

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA
Dipartimento di Ingegneria
Contrada Di Dio I, 98166 – Villaggio S. Agata Messina

Appunti Corso di Sistemi Elettrici

Capitolo 07 Protezione dai Contatti Diretti e Indiretti

Anno Accademico 2021-2022

prof. ing. Bruno Azzerboni

Fonti:

Manuali, guide e cataloghi
ABB, bTicino, Gewiss, Merlin Gerin
Schneider, Siemens

Web:

www.elektro.it,
www.voltimum.it
www.electroyou.it

Sommario

Sommario	2
7. Protezione dai contatti diretti e indiretti	4
7.1 Introduzione	4
7.2 Generalità e Definizioni	4
7.3 Precisazioni	10
7.3.1 Masse	10
7.3.2 Masse estranee	10
7.3.3 Tensioni di contatto	11
7.4 Classificazione dei sistemi di distribuzione	14
7.4.1 Sistema TT	15
7.4.2 Sistema TN	16
7.4.3 Sistema IT	17
7.4.4 Conclusioni	18
7.5 La protezione dai contatti diretti	19
7.5.1 Protezione totale	19
7.5.2 Protezione parziale	19
7.5.3 Protezioni passive	19
7.5.4 Protezioni attive	20
7.5.5 L'interruttore differenziale come protezione addizionale contro i contatti diretti	20
7.5.6 Protezione per limitazione della corrente	21
7.5.7 Protezione per limitazione della carica elettrica	21
7.6 La protezione contro i contatti indiretti	22
7.6.1 Generalità	22
7.6.2 Effetti della corrente nel corpo umano	24
7.7 Protezione dai contatti indiretti con interruzione automatica del circuito (protezioni attive) in relazione al sistema di distribuzione	26
7.7.1 Sistemi TT	26
7.7.2 Sistemi TN	32
7.7.3 Sistemi IT	55
7.8 La selettività delle protezioni contro i guasti di terra	63
7.9 Protezione dai contatti indiretti senza interruzione automatica del circuito (protezioni passive)	66
7.9.1 Generalità	66
7.9.2 Protezione con componenti di classe II	66
7.9.3 Protezione per separazione elettrica	68
7.9.4 Protezione per mezzo di luoghi non conduttori	70
7.9.5 Protezione per equipotenzializzazione del locale non connesso a terra	71
7.9.6 Protezione mediante bassissima tensione di sicurezza	71
7.10 Considerazioni sulle misure di protezione dai contatti diretti e indiretti	78
7.10.1 Confronto tra le misure di protezione dai contatti diretti e indiretti	78
Appendice A	81
I sistemi di distribuzione in corrente continua	81
Sistema TT	81
Sistema TN	82
Sistema IT	85
Appendice B	86
Protezione contro i contatti diretti	86
Appendice C	88
Protezione contro i contatti indiretti senza disconnessione automatica del circuito	88
Protezione mediante componenti elettrici di Classe II o con isolamento equivalente	88
Protezione mediante luoghi non conduttori	89
Protezione per separazione elettrica	89
Appendice D	90
Protezione combinata contro i contatti diretti e indiretti	90
Bassissima tensione di sicurezza (SELV)	90
Bassissima tensione di protezione (PELV)	90
Bassissima tensione funzionale (FELV)	91
Appendice E	92
Considerazioni sul conduttore di neutro e di protezione	92
Conduttore di neutro	92

7. Protezione dai Contatti Diretti e Indiretti

7.1 Introduzione

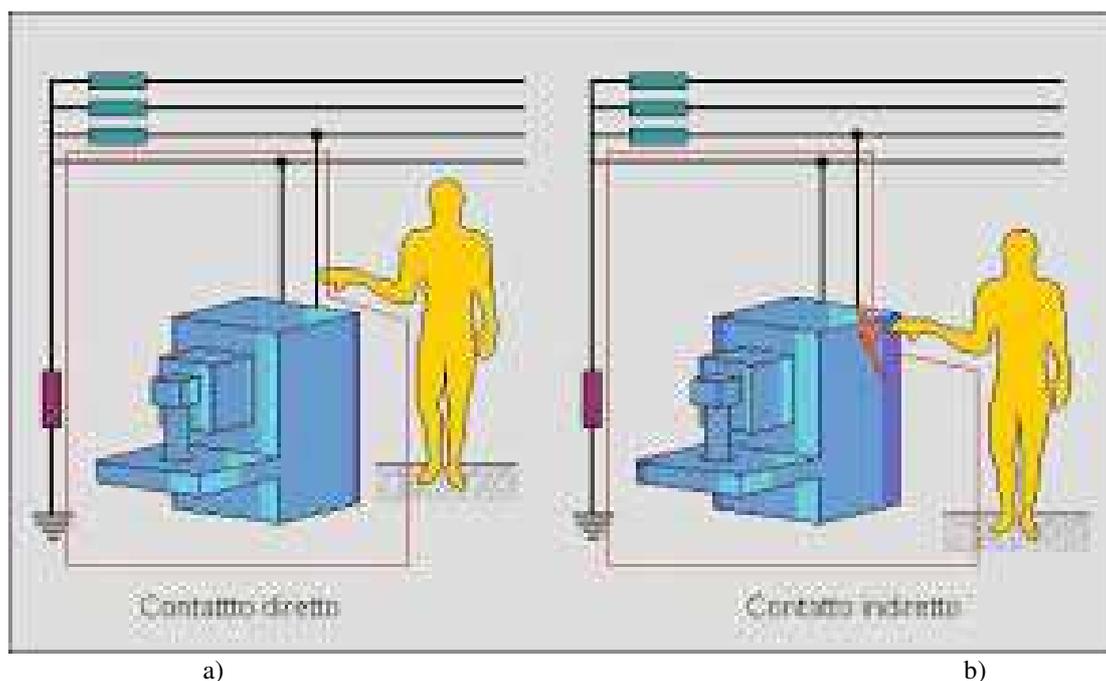
Il guasto a terra, provocato da una perdita di isolamento tra un conduttore in tensione e una massa, rappresenta una problematica impiantistica che arreca danno alle installazioni elettriche e soprattutto rappresenta un pericolo per le persone; queste ultime infatti potrebbero trovarsi in contatto con una parte conduttrice normalmente non in tensione ma che, a causa del guasto, viene a trovarsi ad un potenziale pericoloso.

7.2 Generalità e Definizioni

Una persona è sottoposta a tensione e, quindi, percorsa da corrente quando è in contatto contemporaneo con parti a diversa tensione tra loro. Nel caso ideale in cui tutte le parti di un impianto siano alla stessa tensione, allora, si arriva alla condizione di equipotenzialità che evita la nascita di d.d.p. tra i vari punti e rende l'impianto sicuro per gli utenti.

Un contatto può essere di due tipi distinti:

- **Contatto diretto**, 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) (Fig. 1a);
- **Contatto indiretto**, quando si toccano parti conduttrici di componenti elettrici normalmente non in tensione ma che a causa di un guasto d'isolamento possono assumere un valore di tensione diverso da zero, ad esempio contatto con carcassa di elettrodomestico in tensione a causa di una dispersione di corrente verso massa (Fig. 1b).



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).

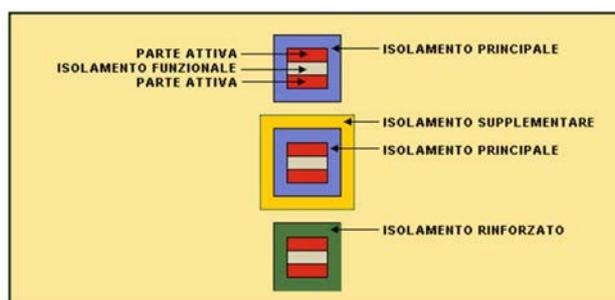
- **Tensione di contatto**, tensione che si stabilisce fra parti simultaneamente accessibili in caso di guasto dell'isolamento (per convenzione il termine è usato nei confronti della protezione contro i contatti indiretti; ai sensi della Norma CEI 11-8 si intende convenzionalmente la tensione mano-piedi);
- **Tensione di contatto limite convenzionale**, massimo valore della tensione di contatto che è possibile mantenere per un tempo indefinito in condizioni ambientali specificate (per convenzione si considera il valore massimo a vuoto che per i sistemi in c.a. è pari a 50 V tranne che per ambienti ed applicazioni particolari a maggior rischio);
- **Tensione di passo**, tensione che può risultare applicata fra i piedi di una persona a distanza di un passo (convenzionalmente un metro) durante un cedimento dell'isolamento;
- **Tensione totale di terra**, tensione che si stabilisce a seguito di un cedimento dell'isolamento fra masse e un punto sufficientemente lontano a potenziale zero.
- **Tensione nominale verso terra di un sistema**, si intende tensione nominale verso terra U_{ne} (vedi Tab.1):
 - ✓ nei sistemi trifase con neutro isolato o con neutro a terra attraverso impedenza, la tensione nominale;
 - ✓ nei sistemi trifase con neutro direttamente a terra, la tensione stellata corrispondente alla tensione nominale diviso $\sqrt{3}$;
 - ✓ nei sistemi monofase, o a corrente continua, senza punti di messa a terra, la tensione nominale;
 - ✓ nei sistemi monofase, o a corrente continua, con punto di mezzo messo a terra, la metà della tensione nominale.

<p>sistemi trifase con neutro isolato o con neutro a terra attraverso impedenza</p> $U_{ne} = U_{n\phi}$	
<p>sistemi trifase con neutro direttamente a terra</p> $U_{ne} = \frac{U_{n\phi}}{\sqrt{3}} = U_0$	
<p>sistemi monofase, o a corrente continua, senza punti di messa a terra</p> $U_{ne} = U_{n\phi}$	
<p>sistemi monofase, o a corrente continua, con punto di mezzo messo a terra</p> $U_{ne} = \frac{U_{n\phi}}{2}$	

Tabella 1

- **Parte attiva**, conduttore o parte conduttrice in tensione nel servizio ordinario, compreso il conduttore di neutro, ma escluso, per convenzione, il conduttore PEN.
- **Parte attiva pericolosa**, parte attiva che può dare origine in determinate condizioni di influenze esterne a una corrente pericolosa.
- **Parti a portata di mano**, conduttori o parti conduttrici situati nella zona che si estende da un punto o da una superficie occupata o percorsa ordinariamente da persone fino ai limiti che una persona può raggiungere con una mano senza l'uso di attrezzi.
- **Parti simultaneamente accessibili**, conduttori o parti conduttrici che possono essere toccati simultaneamente da una persona.
- **Massa**, parte conduttrice di un componente elettrico che può essere toccata e che non è in tensione in condizioni ordinarie, ma che può andare in tensione in condizioni di guasto (Una parte conduttrice che può andare in tensione solo perché è in contatto con una massa non è da considerare una massa).

- **Corrente di dispersione verso terra**, corrente che, in assenza di guasto, fluisce verso terra o verso le masse.
- **Corrente differenziale**, somma vettoriale dei valori istantanei delle correnti che percorrono tutti i conduttori attivi di un circuito in un punto dell'impianto.
- **Involucro**, parte che assicura la protezione di un componente elettrico contro determinati agenti esterni e, in ogni direzione, contro i contatti diretti.
- **Barriera**, parte che assicura la protezione contro i contatti diretti nelle direzioni abituali di accesso.
- **Ostacolo**, elemento inteso a prevenire un contatto diretto involontario con le parti attive, ma non a impedire il contatto diretto intenzionale.
- **Isolamento principale**, isolamento delle parti attive utilizzato per la protezione base contro i contatti diretti e indiretti. È quello che isola le parti normalmente in tensione ed ha lo scopo di proteggere dalle tensioni di contatto. In altre parole è l'isolamento delle parti attive necessario a proteggere contro la folgorazione.
- **Isolamento supplementare**, isolamento indipendente previsto in aggiunta all'isolamento principale per assicurare la protezione contro i contatti elettrici in caso di guasto dell'isolamento principale.
- **Doppio isolamento**, isolamento comprendente sia l'isolamento principale sia l'isolamento supplementare.
- **Isolamento rinforzato**, sistema unico di isolamento applicato alle parti attive, in grado di assicurare un grado di protezione contro contatti elettrici equivalente al doppio isolamento, nelle condizioni specificate nelle relative norme.



- **Isolamento funzionale**, è, in una utenza elettrica, ciò che rende possibile il funzionamento, isolando tra di loro le parti a differente tensione. In altre parole è isolamento esistente tra le parti attive e tra queste e la carcassa di un apparecchio elettrico. Senza questo isolamento la macchina non potrebbe funzionare. L'isolamento funzionale e quello principale non sempre coincidono, per esempio i conduttori aerei nudi hanno l'isolamento funzionale (l'aria tra di essi) ma non hanno quello principale.

Il **contatto di persone con le parti attive costituisce il contatto diretto** definito prima. Ad esempio in un motore sono parti attive gli avvolgimenti e i morsetti, non lo è la struttura metallica esterna.

Il **contatto indiretto è quello di una persona con una massa, oppure con una parte conduttrice in contatto con una massa, durante un guasto che interessi l'isolamento principale.**

In funzione dell'isolamento, distinguiamo:

- **Componenti di classe 0**, sono utenze elettriche provviste solo dell'isolamento principale e **non aventi alcun dispositivo per il collegamento delle masse ad un conduttore di protezione**. Queste utenze non possono essere collegate a terra, quindi, nel caso di guasto all'isolamento principale, la protezione è affidata esclusivamente alle caratteristiche dell'ambiente in cui sono installate.
- **Componenti di classe I**, sono utenze elettriche provviste del solo isolamento principale ed **aventi un dispositivo per il collegamento delle masse ad un conduttore di protezione**.

- **Componenti di classe II**, sono utenze elettriche provviste di isolamento doppio o rinforzato e **non aventi alcun dispositivo per il collegamento delle masse ad un conduttore di protezione**. Queste utenze non devono essere collegate a terra, sono però ammessi morsetti per conduttori di protezione passanti.
- **Componenti di classe III**, sono utenze elettriche provviste di isolamento ridotto poiché sono destinate ad essere alimentate solo da un sistema a bassissima tensione di sicurezza ed in cui non si possono generare tensioni di valore superiore a quello del sistema di alimentazione.
- **Pavimenti e pareti isolanti**, pavimenti e pareti di locali la cui resistenza è sufficientemente elevata da limitare la corrente a un valore non pericoloso.
- **Terra**, il terreno come conduttore il cui potenziale elettrico in ogni punto è convenzionalmente considerato uguale a zero;
- **Dispersore**, corpo conduttore o gruppo di corpi conduttori in contatto elettrico con il terreno e che realizza un collegamento elettrico con la terra.
- **Impianti di terra elettricamente indipendenti**, impianti di terra aventi dispersori separati e tali che la corrente massima che uno di questi impianti può disperdere non modifica il potenziale rispetto a terra dell'altro impianto in misura superiore ad un valore determinato.
- **Conduttore di protezione PE**, conduttore prescritto per alcune misure di protezione contro i contatti indiretti per il collegamento di alcune delle seguenti parti:
 - ✓ masse;
 - ✓ masse estranee;
 - ✓ collettore (o nodo) principale di terra;
 - ✓ dispersore;
 - ✓ punto di terra della sorgente o neutro artificiale.
- **Conduttore PEN**, conduttore che svolge insieme le funzioni sia di conduttore di protezione sia di conduttore di neutro (Il simbolo PEN risulta dalla combinazione del simbolo PE per il conduttore di protezione e del simbolo N per il conduttore di neutro).
- **Impianto di terra**, insieme dei dispersori, dei conduttori di terra, dei collettori (o nodi) principali di terra e dei conduttori di protezione ed equipotenziali, destinato a realizzare la messa a terra di protezione e/o di funzionamento.
- **Corrente di guasto**, corrente che si stabilisce a seguito di un cedimento dell'isolamento o quando l'isolamento è cortocircuitato.
- **Corrente di guasto a terra**, corrente di guasto che si chiude attraverso l'impianto di terra.
- **Persona esperta**, persona avente sufficienti conoscenze tecniche o sufficiente esperienza per permetterle di prevenire i pericoli che può presentare l'elettricità.
- **Persona avvertita**, persona adeguatamente informata od avvisata da persone esperte, per permetterle di prevenire i pericoli che può presentare l'elettricità.
- **Persona addestrata**, persona aventi conoscenze tecniche o esperienza (persona esperta), o che ha ricevuto istruzioni specifiche sufficienti per permetterle di prevenire i pericoli dell'elettricità, in relazione a determinate operazioni condotte in condizioni specificate (persona avvertita). Il termine addestrato è pertanto un attributo relativo:
 - ✓ al tipo di operazione;
 - ✓ al tipo d'impianto sul quale, o in vicinanza del quale, si deve operare;
 - ✓ alle condizioni ambientali, contingenti e di supervisione da parte di personale più preparato.
- **Persona non addestrata**, persona non esperta e non avvertita.

- **Dispersore**, corpo conduttore o gruppo di corpi conduttori in contatto elettrico con il terreno e che realizza un collegamento elettrico con la terra;
- **Dispersore intenzionale o artificiale (DA)**, ottenuto mediante picchetti (puntazze) infissi verticalmente nel terreno, nastri, piastre oppure corde nude interrate orizzontalmente.
- **Dispersore di fatto o naturale (DN)**, costituito da strutture metalliche interrate come ferri d'armatura, tubazioni metalliche dell'acqua (non sono solitamente utilizzabili le tubazioni dell'acquedotto pubblico), schermi metallici dei cavi, ecc.

In generale il dispersore è un corpo conduttore o gruppo di corpi conduttori in contatto elettrico con il terreno e che realizza un collegamento elettrico con la terra;

- **Conduttore di terra (CT)**, collega i dispersori fra loro e al collettore principale di terra, gli eventuali tratti di corda nuda a contatto col terreno devono essere considerati parte del dispersore. È consigliabile proteggere le parti interrate e quelle emergenti mediante tubi per migliorare le difese contro la corrosione e contro gli urti.
- **Collettore principale di terra**, è il nodo principale, realizzato mediante sbarra o morsettiera, cui fanno capo le diverse parti dell'impianto.
- **Collegamenti equipotenziali principali (EQP)**, collegano al collettore principale di terra le masse estranee (tubazioni dell'acqua, del gas, ecc..) entranti alla base dell'edificio.
I collegamenti equipotenziali principali realizzano il collegamento fra il conduttore di protezione, il conduttore di terra, il collettore principale di terra e le parti conduttrici di seguito elencate:
 - i tubi metallici, acqua, gas, ecc.;
 - le strutture metalliche dell'edificio;
 - le canalizzazioni del riscaldamento centrale;
 - le canalizzazioni del condizionamento d'aria;
 - le armature principali del cemento armato (ove possibile);
 - lo schermo metallico dei cavi di telecomunicazione.

Le parti conduttrici che dall'esterno si immettono all'interno nell'edificio devono essere collegate il più vicino possibile al loro punto di ingresso nell'edificio.

- **Conduttore di protezione principale montante (PE)**, connette il collettore principale di terra con i PE di collegamento alle masse e con i conduttori equipotenziali di collegamento alle masse estranee.
È il conduttore prescritto per alcune misure di protezione contro i contatti indiretti per il collegamento di alcune delle seguenti parti: masse, masse estranee, collettore (o nodo) principale di terra, dispersore, punto di terra della sorgente o neutro artificiale;
- **Conduttore di protezione secondario (PE)**, collega le masse al collettore principale di terra tramite il PE montante.
- **Collegamenti equipotenziali supplementari (EQS)**, collegano le masse estranee fra loro e al conduttore di protezione.
Un collegamento equipotenziale supplementare comprendente tutte le masse simultaneamente accessibili costituite da componenti fissi dell'impianto e tutte le masse estranee (comprese, ove possibile, le armature principali del cemento armato) deve essere praticato localmente se i requisiti previsti per l'interruzione automatica non possono essere soddisfatti. Il collegamento equipotenziale deve comprendere i conduttori di protezione di tutti i componenti dell'impianto inclusi quelli delle prese a spina

- **Impianto di terra**, insieme dei dispersori, dei conduttori di terra, dei collettori di terra, dei conduttori di protezione e dei collegamenti equipotenziali, destinato a realizzare la messa a terra di protezione e/o di funzionamento,
- **Corrente di guasto a terra**, corrente di guasto che si chiude attraverso l'impianto di terra;
- **Resistenza di terra**, resistenza fra il collettore principale di terra e la terra (convenzionalmente data dal rapporto fra la tensione totale di terra e la corrente di guasto a terra);
- **Ambienti ordinari**, si intendono quelli dove non esistono condizioni speciali che impongano particolari precauzioni di installazione o limitazioni nella scelta e nell'impiego di macchinari, apparecchiature e conduttori;
- **Ambienti speciali**, si intendono quelli non ordinari e si suddividono in umidi, bagnati, polverosi, etc. etc.;

In relazione al loro grado di mobilità gli apparecchi si classificano in:

- **Apparecchio fisso**, apparecchio ancorato o fissato ad un supporto o comunque fissato, anche in altro modo, in un posto preciso, oppure apparecchio che non può essere facilmente spostato;
- **Apparecchio trasportabile**, apparecchio che, pur potendo essere spostato con facilità, non viene normalmente spostato durante il suo funzionamento ordinario;
- **Apparecchio mobile**, apparecchio trasportabile che deve essere spostato manualmente da chi lo utilizza mentre è collegato al circuito di alimentazione;
- **Apparecchio portatile**, apparecchio mobile destinato ad essere sorretto dalla mano di chi lo utilizza durante il suo impiego normale, nel quale il motore, se esiste, è parte integrante.

7.3 *Precisazioni*

7.3.1 *Masse*

Si definiscono masse tutte le parte conduttrici, facenti parte dell'impianto elettrico, normalmente non in tensione, che possono andare in tensione a causa di un guasto all'isolamento principale (CEI 64 8 art. 23.2).

Sono considerate masse gli involucri degli apparecchi di classe 0 e I, mentre non sono masse gli involucri degli apparecchi in classe II, perché non vanno in tensione se cede l'isolamento principale, essendoci anche quello supplementare.

La norma precisa che non è da intendere come massa una parte conduttrice che può andare in tensione solo perché è in contatto con una massa. È questo, per esempio, il caso di cavi contenuti in tubi, poggiati su una passerella metallica. La passerella non è una massa perché se il tubo è metallico, è esso stesso una massa, e quindi le parti a contatto con esso non lo sono; se invece il tubo è isolante costituisce un doppio isolamento e, nel caso di cedimento dell'isolamento principale, la passerella non va in tensione.

Nel caso in cui l'involucro metallico sia ricoperto di vernici e simili è ancora da considerare massa se va in tensione in caso di cedimento dell'isolamento principale; infatti lo strato protettivo non è, in generale, idoneo a garantire la sicurezza delle persone.

La normativa infine vieta il collegamento a terra di componenti dell'impianto o apparecchi utilizzatori con isolamento doppio, rinforzato, o ad isolamento totale.

Il contatto indiretto è quindi quello di una persona con una massa, oppure con una parte conduttrice in contatto con una massa, durante un guasto che interessi l'isolamento principale.

7.3.2 *Masse estranee*

Si definisce massa estranea una "parte conduttrice non facente parte dell'impianto elettrico in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra" (CEI 64 8 art. 23.3).

Si tratta di parti metalliche accessibili all'uomo, e in buon collegamento elettrico con il terreno:

- ✓ Elementi metallici facenti parte di strutture di edifici, come gli infissi;
- ✓ Condutture metalliche di gas e acqua (interrate o meno).

A causa dell'intimo contatto con il terreno, costituiscono dei dispersori con bassa resistenza di terra; esse conferiscono, nel caso siano toccate, un potenziale prossimo a quello del punto del terreno in cui avviene il contatto.

Può essere costituita anche da una parte metallica isolata verso terra, ma in grado di immettere un potenziale elevato nel locale, derivante da un guasto esterno al locale stesso.

In ambienti particolarmente pericolosi quali locali da bagno, piscine ecc., le masse estranee possono anche introdurre potenziali diversi da quello di terra. È tale il caso delle tubazioni idriche che, anche se isolate da terra, possono portare in altri luoghi il potenziale conseguente, per esempio, a guasti in uno scaldabagno elettrico.

La persona che entra in contatto simultaneamente con una massa e una massa estranea, è soggetta alla tensione totale, occorre pertanto collegare all'impianto di terra le masse estranee e tale collegamento viene definito come collegamento equipotenziale principale

Per decidere se si è alla presenza di una massa estranea, si misura la resistenza verso terra, poiché un corpo conduttore a stretto contatto con il terreno ha una resistenza verso terra molto piccola, al limite nulla. La normativa considera masse estranee le parti metalliche aventi resistenza verso terra inferiore a 1000 ohm per gli ambienti ordinari e 200 ohm per quelli a maggior rischio.

7.3.3 Tensioni di contatto

Nel caso di contatto indiretto, si definiscono due tensioni:

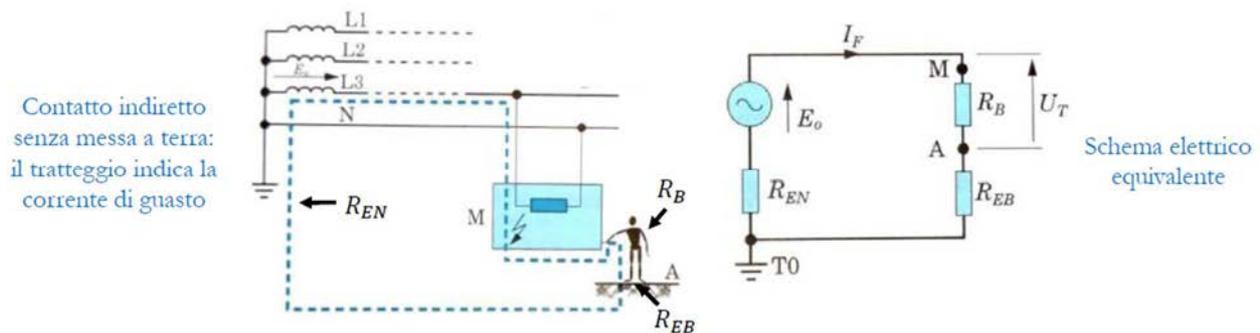
- Tensione di contatto U_T : è il valore di tensione a cui è sottoposta la persona durante il guasto per il contatto con la massa, pari alla d.d.p. tra i punti del corpo collegati al circuito di guasto (nel caso di contatto con una mano avendo i piedi a terra, la tensione di contatto è quella tra mano e piedi).
Il valore di U_T considerato non pericoloso è detto tensione di contatto ammissibile U_{TP}
- Tensione di contatto a vuoto U_{ST} : è il valore di tensione che assume la massa quando vi è un guasto di isolamento ma la persona non tocca la massa stessa. La normativa definisce una tensione di contatto a vuoto ammissibile U_{STP} (limiti di pericolosità della tensione)

Valuteremo le due tensioni in un sistema TT con massa non collegata e collegata all'impianto di terra.

Faremo riferimento a:

- I_F corrente di guasto a terra determinata dal guasto;
- I_B corrente nella persona a contatto con la massa;
- R_{EN} resistenza del neutro verso terra nella cabina di trasformazione (solitamente trascurabile $<1\Omega$)
- R_B resistenza del corpo umano tra i punti di contatto ($1k\Omega$)
- R_{EB} resistenza del corpo umano tra i punti di contatto (dipende dalle condizioni di pavimento, calzature, terreno)

7.3.3.1 Massa non collegata a terra



Nel caso di massa non collegata a terra, la corrente di guasto che si richiude attraverso il terreno interessa la persona e varrà:

$$I_F = I_B = \frac{E_0}{R_{EN} + R_B + R_{EB}}$$

Se consideriamo $R_{EN} + R_B + R_{EB} \approx R_B = 1k\Omega$ ed $E_0 = 230 V$, si ottiene $I_F = I_B = 230 mA$, un valore altissimo (zona 3 di pericolosità della corrente).

