi r_0)$, in corrispondenza del punto di iniezione della corrente, rimanga costante fino alla superficie esterna del dispersore e, quindi, decresca inversamente alla distanza dal dispersore fino a raggiungere il valore zero ad una distanza, teoricamente infinita dal dispersore stesso.

Ne consegue che, nei confronti di una dispersione di corrente elettrica nel terreno, quest'ultimo può essere assimilato ad un conduttore di resistenza totale ("resistenza di terra"), R_t , pari al rapporto tra il valore massimo assunto da potenziale e la corrente dispersa, cioè:

$$R_t = \rho/(2\pi r_0) .$$

Tale resistenza di terra è da intendersi come la resistenza tra il punto di dispersione della corrente nel terreno ed il punto a distanza infinita (in realtà "sufficientemente lontana dal dispersore") in cui si può ritenere nullo il valore del potenziale.

Naturalmente il valore di detta resistenza dipende fortemente sia dalle caratteristiche del dispersore (forma e materiale) che dalle caratteristiche del terreno (grado di disomogeneità, resistività delle varie zone, ...); nella fattispecie, il dispersore è costituito dalla parte del corpo umano in intimo contatto con il terreno (normalmente i piedi) e la dispersione della corrente nel terreno è, quindi, fortemente influenzata da diversi fattori (dimensioni dei piedi, peso della persona, presenza o meno di calzature, ...), inoltre lo strato superficiale del terreno, in ambienti "ordinari", può essere costituito da una qualche forma di pavimentazione "convenzionale" (pavimentazione di ceramica, o di legno o di componenti bituminosi ecc..) ma, in ambienti "non ordinari" (quali cantieri, piscine, locali medici, ...), potrebbe anche non essere presente.

In definitiva, nella figura 1.6 sono riportate le cosiddette curve di sicurezza relative alla tensione.

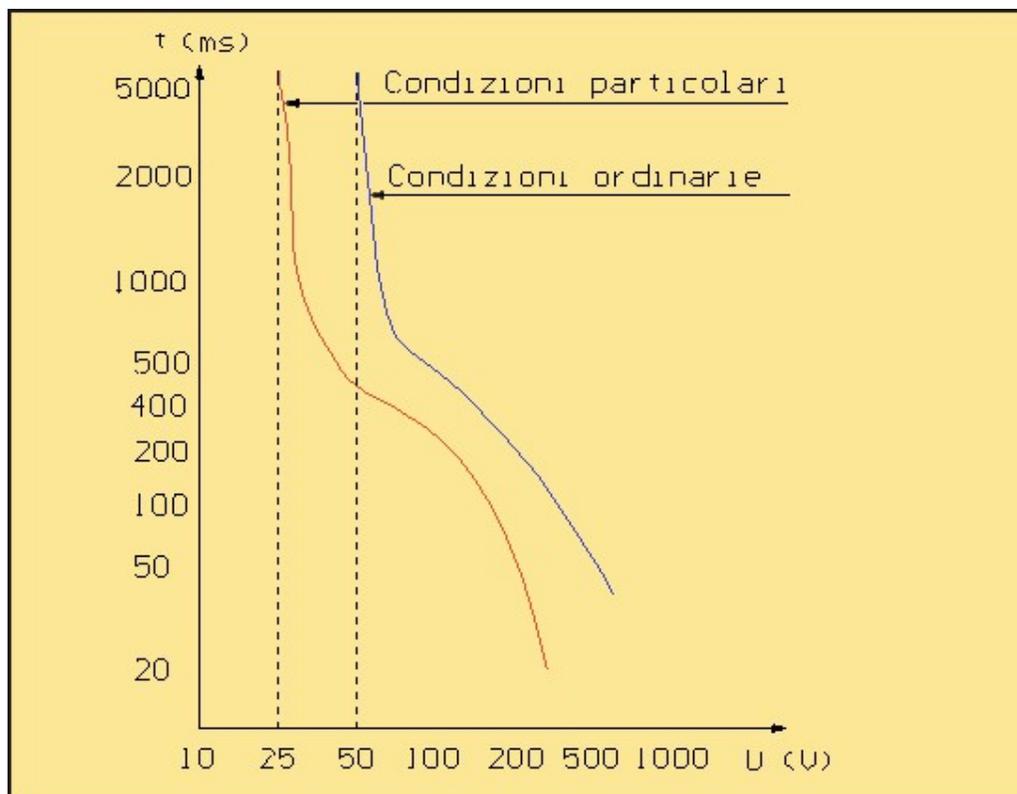


Fig. 1.6. Curve di sicurezza tensione-tempo in condizioni ambientali particolari e ordinarie

Si nota una “curva di sicurezza“ dei limiti tensione-tempo relativa alle condizioni normali a cui può trovarsi il corpo umano ed una “curva di sicurezza“ relativa a condizioni particolari (e più sfavorevoli rispetto a quelle ordinarie, si possono portare ad esempio di condizioni particolari quelle relative ad ambienti bagnati, strutture adibite ad uso zootecnico, ecc..).

La tensione corrispondente al tempo 5s è denominata tensione di contatto limite U_L .

Questo è il limite superiore delle tensioni che possono permanere sul corpo umano per un tempo indefinito, senza pericolo.

In condizioni normali si considera $U_L=50V$ mentre in condizioni particolari $U_L=25V$.

4. Classificazione dei contatti elettrici pericolosi

4.1 Definizioni

Massa: Parte conduttrice facente parte dell'impianto elettrico che può essere toccata e che non è normalmente in tensione ma che può andarci se si ha un cedimento dell'isolamento principale. Una parte conduttrice che avvolge una parte a doppio isolamento non è da considerare una massa. Una parte conduttrice che può andare in tensione durante un guasto d'isolamento solo perché è a contatto con una massa, non è da considerare una massa.

Massa estranea: Parte conduttrice non facente parte dell'impianto elettrico, in buon collegamento elettrico col terreno, in grado di introdurre il potenziale di terra (tubazione idrica interrata, l'armatura del cemento armato, strutture portanti di edifici metallici ecc..) o altro potenziale (tubo che si collega con l'impianto idrico del condominio e che in caso di guasto ad uno

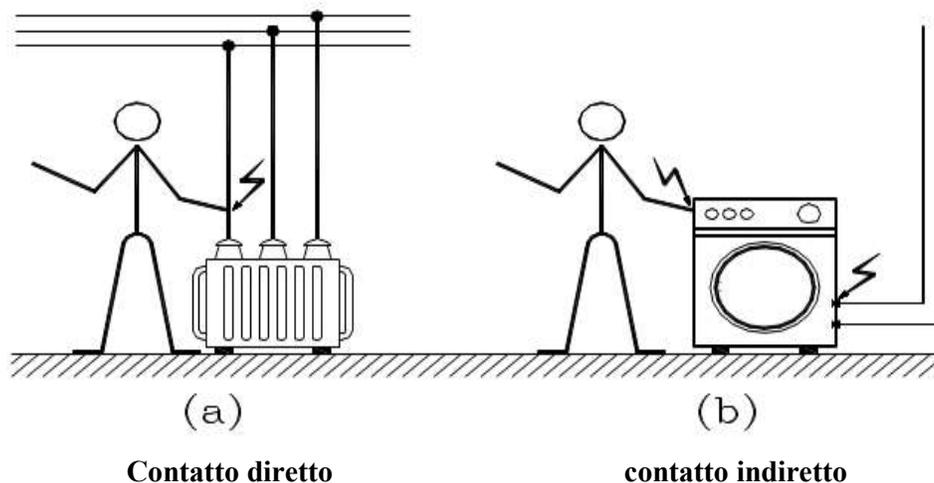
scaldacqua di un condomino può portare un potenziale pericoloso nella vasca da bagno di un altro condomino).

4.2 Contatti diretti

Si parla di contatto diretto quando si entra in contatto con una parte attiva dell'impianto e cioè con conduttori che sono normalmente in tensione, ad esempio i conduttori di una linea elettrica compreso il neutro ma escluso il conduttore PEN. Il contatto diretto può avvenire anche tramite una parte conduttrice purché non sia una massa o in contatto con una massa. (CEI 64-8 art. 23-5)

4.3 Contatti indiretti

Un contatto indiretto è il contatto di una persona con una massa o con una parte conduttrice a contatto con una massa durante un guasto all'isolamento (ad esempio la carcassa di un elettrodomestico). Mentre ci si può difendere dal contatto diretto, mantenendosi a distanza dal pericolo visibile, nel contatto indiretto, essendo un pericolo invisibile, ci si può difendere solo con un adeguato sistema di protezione (CEI 64-8 art 23-6).