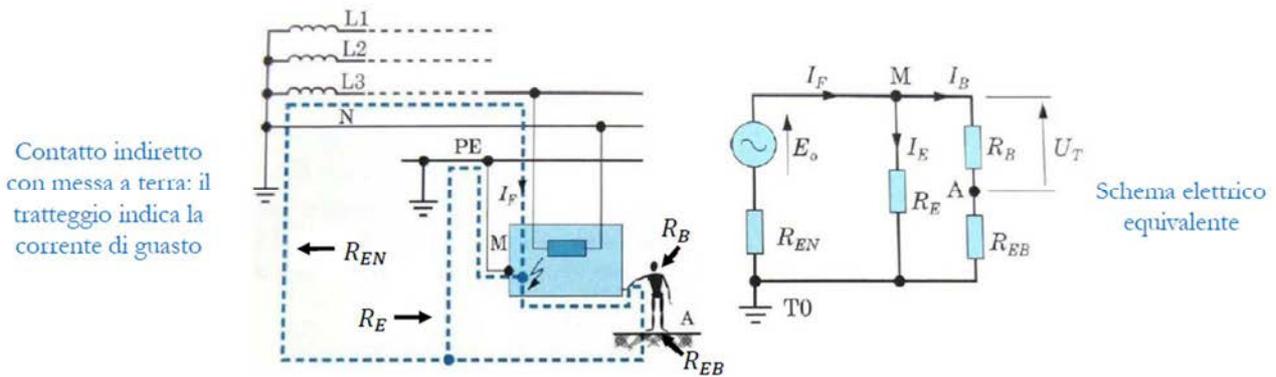
Inoltre, dal partitore di tensione, si ha:

$$U_T = E_0 \frac{R_B}{R_{EN} + R_B + R_{EB}}$$

Se consideriamo $R_{EN} + R_B + R_{EB} \approx R_B = 1k\Omega$, si ha $U_T = E_0 = 230 V$

Se la persona tocca la massa, si ha $U_{ST} = E_0$.

7.3.3.2 Massa collegata a terra (Sistema TT)



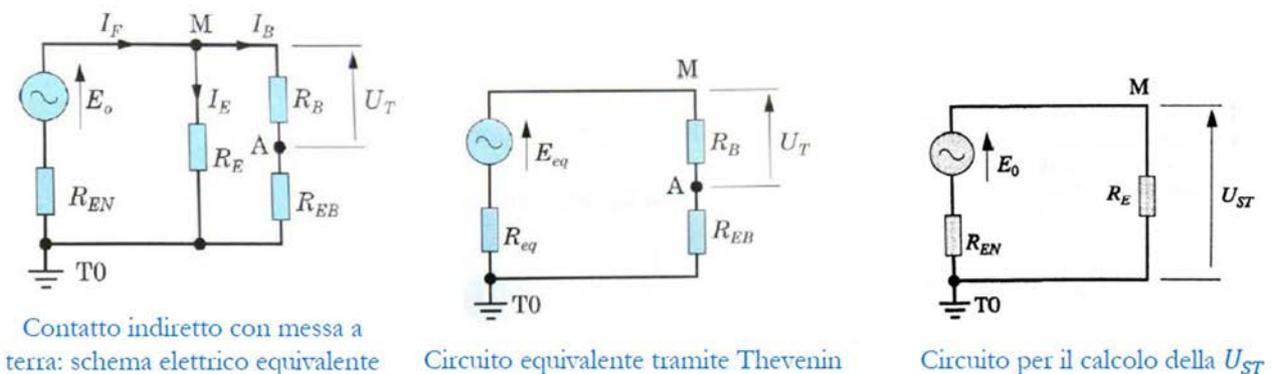
Nel caso di massa collegata a terra, la corrente di guasto si ripartisce tra la resistenza totale di terra R_E e la persona $R_B + R_{EB}$:

$$I_B = I_F \frac{R_E}{R_E + R_B + R_{EB}}$$

Più R_E è piccolo rispetto ad $R_B + R_{EB}$, minore è la corrente che attraversa l'uomo.

L'impianto di terra fornisce alla corrente di guasto un percorso verso terra e, nel caso di contatto indiretto, rappresenta una resistenza R_E in parallelo alla persona, di valore piccolo, attraverso cui deve chiudersi la maggior parte della corrente di guasto.

Riprendiamo lo schema elettrico equivalente:



Per calcolare la tensione di contatto, si può applicare Thevenin al circuito visto da $R_B + R_{EB}$:

$$E_{eq} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} \quad R_{eq} = \frac{R_E R_{EN}}{R_E + R_{EN}}$$

Da cui

$$U_T = E_{eq} \frac{R_B}{R_{eq} + R_B + R_{EB}} \approx E_{eq} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}$$

Confrontando ora la tensione di contatto con terra (U_{T-TT}) con la stessa tensione del caso precedente senza terra (U_{T-TI}), abbiamo:

$$\frac{U_{T-TT}}{U_{T-TI}} \approx \frac{E_{eq} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}}{E_0 \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}} = \frac{E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} * \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}}{E_0 \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}} = \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

Per il calcolo della tensione di contatto a vuoto, consideriamo il circuito senza la persona in contatto:

$$U_{ST} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

$$\frac{U_{T-TT}}{U_{T-TI}} = \frac{E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}}{E_0} = \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

In definitiva abbiamo ottenuto che:

$$U_T = U_{ST} \frac{R_B}{R_{eq} + R_B + R_{EB}} \quad \text{con} \quad U_{ST} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

Rispetto al caso senza massa a terra:

$$\frac{U_{T-TT}}{U_{T-TI}} \approx \frac{U_{ST-TT}}{U_{ST-TI}} = \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

Il rapporto è minore di 1 ma per avere grossi vantaggi è necessario che la R_E sia molto piccola. Nel caso peggiore in cui $R_E \gg R_{EN}$, le tensioni di contatto nei due casi senza e con messa a terra coincidono.

Nel sistema TT, la tensione di contatto a vuoto è sempre minore della tensione imposta dal generatore.

La tensione di contatto è sempre minore di quella di contatto a vuoto. Il rapporto dipende da R_{EB} poiché R_{eq} è sicuramente trascurabile (è minore del minore tra R_E e R_{EN} , quest'ultima $< 1\Omega$). La condizione più sfavorevole si ha quando $R_{EB} \cong 0$ (pavimenti molto umidi e piedi nudi), per cui si avrebbe $U_T = U_{ST}$.

Per una corretta protezione dai contatti indiretti, quindi, è necessario l'impianto di terra coadiuvato da un ulteriore dispositivo di protezione.

7.4 Classificazione dei sistemi di distribuzione

L'entità del guasto a terra e le conseguenze che derivano dal contatto con masse in tensione sono legate in modo determinante allo stato del neutro del sistema di alimentazione e alla modalità di connessione delle masse verso terra.

Per scegliere opportunamente il dispositivo di protezione contro i guasti a terra occorre quindi conoscere il sistema di distribuzione dell'impianto. La norma italiana CEI 64-8/3 (allineata a quella internazionale IEC 60364-3) classifica i sistemi elettrici con la combinazione di due lettere.

La prima lettera indica la situazione del sistema di alimentazione verso terra (la connessione a terra di un punto a livello di trasformatori MT/BT è necessaria per evitare di trasferire a valle tensioni pericolose, ad esempio per guasto tra gli avvolgimenti di MT e quelli di BT. Nei sistemi IT dovrebbero utilizzarsi trasformatori costruiti in modo da non trasferire tensioni pericolose per l'uomo e le apparecchiature)

- **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, generalmente il neutro, tramite un'impedenza.

La seconda lettera indica la 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 indicano la disposizione dei conduttori di neutro e di protezione:

- **S** funzioni di neutro e protezione svolte da conduttori separati;
- **C** funzioni di neutro e protezione svolte da un unico conduttore (conduttore PEN).

Con riferimento a queste definizioni di seguito sono illustrati i principali sistemi di distribuzione utilizzati.

7.4.1 Sistema TT

Nel sistema TT il neutro e le masse sono collegati a due impianti di terra elettricamente indipendenti (Fig. 1) e la corrente di guasto a terra ritorna quindi al nodo di alimentazione attraverso il terreno (Fig. 2).

Fig.1: sistema TT

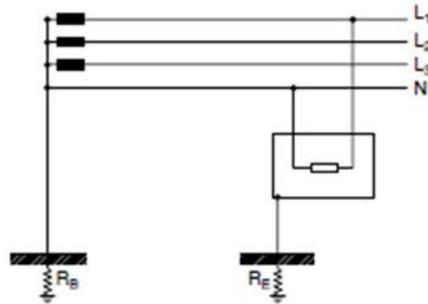
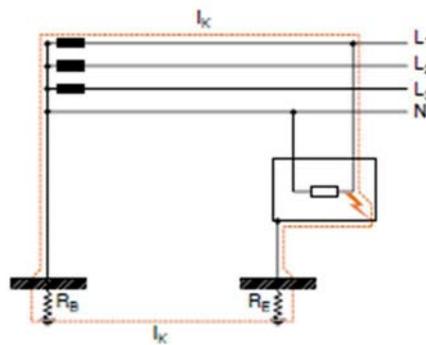


Fig.2: guasto a terra in un sistema TT



In impianti di questo tipo il neutro viene normalmente distribuito e la sua funzione è quella di rendere disponibile la tensione di fase (es. 230 V), utile per l'alimentazione dei carichi monofase degli impianti civili.

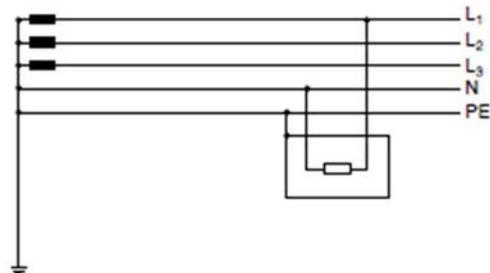
7.4.2 Sistema TN

Nel sistema TN il neutro è connesso direttamente a terra mentre le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro.

Il sistema elettrico TN si distingue in tre tipi a seconda che i conduttori di neutro e di protezione siano separati o meno:

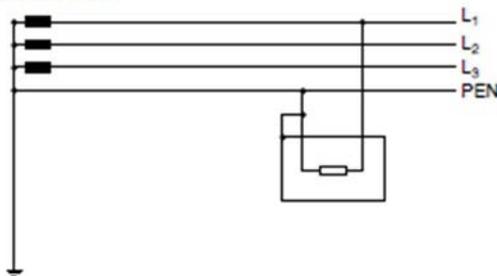
1. TN-S: il conduttore di neutro N e di protezione PE sono separati (Fig. 3)

Fig.3: sistema TN-S



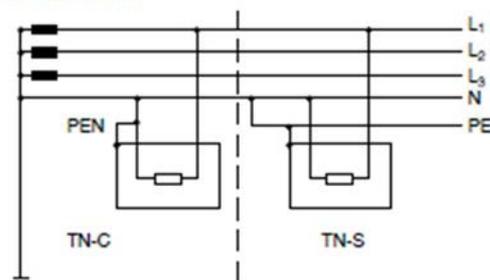
2. TN-C: le funzioni di neutro e di protezione sono combinate in un unico conduttore definito PEN (Fig. 4)

Fig.4: sistema TN-C



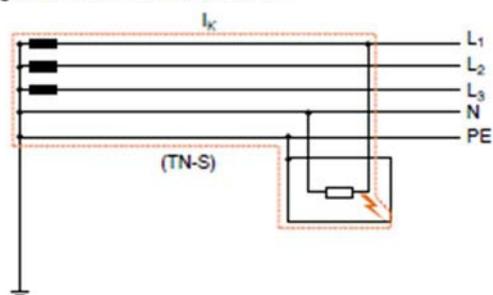
3. TN-C-S: le funzioni di neutro e di protezione sono in parte combinate in un solo conduttore PEN ed in parte separate PE + N (Fig. 5).

Fig.5: sistema TN-C-S



Nei sistemi TN la corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso un collegamento metallico diretto (conduttore PE o PEN) senza praticamente interessare il dispersore di terra (Fig. 6).

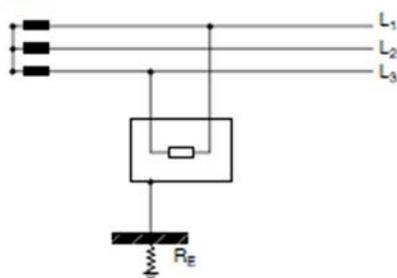
Fig.6: guasto a terra in un sistema TN



7.4.3 Sistema IT

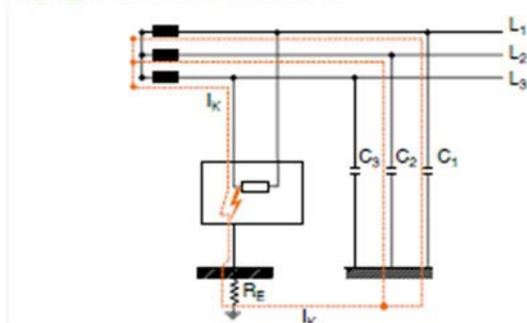
Il sistema elettrico IT non ha parti attive collegate direttamente a terra ma può avere parti attive collegate a terra tramite un'impedenza di valore elevato (Fig. 7). Tutte le masse, singolarmente o in gruppo, sono connesse ad un impianto di terra indipendente.

Fig.7: sistema IT



La corrente di guasto a terra ritorna al nodo di alimentazione attraverso l'impianto di terra delle masse e le capacità verso terra dei conduttori di linea (Fig. 8).

Fig.8: guasto a terra in un sistema IT



7.4.4 Conclusioni

sistema di distribuzione	principali applicazioni	valore tipico delle correnti di guasto a terra	Note
TT	installazioni domestiche e similari; piccole industrie alimentate in bassa tensione	10÷100 A	Il sistema di distribuzione TT è utilizzato quando non è possibile garantire la distribuzione del conduttore di protezione (PE) e si preferisce affidare all'utente la responsabilità della protezione dai contatti indiretti.
TN	industrie e grossi impianti alimentati in media tensione	valori simili al guasto monofase	Il sistema TN è un sistema con il quale viene distribuita l'energia alle utenze che dispongono di propria cabina di trasformazione; in questo caso è relativamente semplice garantire il conduttore di protezione.
IT	industrie chimiche e petrolchimiche, impianti in cui è fondamentale la continuità di servizio	$\mu\text{A} \div 2 \text{ A}$ in funzione dell'estensione dell'impianto; in caso di doppio guasto a terra la corrente di guasto assume valori tipici dei sistemi TT o TN a secondo del collegamento delle masse rispetto a terra	Questo tipo di sistema risulta essere particolarmente adatto nei casi in cui deve essere garantita la continuità di servizio in quanto la presenza di un primo guasto non dà luogo a correnti di valore elevato e/o pericoloso per le persone.

7.5 La protezione dai contatti diretti

7.5.1 Protezione totale

Le misure di protezione totali consistono nell'isolamento delle parti attive e nell'uso di involucri o barriere.

➤ **Isolamento**

Le parti attive devono essere ricoperte completamente da uno strato di isolante avente spessore adeguato alla tensione nominale verso terra del sistema elettrico ed essere resistenti agli sforzi meccanici, elettrici, termici e alle alterazioni chimiche cui possono essere sottoposte durante il funzionamento. Se si considera per esempio un cavo elettrico, per renderlo resistente alle normali sollecitazioni meccaniche occorre adottare un'appropriata modalità di posa (cavo armato o concentrico, tubi protettivi, passerelle, cunicoli, interrati ad almeno 0,5 m, segnalati e protetti con mattoni, tegole ecc.). Vernici, lacche, smalti e prodotti simili non sono considerati idonei a garantire una adeguata protezione contro i contatti diretti.

➤ **Involucri e barriere**

L'involucro garantisce la protezione dai contatti diretti quando esistono parti attive (ad es. morsetti elettrici) che devono essere accessibili e quindi non possono essere completamente isolate. La barriera è un elemento che impedisce il contatto diretto nella direzione normale di accesso. Questi sistemi di protezione assicurano un certo grado di protezione contro la penetrazione di solidi e di liquidi. Le barriere e gli involucri 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. In alcuni casi di comprovata necessità e solo con l'approvazione del diretto superiore e dopo aver preso le necessarie misure di sicurezza, è ammesso lavorare su parti in tensione non superiore a 1000 V. L'interruttore differenziale con corrente nominale d'intervento non superiore a 30 mA è riconosciuto come protezione aggiuntiva (non è riconosciuto come unico mezzo di protezione) contro i contatti diretti in caso di insuccesso delle altre misure di protezione o di incuria da parte degli utenti.

7.5.2 Protezione parziale

Le misure di protezione parziale si ottengono mediante ostacoli e mediante allontanamento. Hanno il compito di proteggere dai contatti accidentali e di realizzare l'allontanamento di parti 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 sia in orizzontale e che quindi non possono convenzionalmente essere toccate contemporaneamente da una persona) ma non hanno efficacia verso i contatti intenzionali. Sono destinate solo alla protezione di personale addestrato e vengono applicate nelle officine elettriche. Non devono poter essere rimosse accidentalmente, ma la rimozione intenzionale deve poter avvenire senza chiave o attrezzo.

7.5.3 Protezioni passive

Metodi per rendere impossibile il manifestarsi di tensioni di contatto pericolose:

- **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);
- **Protezione per isolamento elettrico: apparecchi di classe III** (utenze elettriche provviste di isolamento ridotto poiché sono destinate ad essere alimentate solo da un sistema a bassissima tensione di sicurezza ed in cui non si possono generare tensioni di valore superiore a quello del sistema di alimentazione). 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) (Le parti in tensione possono essere scoperte. Non è presente il morsetto di terra);
- **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. È 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 50.000 Ω per tensioni fino a 500V e 100.000 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 persone 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.**

7.5.4 Protezioni attive

Le misure di protezione indicate nel paragrafo precedente sono finalizzate ad evitare il contatto diretto. Può tuttavia avvenire un contatto diretto a causa del cedimento della protezione passiva o più semplicemente per imprudenza da parte dell'utente. Per proteggere le persone da tale eventualità può essere impiegato, come metodo addizionale, il sistema di interruzione automatica che non esime, però, dall'applicazione delle misure di protezione fin qui descritte. Non essendo la corrente che attraversa il corpo umano in grado di far intervenire i dispositivi di massima corrente, l'unico dispositivo in grado di aprire il circuito in casi del genere è l'interruttore ad alta sensibilità ($I_{\Delta n}$ non superiore a 30mA).

7.5.5 L'interruttore differenziale come protezione addizionale contro i contatti diretti

La corrente $I_{\Delta n}$ di 30mA dell'interruttore differenziale ad alta sensibilità, non corrisponde esattamente a quella che il corpo umano può sopportare per un tempo imprecisato, ma è frutto di un compromesso tra le esigenze di sicurezza per le persone e la continuità di servizio dell'impianto. L'interruttore differenziale non limita il valore della corrente ma solamente il tempo in cui questa corrente permane e la sicurezza della persona è assicurata solo se, per ogni valore di corrente, il circuito viene aperto in un tempo compatibile con la protezione del corpo umano. In caso di contatto diretto l'interruttore differenziale da 30mA, a parità di corrente, interviene in un tempo inferiore rispetto a quello ammesso per la protezione contro i contatti indiretti.

Occorre però sottolineare che nei contatti indiretti si ha un vantaggio: normalmente la persona, nel momento in cui si verifica il guasto, non è a contatto con la massa e la corrente si chiude a terra tramite il conduttore di protezione determinando l'intervento dell'interruttore differenziale, senza che la persona sia percorsa da nessuna corrente. Questo non può accadere nei contatti diretti in quanto il dispositivo differenziale è attivato dalla stessa corrente che attraversa la persona, il che non ci permette di escludere che nell'infortunato non possano insorgere fenomeni di fibrillazione ventricolare. Oltre ai limiti fino ad ora descritti la protezione differenziale contro i contatti diretti presenta le seguenti limitazioni:

- **contatto fra due parti attive del sistema:** se la persona è isolata da terra il dispositivo differenziale sicuramente non interviene mentre se la persona non è isolata da terra il differenziale può anche intervenire. Se il contatto non è simultaneo, ma prima viene toccata la fase, il dispositivo può intervenire se la corrente verso terra è maggiore di $I_{\Delta n}$ e se il tempo di contatto sulla sola fase permane per il tempo minimo di non funzionamento del dispositivo. Un caso particolare si ha quando il neutro presenta un guasto a terra a valle dell'interruttore differenziale. Se il neutro è a potenziale prossimo a zero il guasto può permanere per un tempo non definito. Il contatto simultaneo da parte di una persona di una fase e della massa è riconducibile ad un guasto bipolare e il dispositivo differenziale non interviene. Il sistema di distribuzione potrebbe non essere perfettamente equilibrato ed il neutro potrebbe assumere un potenziale diverso da zero dovuto alla corrente di squilibrio che lo percorre. L'interruttore differenziale potrebbe intervenire, dipendendo questo dal valore del potenziale assunto dal conduttore di neutro e dal valore della resistenza di terra delle masse. È sufficiente una differenza di potenziale di 3V e una resistenza di terra di 100 Ω per far fluire verso terra la corrente di 30mA che è in grado di far intervenire l'interruttore differenziale ad alta sensibilità da 30mA (potrebbe essere un buon motivo per abbassare il noto valore della R_T di 1666 Ω da associare all'interruttore differenziale da 30mA).
- **correnti di dispersione:** la presenza di correnti di dispersione può diminuire la protezione offerta dall'interruttore differenziale. Come esempio consideriamo un sistema trifase in cui la risultante della somma delle correnti di dispersione su due fasi potrebbe non far intervenire l'interruttore differenziale. Siano la corrente I_{d1} e la corrente I_{d2} uguali a 20mA. La somma vettoriale risulta ancora uguale a 20mA senza che l'interruttore differenziale riesca ad intervenire. Il contatto con la terza fase di una persona che derivi una corrente di 30mA non provoca l'intervento del dispositivo. L'interruttore differenziale, infatti, rileva solo la risultante di 10mA e quindi non apre il circuito.
- **componenti continue verso terra:** in presenza di componenti continue verso terra il dispositivo differenziale potrebbe non essere in grado di aprire il circuito. Per questo motivo occorre scegliere l'interruttore differenziale adatto al tipo di corrente di guasto verso terra. In commercio esistono tre tipi di interruttori differenziali denominati AC, A, B differenziale.

7.5.6 Protezione per limitazione della corrente

Alcune apparecchiature speciali (antenne televisive, recinzioni elettriche, apparecchi elettromedicali, interruttore di prossimità ecc.) hanno parti metalliche accessibili collegate a circuiti attivi tramite un'impedenza di valore elevato. Per garantire dal pericolo dell'elettrocuzione 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 devono presentare una tensione di contatto che non deve dar origine, attraverso il corpo della persona, a correnti non superiori a 3,5 mA in corrente alternata e a 10 mA in corrente continua.

7.5.7 Protezione per limitazione della carica elettrica

I condensatori devono essere protetti contro il contatto diretto quando viene superato un determinato valore di capacità per evitare che un'eventuale corrente di scarica, anche se impulsiva, possa provocare effetti pericolosi sulle persone. Per le parti che devono essere toccate il limite di carica elettrica stabilito dalle Norme è di 0,5μC mentre per le altre parti è di 50μC. I valori massimi di capacità in rapporto al valore efficace della tensione di carica del condensatore sono: 0,16μF a 230V, 0,09 a 400V, 0,07μF a 500V, 0,03μF a 1000V. Al di fuori di questi valori è necessario dotare i condensatori di una resistenza di scarica in parallelo che riduca in meno di 5s la tensione ai loro capi ad un valore inferiore a 60V c.c. oppure devono essere protetti contro il contatto accidentale con un grado di protezione minimo di IP2X.

7.6 La protezione contro i contatti indiretti

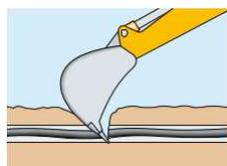
7.6.1 Generalità

La perdita di isolamento tra i conduttori normalmente in tensione e le masse può provocare un guasto chiamato generalmente guasto a terra.

Le principali cause di perdita di isolamento sono:



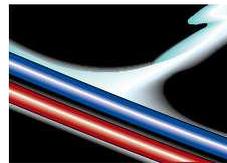
decadimento nel tempo delle proprietà dielettriche (crepature nelle gomme isolanti, etc.);



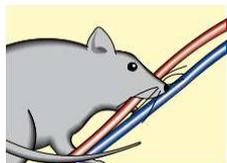
rottura meccanica (es. la tranciatura di un cavo interrato da parte di una pala meccanica);



ambienti particolarmente aggressivi (presenza di polveri, umidità, inquinamento, etc.);

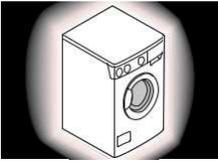


sovratensioni di origine atmosferica o di manovra;

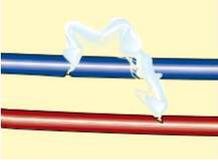


azione di roditori.

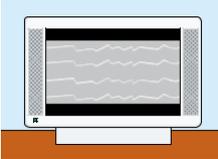
I principali effetti della corrente di guasto a terra sono:



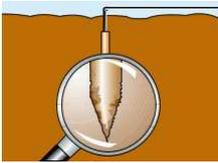
portare in tensione le masse;



archi elettrici localizzati e conseguenti surriscaldamenti;



disturbi ai sistemi di telecomunicazione;



fenomeni di erosione dei dispersori elettrici.

La corrente di guasto a terra si manifesta inizialmente come un arco localizzato nel punto in cui è venuto meno l'isolamento; questo arco è caratterizzato da un'intensità di corrente molto modesta dell'ordine di qualche decina di milliampere. In seguito il guasto evolve, più o meno rapidamente per assumere il carattere di guasto franco fase-terra e, se tale guasto non è tempestivamente interrotto dalle protezioni, può arrivare a coinvolgere tutte le fasi dando origine ad un cortocircuito trifase con contatto a terra.

Una prima conseguenza della corrente di guasto a terra è, quindi, quella relativa al danno che l'impianto subisce, sia a causa delle modeste correnti iniziali d'arco, le quali difficilmente rivelate dagli sganciatori di sovracorrente possono permanere per lungo tempo ed innescare un incendio, sia a causa del cortocircuito che si sviluppa dopo che è stata compromessa l'integrità dell'impianto stesso.

Un'altra importante conseguenza della corrente di guasto a terra è quella relativa al pericolo per le persone derivante da un contatto indiretto, cioè a seguito del contatto con masse che sono andate accidentalmente in tensione a causa del cedimento dell'isolamento principale.

7.6.2 Effetti della corrente nel corpo umano

I pericoli derivanti dal contatto di una persona con una parte in tensione derivano dal conseguente passaggio della corrente nel corpo umano. Tali effetti possono così riassumersi:

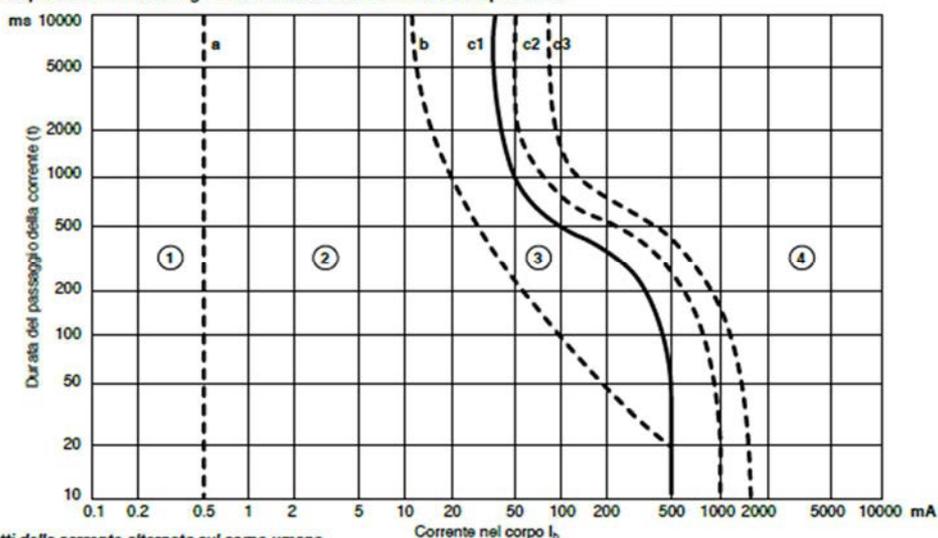
- **Tetanizzazione:** si contraggono i muscoli interessati al passaggio della corrente e risulta difficile staccarsi dalla parte in tensione. Da notare che correnti molto elevate non producono solitamente la tetanizzazione perché quando il corpo è da esse attraversato, l'eccitazione muscolare è talmente elevata che i movimenti muscolari involontari generalmente proiettano il soggetto lontano dalla sorgente.
- **Arresto respiratorio:** se la corrente elettrica attraversa i muscoli che controllano il movimento dell'apparato respiratorio, la contrazione involontaria di questi muscoli altera il normale funzionamento del sistema respiratorio e il soggetto può morire soffocato o subire le conseguenze di traumi dovuti all'asfissia.
- **Fibrillazione ventricolare:** è l'effetto più pericoloso ed è dovuto alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fa perdere il giusto ritmo al cuore. Questa anomalia si chiama fibrillazione ed è particolarmente pericolosa se ventricolare perché diventa un fenomeno non reversibile poiché persiste anche se lo stimolo è cessato.
- **Ustioni:** sono prodotte dal calore che si sviluppa per effetto Joule dalla corrente elettrica che fluisce attraverso il corpo.

La norma IEC 60479-1 Effects of current on human beings and livestock (Effetti della corrente sul corpo umano e sugli animali domestici), fornisce una guida sugli effetti della corrente attraverso il corpo umano, da utilizzare nella definizione dei requisiti per la sicurezza elettrica.

La norma identifica graficamente quattro zone (figura 1) con le quali sono stati distinti gli effetti fisiologici in relazione all'entità della corrente alternata (15 – 100 Hz) che attraversa il corpo umano.

Tali zone sono illustrate nella tabella 1

Fig. 1: zone tempo-corrente relative agli effetti della corrente alternata sul corpo umano



Tab. 1: effetti della corrente alternata sul corpo umano

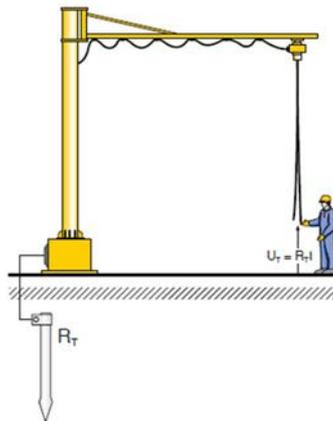
Zona	Effetti
1	Abitualmente nessuna reazione.
2	Abitualmente nessun effetto fisiologicamente pericoloso.
3	Abitualmente nessun danno organico. Probabilità di contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria; disturbi reversibili nella formazione e conduzione di impulsi nel cuore, inclusi fibrillazione atriale e arresto cardiaco provvisorio senza fibrillazione ventricolare, che aumentano con l'intensità della corrente e il tempo.
4	In aggiunta agli effetti della zona 3, la probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta fino a circa il 5% (curva c2), al 50% (curva c3), oltre il 50% al di là della curva c3. Effetti pato-fisiologici come arresto cardiaco, arresto respiratorio, gravi ustioni possono presentarsi con l'aumentare dell'intensità della corrente e del tempo.

La norma IEC 60479-1 fornisce un grafico analogo per la corrente continua e con il medesimo significato per le zone presenti.

Le curve rappresentate nella figura 1 risultano di difficile applicazione ai fini della definizione dei limiti massimi di corrente accettabili per la sicurezza delle persone.

Nota l'impedenza del corpo umano offerta al passaggio della corrente, si possono facilmente ricavare le curve della tensione massima ammissibile grazie alla legge di Ohm.

L'impedenza del corpo umano offerta al passaggio della corrente elettrica che transita fra due sue estremità è molto variabile, la norma IEC 60479-1 ne riporta diversi valori in funzione della tensione di contatto e del percorso interessato dal passaggio della corrente.

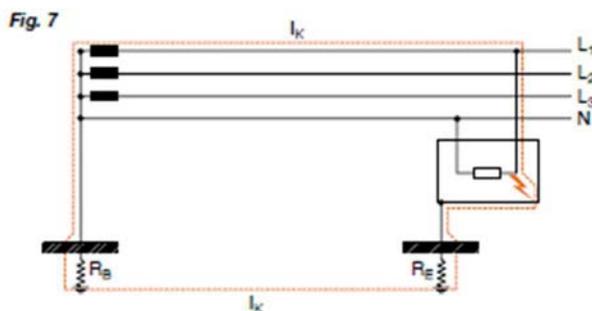


La tensione totale di terra U_T è la tensione che si stabilisce tra una massa e un punto del terreno sufficientemente lontano.

7.7 Protezione dai contatti indiretti con interruzione automatica del circuito (protezioni attive) in relazione al sistema di distribuzione

7.7.1 Sistemi TT

Un guasto a terra in un sistema TT dà origine al circuito di guasto rappresentato nella figura 7.



La corrente di guasto percorre l'avvolgimento secondario del trasformatore, il conduttore di fase, la resistenza di guasto, il conduttore di protezione, le resistenze di terra (dell'utente RE e del neutro RB).

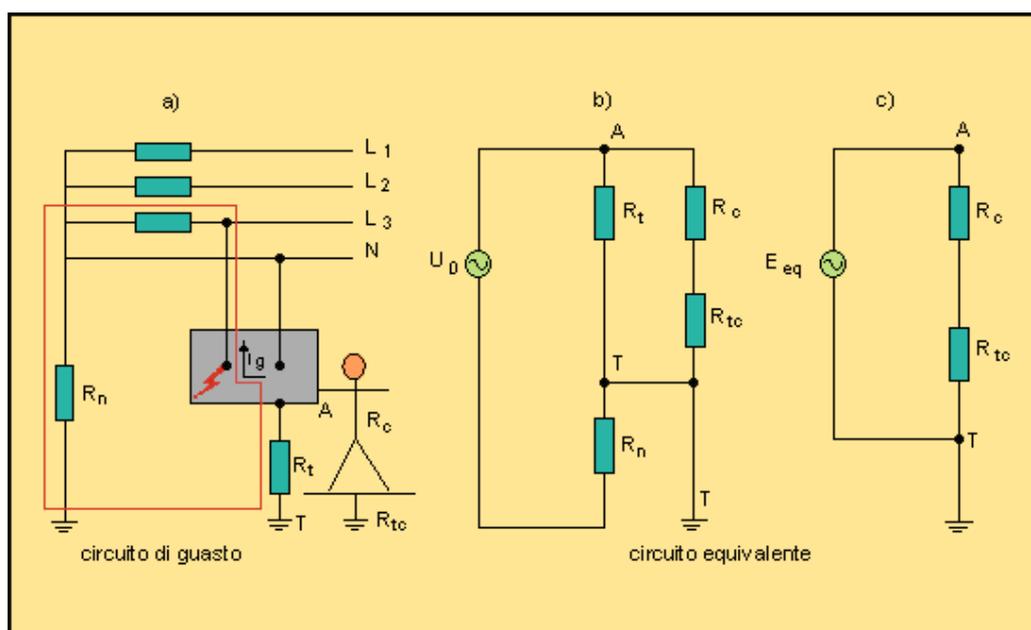
La corrente di guasto dipende dalle impedenze presenti nel circuito (rosso), per cui:

- Se le impedenze sono basse, la corrente sarà elevata ed interverranno gli interruttori di protezione da sovracorrenti.
- Se le impedenze sono alte, la corrente sarà bassa, ma c'è il rischio che la tensione della massa rispetto a terra sia molto alta, quindi deve intervenire un interruttore differenziale.

In accordo con le prescrizioni della norma CEI 64-8/4, i dispositivi di protezione devono essere coordinati con l'impianto di terra in modo da interrompere tempestivamente il circuito, se la tensione di contatto assume valori pericolosi per l'uomo.

7.7.1.1 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 .



a) 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 Thevenin-Norton⁽¹⁾ tra i punti A e T (vedasi figura) nel ramo con R_c ed R_{tc} , 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} :

$$E_{eq} = R_t \times I_g$$

Ed essendo $U_0 = (R_t + R_n) \times I_g$, si ottiene

$$I_g = \frac{U_0}{R_t + R_n}$$

da cui

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

Sempre tra i punti A e T, col generatore U_0 cortocircuitato e quindi con il sistema passivato, si ottiene la resistenza equivalente vista tra A e T:

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

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:

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

La resistenza R_n del neutro è in genere piuttosto bassa 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 Ohm:

$$R_t = \frac{U_0 \times R_n}{U_0 - U_L} = \frac{50 \times 1}{220 - 50} = 0.29 \Omega$$

- (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 elettromotrice indicheremo con E_{eq} (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_{eq} e di R_{eq} viene eseguito applicando i principi di Kirchhoff.

7.7.1.2 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

$$R_t \leq \frac{50}{I}$$

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".

7.7.1.3 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 la 7.5 è soddisfatta, 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 dispositivi di protezione collegati tra loro in serie o in parallelo, per proteggersi contro i contatti indiretti, in caso di dispositivi collegati in serie, nella scelta della corrente da introdurre nella formula, può essere considerato il dispositivo che ha la corrente I_{5s} più bassa mentre in caso di dispositivi collegati in parallelo la maggiore tra le correnti I_{5s} (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 $R_t I_g$ e quindi, se si vuole rispettare la relazione

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

la I_{5s} in caso di dispositivi in parallelo deve essere la più elevata corrente che determina l'intervento entro 5s). Soddisfare la condizione

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

con dei normali interruttori magnetotermici 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} . Se l'utilizzatore è costituito da un carico di 1 kW o 20 kW ai fini della protezione delle persone non cambia nulla per cui occorre approntare un impianto di terra che nel caso del secondo carico deve avere, per mantenere la sicurezza dell'impianto, una R_t venti volte più piccola che non per il primo caso: si arriva al paradosso di dover dimensionare l'impianto di terra in base alla potenza dell'impianto da proteggere e non in base alla tensione. 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.

7.7.1.4 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 $I_{\Delta n}$ supera il valore di soglia per la quale è tarato. Impiegando un interruttore differenziale la relazione che deve essere verificata diventa:

$$R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}} \quad (7.6)$$

L'unica differenza tra le due ultime relazioni 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 $\leq 1666\Omega$) di quanto non lo fosse con i dispositivi di massima corrente. 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 seguente.

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

Tempi massimi di interruzione degli interruttori differenziali per uso generale

7.7.1.5 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 solita relazione

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

dove $I_{\Delta n}$ deve essere, come sappiamo, la minor corrente differenziale nominale per dispositivi differenziali collegati in serie e la maggior corrente differenziale nominale per dispositivi differenziali collegati in parallelo. Lo stesso principio vale anche nel caso di più derivazioni protette in parte con dispositivi a massima corrente e in parte con dispositivi differenziali. La R_t dovrà essere calcolata in base alla I_{5s} del dispositivo a massima corrente essendo questa la corrente nominale d'intervento più elevata tra i due tipi di dispositivi, annullando però tutti i benefici derivanti dall'uso dei relè differenziali. In pratica è opportuno che tutte le derivazioni facenti parte dello stesso impianto di terra siano protette con interruttori differenziali. 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.

➤ **Problemi derivanti dall'installazione dell'interruttore differenziale**

Se, a causa di un guasto su di una massa, il neutro fosse a terra a valle dell'interruttore differenziale, potrebbe essere resa inoperante la protezione differenziale. Il neutro a terra (solitamente a potenziale zero salvo particolari casi anomali) non provoca l'intervento del dispositivo differenziale per cui il guasto permane per un tempo indefinito. Un successivo guasto di una fase su di un'altra massa, provoca una corrente di guasto che si richiude tramite il conduttore di neutro a contatto con la massa stessa e solo in parte verso terra. Il collegamento del neutro all'impianto di terra locale trasforma di fatto il sistema TT in un sistema TN e per garantire la sicurezza dai contatti indiretti dovrebbero essere soddisfatte le condizioni indicate per tale sistema di distribuzione (questo vale anche nel caso che il neutro sia collegato all'impianto di terra locale a monte dell'interruttore differenziale ed è inutile ricordare come sia importante non collegare, ad esempio scambiandolo col conduttore di terra, il neutro a terra).

➤ **Selettività tra interruttori differenziali**

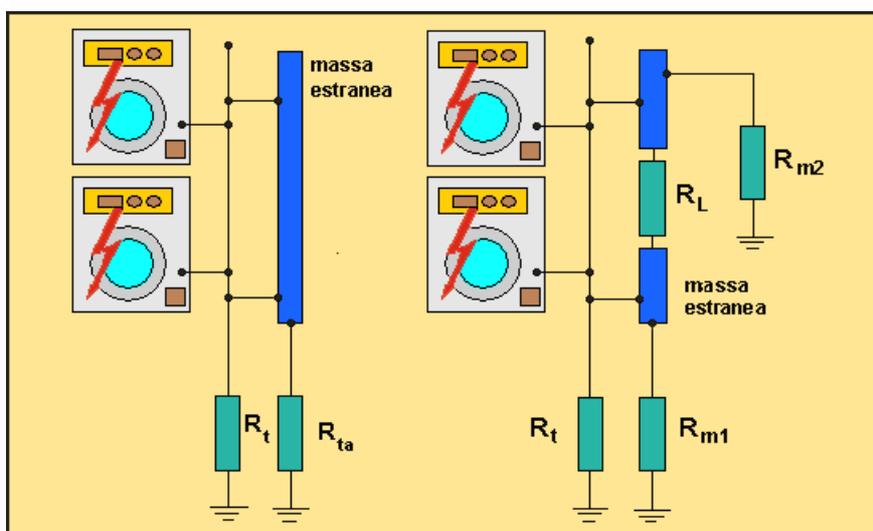
Si definisce corrente differenziale nominale di non intervento il massimo valore di corrente per il quale sicuramente l'interruttore differenziale non interviene. Il valore normale di questa corrente è $I_{\Delta n}/2$ ed entro questo valore il dispositivo non ha un comportamento definito: può intervenire come può non intervenire. La scelta della $I_{\Delta n}$ è condizionata oltre che dal coordinamento con l'impianto di terra anche dalla somma delle correnti di dispersione di tutto l'impianto utilizzatore. Per garantire la continuità del servizio la somma vettoriale di tali correnti di dispersione non dovrebbe superare $I_{\Delta n}/2$. A tal proposito occorre ricordare che le correnti di terra possono essere eccessive se: l'impianto è in cattivo stato di conservazione, gli apparecchi utilizzatori hanno correnti di dispersione che eccedono i valori normali, l'impianto è molto vasto e sono collegati numerosi apparecchi utilizzatori. Per rendere selettivo l'intervento dei dispositivi può essere utile proteggere le singole derivazioni con più dispositivi differenziali garantendo così una discreta selettività orizzontale del sistema ed evitando che un guasto in un punto qualsiasi del circuito provochi la messa fuori servizio di tutto l'impianto. In questo modo però non si è protetti dai guasti che avvengono tra l'interruttore generale e gli interruttori differenziali. Sarà necessario evitare masse lungo questo tratto ovvero, ove non fosse possibile (interruttore generale nello stesso quadro metallico in cui sono alloggiati anche gli interruttori differenziali), bisogna dotare la parte di circuito compresa tra l'interruttore generale e gli interruttori differenziali di isolamento doppio o rinforzato.

Diverso è il caso in cui anche l'interruttore generale è differenziale perché nascono problemi di selettività verticale. Per ottenere una completa selettività occorre in questo caso utilizzare interruttori differenziali ritardati.

7.7.1.6 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. 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 (come già detto assumendo la tensione a vuoto uguale alla tensione totale di terra e rispettando le relazioni o meglio $R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$). 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 rispetto delle relazioni $R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$ oppure $R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$ (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) e 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.



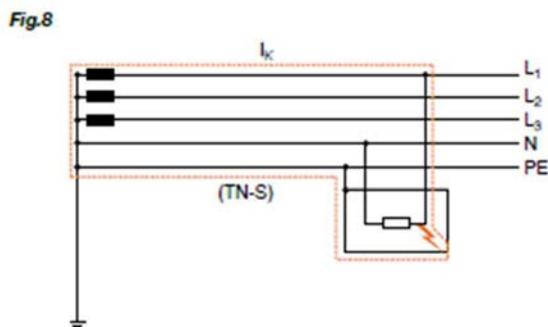
Il collegamento equipotenziale principale nei sistemi TT annulla la tensione di contatto tra le masse e la massa estranea anche se questa presenta una resistenza R_1 .

Circuito di guasto	La corrente di guasto si richiude attraverso il terreno dalla terra degli utilizzatori verso la terra di cabina
Impianto di terra	Utilizzatori e cabina hanno impianti di terra separati
Protezione dai contatti indiretti	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.
Fornitura	Alimentazione in bassa tensione direttamente dalla rete di distribuzione.
Vantaggi	Il guasto viene interrotto tempestivamente all'insorgere del primo difetto di isolamento. Impianto di terra di semplice realizzazione.
Svantaggi	E' richiesto l'uso capillare di relè differenziali

Principali caratteristiche di un sistema TT

7.7.2 Sistemi TN

Un guasto a terra in un sistema TN dà origine al circuito di guasto rappresentato nella figura 8.



Come mostrato in figura, la via di richiusura della corrente non coinvolge il terreno ma è costituita essenzialmente dal conduttore di protezione (PE).

Il circuito di guasto non interessa il terreno, quindi bassa impedenza e corrente alta, intervengono i dispositivi di protezione da sovracorrenti.

Per realizzare una corretta protezione contro i contatti indiretti in un sistema TN tramite la disconnessione automatica del circuito in accordo alla norma CEI 64-8/4, è necessario rispettare la seguente relazione:

$$Z_S * I_a \leq U_0$$

Dove:

Z_S è l'impedenza dell'anello di guasto che comprende la sorgente, il conduttore attivo fino al punto di guasto e il conduttore di protezione tra il guasto e la sorgente (in ohm);

I_a è la corrente d'intervento in ampere del dispositivo di protezione entro il tempo definito nella tabella 4 (in funzione della tensione nominale U_0) per i circuiti terminali con correnti non superiori a 32A oppure entro 5 secondi per i circuiti di distribuzione e per i circuiti terminali con correnti superiori a 32A, se si usa un interruttore differenziale I_a è la corrente differenziale nominale d'intervento.

U_0 è la tensione nominale verso terra in c.a. o in c.c.

Tabella 4: Tempi massimi di interruzione per i sistemi TN

Sistema	50V $U_0 \le 120V$		130V $U_0 \le 230V$		230V $U_0 \le 400V$		$U_0 > 400V$	
	s	s	s	s	s	s	s	s
TN	c.a. 0.8	c.c. Nota 1	c.a. 0.4	c.c. 5	c.a. 0.2	c.c. 0.4	c.a. 0.1	c.c. 0.1

NOTA 1 Per le tensioni che sono entro la banda di tolleranza precisata nella Norma CEI 8-6 si applicano i tempi di interruzione corrispondenti alla tensione nominale.

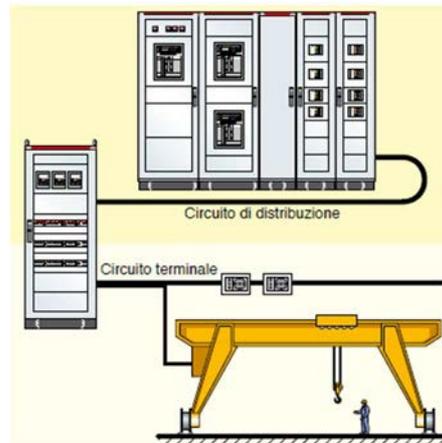
NOTA 2 Per valori di tensione intermedi, si sceglie il valore prossimo superiore della Tabella 4.

NOTA 3 L'interruzione può essere richiesta per ragioni diverse da quelle relative alla protezione contro i contatti elettrici.

NOTA 4 Quando la prescrizione citata sia soddisfatta mediante l'uso di dispositivi di protezione a corrente differenziale, i tempi di interruzione della presente Tabella si riferiscono a correnti di guasto differenziali presunte significativamente più elevate della corrente differenziale nominale dell'interruttore differenziale [tipicamente 5 I_{Δn}].

In pratica la norma distingue due tipi di circuiti:

- circuito terminale: è un circuito che alimenta general-mente apparecchi utilizzatori (ad esempio un aspiratore, un carro ponte, ecc.);
- circuito di distribuzione: è un circuito che alimenta un quadro da cui partono i circuiti terminali.



La scelta del dispositivo automatico ai fini della protezione contro i guasti fase-PE e i contatti indiretti è da effettuarsi coordinando opportunamente i tempi di intervento con il valore dell'impedenza dell'anello di guasto.

Nei sistemi TN un guasto franco fase-PE nel lato bassa tensione genera solitamente una corrente di entità simile a quella di un cortocircuito e la corrente di guasto che percorre il conduttore (o i conduttori) di fase e quello di protezione non interessa in alcun modo l'impianto di terra.

La relazione $Z_S * I_a \leq U_0$ può essere scritta nel seguente modo:

$$I_a \leq \frac{U_0}{Z_S} = I_{kLPE}$$

dove:

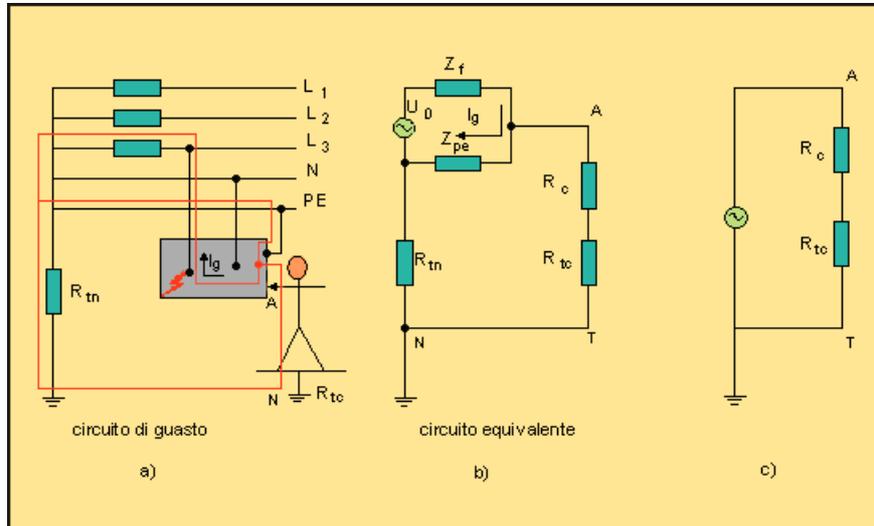
I_{kLPE} è la corrente di guasto fase-PE. Si può quindi affermare che la protezione dai contatti indiretti è verificata se la corrente di intervento I_a del dispositivo di protezione (entro i tempi riportati nella tabella 4 o entro 5s) è inferiore alla corrente di guasto fase-PE I_{kLPE} che si ha in corrispondenza della massa da proteggere.

Nei sistemi TN sono utilizzabili i seguenti dispositivi per la protezione dai contatti indiretti:

- interruttori con sganciatori termomagnetici;
- interruttori con sganciatori elettronici;
- dispositivi differenziali (solo TN-S).

7.7.2.1 Circuito equivalente

Si consideri il caso di un contatto indiretto in un sistema TN-S (conduttore di protezione completamente distinto dal conduttore di neutro per tutta l'estensione dell'impianto). Se trascuriamo come al solito l'impedenza interna del trasformatore, indichiamo con Z_f l'impedenza della fase L_3 , con Z_{pe} l'impedenza del conduttore di protezione, con R_c+R_{tc} la resistenza della persona e con R_{tn} quella di terra del neutro, la situazione di guasto a terra è rappresentabile dal seguente circuito equivalente:



a) Circuito di guasto franco a terra in un sistema TN

b) circuito equivalente

c) Il circuito di guasto si comporta come un generatore ideale di tensione.

Tra i punti A e N (vedasi figura) in assenza del carico R_c+R_{tc} (in assenza del contatto da parte della persona) nell'anello di guasto, costituito da Z_f e Z_{pe} , circola la corrente:

$$i_g = \frac{\dot{U}_0}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_{pe}} = \frac{\dot{U}_0}{\bar{Z}_s}$$

dove:

$\bar{Z}_f + \bar{Z}_{pe} = \bar{Z}_s$ è l'impedenza dell'anello di guasto

Nello studio del circuito di guasto in un sistema TN si ipotizza un guasto franco a terra; se il guasto a terra non fosse franco, a tale impedenza andrebbe aggiunta l'impedenza localizzata nel punto di guasto. Nei sistemi TT si utilizzano gli interruttori differenziali e la protezione contro i contatti indiretti è comunque assicurata (l'efficacia della protezione non dipende dal valore della eventuale resistenza di guasto). Uno dei vantaggi dei sistemi TN sta nell'utilizzare le protezioni di massima corrente contro i contatti indiretti, ma solo ipotizzando un guasto franco a terra perché altrimenti sarebbe impossibile garantire la protezione dai contatti indiretti. La casistica disponibile ha in ogni caso dimostrato che il rischio è accettabile poiché un guasto non franco a terra è poco frequente anche perché tende ad evolvere rapidamente in un guasto franco. Come vedremo in seguito, ogni rischio viene eliminato utilizzando gli interruttori differenziali rinunciando però al vantaggio di usare gli interruttori magnetotermici.

Tra i punti A ed N, in assenza di contatto tra la persona ed il punto in tensione e, quindi, senza il ramo R_c+R_{tc} , si ha la tensione di contatto a vuoto U_{C0} (in R_m non scorre corrente):

$$\dot{U}_{C0} = \bar{Z}_{pe} x \dot{I}_g = \bar{Z}_{pe} x \frac{\dot{U}_0}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_{pe}} = \frac{1}{\bar{Z}_f / \bar{Z}_{pe} + 1} x \dot{U}_0$$

La U_{C0} risulta pertanto proporzionale alla U_0 per mezzo del rapporto Z_f/Z_{pe} e, nel caso particolare di conduttori di fase e di protezione con sezione uguale (nei circuiti terminali quando $Z_{pe}=Z_f$), dalla equazione si ricava:

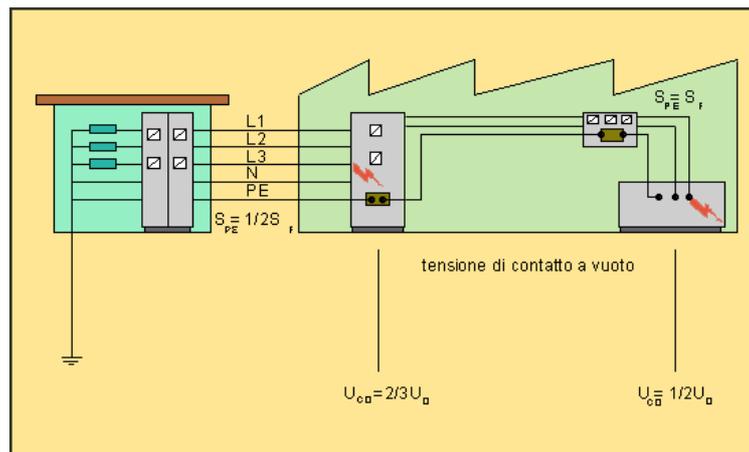
$$\dot{U}_{C0} = \frac{1}{2} \dot{U}_0$$

Se invece, caso piuttosto frequente (nelle linee di distribuzione principale, quando la sezione del conduttore di fase è maggiore di 16 mm², la sezione del conduttore di protezione può essere minore di quella di fase), la sezione del conduttore di protezione è la metà di quella di fase ($Z_{pe}=Z_f/2$), sempre dalla equazione si ottiene:

$$\dot{U}_{C0} = \frac{2}{3} \dot{U}_0$$

Applicando il teorema di Thévenin-Norton tra i punti A e N la Z_{eq} vale:

$$\bar{Z}_{eq} = \frac{\bar{Z}_f x \bar{Z}_{pe}}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_{pe}} + R_{tn}$$



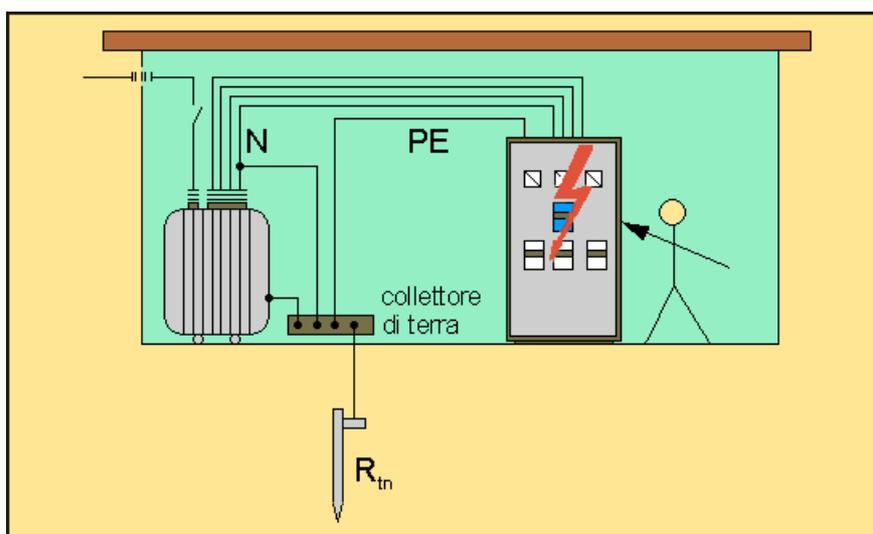
In quella parte dell'impianto dove la sezione del conduttore di protezione è la metà del conduttore di fase la tensione di contatto a vuoto tende al valore $2/3 U_0$. Nei circuiti terminali la tensione di contatto a vuoto diminuisce tendendo al valore di $1/2 U_0$ in quanto l'impedenza del tratto terminale diventa prevalente rispetto a quella a monte e i conduttori di fase e protezione hanno la medesima sezione.