CAPITOLO 2

Protezioni contro i contatti diretti

Premesso che un contatto diretto pericoloso può verificarsi sia in maniera del tutto accidentale (non intenzionale) che in maniera volontaria ed intenzionale (per esempio per svolgere specifiche attività di manutenzione ordinaria o straordinaria su parti d'impianto), diremo che i sistemi di protezione garantiscono una “protezione totale” quando sono atte ad impedire sia un contatto non intenzionale che il contatto intenzionale mentre garantiscono una “protezione parziale” quando sono atte ad impedire solo il contatto non intenzionale ma non anche quello intenzionale.

2.1 Sistemi di protezione totale

2.1.1 Protezione mediante alimentazione a bassissima tensione

Secondo la Norma CEI 64-8 un sistema elettrico è a “bassissima tensione” (anche detto sistema in “categoria 0”) se soddisfa le seguenti condizioni:

- la tensione nominale non supera i 50V, se in c.a., oppure i 120V, se in c.c. non ondulata;
- l'alimentazione proviene da una sorgente di cui ai sistemi denominati “SELV” o “PELV”;
- sono soddisfatte le condizioni di installazione specificatamente previste per questo tipo di circuiti.

Le sigle SELV e PELV stanno per:

- SELV: **S**afety **E**xtra **L**ow **V**oltage, cioè bassissima tensione di sicurezza;
- PELV: **P**rotective **E**xtra **L**ow **V**oltage, cioè bassissima tensione di protezione.

Esse indicano sistemi elettrici a bassissima tensione che devono soddisfare specifici requisiti, come meglio indicato di seguito.

Sistema SELV

Il sistema SELV fornisce un ottimo livello di sicurezza e viene spesso utilizzato in ambienti a maggior rischio, come luoghi con alto livello di umidità.

Il sistema SELV è intrinsecamente sicuro contro i contatti diretti negli ambienti ordinari (ma non negli ambienti non ordinari di cui alla sezione 7 della norma CEI 64/8) e non necessita di ulteriori protezioni, se:

- la tensione di alimentazione non supera i 25V, se in c.a., oppure i 60V, se in c.c. non ondulata;
- viene alimentato da una sorgente indipendente o da una sorgente di sicurezza;
- non sono presenti punti di collegamento a terra (ed è vietato collegare a terra sia le masse sia le parti attive);
- il sistema di distribuzione è separato dagli altri sistemi elettrici (e questa separazione dovrà essere garantita per tutti i componenti).

La sorgente di alimentazione indipendente o di sicurezza si può ottenere sia con un trasformatore di isolamento di sicurezza rispondente alle prescrizioni di cui alla norma CEI 96-7 che con sorgenti che presentano pari gradi di sicurezza e separazione adeguata da altre sorgenti come i gruppi elettrogeni indipendenti o gli accumulatori elettrochimici (batterie) eventualmente dotati di opportuni sistemi elettronici di conversione CC/CA.

Qualora la tensione di alimentazione dovesse essere superiore a 25V in c.a. (anche se comunque inferiore a 50V in c.a.) oppure a 60V in c.c. (anche se comunque inferiore a 120 V in c.c.) la protezione contro i contatti diretti nei sistemi SELV dovrà essere conseguita mediante l'uso di involucri e barriere o adeguati isolamenti (vedi seguito), anche negli ambienti ordinari.

Un esempio di circuito SELV è illustrato nella figura seguente; se la tensione di alimentazione U_2 è maggiore o uguale a 50 V, la protezione contro i contatti diretti non è intrinsecamente garantita e dovrà essere conseguita mediante l'uso dei sistemi di protezione specificati nel seguito.

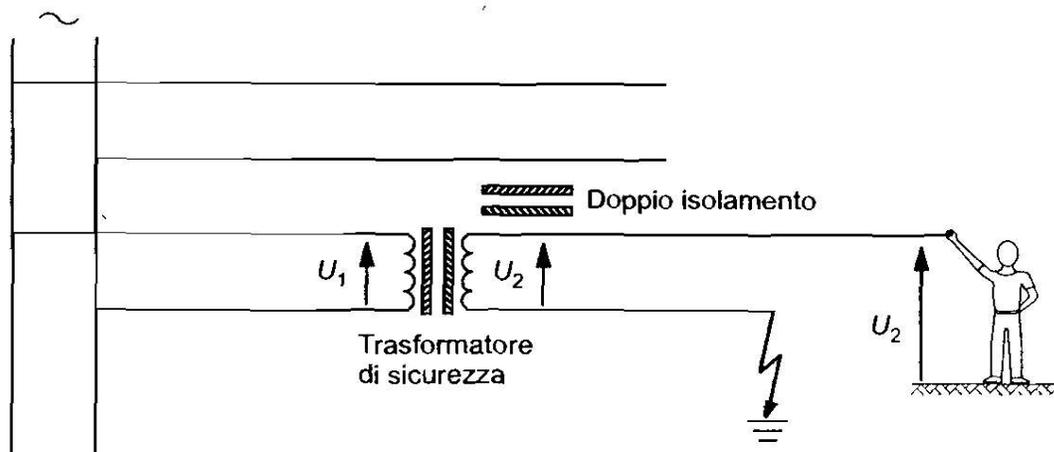


Figura 2.1 Esempio di sistema SELV

Sistema PELV

Il sistema PELV si utilizza quando, per motivi di funzionamento delle apparecchiature, si avverte la necessità di avere collegato a terra un punto attivo (neutro) del circuito. Questo sistema garantisce un livello di sicurezza inferiore al precedente SELV poiché non risulta completamente isolato dal sistema esterno; la possibilità che si presenti un guasto verso terra rende possibile anche l'introduzione, attraverso l'impianto di terra, di tensioni diverse da zero sul neutro e sulle masse, rendendo maggiormente pericolosi, rispetto al sistema SELV, i contatti diretti. Le caratteristiche del sistema PELV sono le stesse di un sistema SELV, fatta eccezione per il divieto di avere collegamenti a terra, infatti nel sistema PELV almeno un punto (per esempio il neutro) è collegato a terra e possono esserlo anche le masse e le masse estranee.

Un esempio di circuito PELV è illustrato nella figura seguente; risultando il neutro e le masse collegate all'impianto di terra, la protezione contro i contatti diretti non è intrinsecamente garantita e dovrà essere conseguita mediante l'uso dei sistemi di protezione specificati nel seguito.

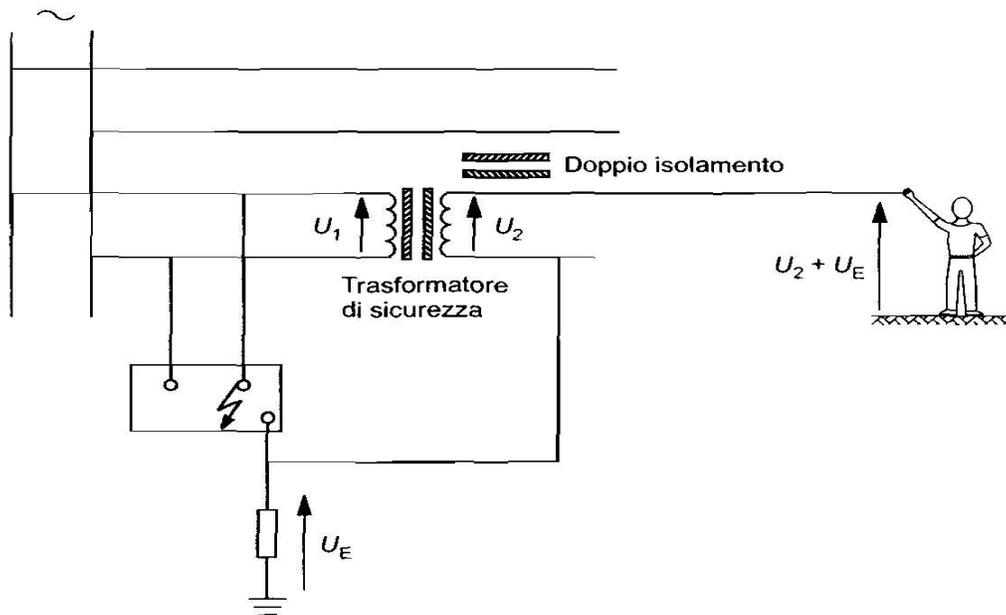


Figura 2.2 Esempio di sistema PELV

In un sistema PELV la sicurezza contro i contatti diretti è garantita intrinsecamente negli ambienti ordinari (ma non negli ambienti non ordinari di cui alla sezione 7 della norma CEI 64/8) solo se la tensione di alimentazione non supera i 12V, se in c.a., oppure i 30V, se in c.c. non ondulata.