La Z_{eq} è in genere trascurabile rispetto alla R_c+R_{tc} della persona (qualche Ω rispetto a 103Ω) e quindi il contatto della persona non altera significativamente la tensione preesistente sulla massa. Il circuito di guasto si comporta, nei confronti del corpo umano, come un generatore ideale di tensione. Risulta evidente che in questo caso il guasto franco a massa rappresenta un cortocircuito perché la corrente è limitata dalla sola impedenza del circuito di guasto Z_s (l'anello di guasto non interessa alcuna resistenza di terra essendo costituito esclusivamente da elementi metallici). Per uno stesso circuito, sempre nell'ipotesi che l'impedenza del trasformatore sia trascurabile e che il conduttore di protezione PE segua nel suo percorso i conduttori di fase, si può notare che, aumentando la distanza del punto di guasto rispetto la cabina, Z_f+Z_{pe} aumenta mentre il rapporto Z_f/Z_{pe} rimane costante (nello stesso circuito le sezioni di Z_f e di Z_{pe} rimangono costanti per tutto il tratto) col risultato che la U_{C0} rimane costante mentre la I_g diminuisce. Da queste considerazioni si può capire come non sia sempre possibile interrompere il circuito in tempi sufficientemente brevi da rendere la tensione sulla massa non pericolosa, soprattutto se l'interruzione del circuito è affidata ad un dispositivo di massima corrente perché, allontanandosi col punto di guasto rispetto la cabina (guasto in fondo alla linea di un circuito terminale), al diminuire della I_g aumenta il suo tempo d'intervento.

La U_{C0} , dipendendo solamente dal rapporto Z_f/Z_{pe} , è difficilmente quantificabile nei vari punti dell'impianto perché varia a seconda della distanza del punto di guasto dalla cabina. Da quanto detto, sempre ipotizzando di trascurare l'impedenza interna del trasformatore e assumendo che il conduttore di protezione segua lo stesso percorso dei conduttori di fase (stessa lunghezza, stesso tipo di posa ecc..) si può notare che:

- la tensione di contatto a vuoto è costante lungo uno stesso circuito, qualunque sia il punto in cui si verifica il guasto d'isolamento;
- la tensione di contatto a vuoto è massima nel punto più lontano dal trasformatore quando la sezione del PE è inferiore a quella del conduttore di fase (circuiti di distribuzione principali dove $Z_{pe}=Z_f/2$ e U_{C0} tende al valore $2/3 U_0$);
- quando la sezione del PE diventa uguale a quella del conduttore di fase (nei circuiti terminali l'impedenza di fase è uguale all'impedenza del PE) la U_{C0} diminuisce tendendo al valore $1/2 U_0$ in quanto l'impedenza dei circuiti terminali diventa prevalente rispetto quelli a monte;

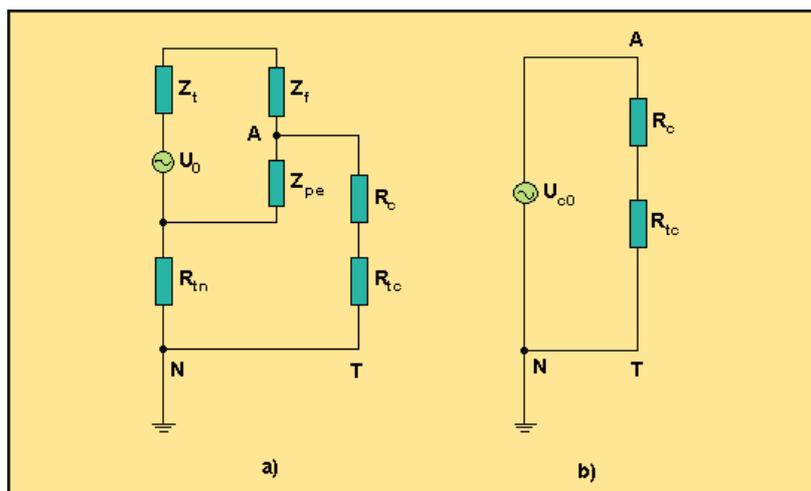
Un discorso particolare va fatto per un guasto che si verificasse, nelle vicinanze del trasformatore, su di una massa all'inizio dell'impianto (ad esempio il quadro generale di distribuzione nella cabina di trasformazione). Normalmente una situazione di questo tipo non introduce tensioni di contatto pericolose se la distanza della massa dal trasformatore non è eccessiva (a seconda della potenza del trasformatore e della sezione del PE la distanza limite può essere compresa tra i 10 e i 30 metri), data la prevalenza dell'impedenza del trasformatore Z_T rispetto a quella del conduttore di protezione. Per mantenere una tale condizione anche all'aumentare della distanza del quadro generale rispetto al trasformatore si potrebbe operare una maggiorazione della sezione del conduttore di protezione. Alla luce di queste considerazioni non sembra quindi conveniente ridurre la sezione del PE dal trasformatore al quadro generale di cabina.



Un guasto franco a terra sul quadro generale in cabina in un sistema TN non è in genere pericoloso

Nei pressi del trasformatore di cabina, dove Z_f e Z_{pe} sono in genere molto piccole e prevale la Z_T , si ha:

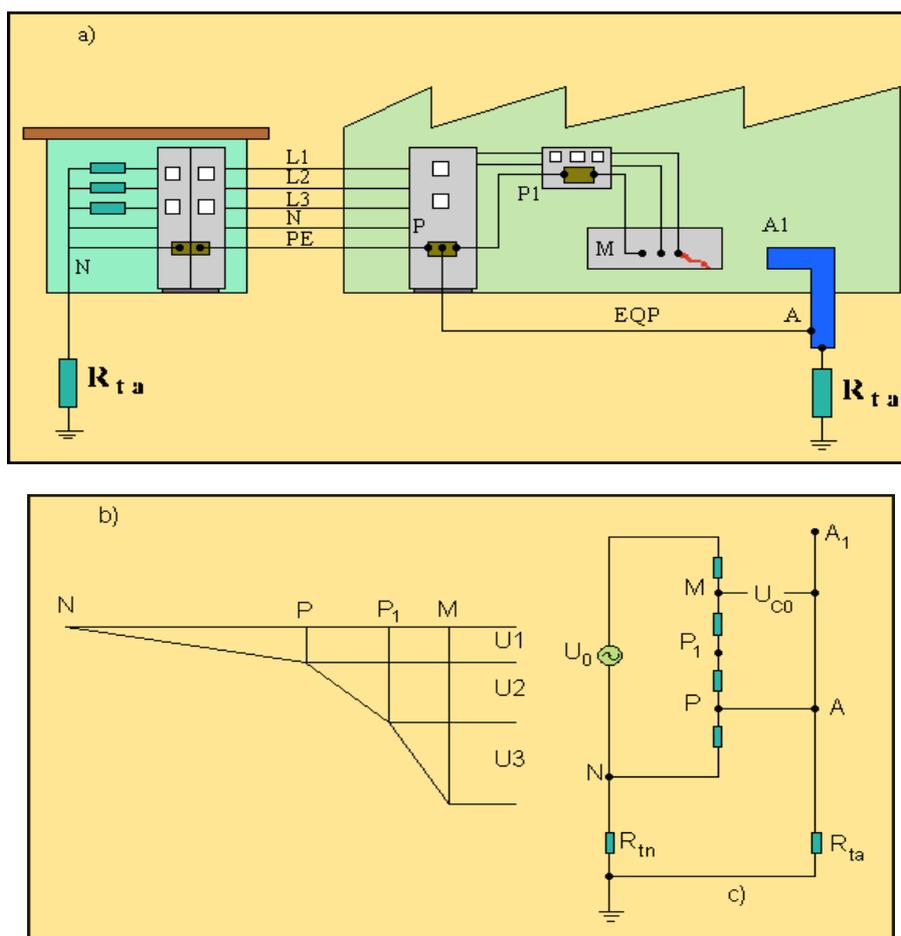
$$\dot{U}_{C0} = \frac{\bar{Z}_{pe}}{\bar{Z}_T + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{pe}} x \dot{U}_0 = \frac{1}{1 + \bar{Z}_T / \bar{Z}_{pe} + \bar{Z}_f / \bar{Z}_{pe}} x \dot{U}_0 = \frac{1}{1 + \bar{Z}_T / \cong 0 + \cong 0} x \dot{U}_0 \cong 0$$



Circuito equivalente di un guasto sul quadro generale di cabina in un sistema TN

7.7.2.2 I collegamenti equipotenziali

La situazione descritta nel paragrafo precedente corrisponde al caso limite di una persona all'aperto in cui la tensione di contatto a vuoto coincide con la tensione totale. All'interno di un edificio le condizioni di sicurezza migliorano perché con i collegamenti equipotenziali si può ridurre la tensione di contatto ad una parte della tensione totale. I collegamenti equipotenziali sono molto più importanti per la sicurezza nei sistemi TN che non nei sistemi TT.



a) A causa di un guasto tutte le masse assumono un potenziale che dipende da Z_f / Z_{pe} . Si ha una caduta di tensione sul PE che non può essere trascurata.

b) Circuito equivalente. Si possono stabilire differenze di potenziale tra le masse e tra queste e le masse estranee. Un guasto che avvenisse su di una massa all'inizio dell'impianto (in cabina) in genere non introduce potenziali pericolosi

In un sistema TT il conduttore di protezione, essendo di resistenza trascurabile rispetto alla resistenza di terra, è praticamente equipotenziale per tutta la sua lunghezza. In un sistema TN il conduttore di protezione (PE) ha un'impedenza uguale o superiore all'impedenza del conduttore di fase ed assume un potenziale diverso lungo il suo percorso. Può essere costituito dall'insieme di più tratti a sezione diversa:

- un primo tratto, dalla massa al quadro di settore;
- un secondo tratto, dal quadro di settore al collettore principale nel quadro di distribuzione;
- un terzo tratto, dal collettore principale alla cabina.

$$\dot{U}_t = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3$$

A seguito di un guasto sulle masse si stabilisce una tensione totale pari alla somma delle cadute di tensione nei tre tratti del conduttore di protezione e la tensione sarà diversa a seconda che le masse in oggetto si trovino a monte o a valle del punto di guasto. In particolare tutte le masse a valle del punto di guasto si porteranno ad un potenziale pari alla tensione di contatto a vuoto nel punto di guasto (sulla massa più vicina o sede del guasto), mentre, per quelle a monte, i valori di tensione saranno decrescenti fino ad annullarsi all'origine dell'impianto (cabina). Se si effettua il collegamento equipotenziale (principale-EQP) all'ingresso di una massa estranea nell'edificio (ad esempio tubazione idrica) l'intera massa estranea si porta alla tensione U_1 e quindi la tensione tra massa e massa estranea si riduce a U_2+U_3 (la serie della resistenza del neutro in cabina e la resistenza della massa estranea verso terra, $R_{tn}+R_{me}$, sono in parallelo col conduttore (PE) che collega il collettore principale con la cabina ma la sua impedenza è trascurabile rispetto alla serie $R_{tn}+R_{me}$ quindi la tensione U_1 non diminuisce in modo apprezzabile). Se il collegamento equipotenziale viene effettuato in prossimità della massa (collegamento equipotenziale supplementare-EQS) la sicurezza migliora ulteriormente in quanto la massa ora assume la sola tensione U_3 (da notare che la tensione U_3 si stabilisce non solo tra l'apparecchio guasto e la massa estranea ma anche sulle altre masse collegate al nodo di terra del quadro di piano). In definitiva la resistenza verso terra di una persona dipende dal collegamento equipotenziale tramite una resistenza R_{eq} . Il collegamento equipotenziale riduce tanto più la tensione di contatto quanto più il collegamento equipotenziale è prossimo al punto di guasto e risulta indispensabile se i dispositivi di protezione non possono intervenire in un tempo inferiore a quello indicato sulla curva di sicurezza per la tensione totale $U_t=U_1+U_2+U_3=U_{C0}$.

7.7.2.3 La sicurezza all'esterno degli edifici

Diverso è il problema della sicurezza all'esterno di un edificio, dove la resistenza verso terra di una persona non può più dipendere dal collegamento equipotenziale. La tensione di contatto a vuoto assume il valore dato dall'equazione e i tempi di intervento dei dispositivi potrebbero non soddisfare la curva di sicurezza (le statistiche dimostrano che i rischi più elevati si riscontrano per i sistemi TN all'aperto ad esempio nei giardini). Per migliorare la sicurezza si potrebbe collegare localmente a terra la massa anche se i risultati non sono molto lusinghieri in quanto la situazione migliora tanto più quanto è minore il rapporto R_t/R_n . Purtroppo, spesso R_t ha valori più elevati di R_n e quindi, per ottenere dei benefici dalla messa a terra locale, sarebbe necessaria una più efficiente (con costi notevolmente superiori) configurazione del sistema dispersore. Solo con l'installazione di un dispositivo differenziale a bassa sensibilità ($I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$) installato sulle derivazioni all'esterno è possibile rispettare i tempi d'intervento richiesti dalla curva di sicurezza (questo però non protegge dai pericoli derivanti dalla presenza di eventuali tensioni sul neutro).

7.7.2.4 Caratteristiche della protezione dai contatti indiretti

Per attuare la protezione con dispositivi di massima corrente o differenziali in un sistema TN è richiesto che sia soddisfatta in qualsiasi punto del circuito la seguente condizione:

$$I_a \leq \frac{U_0}{Z_s} \quad (7.14)$$

Dove:

U_0 = tensione nominale in valore efficace tra fase e neutro in volt dell'impianto relativamente al lato in bassa tensione

Z_s = Impedenza totale in ohm dell'anello di guasto che comprende il trasformatore, il conduttore di fase e quello di protezione tra il punto di guasto e il trasformatore

I_a = Corrente in valore efficace ed in ampere che provoca l'intervento del dispositivo di protezione entro il tempo indicato in tabella.

Se si impiega un dispositivo differenziale, I_a è la corrente $I_{\Delta n}$ differenziale nominale, se invece si utilizza lo stesso dispositivo impiegato per la protezione contro le sovracorrenti si può usare, per la verifica della relazione, la corrente di intervento della protezione magnetica I_m che fa intervenire la protezione in tempi inferiori a quelli prescritti dalla norma.

U_0 (V)	Tempo di interruzione (s)	
	Ambienti normali	Ambienti particolari
120	0,8	0,4
230	0,4	0,2
400	0,2	0,06
>400	0,1	0,02

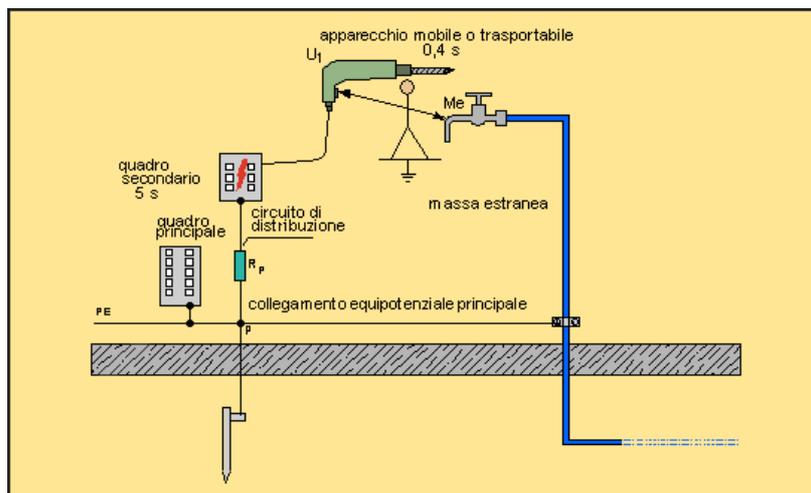
Per un guasto franco a terra le norme CEI richiedono l'intervento dei dispositivi di protezione entro un tempo tanto più piccolo quanto maggiore è la tensione di fase; ad esempio dalla tabella per $U_0 = 230V$ (nuovo valore unificato a livello europeo) il tempo d'interruzione non deve superare 0,4 s con l'eccezione dei circuiti di distribuzione e dei circuiti terminali che alimentano apparecchi fissi per i quali è ammesso un tempo d'intervento non superiore ai 5s purché sia soddisfatta una delle seguenti condizioni enunciate dall'art. 413.3.5 delle Norme CEI 64-8:

a) l'impedenza del conduttore di protezione che collega il quadro di distribuzione al punto nel quale il conduttore di protezione è connesso al collegamento equipotenziale principale (generalmente il collettore di terra) non deve essere superiore a $Z_{PE} = Z_s \times 50 / U_0$;

b) esiste un collegamento equipotenziale supplementare che collega localmente al quadro di distribuzione gli stessi tipi di masse estranee indicati per il collegamento equipotenziale principale che soddisfa le prescrizioni riguardanti il collegamento equipotenziale principale di cui al Capitolo 54 delle Norme CEI 64-8.

Un circuito terminale è un circuito che alimenta un apparecchio utilizzatore o una presa a spina mentre un circuito di distribuzione è un circuito e che fa capo generalmente ad un quadro elettrico dal quale si distribuiscono più circuiti terminali. Un guasto a terra su di un circuito di distribuzione è poco probabile (figura A); potrebbe avvenire su di un canale metallico o sul quadro di distribuzione, meno probabile comunque che sugli apparecchi utilizzatori o sui componenti dell'impianto. Se a questo si aggiunge la difficoltà di garantire la selettività tra le protezioni, sia di sovracorrente sia differenziali, si comprende perché si sia adottato il tempo di 5s per questi circuiti (figura B). Anche per gli apparecchi fissi di grande potenza sarebbe stato arduo rispettare i tempi di 0,4s e, dal momento che solitamente sono meno pericolosi degli apparecchi trasportabili, la Norma ci concede di interrompere il circuito in 5s. Su di un apparecchio fisso la probabilità che si manifesti un guasto non è comunque del tutto trascurabile e le tensioni che vi si stabiliscono per 5s possono trasferirsi sulle masse degli apparecchi trasportabili e portatili (gli apparecchi trasportabili sono più pericolosi di quelli fissi anche se in genere, come prescrive il DPR 547/55 all'art. 315, sono di classe II e quindi protetti per costruzione dai contatti indiretti. In sede internazionale sono però ammessi anche apparecchi di classe I ed ecco che la Norma prescrive l'interruzione automatica del circuito e il rispetto dei tempi della tabella per tutti gli apparecchi elettrici trasportabili anche se alimentati da presa a spina). E' così che si spiegano le due condizioni prescritte dalle Norme che tengono conto, a differenza dei circuiti di distribuzione in cui la probabilità di guasto è minore, della maggior probabilità che si possano verificare guasti sugli apparecchi fissi. In un sistema TN, in caso di guasto a terra, il potenziale che assume l'apparecchio guasto, in questo caso l'apparecchio fisso, sappiamo che dipende dalla caduta di tensione sul conduttore di protezione per cui il potenziale varia da una massa all'altra (a differenza del sistema TT in cui, a causa di un guasto in un punto qualsiasi dell'impianto, tutte le masse assumono uno stesso potenziale dipendendo questo dal rapporto tra la resistenza di terra dell'impianto e la resistenza di terra del neutro). Un'eventuale massa estranea assume il potenziale che ha il conduttore di protezione all'ingresso del fabbricato, dove è stato eseguito il collegamento equipotenziale principale. Tra massa e massa estranea si stabilisce una differenza di potenziale che dipende dalla caduta di tensione che si ha sul PE dall'ingresso dell'edificio alla massa.

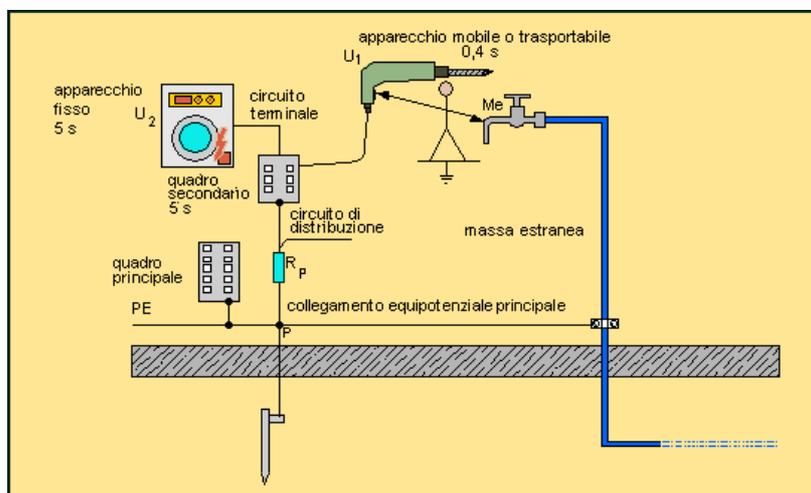
Il potenziale assunto dall'apparecchio fisso è trasferito anche alla massa di un'eventuale apparecchio trasportabile che, proprio perché trasportabile, può mettere l'operatore in condizione di toccare contemporaneamente la massa dell'apparecchio trasportabile e la massa estranea (figura C).



$$U_{c0} = U_{U1Me} = R_p x \frac{U_0}{Z_s}$$

Fig. A - Un guasto sul circuito di distribuzione non è molto frequente per cui la Norma accetta che, a causa di tale guasto, tra l'utilizzatore U_1 e la massa estranea si stabilisca una differenza di potenziale $U_{U1Me} = R_p \times U_0 / Z_s$ per un tempo non superiore a 5s.

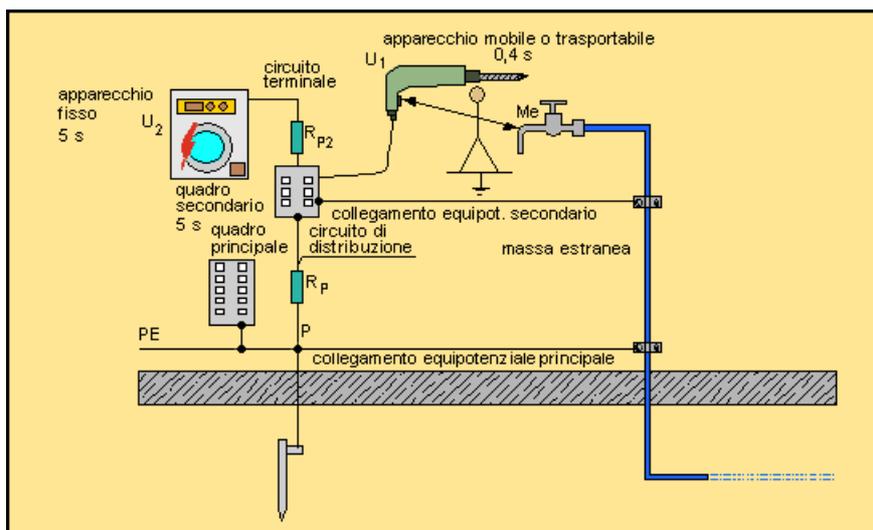
L'operatore potrebbe essere così sottoposto per cinque secondi ad una differenza di potenziale che però non deve essere superiore a 50V.



$$U_{c0} = U_{U1Me} = R_p x \frac{U_0}{Z_s} \leq 50V$$

Fig. B - A causa di un guasto sull'utilizzatore fisso U_2 , tra l'apparecchio U_1 e la massa estranea si stabilisce la tensione $R_p \times U_0 / Z_s$ che è accettata dalla Norma per un massimo di 5 secondi solo se è minore o uguale a 50V.

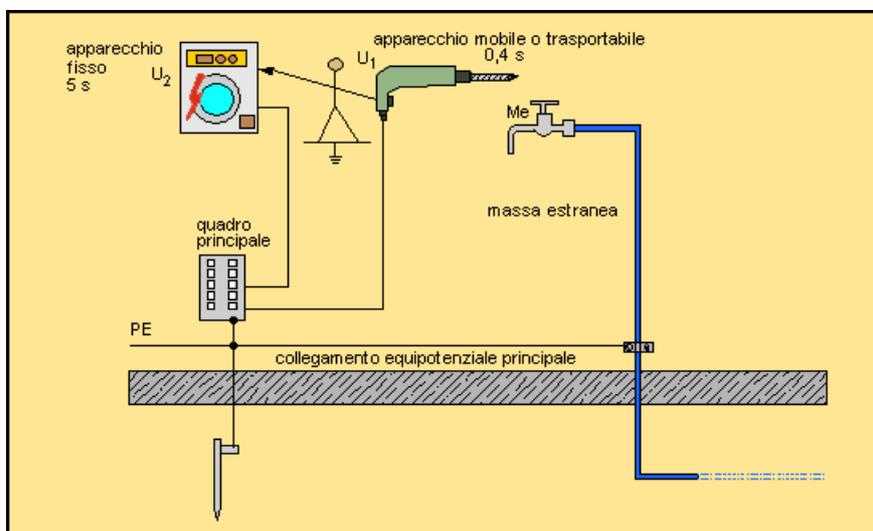
In alternativa, se la tensione di contatto è superiore a 50V bisogna effettuare un collegamento equipotenziale supplementare a livello del quadro secondario che alimenta sia l'apparecchio fisso che l'apparecchio mobile. La tensione tra l'apparecchio trasportabile e la massa estranea si riduce così alla caduta di tensione sul PE che collega la massa dell'apparecchio fisso al quadro secondario.



$$U_{co} = U_{U1Me} = R_p \times \frac{U_0}{Z_s} > 50V$$

Fig. C - Se si verifica un guasto sull'utilizzatore fisso U_2 , tra l'utilizzatore U_1 e la massa estranea si stabilisce la tensione $R_p \times U_0 / Z_s$ per un tempo massimo di 5 secondi. Se è maggiore di 50 V la norma richiede un collegamento equipotenziale supplementare.

La tensione assunta dalla massa dell'apparecchio fisso si trasferisce sulla massa dell'apparecchio mobile a causa del tratto comune di PE che collega il collettore principale al quadro secondario. Se i due apparecchi fossero alimentati separatamente e direttamente dal quadro generale questo non accadrebbe (figura D). Una differenza di potenziale si manifesta comunque tra i due utilizzatori ma la Norma ritiene questo pericolo accettabile entro i 5s di permanenza del guasto a terra.



$$U_{U1U2} = R_{U2p} \times \frac{U_0}{Z_s}$$

Fig. D - Gli utilizzatori U_1 e U_2 sono alimentati con due circuiti distinti dal quadro principale. Se si verifica un guasto sull'utilizzatore fisso U_2 , tra l'utilizzatore U_1 e la massa estranea la tensione è nulla essendo gli apparecchi alimentati da due linee distinte. La tensione che si stabilisce tra i due apparecchi è accettata dalla Norma in quanto è ritenuto poco probabile il contatto entro i cinque secondi di durata del guasto.

Abbiamo visto in precedenza come la curva di sicurezza faccia riferimento alla tensione di contatto a vuoto e che tale tensione dipende dal rapporto tra l'impedenza di fase e l'impedenza del conduttore di protezione (nel caso molto frequente in cui le due impedenze sono uguali risulta $U_{C0}=U_0/2$). In presenza del collegamento equipotenziale principale sappiamo che la tensione a cui è sottoposta una persona normalmente si riduce. Inoltre, dal momento che un guasto a terra può essere paragonato ad un corto circuito, la Norma assume convenzionalmente che la tensione si riduca del 20%. Se U_0 vale 230V e se Z_f è uguale a Z_{pe} (fino a sezioni di 16 mm² il conduttore di protezione ha normalmente la stessa sezione del conduttore di fase $Z_f=Z_{pe}$) dalla equazione si ottiene la tensione di contatto a vuoto:

$$\frac{0.8 \times 230}{1 + \frac{Z_f}{Z_{pe}}} = \frac{184}{1 + 1} = U_{C0} = 92V$$

Alla tensione di 92 V, sulla curva di sicurezza in condizioni ordinarie, corrisponde il tempo di 0,4 s. Per sezioni del conduttore di fase superiori a 16 mm² la sezione del conduttore di protezione è in genere la metà del conduttore di fase, Z_f è minore di Z_{pe} e la situazione peggiora essendo $Z_f/Z_p = 0,5$.