Se la tensione di alimentazione supera i limiti sopra indicati ma è inferiore a 25V, se in c.a., oppure a 60V, se in c.c. non ondulata, per garantire la protezione contro i contatti diretti negli ambienti ordinari è sufficiente collegare all'impianto di messa a terra tutte le masse e, soprattutto, eseguire un "collegamento equipotenziale principale" (per le cui caratteristiche si rimanda alla apposita sezione degli appunti), in modo che tutte le masse ed anche le "masse estranee" (tubazioni di altri impianti, ferri di armatura di strutture in cemento armato, schermi di cavi speciali, ...) si trovino sempre allo stesso potenziale, comune a quello del neutro; un esempio è riportato nella figura seguente.

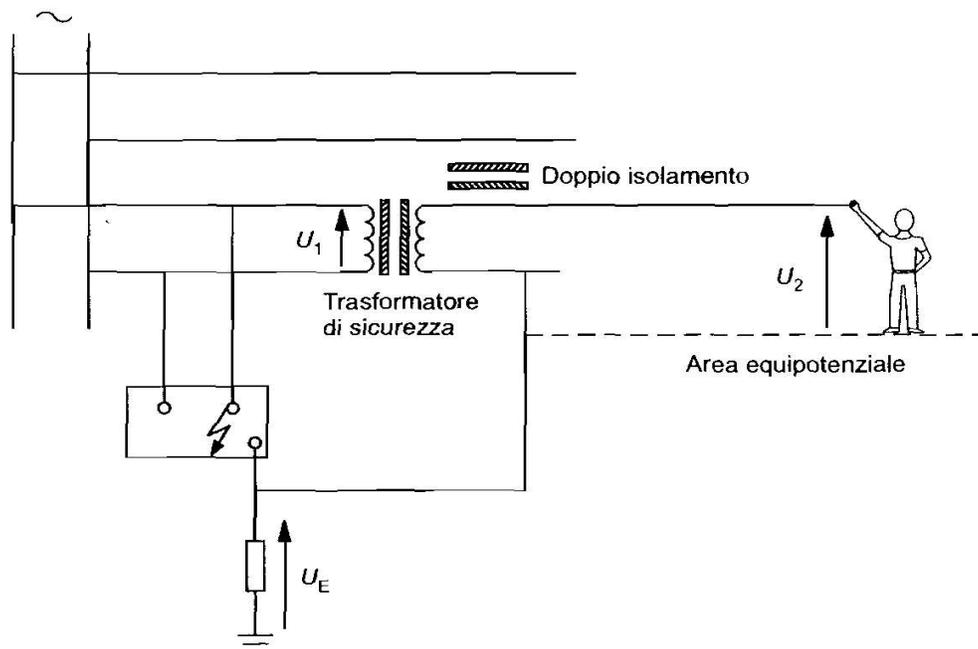


Figura 2.3 Esempio di sistema PELV in presenza di collegamento equipotenziale principale

Il sistema FELV

La Norma CEI 64-8 prevede un terzo sistema a bassissima tensione (categoria zero) e cioè il sistema FELV.

La sigla FELV sta per **F**unctional **E**xtra **L**ow **V**oltage, o bassissima tensione funzionale.

Esso è un sistema che, per motivi di funzionamento, ammette l'alimentazione dei circuiti dell'impianto con un normale trasformatore (non di sicurezza), la cui tensione secondaria non superi (come per i sistemi SELV e PELV) il valore di 50 Volt in c.a.

Rimane evidente che un eventuale guasto, per difetti di isolamento fra il primario ed il secondario del trasformatore, potrebbe indurre al secondario (quindi sul sistema a bassissima tensione) tensioni ben più alte e pericolose della tensione nominale (50V).

Pertanto il sistema FELV non è intrinsecamente sicuro nei confronti dei contatti diretti e, per la protezione contro questi ultimi, richiede sempre l'uso dei sistemi di protezione specificati nel seguito.

2.1.2 Protezione mediante isolamento delle parti attive

Per prevenire un contatto diretto tra l'uomo e le parti attive di un sistema elettrico non già intrinsecamente sicuro, esse devono essere isolate (isolamento principale); devono, cioè, essere ricoperte completamente da uno strato di materiale isolante che deve avere caratteristiche (rigidità dielettrica, spessore, ...) "adeguate" alla tensione nominale di funzionamento del sistema elettrico. L'isolante deve anche essere resistente agli sforzi meccanici, termici ed alle alterazioni chimiche cui può essere sottoposto durante il funzionamento, in modo che, praticamente, possa essere rimosso solo per distruzione.

Se si considera per esempio il caso di un sistema di "categoria 0" (a bassissima tensione funzionale di 50V in c.a.) non già intrinsecamente sicuro contro i contatti diretti, l'isolamento delle parti attive, per essere adeguato, dovrà garantire una "tenuta elettrica" ad una tensione di prova di 500V di valore efficace, almeno per un minuto.

Se si considera, invece, il caso di un sistema di un sistema di "categoria I" (per esempio, con tensione nominale di 230V in c.a. monofase), l'isolamento dovrà resistere ad una tensione di prova di 1500V di valore efficace, almeno per un minuto.

Per quanto detto, forme di isolamento più semplicemente conseguibili mediante vernici, lacche, smalti e prodotti simili non sono considerati idonei a garantire una adeguata protezione contro i contatti diretti.

Più in generale, l'isolamento si distingue in:

Isolamento funzionale: isolamento esistente tra le parti attive e tra queste e la carcassa di un apparecchio elettrico, unicamente finalizzato al corretto funzionamento di una apparecchiatura ma non anche alla sicurezza delle persone.

Isolamento principale: isolamento delle parti attive sufficiente per il corretto funzionamento delle apparecchiature e per proteggere le persone contro la folgorazione ma solo in condizioni normali (assenza di guasti).

Isolamento supplementare: isolamento che garantisce il corretto funzionamento delle apparecchiature e la protezione delle persone anche nel caso di cedimento (guasto) dell'isolamento principale.

Doppio isolamento: isolamento principale più isolamento supplementare.

Isolamento rinforzato: sostituisce il doppio isolamento se garantisce lo stesso grado di protezione.

La figura seguente riassume i diversi tipi di isolamento.

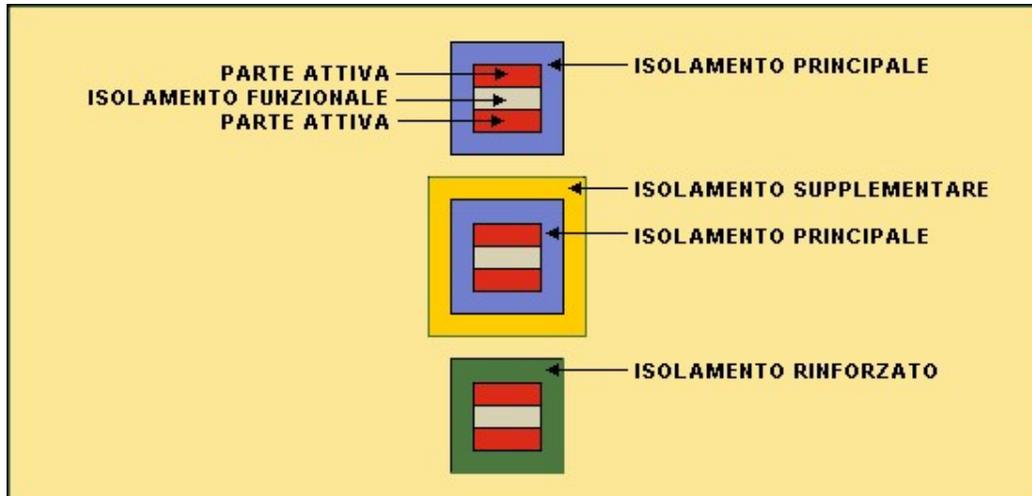


Fig.2.3 Tipi di isolamento

In relazione al tipo di isolamento di cui sono dotati, i componenti elettrici di un impianto (apparecchiature) vengono classificati in classi:

Componenti di “classe 0”:

sono le apparecchiature elettriche provviste del solo isolamento principale; non vi è alcun dispositivo per il collegamento delle masse a terra e, nel caso di guasto all’isolamento, la protezione delle persone è affidata soltanto alle caratteristiche dell’ambiente in cui esse sono installate (ad esempio ambienti totalmente isolati da terra e senza alcuna massa estranea); sono poco sicure e, perciò, poco diffuse.

Componenti di “classe I”:

sono le apparecchiature provviste del solo isolamento principale ma aventi un dispositivo per il collegamento delle masse a terra; in caso di guasto all’isolamento la protezione delle persone è affidata a sistemi “attivi” di protezione (vedi seguito). Simbolo rappresentativo:



Componenti di “classe II”:

sono le apparecchiature provviste di isolamento doppio o rinforzato; non vi è alcun dispositivo per il collegamento a terra e la protezione delle persone è intrinsecamente affidata al “sovradimensionamento” dell’isolamento (appunto, doppio o rinforzato). Simbolo rappresentativo:



Componenti di “classe III”:

sono le apparecchiature dotate di isolamento ridotto in quanto destinate ad essere alimentate soltanto con sistema a *bassissima tensione di sicurezza* (SELV) in cui non si possono generare in alcun caso tensioni pericolose per le persone. Simbolo rappresentativo:



2.1.3 Protezione mediante involucri o barriere

L'involucro garantisce la protezione dai contatti diretti “in ogni direzione” (CEI 64/8 par. 23.12); in pratica, vengono utilizzati quando esistono parti attive (ad es. morsetti elettrici) che devono essere necessariamente accessibili e quindi non possono essere completamente isolate.

La barriera garantisce la protezione contro i contatti diretti con parti attive pericolose “nelle direzioni abituali di accesso” (CEI 64/8 par. 23.13).

Questi sistemi di protezione, intrinsecamente, assicurano anche un certo grado di protezione contro la penetrazione di agenti esterni, quali i corpi solidi e liquidi.

La protezione contro i contatti diretti mediante involucri e/o barriere è garantita solo se risulta idoneo il relativo grado di sicurezza, come meglio specificato nel seguito.

Le barriere e gli involucri, inoltre, devono essere saldamente fissati, rimovibili solo con attrezzi, apribili da personale addestrato oppure solo se l'accesso alle parti attive è possibile dopo avere aperto il dispositivo di sezionamento con interblocco meccanico o elettrico. In ogni caso il personale addestrato deve di regola sezionare il circuito prima di operare su parti attive o nelle loro vicinanze.

Gradi di protezione di involucri e barriere

Per identificare il grado di protezione di involucri e barriere, convenzionalmente in sede IEC, si è adottato un codice composto dalle lettere IP seguite da due cifre ed eventualmente da una terza lettera addizionale (si vedano le Tabb. 2.1 e 2.2); in particolare: la prima cifra indica il grado di protezione contro la penetrazione di corpi solidi (e, indirettamente, anche contro i contatti diretti, visto che una persona potrebbe venire a contatto con una parte attiva contenuta entro un involucro, appunto, mediante una “parte solida” quale, ad esempio, una mano) e la seconda contro la penetrazione dei corpi liquidi. La lettera addizionale, invece, ha lo scopo specifico di designare il livello di inaccessibilità dell'involucro alle dita o alla mano di una persona, oppure ad oggetti conduttori impugnabili da una persona. Essa, pertanto, deve essere necessariamente usata solo se la protezione contro l'accesso dei corpi solidi (prima cifra del grado IP) è insufficiente a garantire l'impenetrabilità del dito di una persona o dei corpi conduttivi impugnabili da una persona.

Più specificamente, la terza lettera può essere la B oppure la D.

Se, a prescindere dal valore numerico delle prime due cifre (quindi genericamente indicate con XX), si vuole o si deve assicurare l'impenetrabilità dell'involucro o della barriera contro il cosiddetto “dito di prova”, allora deve essere assicurato almeno il grado di protezione IPXXB.

Se, a prescindere dal valore numerico delle prime due cifre (quindi genericamente indicate con XX), si vuole o si deve assicurare l'impenetrabilità dell'involucro o della barriera contro il cosiddetto “filo di prova” (corpo solido conduttivo ed impugnabile da una persona, di dimensioni più piccole rispetto al dito di prova), allora deve essere assicurato almeno il grado di protezione IPXXD.

Il grado di protezione IPXXB (impenetrabilità del dito di prova) deve essere garantito quando l'involucro o la barriera sono installate “non a portata di mano”.

Il grado di protezione IPXXD (impenetrabilità del filo di prova) deve essere garantito quando l'involucro o la barriera sono installate “a portata di mano”.

In forma più generale, nelle figure seguenti sono riassunti i gradi di protezione IP di involucri e barriere contro i corpi la penetrabilità di corpi estranei solidi (Figura 2.3) e liquidi (Figura 2.4) stabiliti dalle Norme.

Si noti che, ai fini della protezione contro i contatti diretti, un involucro o una barriera con grado di protezione IP2X ha grado di protezione equivalente a IPXXB, mentre un involucro o una barriera con grado di protezione IP4X ha grado di protezione equivalente a IPXXD.

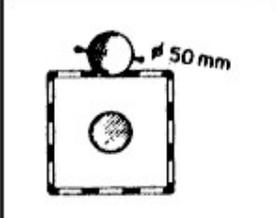
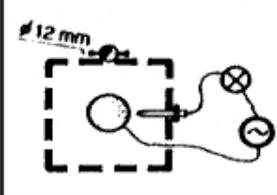
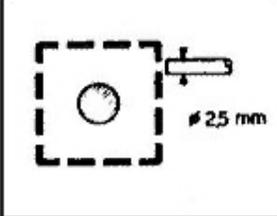
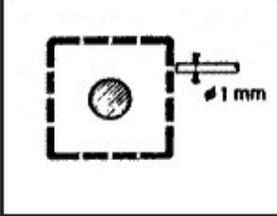
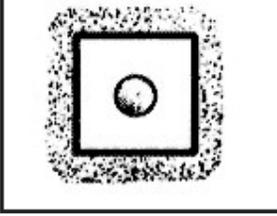
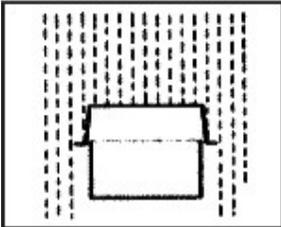
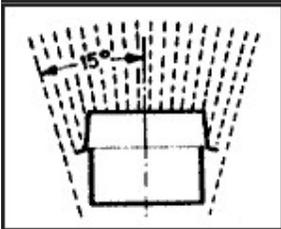
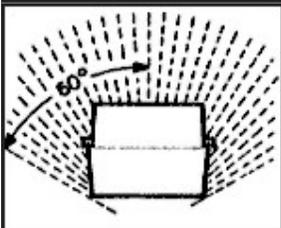
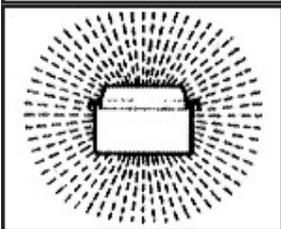
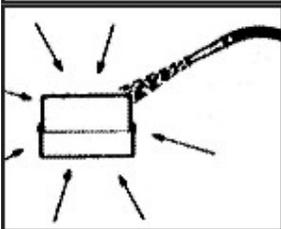
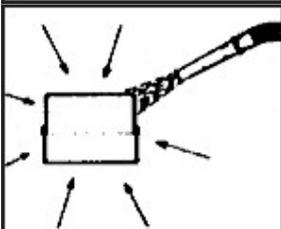
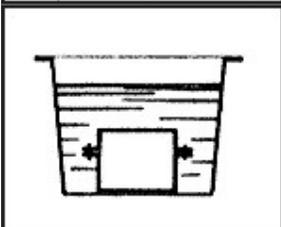
Grado di protezione contro corpi solidi	Disegno schematico della prova	Prova di validazione della protezione
1		<p>Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 50mm e contro l'accesso a parti pericolose col dorso della mano. Una sfera di $\varnothing 50$ mm non deve poter passare attraverso l'involucro e/o entrare in contatto con parti attive o in movimento.</p>
2		<p>Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 12 mm e contro l'accesso a parti pericolose con un dito. Una sfera di $\varnothing 12$ mm non deve poter passare attraverso l'involucro. Inoltre, il cosiddetto "dito di prova" non deve entrare in contatto con le parti attive custodite all'interno.</p>
3		<p>Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 2.5mm e contro l'accesso a parti pericolose con un attrezzo (ad es. cacciavite).</p>
4		<p>Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 1.0mm. Un filo di $\varnothing 1.0$ mm non deve poter passare attraverso l'involucro. Inoltre, il cosiddetto "filo di prova" non deve entrare in contatto con le parti attive custodite all'interno.</p>
5		<p>Con l'apparecchiatura in una camera a polvere di talco in sospensione, si deve verificare che la quantità di polvere che entra nell'apparecchiatura stessa non superi un certo quantitativo.</p>
6		<p>Con l'apparecchiatura in una camera a polvere di talco in sospensione, si deve verificare che la quantità di polvere che entra nell'apparecchiatura stessa sia nulla.</p>

Fig. 2.3 - Grado di protezione contro corpi solidi

<i>Grado di protezione contro i liquidi</i>	<i>Disegno schematico della prova</i>	<i>Prova di validazione della protezione</i>
1		L'apparecchiatura deve essere protetta contro la caduta di gocce in verticale.
2		L'apparecchiatura deve essere protetta contro la caduta di gocce con una angolazione massima di 15 gradi.
3		L'apparecchiatura deve essere protetta contro la pioggia.
4		L'apparecchiatura deve essere protetta contro gli spruzzi.
5		L'apparecchiatura deve essere protetta contro i getti d'acqua.
6		L'apparecchiatura deve essere protetta contro le ondate.
7		L'apparecchiatura deve essere protetta contro l'immersione.