La tensione di contatto U_{C0} diventa:

$$\frac{0.8 \times 230}{1.5} = U_{C0} = 122V$$

In questo caso la curva di sicurezza non è del tutto verificata. Nonostante le apparenze il sistema TN è abbastanza sicuro, va infatti ricordato che i valori di corrente che si presume possano attraversare il corpo umano in condizioni di guasto e che sono serviti per costruire la curva di sicurezza, si riferiscono a condizioni circuitali e ambientali molto cautelative. Nella maggioranza dei casi le condizioni sono sicuramente migliori e solo in casi particolari sono possibili condizioni più gravose. Un caso critico, per altro poco frequente, è quello di guasto non franco a terra e cioè con l'interposizione di una resistenza tra la fase e la massa. Questa potrebbe limitare la corrente ritardando l'apertura del circuito senza ridurre la tensione di contatto entro i limiti di sicurezza. Ovviamente se la U_{C0} non supera in nessun punto i 50V non è necessario l'intervento delle protezioni. Dalla equazione se poniamo $U_{C0}=50V$, $U_0=230V$ e risolviamo rispetto a Z_p :

$$U_{C0} = 50 = \frac{0.8 \times 230}{1 + \frac{Z_f}{Z_{pe}}} = \frac{184}{\frac{Z_f + Z_{pe}}{Z_{pe}}} = \frac{184 \times Z_{pe}}{Z_f + Z_{pe}}$$

$$50 \times Z_f + 50 \times Z_{pe} = 184 \times Z_{pe}$$

$$50 \times Z_f = -50 \times Z_{pe} + 184 \times Z_{pe}$$

$$50 \times Z_f = 134 \times Z_{pe}$$

$$Z_{pe} = Z_f \times 0.373$$

$$Z_{pe} = \frac{Z_f}{2.68}$$

Se Z_{pe} è inferiore a $Z_f/2,68$ la tensione di contatto totale (cioè la tensione di contatto tra la massa interessata e il punto del sistema a potenziale zero) è inferiore a 50 V. Questo è impossibile da ottenere quando si fa uso esclusivamente del conduttore di protezione incorporato nel cavo di alimentazione, come normalmente accade negli impianti di tipo civile dove l'impianto, che si sviluppa prevalentemente in verticale, è dotato di un unico collettore di terra posto alla base dei montanti dal quale si dipartono i vari conduttori di protezione. Tali valori di Z_{pe} si possono invece ottenere facilmente negli impianti industriali nei quali al trasporto della corrente di guasto sono chiamati vari elementi dell'impianto di terra. Si potrebbe ad esempio far seguire al fascio di cavi di potenza un conduttore di protezione principale di notevole sezione cui potrebbero far capo i singoli conduttori di protezione degli utilizzatori e il conduttore di protezione principale che lungo il suo percorso potrebbe essere collegato anche ad un certo numero di collettori di terra. Questi potrebbero, a loro volta, essere collegati mediante conduttori di terra al dispersore a maglia, che partecipa al trasporto della corrente di guasto verso il centro stella del trasformatore. In questo modo il circuito di ritorno presenta un'impedenza molto bassa che permette di limitare la tensione di contatto al di sotto di 50 V). Con questo sistema si ottiene anche una buona equipotenzialità che riduce la tensione di contatto a valori ancora più bassi.

Da notare che se nella peggiore situazione di guasto non viene superato sulle masse il valore della tensione di contatto limite (U_L - 50V gli ambienti ordinari - 25 V per quelli particolari) non si possono creare situazioni pericolose e le norme permettono di non attuare la protezione contro i contatti indiretti mediante il sistema ad interruzione automatica dell'alimentazione in tempi prestabiliti (messa a terra coordinata con il dispositivo di interruzione). Occorre però sottolineare che conoscere la tensione di contatto sulle masse non è sempre facile. La si può misurare immettendo una corrente di prova nel circuito e andando alla ricerca dei punti più pericolosi che però possono essere molto numerosi e quindi difficili da individuare. È una ricerca molto delicata e che viene normalmente affidata all'esperienza del verificatore.

7.7.2.5 La protezione contro i contatti indiretti mediante disconnessione automatica del circuito

La norma CEI 64-8 prescrive l'interruzione automatica dell'alimentazione ai fini della protezione contro i contatti indiretti.

Il dispositivo di protezione deve interrompere automaticamente l'alimentazione in modo che, in caso di guasto, tra una parte attiva ed una massa o un conduttore di protezione, non possa persistere una tensione di contatto presunta superiore alla tensione di contatto limite convenzionale di 50V in c.a. (25V in ambienti speciali) per una durata sufficiente a causare un rischio di effetti fisiologici dannosi in una persona in contatto con parti simultaneamente accessibili.

Questa misura di protezione richiede il coordinamento tra la modalità di collegamento a terra del sistema e le caratteristiche dei conduttori di protezione e dei dispositivi di protezione.

I dispositivi adatti alla disconnessione automatica dell'alimentazione capaci di rilevare le correnti di guasto a terra sono:

- interruttori automatici con sganciatore termomagnetico;
- interruttori automatici con sganciatore elettronico a microprocessore;
- interruttori automatici con sganciatore elettronico a microprocessore con protezione contro guasto a terra integrata (funzione G);
- interruttori automatici magnetotermici o elettronici con sganciatore differenziale integrato;
- interruttori differenziali puri;
- relè differenziali.

Di seguito si riporta una descrizione di tali dispositivi di protezione.

7.7.2.5.1 Protezione contro i contatti indiretti mediante sganciatori termomagnetici

7.7.2.5.2 Interruttori automatici con sganciatore termomagnetico

Le protezioni assicurate dagli interruttori automatici con sganciatore termomagnetico sono:

- protezione contro i sovraccarichi;
- protezione contro i cortocircuiti;
- protezione contro i contatti indiretti.

La protezione contro i sovraccarichi è attuata tramite lo sganciatore termico con una curva di intervento a tempo dipendente ossia con intervento tanto più rapido quanto più grande è la corrente di sovraccarico.

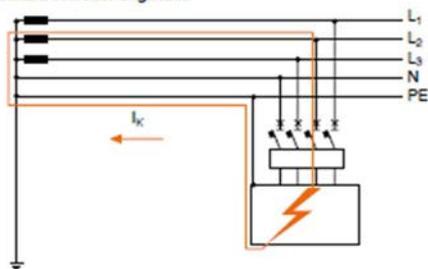
La protezione contro i cortocircuiti è attuata tramite lo sganciatore magnetico con una curva di intervento a tempo indipendente ossia con tempo di intervento indipendente dalla corrente di cortocircuito.

La protezione contro i contatti indiretti può essere attuata sia tramite lo sganciatore termico sia tramite lo sganciatore magnetico in quanto la corrente di guasto a terra interessa almeno una fase; se tale corrente è sufficientemente elevata può provocare lo sgancio dell'interruttore. Come si vedrà in seguito, occorre coordinare il dispositivo di protezione con il sistema di distribuzione e il modo di collegamento delle masse a terra in modo da intervenire in tempi tali da limitare la durata di permanenza delle tensioni di contatto pericolose presenti nelle masse in seguito al guasto.

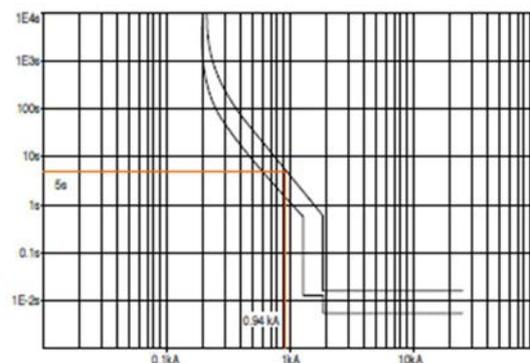
In figura 2 è illustrato un esempio che mostra il percorso della corrente di guasto a terra in un sistema in cui il neutro è connesso direttamente a terra, mentre le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro (sistema TN) e la curva di intervento di un interruttore termomagnetico Tmax T1C160 In160.

Fig. 2

Percorso della corrente di guasto



Curva di intervento Tmax T1C160 In160

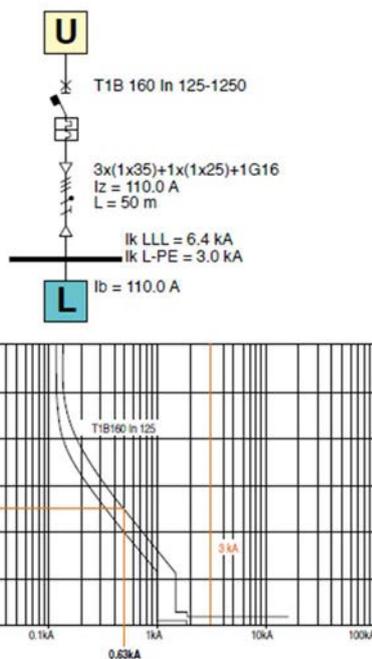


Come si può vedere dal grafico, ipotizzando una corrente di guasto a terra di 940 A l'interruttore interverrà al massimo in 5s (valore letto sulla curva a tolleranza maggiore).

Come precedentemente illustrato, nel sistema di distribuzione TN le correnti di guasto (verso massa) risultano essere abbastanza elevate a causa del basso valore dell'impedenza dell'anello di guasto, per cui la protezione contro i contatti indiretti può essere in molti casi assicurata da interruttori termomagnetici: basta verificare che la corrente di guasto che provoca l'intervento entro i tempi definiti dalla norma sia inferiore alla corrente di guasto.

Nell'esempio che segue (figura 9) si vuole verificare la protezione contro i contatti indiretti di un circuito terminale che alimenta un utilizzatore con $I_b > 32A$ in un sistema TN-S a 400V. Per far ciò è sufficiente verificare che la corrente di guasto fase-PE in corrispondenza della massa considerata sia superiore alla corrente di intervento entro 5s.

Fig. 9



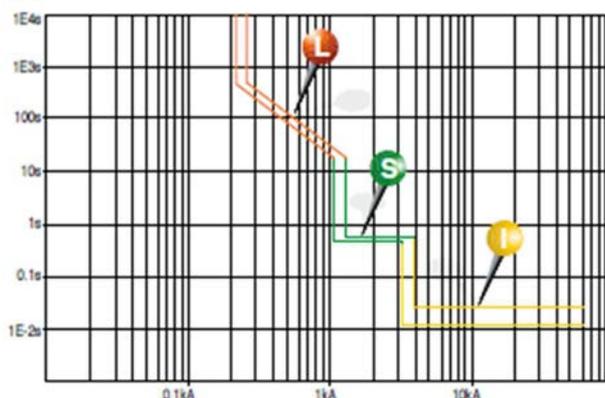
Nel caso in esame la corrente che provoca lo sgancio in meno di 5 secondi (considerando la tolleranza superiore) è inferiore alla corrente di guasto fase-PE che risulta essere di 3kA perciò sono rispettati i tempi di intervento richiesti dalla norma.

Nel caso in cui il carico fosse stato un circuito terminale (per esempio un piccolo aspiratore) con corrente inferiore a 32 A, avremmo dovuto verificare che l'intervento dell'interruttore in caso di un guasto fase-PE fosse stato inferiore al tempo indicato nella tabella 4.

7.7.2.5.3 Interruttori automatici con sganciatore elettronico a microprocessore

Le protezioni assicurate dagli interruttori automatici con sganciatore elettronico sono perfettamente analoghe a quelle assicurate dagli interruttori con sganciatore termomagnetico. Le funzioni di protezione implementate dallo sganciatore a microprocessore permettono la protezione contro il sovraccarico (protezione L), il cortocircuito (protezione S e I) e i contatti indiretti.

Fig. 3

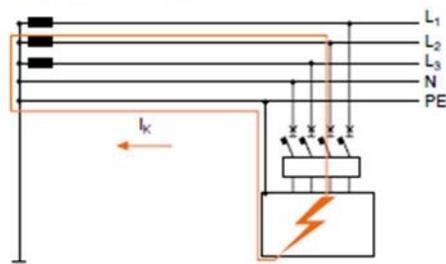


Gli sganciatori elettronici permettono una regolazione accurata sia in termini di tempi di intervento sia in termini di soglie di corrente in modo da soddisfare le esigenze impiantistiche.

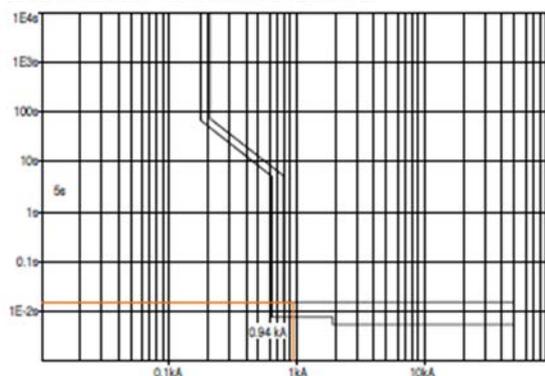
In figura 4 è riportato l'esempio precedente, ma come dispositivo di protezione è installato un interruttore con sganciatore elettronico Tmax T2S160 PR221DS-LS/I In160.

Fig. 4

Percorso della corrente di guasto



Curva di intervento T2S160 PR221DS-LS/I In160



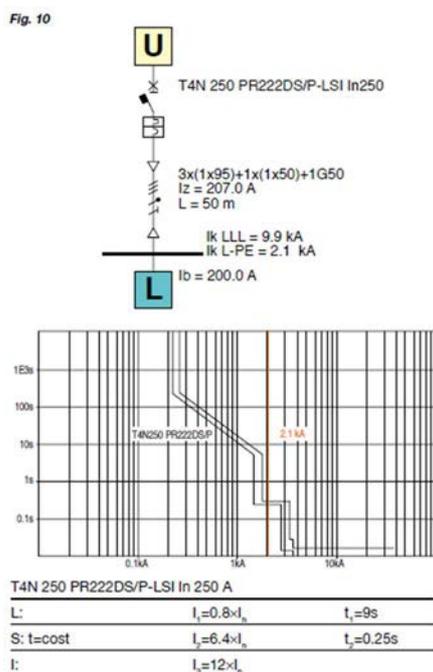
La possibilità di settare una soglia magnetica bassa (circa 750 A) consente di ottenere un tempo di intervento corrispondente all'intervento magnetico (qualche decina di millisecondi) notevolmente più rapido di quello ottenibile a parità di condizioni con un interruttore termomagnetico di pari taglia.

Per gli sganciatori elettronici si possono seguire le stesse indicazioni del caso precedente per ciò che riguarda le funzioni di protezione L (contro il sovraccarico), S (contro il cortocircuito ritardato) e I (cortocircuito istantaneo).

Naturalmente gli sganciatori elettronici permettono una regolazione accurata sia in termini di tempi di intervento sia in termini di soglia di corrente.

L'utilizzo di questi sganciatori trova applicazione in quegli impianti in cui le correnti di guasto fase-PE presentano un valore elevato interessando le protezioni di fase (L-S-I), tale impiego però potrebbe comportare dei settaggi troppo bassi impattando negativamente sulla selettività per sovracorrenti (sovraccarico e cortocircuito).

L'esempio che segue (figura 10) mostra i possibili settaggi di un interruttore T4N 250 In 250A con sganciatore elettronico PR222DS/P LSI.



In particolare si è scelto di settare la soglia I2 della funzione S in modo da estinguere il guasto in meno di 0.25s.

Si vuole sottolineare che quello indicato è solo uno dei possibili settaggi in quanto si poteva utilizzare la funzione I per la protezione contro i contatti indiretti. Se il circuito da proteggere fosse stato un circuito terminale con corrente nominale inferiore a 32A avremmo dovuto verificare che il tempo d'intervento della protezione avvenisse entro il tempo della tabella 4.

La funzione di protezione G contro i guasti a terra migliora le condizioni di protezione in quanto consente di far fronte a tutte quelle situazioni in cui l'impedenza dell'anello di guasto assume valori così elevati da non permettere alle protezioni di fase di intervenire nei tempi richiesti dalla norma, oppure è necessario settare le funzioni S e I "alte" per ragioni di selettività.

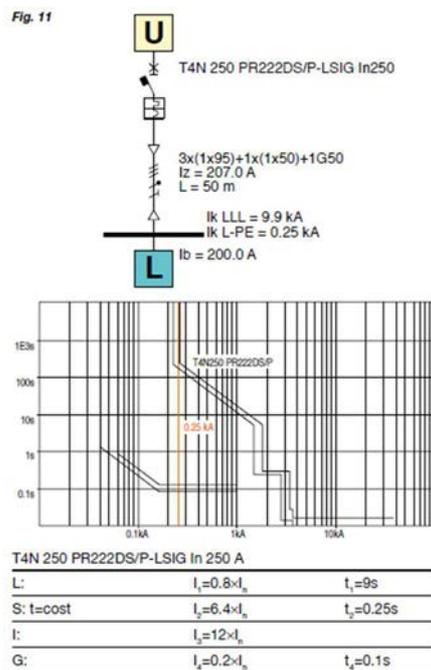
Utilizzando la funzione di protezione G la relazione da soddisfare per la protezione contro i contatti indiretti diventa:

$$Z_S * I_4 \leq U_0$$

dove:

I_4 è il valore del settaggio della funzione di protezione contro i guasti a terra; essendo tale valore regolabile da 0.2 a $1 I_n$ (a seconda del tipo di sganciatore) si capisce come, utilizzando la funzione G, si riesca ad ottenere la protezione dai contatti indiretti per valori di impedenza dell'anello di guasto più grandi (esempio cavi più lunghi) rispetto alla protezione di fase.

L'esempio che segue (figura 11) mostra i possibili settaggi di un interruttore T4N 250 In250 con sganciatore elettronico PR222DS/P LSIG.



La funzione G nei sistemi TN-S consente quindi di risolvere tutti quei casi in cui le protezioni di fase non riescono a garantire l'adeguata protezione, infatti in questo caso con una corrente di guasto fase-PE pari a 0.25kA nessuna protezione di fase (L-S-I) avrebbe garantito l'intervento entro 5 secondi (essendo un circuito terminale con $I_b > 32A$).

Se il circuito da proteggere fosse stato un circuito terminale con corrente nominale inferiore a 32A avremmo dovuto utilizzare uno sganciatore elettronico/termomagnetico proteggendo la linea contro i contatti indiretti tramite le protezioni di fase dell'interruttore entro i tempi della tabella 4.

Occorre tenere presente che nel sistema TN-C non è possibile utilizzare la funzione G in una linea che alimenta un carico trifase più neutro. Infatti in questo caso lo sganciatore a microprocessore non sarebbe in grado di rilevare la corrente di guasto a terra in quanto, in tali condizioni la somma delle correnti nelle fasi e nel neutro sarebbe sempre uguale a zero poiché la corrente di guasto rientra nel conduttore di neutro che è anche conduttore di protezione PEN (si faccia riferimento al paragrafo successivo per una spiegazione più accurata).

7.7.2.5.4 Interruttori automatici con sganciatore elettronico a microprocessore con protezione contro guasto a terra integrata (funzione G)

Gli sganciatori elettronici a microprocessore nelle versioni evolute presentano oltre alle funzioni di protezione contro sovraccarico (L) e cortocircuito (S e I), una funzione di protezione dedicata ai guasti a terra chiamata funzione G.

La protezione G è in grado di valutare la somma vettoriale delle correnti che fluiscono nei conduttori attivi (le tre fasi e il neutro).

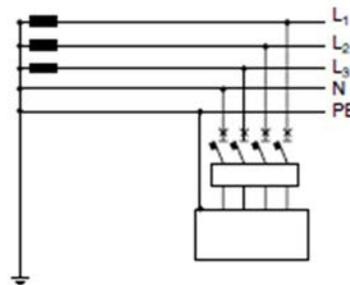
In un circuito sano tale somma è pari a zero ma in pre-senza di un guasto a terra, parte della corrente di guasto ritornerà alla sorgente di alimentazione attraverso il conduttore di protezione e/o la terra, non interessando i conduttori attivi.

Se tale corrente è superiore al valore di intervento impostato per la funzione G l'interruttore aprirà nel relativo tempo impostato. In figura 5 è illustrato il principio di funzionamento.

Fig. 5: principio di funzionamento della funzione G

In caso di circuito sano la somma vettoriale delle correnti nei circuiti attivi (fasi più neutro) è zero:

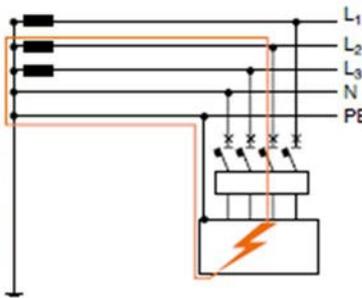
$$I_A = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_N = 0$$



In caso di guasto a terra una parte della corrente di guasto ritorna all'alimentazione attraverso il conduttore di protezione PE non interessando il toroide, la somma vettoriale delle correnti sarà diversa da zero:

$$I_A = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_N \neq 0$$

$I_A \geq I_A$ intervento della funzione G



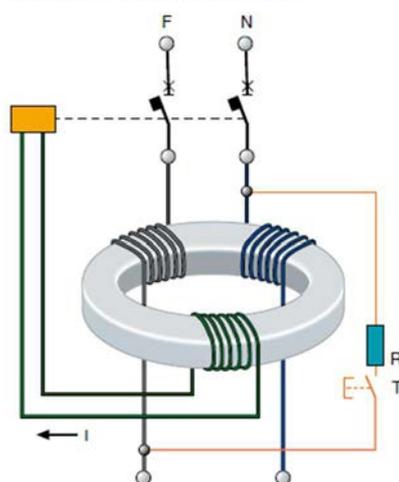
7.7.2.5.5 Protezione contro i contatti indiretti mediante dispositivi differenziali

7.7.2.5.6 Interruttori automatici magnetotermici o elettronici con sganciatore differenziale integrato

Gli interruttori automatici con sganciatore differenziale integrato abbinano in un unico apparecchio lo sganciatore differenziale e lo sganciatore di protezione contro le sovracorrenti e intervengono sia per dispersione di corrente verso terra sia per sovraccarico/cortocircuito.

Il principio di funzionamento dello sganciatore differenziale consiste essenzialmente nel rilevare la corrente di guasto a terra mediante un trasformatore toroidale che abbraccia tutti i conduttori attivi compreso il neutro se distribuito.

Fig. 6: principio di funzionamento del relé differenziale

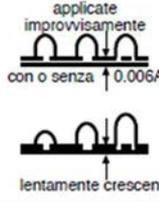


In assenza di guasto a terra la somma vettoriale delle correnti I_{Δ} è zero; in caso di guasto a terra se il valore di I_{Δ} supera il valore di soglia di intervento $I_{\Delta n}$, il circuito posto sul secondario del toroide invia un segnale di comando a un apposito sganciatore di apertura che provoca l'intervento dell'interruttore.

Una prima classificazione degli interruttori differenziali può essere fatta secondo la tipologia di corrente di guasto che possono rilevare:

- tipo AC: lo sgancio è assicurato per correnti alternate sinusoidali differenziali;
- tipo A: lo sgancio è assicurato per correnti alternate sinusoidali differenziali e per correnti differenziali pulsanti unidirezionali;
- tipo B: lo sgancio è assicurato per correnti differenziali continue oltre che per correnti alternate sinusoidali differenziali e per correnti differenziali pulsanti unidirezionali.

Tab. 2: tipologia degli sganciatori differenziali

	Forma d'onda delle correnti differenziali	Corretto funzionamento di dispositivi differenziali		
		Tipo		
		AC	A	B
Alternate sinusoidali		+	+	+
Pulsanti unidirezionali			+	+
Continue				+

Un'ulteriore classificazione è stabilita in base al ritardo d'intervento:

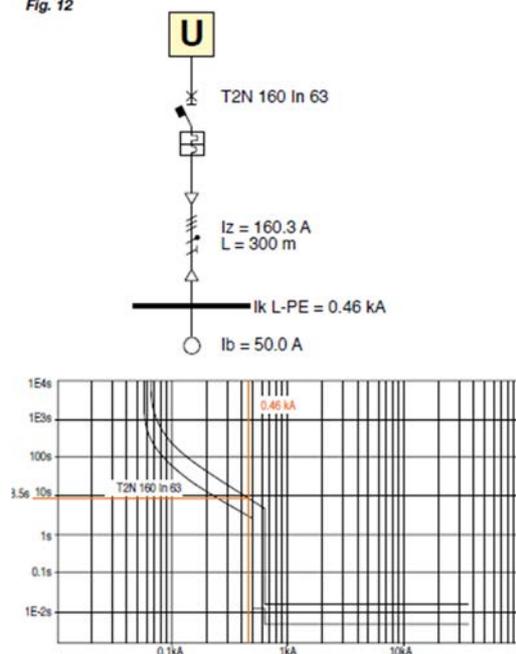
- tipo non ritardato
- tipo S selettivo con ritardo intenzionale.

L'impiego degli interruttori differenziali migliora ulteriormente le condizioni di protezione; in particolare, quando il guasto non è franco o per un guasto alla fine di una linea molto lunga in cui è presente una notevole impedenza che limita la corrente di cortocircuito, questa può permanere per tempi sufficientemente lunghi con conseguenti innalzamenti di temperatura e conseguente pericolo di incendio.

Per spiegare quanto appena detto la figura 12 mostra un esempio di un circuito terminale alimentato da un cavo lungo 300m e protetto da un interruttore termomagnetico Tmax T2N 160 In 63. A causa dell'elevata impedenza del cavo il valore della corrente di guasto fase-PE è pari a 0.46kA. In corrispondenza di tale valore l'interruttore interviene in un tempo maggiore di 5 s (circa 8.5 s considerando la tolleranza) non rispettando i tempi previsti dalla norma.

In questo caso l'interruttore differenziale consente di rilevare la corrente di guasto e intervenire in tempi rapidi rispettando quanto prescritto dalla norma.

Fig. 12

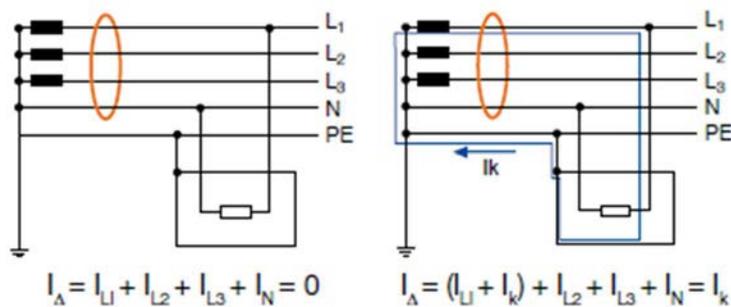


Si fa notare che anche l'interruttore differenziale (come la funzione G) non può essere utilizzato nei sistemi TN-C, in quanto le funzioni di neutro e di protezione vengono assolve da un unico conduttore PEN che impedisce il funzionamento del dispositivo.

Per capire quanto appena detto occorre comprendere il principio di funzionamento di un interruttore differenziale. Come descritto precedentemente esso consiste essenzialmente nel rilevare la corrente di guasto a terra mediante un trasformatore toroidale che abbraccia tutti i conduttori attivi compreso il neutro, se distribuito.

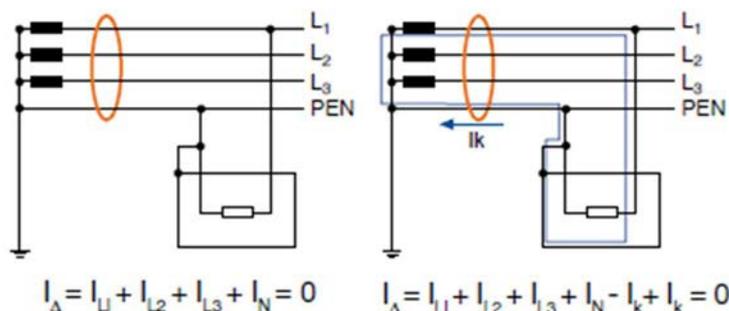
In un sistema TN-S la corrente di guasto a terra si richiude attraverso il conduttore di protezione PE non interessando il toroide (figura 13); in questo caso la somma vettoriale delle correnti è diversa da zero e se superiore alla soglia impostata può fare intervenire il differenziale.

Fig.13: differenziale nel sistema TN-S



In un sistema TN-C la corrente di guasto a terra si richiude attraverso il conduttore di protezione PEN ripassando all'interno del toroide (Si ricorda infatti che il toroide abbraccia tutti i conduttori attivi fase e neutro) (figura 14). in questo caso la somma vettoriale delle correnti è ancora uguale a zero per cui il differenziale non potrà intervenire.

Fig.14: differenziale nel sistema TN-C



D'altra parte, nello stesso sistema, se il conduttore di neutro non passasse attraverso il toroide, la presenza di un carico monofase (carico sbilanciato) sarebbe sufficiente a causare l'intervento non desiderato del differenziale, anche se il circuito non si trova in condizioni di guasto.

Conclusioni

Riassumendo, nei sistemi TN la norma consente l'utilizzo di:

- dispositivi (sia differenziali, sia automatici contro le sovracorrenti) rispettando la relazione $Z_S * I_a \leq U_0$ entro i tempi della tabella 4 per i circuiti terminali con correnti inferiori a 32A, o entro 5s per i circuiti di distribuzione o per circuiti terminali con correnti nominali superiori a 32A.

Se l'interruzione automatica non può essere ottenuta rispettando le condizioni precedentemente illustrate è necessario realizzare un collegamento equipotenziale supplementare connesso a terra, tuttavia tale collegamento non dispensa dalla necessità di interrompere l'alimentazione per altre ragioni (es. contro l'incendio, contro le sollecitazioni termiche in componenti elettrici, ecc.).

Nei sistemi TN-C non è possibile sezionare il neutro e non è possibile utilizzare dispositivi differenziali o simili nella filosofia di funzionamento (funzione G contro i guasti a terra).