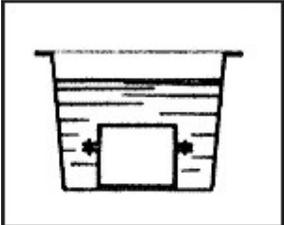
8		<p>L'apparecchiatura deve essere protetta contro l'immersione a tempo indefinito e a profondità specificata.</p>
---	---	--

Fig. 2.4 - Grado di protezione contro i liquidi

2.2 Sistemi di protezione parziale

Protezione mediante ostacoli

Le misure di protezione parziale si ottengono mediante ostacoli e mediante allontanamento.

Gli ostacoli hanno il compito di proteggere dai contatti diretti accidentali ma non hanno efficacia contro i contatti intenzionali; infatti, gli ostacoli possono essere aggirati intenzionalmente. Questo tipo di protezione è, normalmente, attuata nei locali destinati solo alla protezione di personale addestrato; vengono, ad esempio, applicate nelle cosiddette officine elettriche.

Gli ostacoli non devono poter essere rimossi accidentalmente; la rimozione intenzionale è invece consentita e può essere operata senza apposite chiavi e/o attrezzi.

Protezione mediante distanziamento

Si attua, di fatto, realizzando l'allontanamento di parti d'impianto a tensione diversa simultaneamente accessibili; le norme CEI 64/8 considerano parti simultaneamente accessibili quelle che si trovano a distanza inferiore a 2.5 m, sia in verticale che in orizzontale, e che quindi potrebbero – convenzionalmente - essere toccate contemporaneamente da una persona.

Quando in un determinato spazio frequentato da persone sono installati ostacoli con gradi di protezione inferiori a IPXXB (non sicuri contro il contatto diretto, a mezzo del filo di prova), la zona a portata di mano inizia dai predetti ostacoli.

2.3 Protezione aggiuntiva

Sebbene l'aggettivo “aggiuntiva” sia abbastanza chiaro, ebbene sottolineare che per protezione aggiuntiva si intende una protezione che non può sostituire la protezione principale ma che ad essa è aggiunta per sopperire all'eventuale (e sempre probabile) fallimento di quest'ultima, per esempio a causa di incurie o per guasto.

Non solo la protezione aggiuntiva è sempre consentita e gradita ma, in alcuni casi specifici, è addirittura obbligatoria.

La protezione aggiuntiva contro i contatti diretti è obbligatoria:

- nei locali ad uso abitativo, su ogni circuito che alimenti carichi mediante “prese a spina” che abbiano correnti nominali inferiori o uguali a 20 A;
- su ogni circuito che alimenti carichi mobili usati all'esterno mediante “prese a spina” che abbiano correnti nominali inferiori o uguali a 32 A.

Ciò premesso, la protezione aggiuntiva consiste, di fatto, nell'uso di un apposito sistema di protezione denominato “interruttore differenziale”, che sarà dettagliatamente descritto nel seguito quando saranno trattate le protezioni contro i contatti indiretti, a patto che abbia “*corrente differenziale*” non superiore a 30 mA.

Protezione per limitazione della corrente

Alcune apparecchiature speciali (antenne televisive, apparecchi elettromedicali, recinzioni elettriche ecc..) hanno parti metalliche accessibili collegate a circuiti attivi tramite un'impedenza di valore elevato.

Per garantire la protezione contro il contatto diretto con le parti attive di questi apparecchi, il costruttore deve fare in modo che la corrente che può attraversare il corpo di una persona durante il servizio ordinario non sia superiore a 1mA in corrente alternata o a 3mA in corrente continua.

Le parti metalliche che non devono essere toccate durante il servizio ordinario (che possono essere toccate accidentalmente o a causa di un guasto) non devono poter causare, attraverso il corpo della persona, correnti uguali o superiori a 3.5 mA in corrente alternata e a 10 mA in corrente continua.

CAPITOLO 3

Classificazione dei sistemi elettrici e protezione contro i contatti indiretti

Protezioni passive

Metodi per rendere impossibile il manifestarsi di tensioni di contatto pericolose, in caso di cedimento dell'isolamento principale:

- Impiego di apparecchi con isolamento doppio o rinforzato - Apparecchi di classe II (non hanno masse, sono provvisti di isolamento speciale, sono privi del morsetto di terra e sono adatti per proteggere piccoli apparecchi portatili o per apparecchi fissi da installare in impianti senza impianto di terra);
- Sistemi a bassissima tensione di sicurezza di cui al paragrafo 2.1.1.
- Protezione per isolamento elettrico - Apparecchi di classe III. Si realizza mediante l'impiego di opportuni trasformatori di isolamento o alimentando i circuiti con sorgenti autonome di energia aventi caratteristiche d'isolamento uguali a quelle indicate dalle norme per i trasformatori d'isolamento (CEI 96-2);
- Locali isolanti con l'impiego di apparecchi di classe 0, provvisti solo di isolamento principale necessario per assicurare il normale funzionamento. L'involucro metallico non possiede il morsetto di terra. E' vietata l'installazione negli impianti in edifici civili e similari. Tale protezione consiste nel realizzare locali in cui il pavimento e le pareti presentino una resistenza verso terra di 50000 Ω per tensioni fino a 500V e 100000 Ω per tensioni superiori a 500V. Non possono essere utilizzati negli edifici civili, non possono essere installate prese a spina e il conduttore di protezione PE. I locali devono essere mantenuti costantemente sotto controllo da personale specializzato onde evitare che vengano introdotte masse estranee o che vengano collegate a terra le apparecchiature. Gli ingressi devono essere costruiti in modo tale che l'accesso ai locali delle perone avvenga senza che le stesse siano sottoposte a potenziali pericolosi; per questo scopo si possono usare pedane o scarpe isolanti. Tutte le masse estranee entranti nel locale devono essere interrotte con una o più giunzioni isolanti tali da impedire l'introduzione di potenziali pericolosi nel locale isolato. Gli apparecchi e gli elementi fissi devono avere tra di loro una distanza minima di due metri se a portata di mano e di 1,25 metri se non a portata di mano;
- Locali resi equipotenziali e non connessi a terra.

Protezione mediante interruzione dei circuiti (attive)

3.1 Classificazione dei sistemi elettrici

Classificazione in base alla tensione

Si dice tensione nominale di un sistema il valore della tensione con il quale il sistema è denominato ed al quale sono riferite le sue caratteristiche.

Si dice tensione nominale verso terra la tensione dipendente dallo stato del neutro verso terra: nei sistemi trifasi con neutro a terra la tensione stellata della tensione nominale, nei sistemi monofasi col punto di mezzo a terra, metà della tensione nominale.

Nei sistemi isolati da terra tale tensione non ha un valore ben preciso perché dipende dalle impedenze di isolamento delle tre fasi verso terra costituite dal parallelo delle resistenze

d'isolamento e delle reattanze capacitive. In ogni caso si assume come valore della tensione verso terra la tensione nominale perché il caso peggiore consiste nel guasto franco a terra di una fase per cui le altre fasi assumono verso terra il valore della tensione concatenata. La tensione verso terra è importante per la sicurezza perché i contatti più frequenti si hanno tra mani e piedi tra una parte in tensione e la terra mentre più raramente tra due fasi in cui è coinvolta la tensione concatenata. E' riferendosi alla tensione nominale che si classificano i sistemi elettrici :

Sistema di categoria 0 con $U \leq 50$ V in C.a. e 120V in C.c.

Sistemi di categoria I con $U > 50$ V ≤ 1000 in C.a. e > 75 V ≤ 1550 V in C.c.

Sistemi di categoria II con $U > 1000$ V ≤ 30000 V in C.a. e > 1500 V ≤ 30000 V in C.c.

Sistemi di categoria III con $U > 30000$ V sia in C.a. che in C.c.

Il DPR 547/1955 fissa il limite tra alta e bassa tensione in 400V per la C.a. e in 600V per la C.c. Per i sistemi con $V_n >$ di 1000V C.a. e 1500V C.c. ad ogni valore nominale di tensione si abbina anche un valore di tensione riferito all'isolamento rispetto al quale devono essere dimensionate le apparecchiature (La tensione d'isolamento V_i deve essere circa uguale a $V_n + 10\%V_n$).