7.7.2.5.7 Interruttori differenziali puri

Gli interruttori differenziali puri sono dotati del solo sganciatore differenziale e quindi garantiscono solo la protezione verso terra. Devono essere accoppiati a interruttori magnetotermici o a fusibili per la protezione dalle sollecitazioni termiche e dinamiche.

Il principio di funzionamento è identico a quanto illustrato precedentemente.

7.7.2.5.8 Relè differenziali

I relè differenziali, anche detti relè differenziali da quadro, svolgono la funzione di rilevazione della corrente di guasto a terra tramite un toroide separato da installare esternamente sui conduttori attivi del circuito.

Nel caso in cui la corrente differenziale dovesse superare la soglia impostata, il relè attiva un contatto che viene utilizzato per comandare il meccanismo di sgancio di un interruttore.

Sono dispositivi impiegati negli impianti industriali dove le condizioni di installazione sono particolarmente restrittive come ad esempio interruttori già installati o spazio limitato nella cella interruttore.

Il principio di funzionamento è identico a quanto illustrato precedentemente.

7.7.2.5.9 Principio di funzionamento di un dispositivo differenziale

Il principio di funzionamento dello sganciatore differenziale consiste essenzialmente nel rilevare la corrente di guasto a terra mediante un trasformatore toroidale che abbraccia tutti i conduttori attivi compreso il neutro, se distribuito. In assenza di guasto a terra la somma vettoriale delle correnti, indicata con I_{Δ} , è zero; in caso di guasto a terra se il valore di I_{Δ} supera il valore di soglia di intervento nominale, detta $I_{\Delta n}$, il circuito posto al se-condario del toroide invia un segnale di comando a un apposito sganciatore di apertura che provoca l'intervento dell'interruttore.

Nella scelta della corrente differenziale nominale d'intervento occorre considerare, oltre al coordinamento con l'impianto di terra, anche la corrente totale di dispersione dell'impianto nel suo funzionamento normale e, per evitare scatti intempestivi, tale corrente non deve superare $0.5I_{\Delta n}$.

Conclusioni

Riassumendo, nei sistemi TT la norma CEI 64-8/4 con-sente l'utilizzo di:

- dispositivi differenziali rispettando la relazione $R_E * I_{\Delta n} \leq 50V$ con un tempo di interruzione non superiore a 1s.

Se la condizione per l'interruzione automatica non può essere ottenuta è necessario realizzare un collegamento equipotenziale supplementare connesso a terra, tuttavia tale collegamento non dispensa dalla necessità di interrompere l'alimentazione per altre ragioni (es. contro l'incendio, contro le sollecitazioni termiche in componenti elettrici, ecc.).

7.7.2.5.10 Interruttori differenziali e sistema TN

Tutte le preoccupazioni emerse sopra vengono meno utilizzando gli interruttori differenziali perché sono dispositivi in grado di aprire il circuito in centesimi di secondo (con le elevate correnti di guasto, tipiche dei sistemi TN, in 30-40ms). Non va dimenticato però che il vantaggio dei sistemi TN è quello di utilizzare i dispositivi di massima corrente per la protezione dai contatti indiretti: ricorrere agli interruttori differenziali vuol dire rinunciare a questo vantaggio. Bisogna infine ricordare che questi dispositivi possono essere utilizzati solo nei sistemi TN-S in quanto nei sistemi TN-C l'uso combinato del conduttore di neutro e di protezione ne impedirebbe il funzionamento in caso di guasto a terra. Nei sistemi TN si è detto che un guasto franco a terra costituisce un corto circuito monofase a terra quindi la corrente differenziale corrisponde a una corrente di corto circuito. L'interruttore deve essere capace di interromperla poiché si è in presenza proprio di una corrente differenziale. Come per un interruttore magnetico contro il cortocircuito è stabilito il potere d'interruzione, così per l'interruttore differenziale deve essere specificato il potere d'interruzione differenziale. Se il dispositivo non è dotato di sganciatori di sovracorrente nei sistemi TN occorre verificare che il potere d'interruzione differenziale sia maggiore della corrente presunta di cortocircuito monofase a terra. In alternativa il dispositivo differenziale deve essere associato a un dispositivo di protezione di massima corrente capace di assicurare la protezione di tutto il circuito compreso il differenziale in situazione di cortocircuito (il coordinamento tra i vari dispositivi deve essere dichiarato dal costruttore).

7.7.2.5 Il neutro in condizioni anomale del circuito

In caso di anomalia nel circuito il neutro può assumere tensioni verso terra pericolose e tutte le masse assumono questa tensione anche se non sono interessate da nessun guasto d'isolamento. Queste tensioni possono essere originate o sull'impianto di terra del neutro o sul conduttore di neutro stesso. L'impianto di terra del neutro può introdurre tensioni pericolose a causa di un guasto sull'alta tensione o a causa di un guasto a terra sulla bassa tensione. Se un conduttore sulla distribuzione aerea in bassa tensione dovesse entrare in contatto col suolo, il circuito si chiuderebbe, verso il neutro in cabina, attraverso la resistenza verso terra R_E del conduttore in contatto col suolo e attraverso la resistenza R_n del neutro messo a terra in cabina. I dispositivi di protezione intervengono difficilmente entro i tempi previsti dalla curva di sicurezza per un guasto a terra in linea anche perché la corrente di guasto è limitata dalle resistenze di terra. Tale guasto può permanere per lungo tempo ed è necessario che la resistenza R_n sia di valore tale per cui la tensione applicata su di essa non superi il valore U_L di tensione limite; deve cioè essere rispettata la relazione:

$$R_n \times \frac{U_0}{R_E + R_n} \leq U_L$$

Da cui:

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

R_E = Resistenza di terra dell'elemento verso cui si è prodotto il guasto

R_n = Resistenza di terra del neutro

Questi problemi sono caratteristici dei sistemi di distribuzione dell'energia elettrica pubblica e quindi interessano in particolare le società distributrici (in ogni caso occorre sottolineare che si assumono valori convenzionali di R_n prudenziali per la messa a terra del neutro in cabina e lungo la linea). Al contrario in un impianto di distribuzione alimentato da propria cabina l'impianto di terra è unico e se si verifica un guasto verso una massa o una massa estranea, essendo queste collegate a terra, il conduttore di protezione cortocircuita la R_n del partitore di tensione costituito dalle resistenze R_n ed R_E . Se invece il guasto avviene verso il terreno (conduttore a contatto col suolo) in genere R_E ha valori piuttosto elevati e quindi la tensione sul neutro è in genere ridotta a valori non pericolosi. Oltre ai motivi indicati sopra, il neutro può assumere tensioni pericolose anche a causa di correnti di squilibrio elevate, corto circuito tra fase e neutro o interruzione del conduttore neutro stesso, anche se bisogna sottolineare che questi pericoli sussistono solo se il conduttore di neutro è utilizzato anche come conduttore di protezione (conduttore PEN poco usato).

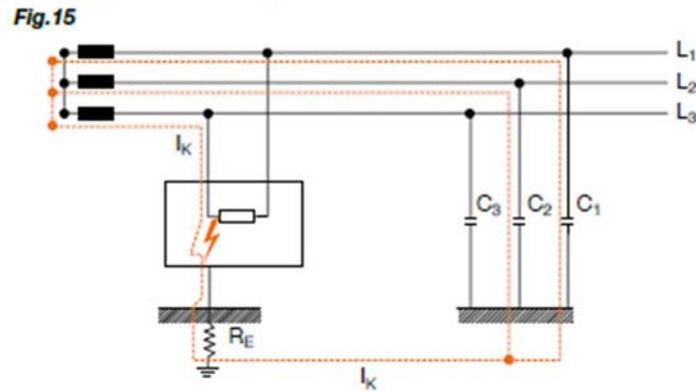
Da queste considerazioni si può concludere che il sistema TN deve essere utilizzato per gli impianti con propria cabina di trasformazione (le norme CEI impongono il sistema TN per utenze di questo tipo) in quanto il sistema può essere gestito in modo tale da garantire i requisiti di sicurezza necessari, mentre, a causa dei complessi problemi di responsabilità tra utente e distributore (non è semplice per il distributore fornire i requisiti di sicurezza necessari), è preferibile l'utilizzo del sistema TT.

Circuito di guasto	La corrente di guasto si richiude attraverso il conduttore di protezione o attraverso il conduttore di protezione e l'impianto di terra quando l'impianto di terra è suddiviso in più parti sia in cabina che presso gli utilizzatori.
Impianto di terra	Utilizzatori e cabina hanno impianti di terra in comune
Protezione dai contatti indiretti	La tensione totale di terra presso gli utilizzatori dipende dall'impedenza dell'anello di guasto. La protezione può essere assicurata con l'interruzione del guasto, ottenuta per mezzo di interruttori magnetotermici o di relè differenziali, e garantendo una buona equipotenzialità
Fornitura	Alimentazione in MT degli impianti che devono essere dotati di propria cabina di trasformazione MT/BT
Vantaggi	Il guasto viene interrotto tempestivamente all'insorgere del primo difetto di isolamento. Può essere evitato l'uso di relè differenziali.
Svantaggi	Il coordinamento delle protezioni magnetotermiche può essere difficoltoso. Impianto di terra costoso.

Principali caratteristiche di un sistema TN-S

7.7.3 Sistemi IT

Come si può vedere dalla figura 15, la corrente di guasto a terra in un sistema IT si richiude attraverso le capacità verso terra dell'impianto, pertanto la corrente di guasto verso terra risulterà essere di valore estremamente ridotto al punto da non determinare alcun intervento delle protezioni; le tensioni di contatto originate assumeranno di conseguenza valori particolarmente bassi.



Se si verifica un guasto, la corrente si chiude o tramite capacità parassite (se il neutro è isolato), oppure tramite l'impedenza non trascurabile del neutro (nel disegno non rappresentata).

In entrambi i casi, l'impedenza è elevata e la corrente è bassa, quindi il circuito non viene interrotto e può continuare a funzionare (ad un primo guasto).

Questo va bene a patto che l'isolamento non ceda troppo diminuendo l'impedenza e aumentando la corrente.

Secondo la norma CEI 64-8/4, non è necessaria l'interruzione automatica del circuito nel caso di un singolo guasto a terra purché sia verificata la condizione:

$$R_E * I_d \leq U_L$$

dove:

R_E è la resistenza del dispersore al quale sono collegate le masse, in ohm;

I_d è la corrente di guasto in ampere, del primo guasto di impedenza trascurabile tra un conduttore di linea ed una massa, tale valore tiene conto delle correnti di dispersione e dell'impedenza totale verso terra dell'impianto elettrico.

Se questa condizione è rispettata, successivamente al guasto, sulla massa si ha il permanere di una tensione di contatto minore di 50V (in corrente alternata), sopportabile dal corpo umano per un tempo indefinito.

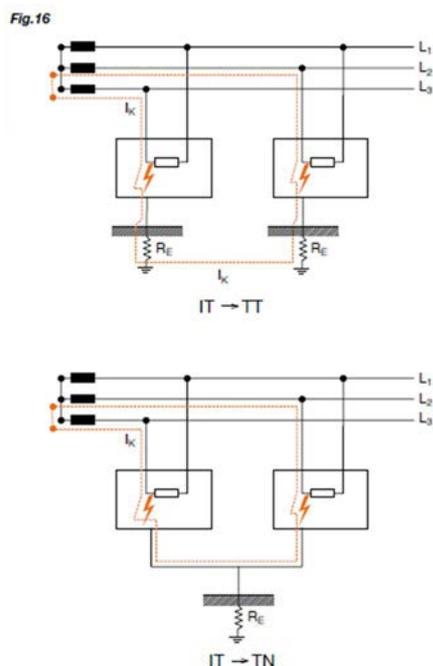
Negli impianti che adottano il sistema IT, si deve prevedere un dispositivo di controllo dell'isolamento per segnalare la presenza della condizione anomala una volta manifestatosi un guasto. Un dispositivo di controllo dell'isolamento, conforme a CEI EN 61557-8, è un dispositivo che controlla con continuità l'isolamento di un impianto elettrico.

Esso è destinato a segnalare qualsiasi riduzione significativa del livello di isolamento dell'impianto per permettere di trovare la causa di questa riduzione prima che si produca un secondo guasto, evitando così l'interruzione dell'alimentazione.

Il manifestarsi di un guasto a terra modifica il sistema di distribuzione vanificando i benefici di una rete isolata da terra.

In particolare possono verificarsi due situazioni in presenza di un guasto a terra (figura 16):

- se le masse degli utilizzatori sono connesse ciascuna al proprio impianto di terra allora il sistema da IT si trasforma in TT;
- se le masse degli utilizzatori son connesse ad un unico impianto di terra allora il sistema da IT si trasforma in TN.



In tali condizioni in caso di un guasto a terra (doppio guasto) la norma prescrive che occorre interrompere l'alimentazione secondo le seguenti modalità:

- quando le masse sono messe a terra per gruppi o individualmente, le condizioni per la protezione sono analoghe a quelle indicate per il sistema TT.
- quando le masse sono interconnesse collettivamente da un conduttore di protezione, si applicano le prescrizioni relative al sistema TN in particolare:

$$Z_s \leq \frac{U}{2I_a}$$

quando il neutro è distribuito si deve verificare:

$$Z'_s \leq \frac{U_0}{2I_a}$$

Dove:

U_0 è la tensione nominale tra fase e neutro;

U è la tensione nominale tra fase e fase;

Z_s è l'impedenza dell'anello di guasto costituito dal conduttore di fase e dal conduttore di protezione del circuito;

Z'_s è l'impedenza dell'anello di guasto costituito dal conduttore di neutro e dal conduttore di protezione del circuito.

I_a è il valore di corrente di intervento del dispositivo di protezione entro i tempi definiti per i sistemi TN.

La norma raccomanda di non distribuire il conduttore di neutro nei sistemi IT. Una ragione è legata alla difficoltà pratica di rispettare la condizione prevista per l'impedenza dell'anello di doppio guasto Z'_S . Infatti, in presenza di conduttore di neutro distribuito, essa deve risultare il 58% più piccola, di quella delle fasi Z_S , che si riscontra in caso di doppio guasto tra le fasi; si evidenzia quindi una maggiore difficoltà di coordinamento con il dispositivo di interruzione automatica che deve intervenire per la protezione dai contatti indiretti.

Inoltre, la presenza del neutro distribuito comporta, soprattutto per impianti industriali di una certa complessità, il rischio che questo possa accidentalmente essere collegato a terra, in qualche punto, vanificando così i vantaggi del sistema IT.

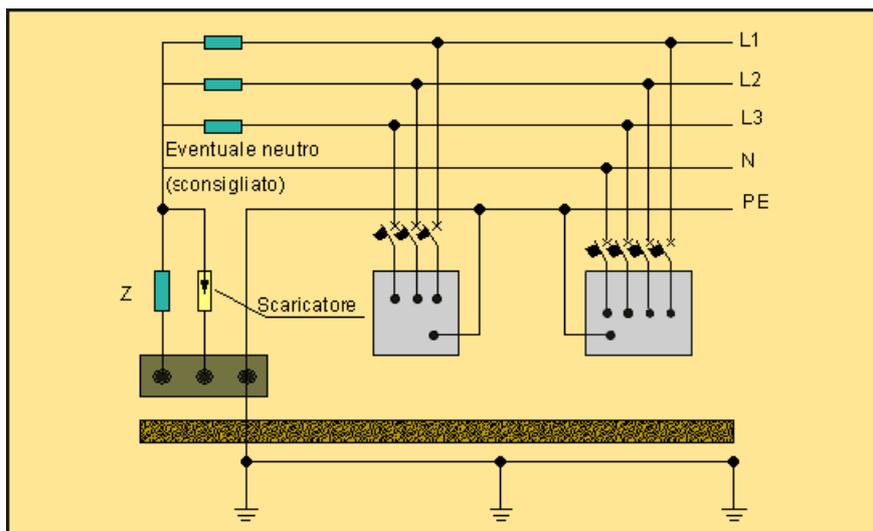
Conclusioni

Riassumendo, nei sistemi IT la norma:

- consente di non interrompere automaticamente l'alimentazione al circuito quando si verifica un primo guasto;
- prescrive di interrompere automaticamente l'alimentazione al circuito quando si verifica un secondo guasto, con il primo non estinto, adottando analoghe prescrizioni ai sistemi TT o TN, in funzione del tipo di collegamento delle masse verso terra;
- obbliga il monitoraggio dell'isolamento della rete verso terra in modo da segnalare la presenza di eventuali guasti.

7.7.3.1 Caratteristiche del sistema

Si ricorre al sistema di distribuzione IT negli impianti in cui è necessario garantire la continuità perché un disservizio potrebbe provocare gravi danni alla produzione. Questo sistema è caratterizzato dal fatto che il neutro è isolato o connesso a terra tramite impedenza di valore opportuno (alcune centinaia di ohm negli impianti 230/400 V) e le masse sono connesse a terra.



Sistema di distribuzione IT .

Un guasto a terra in un sistema con neutro isolato da terra provoca la circolazione di una piccola corrente di guasto dovuta principalmente all'accoppiamento capacitivo dei cavi ed in misura minore ai motori e agli altri componenti dell'impianto (figura). La tensione limite U_L può essere facilmente contenuta entro valori non pericolosi in quanto, visto il modesto valore della corrente di guasto, è facile soddisfare la condizione:

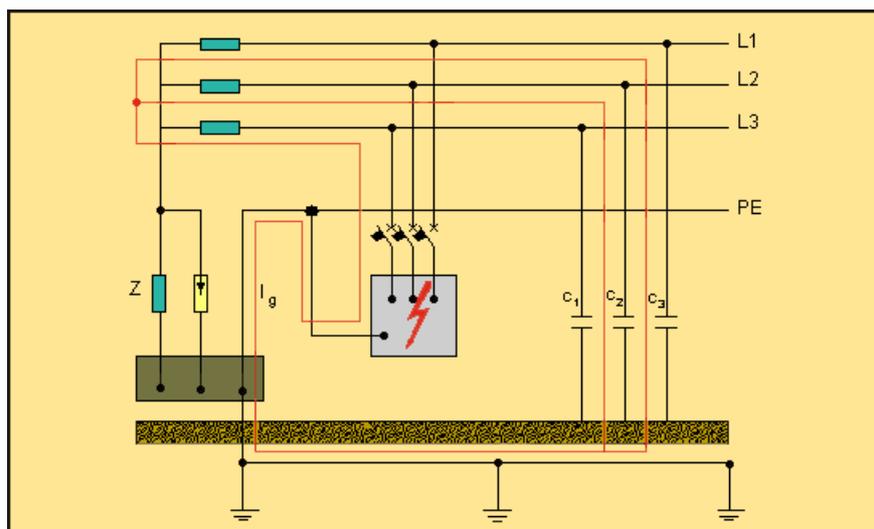
$$R_T \times I_g \leq U_L \quad (7.18)$$

dove:

R_T è la resistenza, espressa in ohm, del dispersore al quale sono collegate le masse;

I_g è la corrente di guasto, espressa in amperes, fra un conduttore di fase e una massa;

U_L è il massimo valore ammissibile per la tensione di contatto in seguito ad un guasto a massa ($U_L=50$ V per ambienti ordinari, $U_L=25$ V per ambienti particolari).

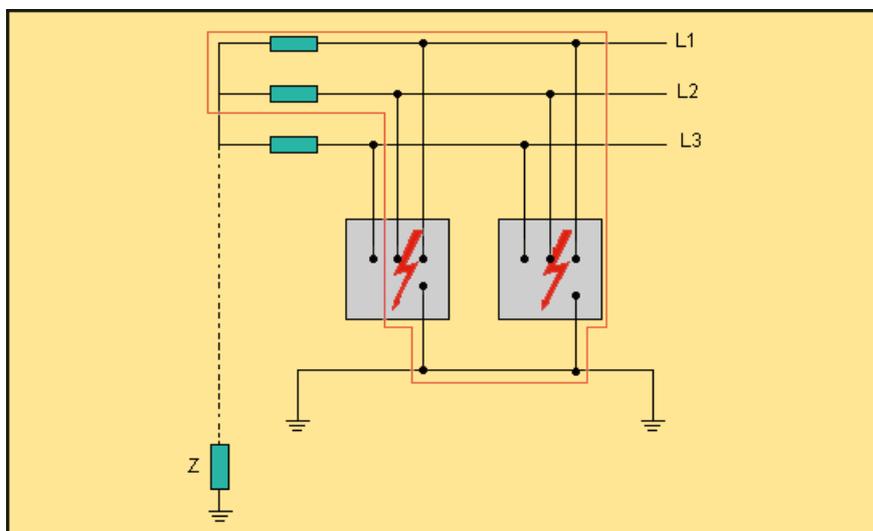


Percorso della corrente di primo guasto a terra in un sistema IT.

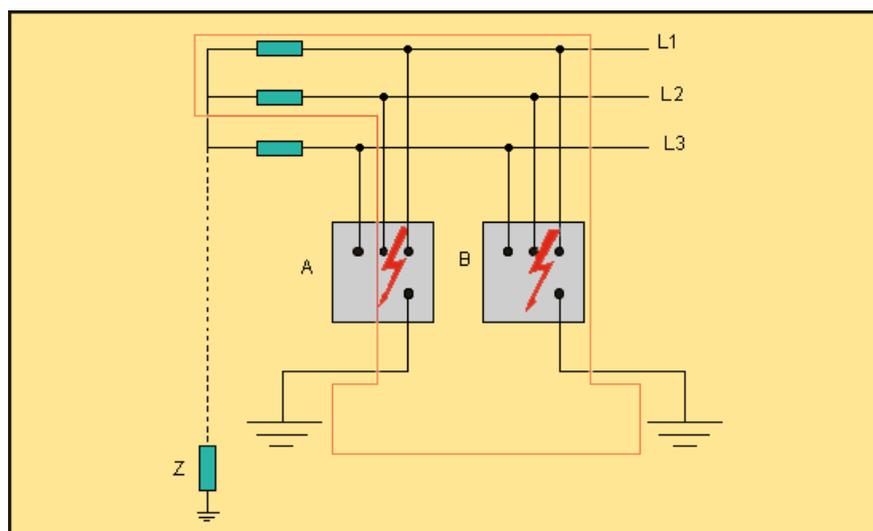
Se questa condizione è soddisfatta il guasto può permanere per un tempo indefinito senza che vi sia pericolo di contatti indiretti. Questa caratteristica è molto vantaggiosa in quegli impianti in cui l'interruzione del servizio può causare danni economici o causare pericolo per la salute delle persone. Le Norme CEI ne consentono l'utilizzo negli impianti di prima categoria dotati di cabina propria e prescrivono che la tensione limite sulle masse, a causa di un primo guasto a terra, non superi $U_L=50\text{ V}$ per ambienti ordinari e $U_L=25\text{ V}$ per ambienti particolari. In caso di contatto diretto la corrente che fluisce attraverso la persona è invece piuttosto pericolosa soprattutto nel caso di impianti con linee in cavo molto estese (se il neutro è isolato da terra ed i circuiti sono poco estesi il contatto non è pericoloso trattandosi di misura di protezione per 'separazione elettrica'). Inoltre, in caso di permanenza di un primo guasto a terra, una persona che subisse un contatto diretto sarebbe sottoposta alla tensione concatenata anziché alla tensione stellata come invece succede in un sistema TT o TN. Per ovviare a questo inconveniente si rende necessario ricorrere ad un sistema di controllo continuo dell'isolamento verso terra, in modo che sia facile individuare ed eliminare un primo guasto a terra. Il dispositivo di controllo dell'isolamento è un apparecchio sempre inserito, regolato per una soglia di circa $0,4\text{ M}\Omega$ che segnala acusticamente o visivamente la mancanza di isolamento minimo prestabilito causato dal primo guasto verso terra. Per evitare manomissioni la regolazione deve essere effettuata solo tramite chiave o attrezzo. Al verificarsi di un allarme per caduta dell'isolamento deve far seguito una rapida ricerca del punto di guasto che può essere eseguita solo se si dispone di apparecchiature adeguate e di personale specializzato. Una particolare attenzione occorre avere per i luoghi MARCI dove il permanere di una corrente verso terra è poco gradita perché potrebbe produrre riscaldamenti localizzati ed innescare un incendio. Inoltre allo stabilirsi di un secondo guasto si ha la circolazione su due circuiti di una sovracorrente il cui valore non è noto a priori e i dispositivi di protezione potrebbero non essere adatti a proteggere adeguatamente i circuiti. In questi luoghi è necessario impartire particolari istruzioni al personale affinché, scegliendo il momento più adatto, cioè quando il disservizio è minore, provveda ad aprire manualmente il circuito quando il dispositivo di controllo dell'isolamento segnala un primo guasto a terra.

7.7.3.2 Protezione dai contatti indiretti

Al primo guasto a terra sappiamo che la condizione 7.18 è facilmente soddisfatta ed un'eventuale resistenza di guasto (a differenza dei sistemi TT e TN) aumenta la sicurezza. Con il primo guasto a terra il sistema non è più isolato da terra e si trasforma in un sistema TT (vedasi figura) o TN (vedasi figura) a seconda che le masse siano collegate ad un unico impianto di terra o ad impianti di terra separati.



Impianto IT con le masse degli utilizzatori collegate ad uno stesso impianto di terra. A seguito di un primo guasto a terra il sistema IT si trasforma in un sistema TN.



Impianto IT con le masse degli utilizzatori connesse a impianti di terra separati. A seguito di un primo guasto a terra il sistema IT si trasforma in un sistema TT.

In questo secondo caso, la corrente di guasto è normalmente in grado di far intervenire le protezioni di massima corrente. Se invece la messa a terra è ottenuta con impianti di terra separati la corrente di guasto potrebbe non essere in grado di far intervenire le protezioni di massima corrente. Se si usassero i relè differenziali si potrebbero verificare situazioni di disservizio dovute al loro intervento intempestivo per cui si ritiene normalmente più economico costruire un impianto di terra unico in modo da convertire il sistema IT in un sistema TN.

Le condizioni per assicurare la protezione contro i contatti indiretti devono quindi essere:

- conformi alle prescrizioni per i sistemi TT se le masse sono messe a terra singolarmente o per gruppi;
- conformi alle prescrizioni per i sistemi TN se le masse sono collegate allo stesso impianto di terra ma distinguendo tra impianto con neutro non distribuito e impianto con neutro distribuito.

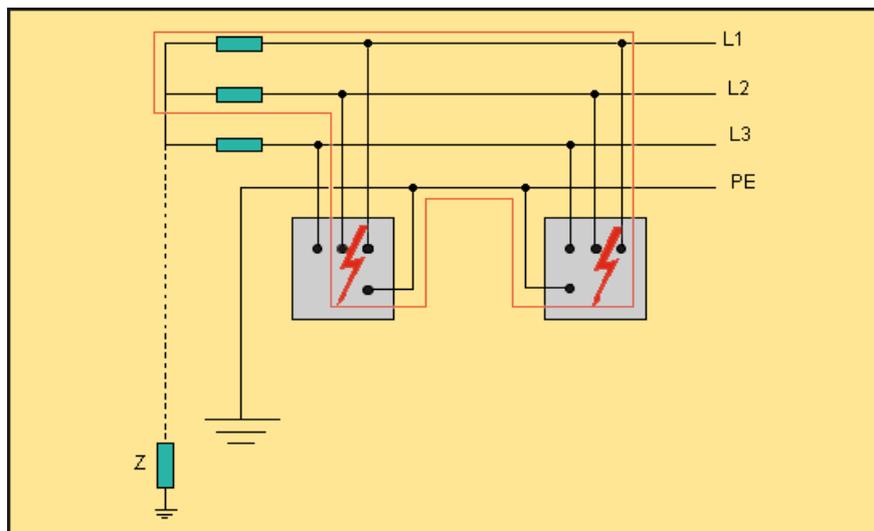
Neutro non distribuito – Il doppio guasto interessa due fasi (figura) come se si trattasse di un sistema TN con una tensione uguale a $\sqrt{3}xU_0$. Purtroppo l'anello di guasto e la relativa impedenza non sono noti in quanto il guasto può avvenire in due punti qualsiasi dell'impianto. La Norma stabilisce convenzionalmente che l'impedenza dell'anello di guasto debba essere la metà di quella permessa per un sistema TN. In questo modo dovrebbe essere possibile l'apertura di almeno uno dei due circuiti guasti in un tempo stabilito come da tabella (neutro non distribuito).