Classificazione in relazione alla messa a terra

I sistemi elettrici sono classificati in base allo stato del neutro e delle masse rispetto alla terra. Vengono indicati con due lettere:

1^a lettera = T Il neutro è collegato a terra

1^a lettera = I Il neutro non è collegato a terra oppure è collegato a terra tramite un'impedenza

2^a lettera = T Masse collegate a terra

2^a lettera = N Masse collegate al neutro del sistema

Fondamentalmente esistono tre tipi di sistemi elettrici di distribuzione:

1) Sistema TT, terra del neutro in cabina e terra delle masse collegate all'impianto di terra dell'utente mediante il conduttore di protezione (PE). Il conduttore di neutro è considerato attivo a tutti gli effetti (può assumere tensioni pericolose ad esempio a causa di cadute di tensione su di esso) come tale deve essere sezionabile e quindi gli interruttori devono aprire su tutti i poli. Il conduttore PE invece non deve mai essere sezionato.

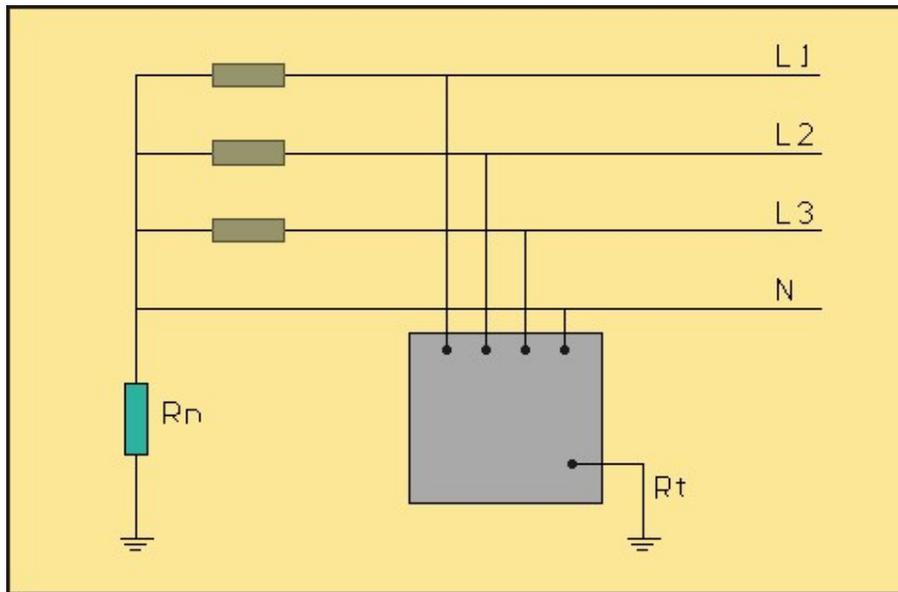


Fig. III.1 - Sistema TT. Il neutro è collegato direttamente a terra mentre le masse sono collegate ad un impianto di terra locale indipendente da quello del neutro.

- 2) Sistema TN, neutro a terra con le masse collegate direttamente al neutro (TN-C - il neutro, fungendo anche da conduttore di protezione, non deve essere sezionabile e deve avere sezione rispondente alle normative sugli impianti di terra) oppure tramite il conduttore di protezione (TN-S - le norme richiedono il sezionamento del neutro solo nei circuiti a due conduttori fase-neutro aventi a monte un dispositivo di interruzione unipolare come ad esempio un fusibile. Comunque il sezionamento del neutro non è vietato negli altri casi).

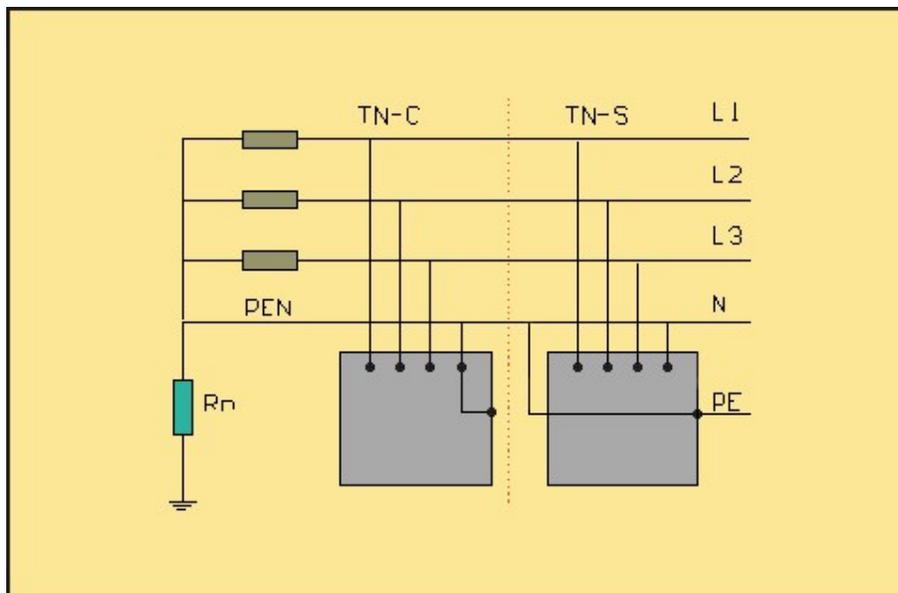


Fig. III.2 - Sistema TN. Il neutro è collegato direttamente a terra. Le masse sono collegate al conduttore di neutro direttamente (TN-C) o tramite un conduttore di protezione (TN-S). Se il conduttore di neutro funge anche da conduttore di protezione prende il nome di PEN.

- 3) Sistema IT, il neutro è isolato o collegato a terra tramite impedenza mentre le masse sono collegate ad una terra locale (il neutro deve essere sempre sezionabile). Il principale vantaggio di questo sistema è la continuità del servizio perché al primo guasto a terra la corrente che si richiude attraverso le capacità parassite dei conduttori verso terra è molto

piccola e quindi non necessita di essere interrotta. Questo è un sistema utilizzato per impianti con particolari esigenze di continuità di esercizio purché vi sia un collegamento ad un unico impianto di terra delle parti metalliche da proteggere, la tensione sulle masse non superi i 25V nel caso di primo guasto a terra, il tempo di intervento del dispositivo di protezione non superi i 5s quando si verifica il secondo guasto a terra e vi sia un dispositivo di controllo continuo dell'isolamento delle parti attive verso terra.

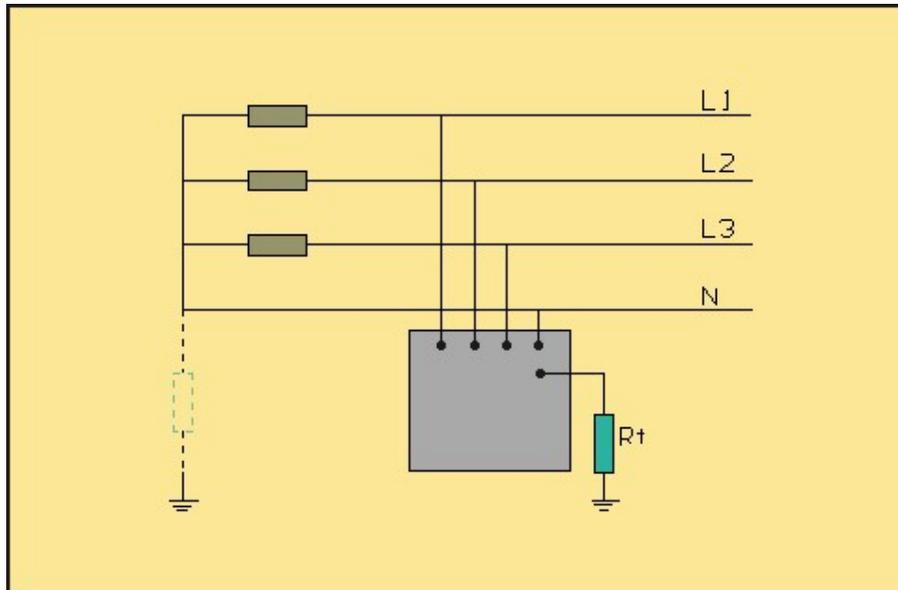


Fig. III.3 - Sistema IT

Protezione attiva dai contatti indiretti in relazione al sistema di distribuzione

3.2 Sistemi TT

3.2.1 Circuito equivalente

La tensione di contatto a vuoto U_{C0} diventa uguale alla tensione totale U_T se la persona, sufficientemente lontana dal dispersore, si trova ad un potenziale prossimo allo zero. Essendo questa la condizione più pericolosa che si può verificare, per studiare il problema si può assumere, a favore della sicurezza, la tensione U_T .

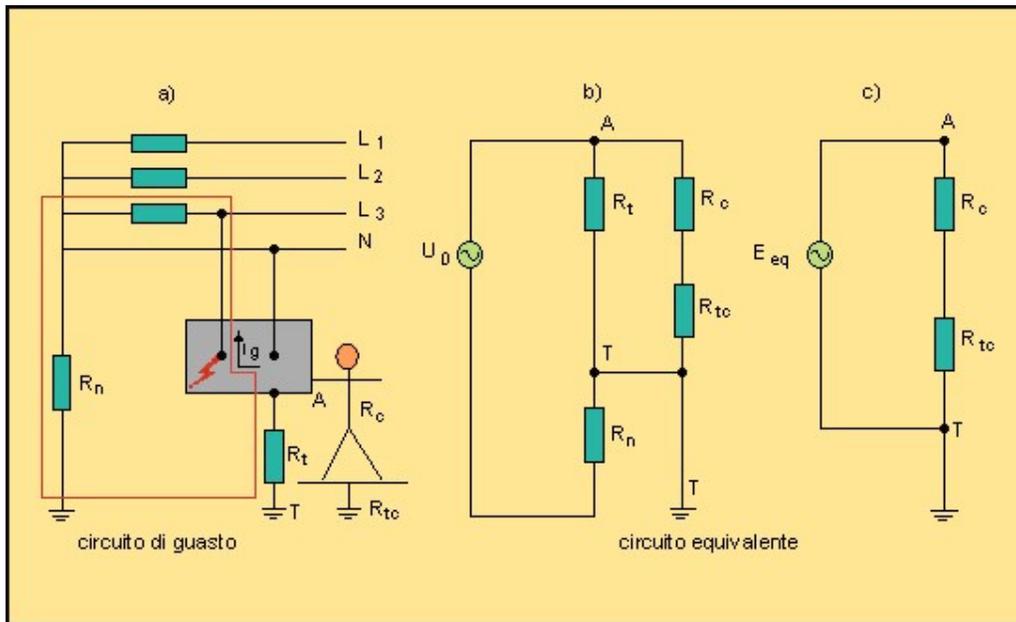


Fig. III.4 Circuito di guasto a terra in un sistema TT b) Circuito elettrico equivalente c) Il circuito di guasto si comporta come un generatore di tensione E_{eq} , essendo R_{eq} trascurabile rispetto a $R_c + R_{tc}$.

La resistenza del conduttore di fase e le impedenze del trasformatore (dell'ordine della decina di ohm) sono trascurabili rispetto alle altre resistenze del circuito di guasto e, applicando il teorema di Thévenin-Norton (1) tra i punti A e T (fig. 7.1), si può ricondurre il circuito di guasto ad un generatore ideale di tensione di f.e.m. (E_{eq}) avente in serie la sola R_{eq} :

$$E_{eq} = R_t \times I_g ; U_0 = (R_t + R_n) \times I_g ; I_g = \frac{E_{eq}}{R_t} = \frac{U_0}{R_t + R_n} ;$$

$$E_{eq} = \frac{U_0 \times R_t}{R_t + R_n}$$

Sempre tra i punti A e T col generatore U_0 cortocircuitato si ottiene:

$$R_{eq} = \frac{R_t \times R_n}{R_t + R_n}$$

La R_{eq} è trascurabile (dell'ordine degli Ohm) rispetto alla resistenza di carico $R_c + R_{tc}$ (dell'ordine delle migliaia di Ohm) ed inoltre questa approssimazione è senz'altro a favore della sicurezza. Il contatto di una persona ($R_c + R_{tc}$) non modifica in modo sensibile la tensione preesistente. Per assicurare la sicurezza delle persone occorre contenere la tensione sulla massa entro il limite di sicurezza U_L , dovrebbe perciò essere verificata la condizione:

$$E_{eq} = \frac{U_0 \times R_t}{R_t + R_n} \leq U_L$$

da cui:

$$R_t \leq \frac{U_L \times R_n}{U_0 - U_L}$$

La resistenza R_n del neutro è in genere piuttosto bassa (circa 1Ω) e in un sistema trifase 380/220 V con una U_L uguale a 50V la R_t dovrebbe essere inferiore a circa $0,3 \Omega$:

$$R_t = \frac{U_L \times R_n}{U_0 - U_L} = \frac{50 \times 1}{220 - 50} = 0,29 \Omega$$

(1) - Data una rete comunque complessa, formata da generatori elettrici e da elementi passivi tutti lineari, ai fini della corrente che circola in un qualsiasi suo tronco (ad esempio $R_c + R_{tc}$) o della tensione ai suoi capi (punti A e T), è sempre possibile, per il principio di Thévenin-Norton, schematizzare la restante rete, di cui il tronco considerato fa parte, con un solo generatore ideale di tensione, la cui forza elettro motrice indicheremo con E_{cq} (rappresenta la d.d.p. che esiste fra i punti della rete tra i quali vi è il tronco considerato, quando però questo è stato tolto dalla rete - tensione a vuoto tra i punti A e T) e la cui resistenza in serie con R_{eq} (rappresenta la resistenza vista entro la rete del tronco considerato quando tutti i generatori ideali di tensione sono stati cortocircuitati). In generale il calcolo di E_{cq} e di R_{eq} viene eseguito applicando i principi di Kirchhoff.

3.2.2 Caratteristiche della protezione

Non essendo facile contenere la tensione sulla massa entro il limite di sicurezza U_L , perché sarebbero necessari valori di R_t troppo bassi e non potrebbero essere facilmente controllate le eventuali variazioni che la resistenza di terra del neutro potrebbe subire col tempo (Il sistema TT è utilizzato prevalentemente come sistema di distribuzione pubblica e l'utente non conosce il valore della R_n). Si vogliono infatti distinguere i problemi della sicurezza dell'utente da quelli della rete di distribuzione pubblica in bassa tensione), per conseguire la sicurezza occorre ridurre il tempo di permanenza di tale tensione. Il circuito deve essere interrotto in un tempo tanto più breve quanto maggiore è la tensione sulle masse in modo da soddisfare la curva di sicurezza. Come già si è detto, nell'applicare la curva di sicurezza si può utilizzare la tensione totale U_t anziché la tensione di contatto a vuoto U_{C0} proteggendo in questo modo anche una persona in contatto con una massa e un punto all'infinito a potenziale zero (situazione più pericolosa). Gli interruttori automatici aprono il circuito secondo una curva caratteristica tempo-corrente. La corrente di guasto I_g può assumere qualsiasi valore dipendente dalla resistenza R_n , R_t ed R_g (resistenza del guasto sulla massa). Un guasto non franco a terra potrebbe diventare pericoloso se la I_g che circola non fosse in grado di aprire il circuito in un tempo t_i inferiore al tempo t_s corrispondente alla tensione $U_t = R_t I_g$. Si può quindi affermare che la R_t deve avere un valore coordinato con la caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione in modo che la tensione totale sia eliminata in tempi inferiori a quelli previsti dalla curva di sicurezza. A tal proposito la Norma 64-8, in relazione ai sistemi TT, prescrive che: "Per attuare la protezione mediante dispositivi di massima corrente a tempo inverso o dispositivi differenziali deve essere soddisfatta la seguente condizione

$$R_t \leq 50 / I$$

dove R_t è la resistenza, in ohm, dell'impianto di terra nelle condizioni più sfavorevoli; I è il valore, in ampere, della corrente di intervento in 5 secondi per gli interruttori magnetotermici o per i fusibili o in 1 secondo per gli interruttori differenziali; se l'impianto comprende più derivazioni protette da dispositivi con correnti di intervento diverse, deve essere considerata la corrente di intervento più elevata.

3.2.3 Protezione con dispositivi di massima corrente

Dalle curve di sicurezza si ricava che per tensioni di 50V (luoghi normali) e 25V (luoghi particolari) un contatto può permanere per un tempo massimo di 5s. Essendo questa la condizioni limite occorre

individuare una protezione di massima corrente che abbia una caratteristica tale per cui sia soddisfatta la relazione:

$$R_t \leq \frac{U_L}{I_{5s}}$$

Per correnti superiori ad I_{5s} le caratteristiche degli interruttori dovrebbero essere in grado di soddisfare la curva di sicurezza mentre per correnti minori anche se si supera il tempo di 5s se le masse non assumono tensioni (U_L) superiori a 50 V o 25 V e il contatto può permanere per tempi pressoché infiniti. Poiché normalmente un impianto di terra è comune a più masse protette con numerosi dispositivi di protezione, se a causa di un guasto d'isolamento una massa disperde una corrente di guasto I_g tutte le masse collegate allo stesso impianto di terra assumono la stessa tensione, segue che per proteggere tutte le masse contro i contatti indiretti deve essere considerata la corrente di intervento più elevata.