La condizione da soddisfare quando il neutro non è distribuito diventa:

$$Z_{s1} \leq \frac{\sqrt{3}xU_0}{2xI_a} = \frac{U}{2xI_a}$$

dove:

I_a è la corrente che provoca l'intervento del dispositivo di protezione del circuito entro il tempo t specificato nella tabella per i circuiti terminali che alimentano apparecchi trasportabili, mobili o portatili ed entro 5s per gli altri circuiti come per i sistemi TN; Z_{s1} è l'impedenza dell'anello di guasto costituito dal conduttore di fase e dal conduttore di protezione; U_0 è la tensione nominale tra fase e neutro; U è la tensione nominale tra fase e fase.



Sistema di distribuzione IT. Circuito senza neutro distribuito

U ₀ / U (V)	Tempo di interruzione (s)			
	Condizioni ordinarie (U _L =50V)		Condizioni particolari (U _L =25V)	
	Neutro non distribuito	Neutro distribuito	Neutro non distribuito	Neutro distribuito
120/240	0,8	5	0,4	1
230/400	0,4	0,8	0,2	0,4
400/690	0,2	0,4	0,06	0,2
580/1000	0,1	0,2	0,02	0,06

Tempo di interruzione massimo ammesso per secondo guasto nei sistemi IT

Il caso più pericoloso, il contatto simultaneo tra due masse, non è stato considerato in quanto si ritiene poco probabile un evento simile. La tabella si riferisce quindi ai tempi di intervento massimi per contatto con una sola massa.

Neutro distribuito - Il doppio guasto può avvenire tra una fase e il neutro (figura) ed in questo caso il circuito di guasto viene sostenuto da una tensione U_0 . La tensione è minore rispetto al caso precedente ma anche la corrente diminuisce facendo aumentare i tempi di intervento del sistema di protezione a tempo inverso. Va quindi verificata la condizione:

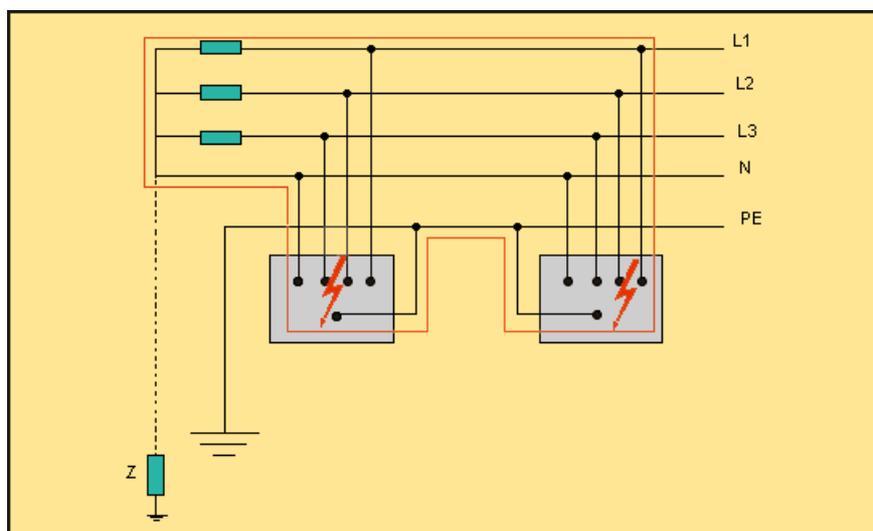
$$Z_{s2} \leq \frac{U_0}{2xI_a}$$

dove:

I_a è la corrente che provoca l'intervento del dispositivo di protezione del circuito entro il tempo t specificato nella tabella per i circuiti terminali che alimentano apparecchi trasportabili, mobili o portatili ed entro 5s per gli altri circuiti come per i sistemi TN;

Z_{s2} è l'impedenza dell'anello di guasto costituito dal neutro e dal conduttore di protezione;

U_0 è la tensione nominale tra fase e neutro.



Sistema di distribuzione IT. Circuito con neutro distribuito

In ogni caso la distribuzione del neutro è decisamente sconsigliata in un sistema IT anche perché è più facile mantenerlo isolato se non è distribuito. Il sistema IT presenta l'inconveniente di non essere protetto dai contatti accidentali con le reti a MT. Per questo motivo si prevede l'installazione di scaricatori tra il centro stella dell'avvolgimento di bassa tensione del trasformatore MT/BT e l'impianto di terra. Oltre a questo è utile osservare che i materiali isolanti devono essere dimensionati per funzionare per periodi piuttosto lunghi con tensioni verso terra che coincidono con la tensione concatenata del sistema.

Circuito di guasto	La corrente di primo guasto è di valore modesto e le tensioni di contatto non sono pericolose.
Impianto di terra	Impianto di terra degli utilizzatori separato
Protezione dai contatti indiretti	Al primo guasto non si ha l'intervento delle protezioni. Deve essere installato un controllore permanente dell'isolamento verso massa. In caso di doppio guasto la protezione può essere ottenuta per mezzo di interruttori di massima corrente o relè differenziali.
Fornitura	Impianti in cui la continuità del servizio è essenziale.
Vantaggi	L'impianto può continuare a funzionare anche dopo il primo guasto verso terra. Impianto di terra poco costoso.
Svantaggi	l'isolamento verso massa con segnalazione tramite allarme al primo guasto verso terra.

Principali caratteristiche di un sistema IT

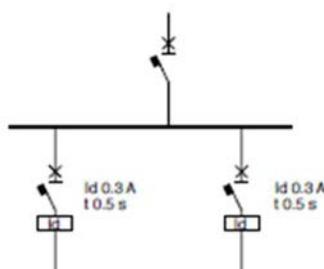
7.8 La selettività delle protezioni contro i guasti di terra

La norma CEI 64-8/5 consiglia la realizzazione di un coordinamento selettivo, per ragioni di esercizio, tra dispositivi differenziali disposti in serie allo scopo di non fare mancare l'alimentazione delle parti dell'impianto non interessate dall'eventuale guasto. Questa selettività può essere ottenuta installando dispositivi differenziali in modo che solo il più vicino al guasto interrompa l'alimentazione.

Si parla in questo caso di selettività differenziale e si possono distinguere due tipi di selettività:

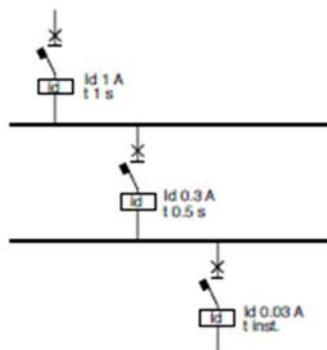
- selettività differenziale orizzontale (figura 1): consiste nel proteggere ogni singola linea con un interruttore differenziale. In questo modo, in caso di guasto a terra, viene messa fuori servizio solo la partenza affetta dal guasto in quanto gli altri interruttori differenziali non sono interessati da alcuna corrente di guasto. Occorre però prendere dei provvedimenti diversi dall'uso del differenziale per la protezione dai contatti indiretti nella parte di quadro e di impianto a monte del dispositivo differenziale;

Fig. 1: selettività differenziale orizzontale



- selettività differenziale verticale (figura 2): si realizza con interruttori differenziali posti in serie.

Fig. 2: selettività differenziale verticale



Conformemente alla CEI 64-8/5 (IEC 60364-5-53), per assicurare la selettività dei due dispositivi differenziali in serie, questi devono soddisfare simultaneamente le seguenti due condizioni:

- la caratteristica di non funzionamento tempo-corrente del dispositivo posto a monte si deve trovare al di sopra della caratteristica di interruzione tempo corrente del dispositivo posto a valle;
- la corrente differenziale nominale del dispositivo posto a monte deve essere adeguatamente superiore a quella del dispositivo posto a valle.

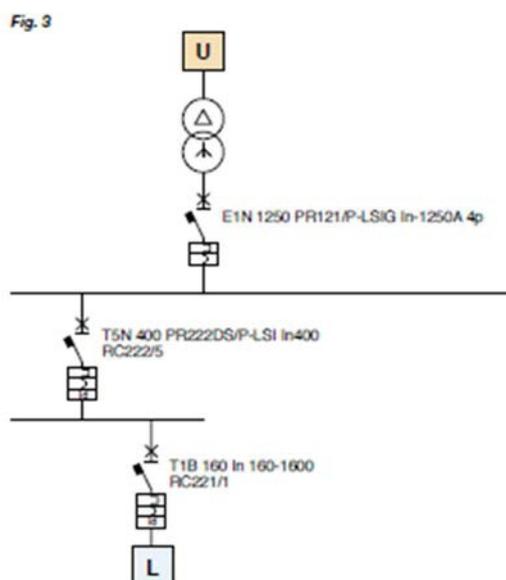
La caratteristica di non funzionamento tempo corrente è la curva che riporta il ritardo massimo durante il quale una corrente differenziale più elevata di quella nominale di non intervento (pari a $0.5I_{\Delta n}$) fluisce nell'interruttore differenziale senza provocarne l'intervento.

Riassumendo, per ottenere la selettività differenziale tra due dispositivi posti in serie:

- per interruttori differenziali di tipo S a monte, (conformi a CEI EN 61008-1 e CEI EN 61009 (IEC 61008-1 e IEC 61009), di tipo ritardato, bisogna scegliere interruttori a valle di tipo non selettivo con $I_{\Delta n}$ tre volte inferiore;
- per sganciatori differenziali elettronici (RC 221/222/223, RCQ, RD2) è sufficiente scegliere il dispositivo a monte con la regolazione delle soglie di tempo e di corrente immediatamente maggiori di quelle del dispositivo a valle tenendo opportunamente conto delle tolleranze.

L'esempio che segue (figura 3) mostra una parte di un impianto in cui sono presenti tre interruttori in cascata equipaggiati con sganciatori differenziali e sganciatori elettronici con protezione contro i guasti a terra G. Gli interruttori in esame sono:

- E1N 1250 PR121/P-LSIG In=1250A 4p
- T5N 400 PR222DS/P-LSI In =400A con sganciatore differenziale RC222
- T1B 160 In=160A con sganciatore differenziale RC221



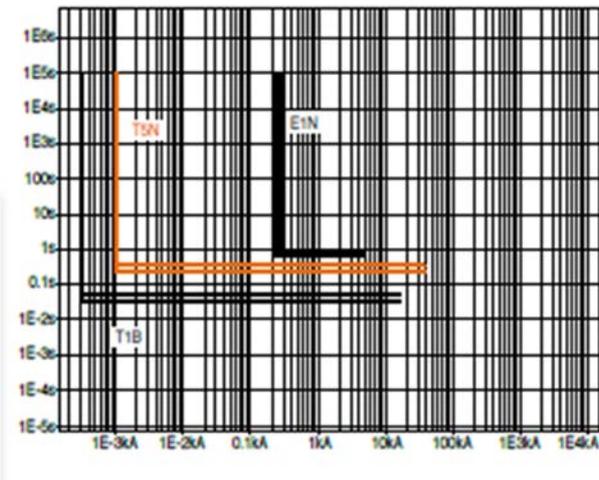
Per un corretto coordinamento ai fini della selettività differenziale è necessario settare opportunamente le soglie di corrente e i tempi di intervento tenendo in conto le tolleranze. Ovviamente per ciascun interruttore dovrà essere verificato il vincolo imposto dalle norme per ciò che riguarda la protezione dai contatti indiretti.

I possibili settaggi ai fini della selettività sono i seguenti:

- E1N 1250
G (Guasto a terra): $t=cost$ - Corrente - 250 [A] - Tempo 0.8 [s]
- T5N 400
RC: Corrente 1 [A] - Tempo 0.3 [s]
- T1B 160
RC: Corrente 0.3 [A] - Tempo istantaneo.

Con tali settaggi le curve di intervento sono quelle rappresentate in figura 4:

Fig. 4



7.9 Protezione dai contatti indiretti senza interruzione automatica del circuito (protezioni passive)

7.9.1 Generalità

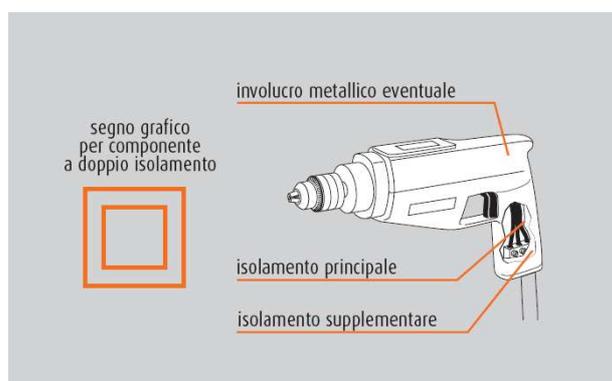
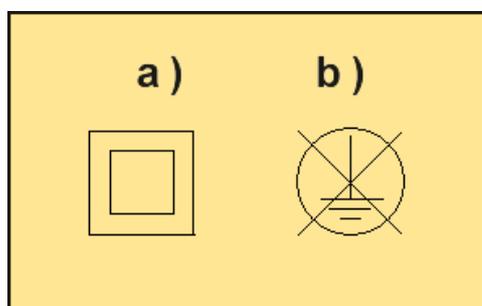
Sono questi dei metodi di protezione che, a differenza dei sistemi di protezione attiva trattati fino ad ora (protezione repressiva), non determinano l'interruzione automatica del circuito, con un vantaggio evidente per quanto riguarda la continuità di esercizio. Si tratta quindi di sistemi di protezione passivi che tendono ad impedire che possano verificarsi condizioni di pericolo (protezione preventiva).

7.9.2 Protezione con componenti di classe II

Un sistema di protezione passivo molto semplice consiste nell'utilizzare materiali elettrici (apparecchi, quadri, condutture, cassette di derivazione ecc..) con isolamento supplementare con l'intento di evitare che il cedimento dell'isolamento principale possa creare tensioni pericolose sull'involucro. L'insieme dell'isolamento principale e supplementare è denominato **doppio isolamento** oppure, se l'isolamento è unico ma equivalente al doppio isolamento, **isolamento rinforzato**.

7.9.2.1 Caratteristiche degli apparecchi di classe II

A seconda del tipo e dell'ambiente di utilizzo le Norme prescrivono le prove da eseguire e i requisiti che gli apparecchi di classe II devono possedere. Le prove tendono a stabilire le qualità elettriche e meccaniche dell'isolamento. Le caratteristiche costruttive devono garantire che la manutenzione a cura dell'utente non indebolisca l'isolamento (ad esempio che nel rimontare l'apparecchio non sia possibile dimenticare un elemento importante per garantire l'isolamento). L'involucro dell'apparecchio può essere costruito indifferentemente sia di materiale isolante sia metallico ed in questo secondo caso è vietato dalle Norme il collegamento a terra (in alcuni casi, come vedremo, può essere richiesto un morsetto di equipotenzialità). Il collegamento a terra, che a prima vista potrebbe sembrare una sicurezza in più, può infatti risultare controproducente, in quanto il conduttore di protezione rischia di portare sull'involucro dell'apparecchio tensioni pericolose che si possono stabilire sull'impianto di terra inefficiente. Che questo possa accadere è assai più probabile che non il cedimento del doppio isolamento o dell'isolamento rinforzato da cui la prescrizione normativa di non collegare a terra la carcassa metallica dell'apparecchio.



- a) Simbolo grafico di un componente o apparecchio dotato di isolamento doppio o rinforzato Classe II.
b) divieto di collegamento delle parti metalliche ad un conduttore di protezione.

In alcuni casi, come ad esempio per gli interruttori elettronici a contatto con le persone, in sostituzione del doppio isolamento può essere interposta un'impedenza di protezione che deve però garantire una protezione equivalente al doppio isolamento. Apparecchi di uso comune per i quali è richiesto l'isolamento doppio o rinforzato sono, ad esempio, quelli portatili; essendo normalmente sostenuti durante l'uso, devono essere di classe II in quanto si ritiene che siano più sicuri dei corrispondenti apparecchi di classe I.

Negli apparecchi portatili il rischio è elevato in quanto l'operatore, a causa dell'elevata pressione del contatto con l'apparecchio, possiede una resistenza del corpo ridotta; inoltre i guasti d'isolamento sono più frequenti a causa delle numerose sollecitazioni a cui l'apparecchio portatile è soggetto durante l'uso.

7.9.2.2 *Condutture di Classe II*

Le condutture possono essere considerate di classe II (con tensioni nominali non superiori a 690 V) se utilizzano:

- cavi con guaina isolante di tensione superiore di un gradino rispetto a quella del sistema elettrico (isolamento rinforzato);
- cavi unipolari senza guaina installati in tubo protettivo o in canale isolante rispondente alle Norme di prodotto;
- cavi con guaina metallica aventi isolamento idoneo alla tensione nominale del sistema elettrico tra la parte attiva e la guaina metallica e tra questa e l'esterno.

Gli apparecchi di classe seconda non devono essere collegati a terra (il collegamento a terra delle masse potrebbe essere utile nel caso di un guasto tra gli avvolgimenti del trasformatore, ma potrebbe introdurre tensioni pericolose dovute a guasti su altri apparecchi alimentati dalla rete di distribuzione) ma, nel caso dei canali metallici contenenti cavi di classe seconda, tale collegamento è accettato dalle Norme in quanto nel canale potrebbero essere posati, anche in tempi successivi, cavi non di classe seconda. Sintetizzando: se il canale contiene cavi di classe seconda e cavi normali deve essere collegato a terra, se contiene solo cavi di classe seconda può essere collegato a terra, se contiene solo cavi normali deve essere collegato a terra. In definitiva, per garantire all'impianto nel suo complesso un isolamento di classe II, è necessario rispettare le seguenti condizioni:

- gli involucri isolanti devono presentare una struttura atta a sopportare le sollecitazioni meccaniche, elettriche, e termiche che possono verificarsi in caso di guasto;
- nella fase di installazione si deve evitare di danneggiare gli isolamenti;
- gli involucri non devono essere dotati di viti di qualsiasi tipo (neppure isolanti per evitare che possano essere sostituite da altre di tipo metallico che potrebbero comprometterne l'isolamento);
- i contenitori con portello devono poter essere aperti solo con attrezzo o chiave. Se i coperchi fossero rimovibili senza chiave o attrezzo le parti conduttrici accessibili devono essere protette da una barriera, rimovibile solo con l'uso di attrezzi, avente grado di protezione non inferiore a IPXXB;
- le parti intermedie dei componenti elettrici devono avere grado di protezione non inferiore a IPXXB;
- non devono essere impiegate vernici o lacche per ottenere un isolamento supplementare;
- l'involucro non deve essere attraversato da parti conduttrici che potrebbero propagare potenziali pericolosi;
- l'involucro non deve impedire il regolare funzionamento dell'apparecchio elettrico;
- le parti conduttrici contenute all'interno dell'involucro non devono essere collegate ad un conduttore di protezione. È possibile far attraversare l'involucro da conduttori di protezione di altri componenti elettrici il cui circuito di alimentazione passi anch'esso attraverso l'involucro. All'interno dell'involucro tali conduttori e i loro morsetti devono essere isolati come se fossero parti attive e i morsetti devono essere contrassegnati in modo adeguato;
- le parti conduttrici e le parti intermedie non devono essere collegate ad un conduttore di protezione a meno che ciò non sia espressamente previsto nelle prescrizioni di costruzione del relativo componente elettrico.

7.9.3 Protezione per separazione elettrica

In un sistema isolato completamente da terra chi venisse in contatto con una parte in tensione non correrebbe alcun rischio in quanto, se l'impianto è tanto poco esteso da poter trascurare le correnti capacitive, è impossibile la chiusura del circuito verso terra per cui la tensione sulla persona è limitata dall'elevata impedenza verso terra del sistema elettrico. Questo tipo di protezione si può ottenere mediante un trasformatore di isolamento ed il circuito deve rispondere ai seguenti requisiti:

- alimentazione da trasformatore di isolamento rispondente alle Norme CEI 96-2 oppure con apparecchiature aventi analoghe caratteristiche come ad esempio un gruppo motore generatore. La separazione è invece implicita se l'alimentazione proviene da sorgenti autonome (gruppo elettrogeno, batterie o altro dispositivo) non collegate alla rete;
- la tensione del circuito separato non deve superare i 500 V. Il circuito separato deve essere di estensione ridotta e comunque non superiore a quella determinabile con la seguente relazione:

$$L \leq \frac{100000}{U_n}$$

e comunque non superiore a 500 m dove L è la lunghezza della linea in metri a valle del trasformatore e U_n la tensione di alimentazione nominale in volt del circuito separato;

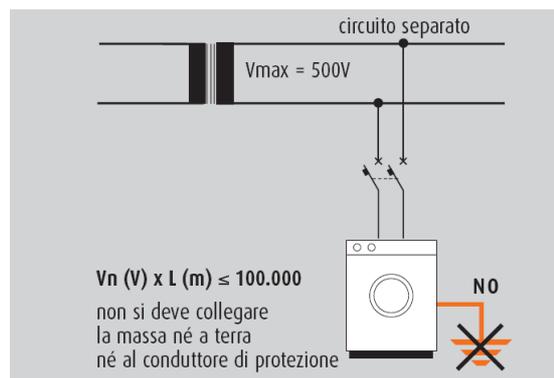
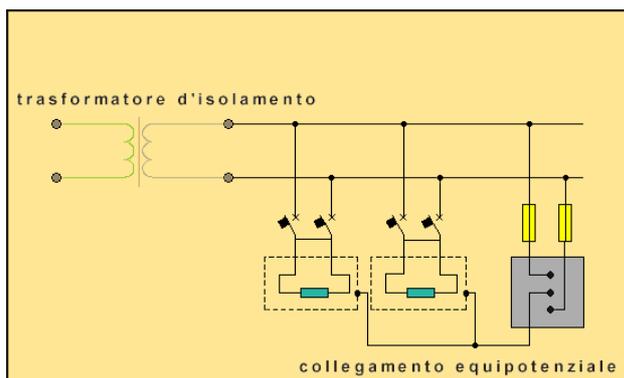
- la separazione verso altri circuiti elettrici deve essere almeno equivalente a quella richiesta tra gli avvolgimenti del trasformatore di isolamento. Tale separazione elettrica deve essere garantita tra le parti attive di quei componenti elettrici che possono contenere nel loro interno conduttori di circuiti diversi (ad esempio relè, contattori ecc.);
- per il circuito separato è raccomandabile utilizzare condutture separate da quelle di altri circuiti. Ove questo non fosse possibile si devono impiegare cavi multipolari senza guaina metallica isolati per la tensione nominale del sistema a tensione più elevata;
- ad evitare rischi di guasti verso terra, deve essere posta particolare cura all'isolamento verso terra con particolare riguardo verso i cavi flessibili;
- assicurare l'ispezionabilità dei cavi flessibili non a posa fissa ad evitare che possano subire danneggiamenti.

Non essendo pratico alimentare ogni singolo apparecchio con un trasformatore d'isolamento diverso (condizione ideale) si preferisce alimentare più apparecchi (senza superare la lunghezza massima della linea prescritta dalla Norma) con un unico trasformatore (ad esempio il banco di lavoro di un laboratorio scolastico). Un primo guasto d'isolamento potrebbe permanere per un tempo indefinito senza rischi per le persone, mentre un secondo guasto su un'altra fase di un secondo apparecchio determinerebbe un pericolo mortale per la persona in contatto con i due apparecchi. Per ovviare a questo problema, quando il circuito separato alimenta più di un utilizzatore (nel caso alimentasse un solo utilizzatore la sua massa non deve essere collegata al conduttore di protezione), ogni massa va collegata ad un conduttore equipotenziale isolato da terra, in modo che un doppio guasto a massa venga tramutato in un corto circuito e possa così essere eliminato dai dispositivi di massima corrente, posti a protezione delle singole linee, entro i tempi di seguito indicati:

U_0 (V)	t (s)
120	0,8
30	0,4
400	0,2
<400	0,1

Per quanto concerne i collegamenti equipotenziali le prescrizioni da seguire sono le seguenti:

- il collegamento non deve interessare l'involucro metallico della sorgente di alimentazione;
- tutte le prese del circuito separato devono avere l'alveolo di terra collegato al conduttore equipotenziale;
- il conduttore equipotenziale deve essere dotato di guaina isolante, in modo che non possa andare in contatto con conduttori di protezione, di terra o masse di altri circuiti;
- tutti i cavi di alimentazione delle utenze, tranne quelli di classe II, devono avere il conduttore di protezione incorporato che sarà utilizzato in questo caso come conduttore equipotenziale;
- ogni collegamento deve essere effettuato con sezioni non inferiori a 2,5 mm² se con protezione meccanica, 4 mm² se non è prevista alcuna protezione meccanica (il conduttore equipotenziale incorporato nel cavo di alimentazione dell'utilizzatore può avere sezione inferiore a quelle indicate ma non a quella del conduttore di fase);
- il collettore equipotenziale principale non deve avere sezione inferiore a 6 mm².



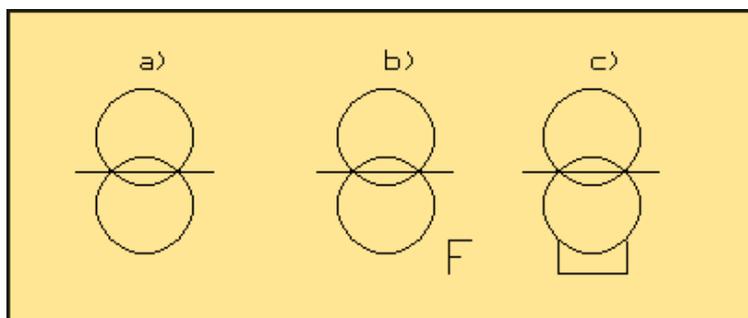
I collegamenti equipotenziali tra le masse degli apparecchi alimentati dallo stesso trasformatore d'isolamento trasformano un doppio guasto a massa in un cortocircuito.

7.10.3.1 Il trasformatore d'isolamento

Nel trasformatore d'isolamento la separazione elettrica fra gli avvolgimenti primari e quelli secondari è realizzata mediante un doppio isolamento o un isolamento rinforzato. L'involucro può essere anche metallico, ma in questo caso deve essere separato dagli avvolgimenti da un isolamento doppio o rinforzato. La potenza non deve essere superiore a 25 kVA per i monofasi e 40 kVA per i trifasi. Possono essere di due tipi:

- resistente al cortocircuito, quando, in caso di sovraccarichi o cortocircuiti, la sovratemperatura che in esso si manifesta non supera determinati limiti stabiliti e, dopo l'eliminazione del guasto le sue caratteristiche rientrano ancora in quelle stabilite dalle Norme;
- a prova di guasto, quando, in seguito ad un guasto o ad un impiego anormale, non è più in grado di funzionare, ma non presenta alcun pericolo per l'utilizzatore e per le parti adiacenti.

In base al tipo di installazione si possono ancora suddividere in trasformatori per installazione fissa o per installazione mobile. Fino a 630 VA, se mobili, devono essere resistenti ai corto circuiti oppure a prova di guasto. Se è necessario un collegamento a spina nei trasformatori mobili può esserne presente una sola per ogni avvolgimento secondario e gli avvolgimenti devono ovviamente essere elettricamente isolati gli uni dagli altri.



Trasformatore d'isolamento
a) simbolo generale
b) resistente al corto circuito
c) a prova di guasto

7.9.4 Protezione per mezzo di luoghi non conduttori

In un ambiente isolato un contatto con una parete in tensione non è pericoloso in quando non fluisce nessuna corrente attraverso il corpo umano isolato da terra. Un ambiente si dice isolato quando le pareti e il pavimento presentano in ogni punto una resistenza verso terra:

- $\geq 50k\Omega$ per tensioni nominali fino a 500V
- $\geq 100k\Omega$ per tensioni nominali maggiori di 500V

La sicurezza dai contatti indiretti deriva dall'isolamento principale dell'impianto e delle apparecchiature elettriche e dall'isolamento supplementare fornito dal locale. Il collegamento a terra dovrà quindi essere evitato in quanto un contatto con una parte attiva e la massa collegata a terra risulterebbe pericoloso. Per la sua particolarità questo sistema non è ammesso negli edifici civili e viene applicato solo in casi particolari. Per garantire la sicurezza occorre:

- che le masse siano lontane fra loro e le masse estranee almeno 2 m in orizzontale e 2,5 m in verticale se a portata di mano, e 1,25 m se fuori dalla portata di mano in modo che non sia possibile toccare contemporaneamente due masse o una massa e una massa estranea. Si possono erigere ostacoli in materiale isolante per impedire il contatto tra due masse o tra una massa e una massa estranea e le distanze minime necessarie per sormontarli devono corrispondere a quelle prima indicate;
- che il locale sia sorvegliato da personale addestrato affinché non vengano introdotti nel locale apparecchi collegati a terra o masse estranee e che le persone, durante l'accesso nel locale, non siano sottoposte a potenziali pericolosi;
- che non siano utilizzate prese a spina;
- che le masse estranee uscenti dal locale siano interrotte con manicotti isolanti;
- che non siano introdotti nel locale conduttori di protezione.