Soddisfare la condizione

$$R_t \leq U_L / I_{5s}$$

con dei normali interruttori magneto-termici non è facile. La I_{5s} in genere varia dalle quattro alle dieci volte la I_n dell'interruttore e quindi per interruttori con grandi correnti nominali può essere anche molto alta. La R_t per contro deve essere tanto più bassa quanto più è alto il valore di I_{5s} . Questo si spiega col fatto che gli interruttori di massima corrente sono stati studiati per la protezione dei cavi e non per la protezione dai contatti indiretti.

3.2.4 Protezione con dispositivi differenziali

Il relè differenziale è un dispositivo che rileva una differenza tra le correnti entranti e uscenti da un circuito (in condizioni normali sia in monofase, sia in trifase, sia in trifase con neutro, la somma delle correnti è sempre uguale a zero). Nel caso che si verifichi un guasto a terra una parte della corrente fluisce verso il terreno e la risultante della somma delle correnti non è più uguale a zero. La corrente risultante produce un flusso che induce su di un terzo avvolgimento una corrente che è in grado di fare intervenire l'interruttore differenziale quando la corrente differenziale supera il valore di soglia per la quale è tarato. Impiegando un interruttore differenziale la relazione che deve essere verificata diventa:

$$R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$$

L'unica differenza tra questa e la precedente relazione consiste nel denominatore: mentre le correnti I_{5s} dipendono dalla corrente nominale dell'interruttore e possono essere dell'ordine delle centinaia di ampere, la corrente $I_{\Delta n}$ è indipendente dalla corrente nominale del dispositivo differenziale e può assumere valori variabili da qualche millesimo di ampere a qualche ampere. Risulta in questo modo più agevole il coordinamento con l'impianto di terra.

Ad es. con U_L uguale a 50V e con $I_{\Delta n}$ 0,03 A , la resistenza di terra R_t può essere: $R_t \leq 1666 \Omega$.

La caratteristica d'intervento dell'interruttore differenziale è stata studiata proprio per soddisfare completamente la curva di sicurezza. I tempi massimi di interruzione degli interruttori differenziali per uso generale sono riportati nella tabella VIII.3.

$I_{\Delta n}$	t
$I_{\Delta n}$	0,3 s
$2I_{\Delta n}$	0,15 s
$5I_{\Delta n}$	0,04 s

Tab. III.1 - Tempi massimi di interruzione degli interruttori differenziali per uso generale

3.2.5 Alcune considerazioni sui relè differenziali

Impianto di terra comune a più derivazioni

Se ad un impianto di terra sono collegate masse alimentate da più derivazioni protette con interruttori differenziali deve essere soddisfatta la predetta relazione di coordinamento con l'impianto di terra deve esser soddisfatta per la maggior corrente differenziale nominale.

Questo vale anche per edifici con più unità immobiliari perché se un'unità immobiliare è sprovvista di interruttore differenziale le tensioni pericolose prodotte da un guasto a terra in tale unità immobiliare si trasferiscono sulle masse delle altre unità immobiliari senza che i corrispondenti interruttori differenziali intervengano.

3.2.6 I collegamenti equipotenziali nei sistemi TT

Se il terreno ed ogni parte conduttrice simultaneamente accessibile fossero allo stesso potenziale non vi sarebbe alcun pericolo per le persone. Tecnicamente questa condizione ideale non può essere raggiunta con certezza. Ci si può avvicinare a tale condizione collegando all'impianto di terra, tramite il conduttore equipotenziale, non solo le masse ma anche le masse estranee. In un sistema TT la tensione totale assunta da una massa a causa di un guasto verso terra deve essere eliminata in un tempo inferiore a quello previsto dalla curva di sicurezza rispettando le note condizioni. Risulta perciò evidente che una persona è protetta per le condizioni più sfavorevoli, compreso il contatto tra una massa e una massa estranea anche quando manca il collegamento equipotenziale. E' comunque buona norma effettuare i collegamenti equipotenziali (tubazioni dell'acqua, del gas, riscaldamento, armature di ferro delle fondazione in cemento armato degli edifici ecc..) perché diminuisce la resistenza di terra dell'impianto (la massa estranea funge da dispersore e quindi si riduce la tensione totale U_t e si riducono le tensioni di contatto tra una massa e il terreno), si riducono le tensioni di contatto tra una massa e una massa estranea perché diventano equipotenziali e si riducono i rischi per le persone nel caso in cui dovessero venire meno le condizioni di sicurezza (ad esempio a causa di un mal funzionamento dei dispositivi di protezione oppure di mutamenti stagionali della resistenza di terra). A favore dei collegamenti equipotenziali resta infine da considerare che la curva di sicurezza si basa su dati statistici della resistenza del corpo umano e che quindi potrebbe risultare non sufficiente per la sicurezza di tutte le persone. Durante un guasto d'isolamento, essendo trascurabile la caduta di tensione sui conduttori di protezione, tutte le masse si trovano allo stesso potenziale. Per portare allo stesso potenziale tutte le masse e una massa estranea (ad esempio tubazione idrica entrante in uno stabile) è sufficiente effettuare un collegamento equipotenziale in prossimità della parte disperdente della massa estranea (radice) trascurando tutta la restante parte che non è in contatto col terreno (ad esempio tubazione idrica annegata nella muratura). Se le parti disperdenti della massa estranea fossero più di una, cioè se le radici fossero più di una, il collegamento deve essere ripetuto in corrispondenza di ciascuna di esse.

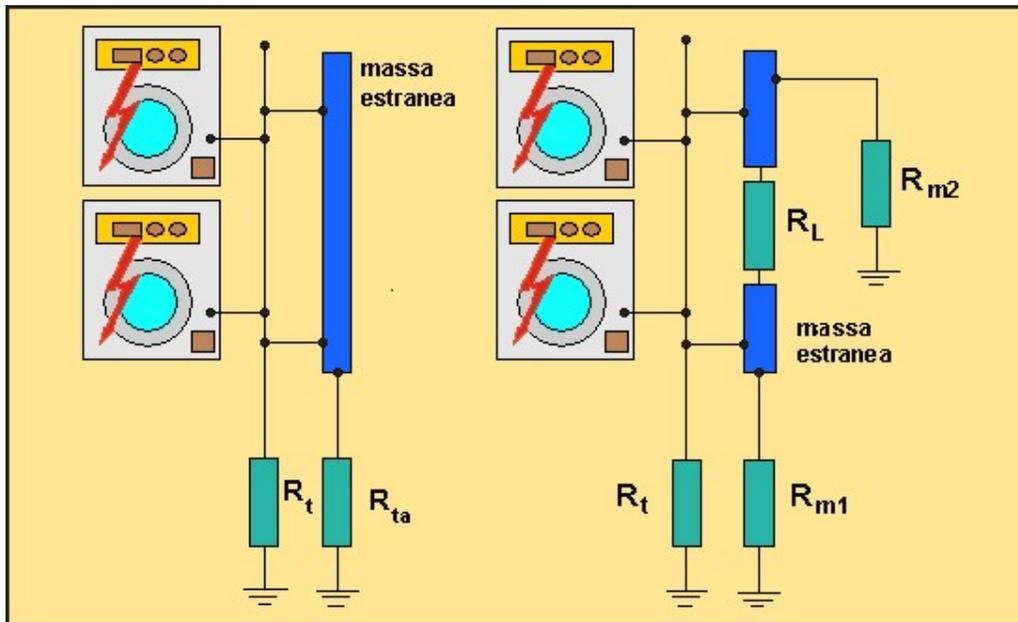


Fig. III.5 - Il collegamento equipotenziale principale nei sistemi TT annulla la tensione di contatto tra le masse e la massa estranea anche se questa presenta una resistenza R_i .

<i>Circuito di guasto</i>	La corrente di guasto si richiude attraverso il terreno dalla terra degli utilizzatori verso la terra di cabina
<i>Impianto di terra</i>	Utilizzatori e cabina hanno impianti di terra separati
<i>Protezione dai contatti indiretti</i>	La protezione è assicurata dal coordinamento tra interruttori differenziali e impianto di terra. Le carcasse degli utilizzatori sono tutte collegate all'impianto di terra dell'utente. La tensione totale di terra applicata agli utilizzatori in caso di guasto dipende dal valore della resistenza di terra della cabina e dell'utente.
<i>Fornitura</i>	Alimentazione in bassa tensione direttamente dalla rete di distribuzione.
<i>Vantaggi</i>	Il guasto viene interrotto tempestivamente all'insorgere del primo difetto di isolamento. Impianto di terra di semplice realizzazione.
<i>Svantaggi</i>	E' richiesto l'uso capillare di relè differenziali

Tab.III.2 – Principali caratteristiche di un sistema TT

3.3 Sistemi TN