Gli apparecchi che devono essere usati in questi locali isolanti sono apparecchi con il solo isolamento principale e senza morsetto di terra denominati di Classe 0 (il costruttore dovrebbe indicare sul libretto istruzioni che questi apparecchi devono essere usati solo in locali isolati).

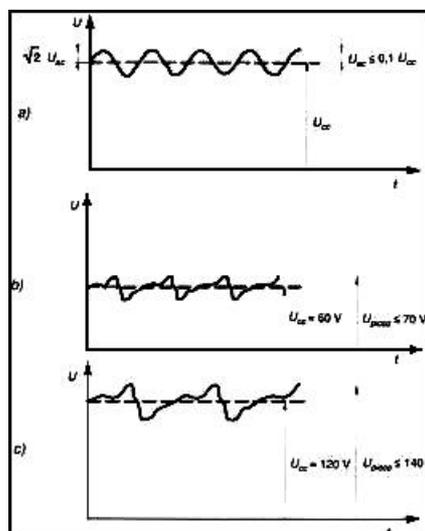
Le prese a spina di tali apparecchi devono essere diverse dalle prese a spina degli apparecchi di classe diversa, ma questo a causa della disponibilità sul mercato di adattatori, purtroppo, non ne impedisce l'uso improprio anche in altre situazioni diverse da quelle dei locali isolanti. Potrebbero comunque essere impiegati anche apparecchi di Classe I, ovviamente senza collegare a terra il morsetto di terra.

7.9.5 Protezione per equipotenzializzazione del locale non connesso a terra

Come nel caso precedente anche questo sistema di protezione può essere adottato solo in casi particolari. Consiste nel collegare fra loro tutte le masse e le masse estranee simultaneamente accessibili con un collegamento equipotenziale non connesso a terra. Per le persone che entrano nel locale devono essere prese particolari precauzioni affinché non siano sottoposte a potenziali pericolosi, soprattutto quando il pavimento, conduttore ed isolato da terra, sia dotato di collegamento locale non connesso a terra. Si devono usare apparecchi di Classe I con morsetto di terra e in questo caso, a differenza di quanto indicato per i locali isolanti, essendo garantita l'equipotenzialità non è necessario accertarsi che i due apparecchi non siano simultaneamente accessibili.

7.9.6 Protezione mediante bassissima tensione di sicurezza

Con i sistemi a bassissima tensione, denominati anche di categoria zero (sistemi che hanno una tensione nominale inferiore a 50V in corrente alternata e a 120V in corrente continua non ondulata figura), è garantita una protezione sia contro i contatti diretti che indiretti. Esistono fondamentalmente due tipi di sistemi a bassissima tensione che garantiscono dal pericolo dei contatti, il tipo SELV e il tipo PELV. Un terzo tipo, il FELV, ha caratteristiche prettamente funzionali che non garantiscono da eventuali sopraelevazioni accidentali della tensione e quindi non garantisce la protezione dai contatti indiretti e diretti. Le caratteristiche dettagliate dei tre sistemi sono di seguito indicate.

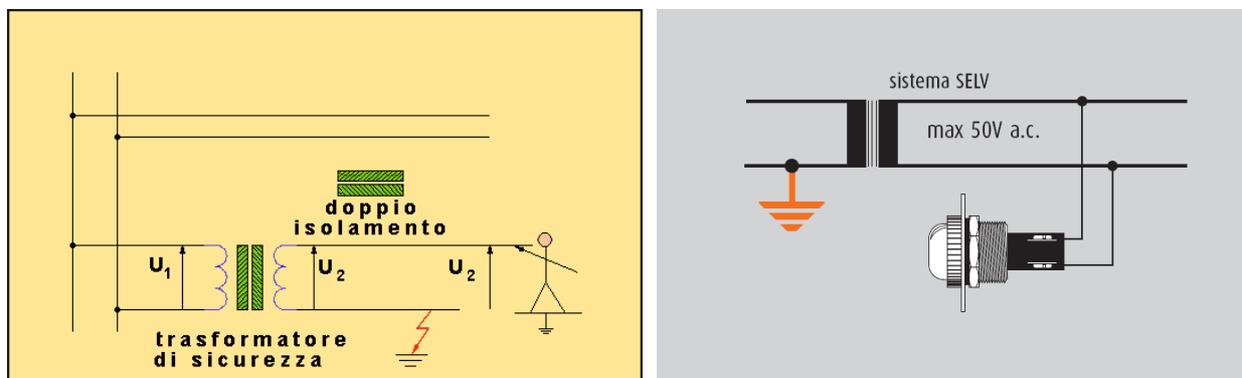


Una corrente continua si dice non ondulata se:

- a) per ondulazione sinusoidale $U_{ac} \leq 0,1 U_{cc}$;
- b) per ondulazione non sinusoidale ($U_{cc} = 60 \text{ V}$) $U_{picco} \leq 70 \text{ V}$;
- c) per ondulazione non sinusoidale ($U_{cc} = 120 \text{ V}$) $U_{picco} \leq 140 \text{ V}$

7.9.6.1 Bassissima tensione di sicurezza SELV (Safety Extra Low Voltage)

È un sistema che deve essere alimentato da una sorgente autonoma di sicurezza, deve garantire la separazione galvanica rispetto agli altri sistemi elettrici e non deve avere punti a terra. Se sono rispettati questi requisiti il sistema non dovrebbe assumere tensioni superiori a quelle nominali.



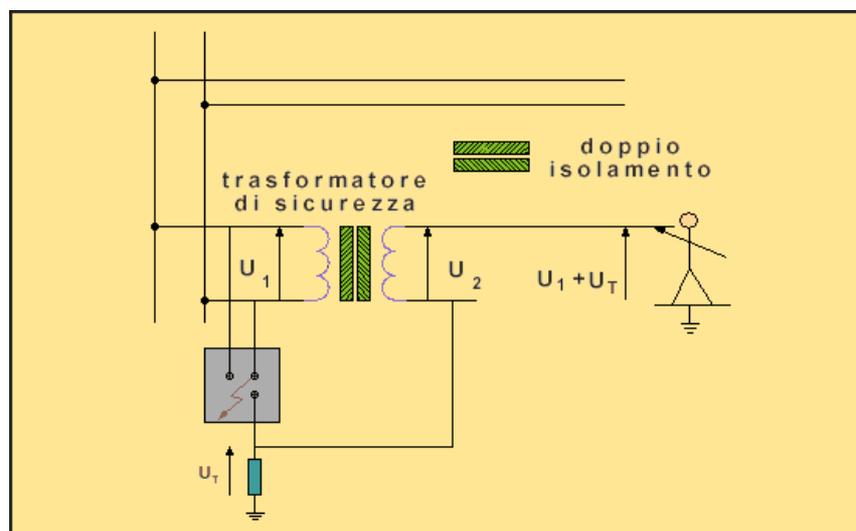
Circuito SELV. Nel caso di guasto a terra di un polo del circuito secondario del trasformatore, tra la persona e la terra si stabilisce la tensione U_2

Le caratteristiche principali che questo sistema deve possedere sono:

- **Alimentazione** - un trasformatore di sicurezza conforme alle Norme CEI 14-6, un motore generatore con gli avvolgimenti isolati come indicato dalle Norme CEI 16-6, una batteria, un gruppo di continuità statico ad inverter ecc. Da queste apparecchiature viene garantita la separazione tra i sistemi per mezzo di un doppio isolamento oppure, nei trasformatori ad installazione fissa tramite uno schermo metallico connesso a terra. Questo tipo di collegamento non è ammesso nei trasformatori trasportabili in quanto si ritiene non possa essere garantito un efficiente collegamento a terra;
- **Parti attive** - non è ammesso collegare a terra o a conduttori di protezione o a parti attive di altri circuiti le parti attive dei circuiti SELV e delle apparecchiature alimentate;
- **Masse** - è vietato collegare le masse a terra o a conduttori di protezione o a masse di altri circuiti elettrici. È altresì vietato il collegamento a masse estranee a meno che la natura dei componenti lo richieda e purché tali masse estranee non possano assumere valori di tensione pericolosi. In alcuni casi il collegamento a terra è ammesso come ad esempio quando all'impianto di terra non sia connesso nessun altro sistema elettrico oppure quando si devono interrare conduttori nudi direttamente nel terreno (ad esempio riscaldamento delle serre) e quindi non si può parlare di un vero e proprio collegamento a terra;
- **Prese a spina** - non deve essere presente il morsetto per il collegamento del conduttore di protezione e deve essere impedito l'accoppiamento con prese e spine di altri sistemi compresi quelli PELV e FELV;
- **Protezione contro i contatti diretti** - se la tensione nominale del circuito non è superiore a 25V in c.a. e a 60V in c.c. non è necessaria alcuna protezione (a meno che il circuito non si trovi in ambienti critici come locali da bagno, piscine, luoghi conduttori ristretti ecc..). Se la tensione supera tali valori le parti attive, comprese quelle degli utilizzatori, devono essere protette contro il contatto diretto mediante involucri e barriere aventi un grado di protezione non inferiore a IPXXB oppure con un isolamento in grado di sopportare per un minuto una tensione di 500V in c.a.;
- **Separazione di protezione rispetto agli altri sistemi** - si ottiene con un isolamento doppio o rinforzato oppure con uno schermo metallico collegato a terra. Qualora la bassissima tensione di sicurezza coesista con altri sistemi elettrici, nell'impianto o nello stesso apparecchio utilizzatore (relè, condutture, contattori ecc..), occorre garantire una separazione di protezione su ogni punto del circuito a bassissima tensione di sicurezza, rispetto agli altri circuiti, almeno pari a quello previsto fra il primario e il secondario di un trasformatore di sicurezza. Questo si può ottenere: separando materialmente i conduttori di sistemi diversi; con i conduttori del circuito SELV muniti, oltre che del normale isolamento, anche di guaina non metallica; con i circuiti a tensione diversa divisi da uno schermo o da una guaina metallica connessa a terra; con i circuiti a tensione diversa contenuti in uno stesso cavo multipolare o in un unico raggruppamento di cavi, a condizione che i conduttori dei circuiti SELV siano isolati, nell'insieme o individualmente, per la massima tensione presente.

7.9.6.2 Bassissima tensione di protezione PELV (Protective Extra Low Voltage)

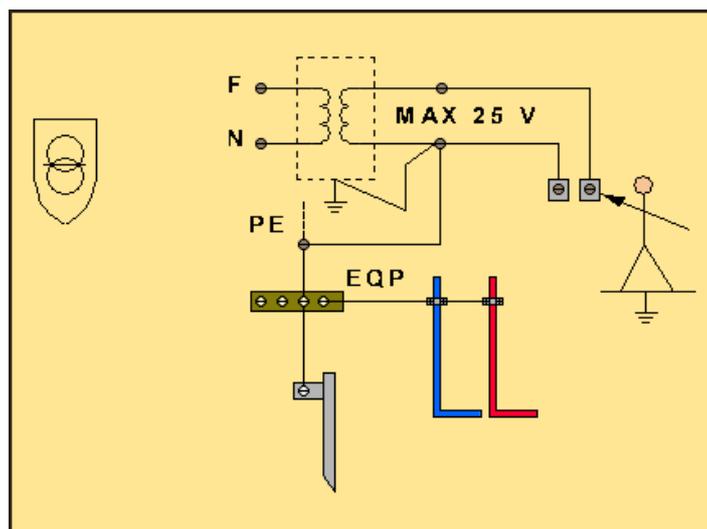
È un sistema a bassissima tensione alimentato da una sorgente di sicurezza e con una separazione di protezione rispetto agli altri sistemi elettrici, ma con un punto collegato a terra.



Circuito PELV. Nel caso di guasto in un punto qualsiasi del sistema elettrico che alimenta il trasformatore di sicurezza, la persona è soggetta al massimo alla tensione U_2+U_T .

Le principali caratteristiche e prescrizioni di questo sistema sono:

- **Alimentazione** - un trasformatore di sicurezza conforme alle Norme CEI 96-2, un motore generatore con gli avvolgimenti isolati come indicato dalle Norme CEI 16-6, una batteria, un gruppo di continuità statico ad inverter, un dispositivo elettronico, rispondente a Norme appropriate, tale che la tensione ai morsetti non superi i limiti della bassissima tensione (neanche in caso di guasto interno) ecc.. Dispositivi che forniscono tensioni superiori ai morsetti d'uscita sono ammessi purché la tensione misurata con un voltmetro con resistenza interna di 3000Ω (ad esempio apparecchio per la misura dell'isolamento) si riduca nel tempo previsto dalla tabella 8.1. Da queste apparecchiature viene garantita la separazione tra i sistemi per mezzo di un doppio isolamento oppure, nei trasformatori ad installazione fissa tramite uno schermo metallico connesso a terra. Questo tipo di collegamento non è ammesso nei trasformatori trasportabili in quanto si ritiene non possa essere garantito un efficiente collegamento a terra (stesse caratteristiche del sistema SELV);
- **Parti attive** - è ammesso collegare a terra le parti attive del circuito;
- **Masse** - è ammesso collegare le masse a terra;
- **Prese a spina** - possono avere un contatto per il collegamento del conduttore di protezione. Non devono consentire l'accoppiamento con prese e spine di altri sistemi neppure SELV e FELV;
- **Protezione contro i contatti diretti** - se la tensione nominale del circuito non è superiore a 25V in c.a. e a 60V in c.c. non è necessaria, per contatti con parti nude di piccole dimensioni, alcuna protezione ma solo se il componente è ubicato nell'interno di un edificio dove sia stato realizzato il collegamento equipotenziale principale e a condizione che i componenti elettrici non si trovino in ambienti critici come locali da bagno, piscine, luoghi conduttori ristretti ecc. Se invece l'ambiente è critico non sono necessarie protezioni se la tensione non è superiore a 6 V in c.a. o minore a 15 V in c.c. non ondulata. Se la tensione supera tali valori le parti attive, comprese quelle degli utilizzatori, devono essere protette contro il contatto diretto mediante involucri e barriere aventi un grado di protezione non inferiore a IPXXB oppure con un isolamento in grado di sopportare per un minuto una tensione di 500V in c.a.;



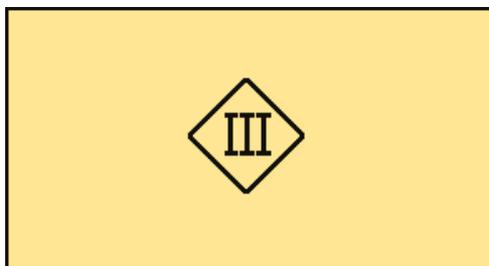
La protezione è assicurata per contatti diretti su piccole superfici solo in ambienti asciutti nell'interno di un edificio con collegamento equipotenziale principale.

- **Separazione di protezione rispetto agli altri sistemi** - si ottiene con un isolamento doppio o rinforzato oppure con uno schermo metallico collegato a terra. Qualora la bassissima tensione di sicurezza coesista con altri sistemi elettrici, nell'impianto o nello stesso apparecchio utilizzatore (relè, condutture, contattori ecc..), occorre garantire una separazione di protezione su ogni punto del circuito a bassissima tensione di sicurezza, rispetto agli altri circuiti, almeno pari a quello previsto fra il primario e il secondario di un trasformatore di sicurezza. Questo si può ottenere: separando materialmente i conduttori di sistemi diversi; con i conduttori del circuito SELV muniti, oltre che del normale isolamento, anche di guaina non metallica; con i circuiti a tensione diversa divisi da uno schermo o da una guaina metallica connessa a terra; con i circuiti a tensione diversa contenuti in uno stesso cavo multipolare o in un unico raggruppamento di cavi, a condizione che i conduttori dei circuiti SELV siano isolati, nell'insieme o individualmente, per la massima tensione presente.

Questo sistema è impiegato in quei circuiti in cui, per motivi funzionali, è necessario avere un punto collegato a terra (si vuole evitare che uno o più guasti a terra provochino un funzionamento intempestivo in un circuito di comando). Essendo un punto del circuito collegato a terra il circuito PELV non risulta sicuro come il circuito SELV perché, tramite la messa a terra, il circuito può essere interessato da una tensione più elevata di quella nominale secondaria. La figura 8.6 mostra come una persona che venisse a contatto con un punto del circuito PELV sia sottoposta in condizioni normali ad una tensione U_2 mentre, nel caso di un guasto sul sistema di alimentazione del trasformatore di sicurezza, ad una tensione U_2+U_T (U_T è la tensione totale di terra dovuta al guasto del sistema di alimentazione del trasformatore) mentre ciò non può accadere con il sistema SELV dove, come abbiamo visto la persona in contatto con un polo della SELV è soggetta al massimo alla tensione U_2 quando l'altro polo del circuito fosse accidentalmente a terra. Per questi motivi la PELV non può essere impiegata quando siano necessarie misure di protezioni più restrittive (ad esempio nei 'luoghi conduttori ristretti').

7.9.6.3 Apparecchi di classe III

Gli apparecchi destinati ad essere impiegati nei sistemi SELV e PELV presentano caratteristiche costruttive meno restrittive degli altri apparecchi in quanto la sicurezza è fornita dal sistema di alimentazione. Questi apparecchi non devono generare al loro interno tensioni superiori al limite imposto dalla bassa tensione di sicurezza a meno che l'energia in gioco non sia trascurabile. Sono dotati di isolamento principale ridotto e non sono provvisti di morsetto di terra.



Simbolo grafico di un apparecchio di classe III.

7.9.6.4 Bassissima tensione funzionale - FELV (Functional Extra Low Voltage)

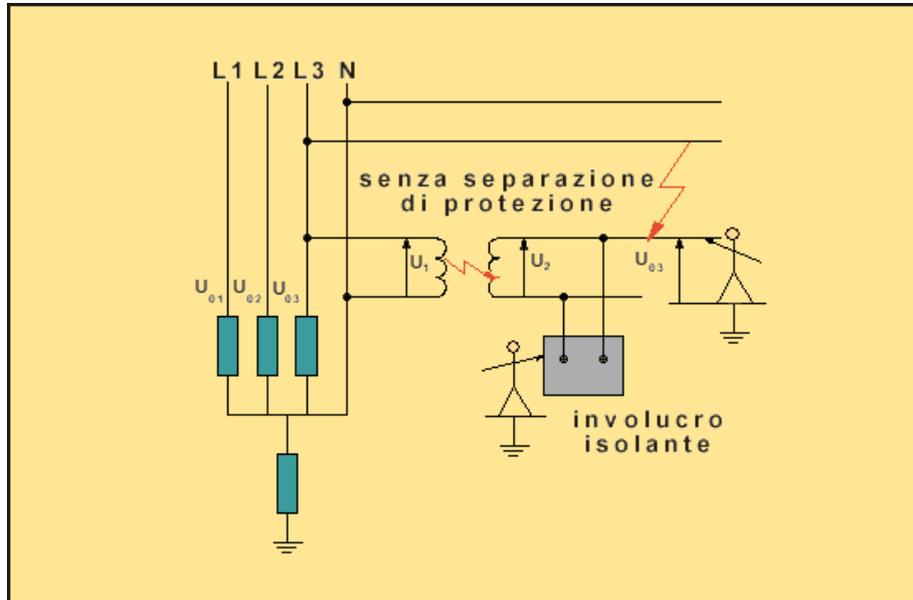
È un sistema a tensione ridotta che si differenzia dal SELV e dal PELV per il fatto di non essere alimentato da una sorgente autonoma o di sicurezza e perché non è garantito l'isolamento del circuito secondario verso i sistemi elettrici a tensione maggiore. Si può quindi temere un passaggio della tensione primaria sul secondario e il circuito secondario deve essere protetto sia dai contatti diretti che indiretti.

Le caratteristiche e le prescrizioni principali di questo sistema possono essere così sintetizzate:

- **Alimentazione** - un trasformatore ordinario, un autotrasformatore, un alimentatore elettronico senza adeguato isolamento tra ingresso e uscita;
- **Parti attive e masse** - è necessario collegare le masse al conduttore di protezione del circuito primario, a condizione che quest'ultimo sia protetto contro i contatti indiretti mediante interruzione automatica dell'alimentazione (con differenziale coordinato con la resistenza dell'impianto di terra nei sistemi TT, oppure con differenziale o interruttore automatico coordinato con l'impedenza dell'anello di guasto nei sistemi TN o anche con uno degli altri sistemi di protezione previsti dalle Norme CEI 64-8). In caso contrario si deve collegare una parte attiva del circuito FELV al conduttore di protezione del circuito primario purché quest'ultimo sia protetto mediante interruzione automatica;
- **Prese a spina** - Devono essere dotate di morsetto per il collegamento al conduttore di protezione e non devono essere compatibili con altri sistemi anche se di bassa o bassissima tensione;
- **Protezione contro i contatti diretti** - le parti attive, compresi gli utilizzatori, devono essere protette dal contatto diretto mediante involucri o barriere che non permettano l'accesso al dito di prova con un diametro di 12 mm, oppure con un isolamento corrispondente alla tensione minima di prova richiesta dal circuito primario non inferiore a 1500 V applicati per un minuto;
- **Separazione di protezione rispetto agli altri sistemi** - non si richiedono misure particolari per garantire la separazione dei circuiti FELV se non un isolamento dimensionato in base alla tensione nominale del circuito primario.

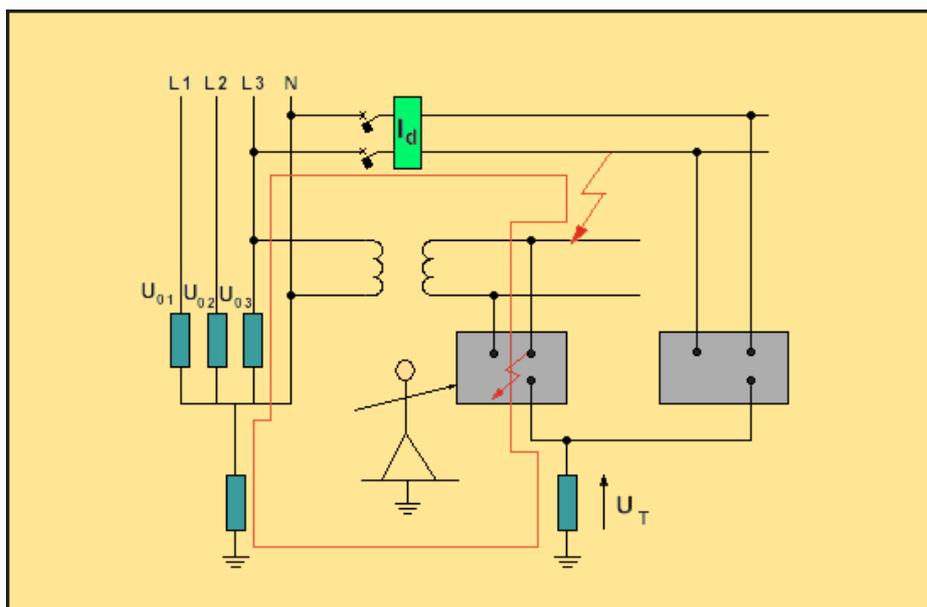
Da quanto sopra si può affermare che in un circuito FELV:

- la protezione contro i contatti diretti è sempre richiesta anche se la tensione al secondario è molto ridotta poiché non si può escludere un guasto tra gli avvolgimenti del trasformatore. Per garantire la protezione dai contatti diretti il circuito secondario deve avere un isolamento verso terra adatto alla tensione del primario (purtroppo molto spesso gli apparecchi a tensione ridotta hanno un isolamento verso terra per la propria tensione nominale);



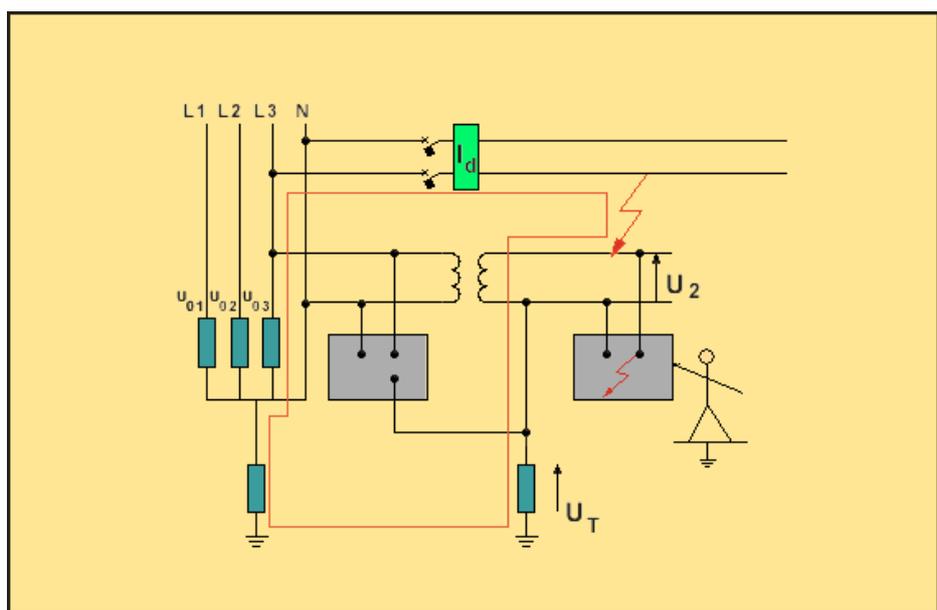
Circuito FELV - In caso di guasto nel trasformatore (non di sicurezza) o tra i circuiti senza separazione elettrica, la persona che toccasse un polo del circuito secondario è sottoposta ad una tensione U_0 verso terra. L'involucro degli utilizzatori dovrebbe essere isolato verso terra rispetto alla tensione U_0 anche se è alimentato ad una tensione U_2 .

- un guasto proveniente da un circuito di un altro sistema, provoca normalmente un guasto anche sull'apparecchio alimentato a tensione ridotta, essendo l'isolamento dell'apparecchio a tensione ridotta non adatto a resistere alla tensione del circuito primario. Se la massa dell'apparecchio è collegata alla terra dello stesso impianto delle masse del primario (fig. 8.10) i due guasti sono visti dal circuito primario come un guasto a terra (la tensione sulle masse vale U_T) e interviene il sistema di protezione contro i contatti indiretti del circuito primario. La vecchia norma 64/8 con masse isolate da terra permetteva di mettere a terra un polo del trasformatore (figura). La situazione in questo caso è sempre vista dal primario come un guasto a terra ma la tensione sulla massa non vale più U_T bensì U_T+U_2 . È un metodo più pratico ma la sicurezza in questo secondo caso è minore rispetto al primo metodo in quanto generalmente gli apparecchi a bassissima tensione non sono dotati di morsetto di terra rendendo difficoltoso il collegamento al conduttore di protezione. Ora per uniformarsi alle direttive Europee occorre sempre collegare a terra le masse dei sistemi FELV. Se il circuito FELV è derivato da un circuito primario protetto mediante separazione elettrica (trasformatore d'isolamento) si devono collegare le masse del circuito FELV al conduttore equipotenziale isolato da terra in accordo con quanto prescritto per i circuiti protetti per separazione elettrica.



Circuito FELV isolato da terra con le masse collegate a terra.

In caso di guasto verso terra sul circuito primario e di un conseguente guasto sull'utilizzatore, interviene il sistema di protezione contro i contatti indiretti del circuito primario. Una persona che venisse a contatto con l'utilizzatore è sottoposta alla tensione U_T .



Polo del circuito FELV a terra e masse isolate da terra (non più ammesso dalla norma).

Un guasto sul circuito primario fa intervenire il sistema di protezione contro i contatti indiretti del primario. La persona è sottoposta alla tensione $U_T + U_2$.

7.10 Considerazioni sulle misure di protezione dai contatti diretti e indiretti

7.10.1 Confronto tra le misure di protezione dai contatti diretti e indiretti

Si è già esaurientemente trattato il problema delle protezioni da contatti indiretti ma, a conclusione dell'argomento si ritiene utile fare una piccola sintesi e un confronto tra i vari sistemi di protezione. La sicurezza di un sistema di protezione, infatti, dipende in larga misura dalle condizioni ambientali e d'uso e, a seconda del caso, va individuato il sistema di protezione più conveniente:

- **Locali isolanti (apparecchi di classe 0)** - la protezione viene applicata per mezzo dell'isolamento principale e dell'isolamento verso terra del locale. È affidabile solo in casi particolari in quanto l'isolamento dell'ambiente dipende da diverse variabili non sempre facilmente controllabili.
- **Interruzione automatica dell'alimentazione (apparecchi di classe I)** - la protezione viene attuata per mezzo dell'isolamento principale e dell'interruzione automatica del circuito, entro tempi prefissati, prima che la tensione raggiunga valori pericolosi. La curva di sicurezza è stabilita sulla base di dati rilevati statisticamente e anche se rispettata comporta sempre un certo rischio. L'affidabilità del sistema dipende dai dispositivi di interruzione del circuito, dal conduttore di protezione e dalla variazione che potrebbe subire la resistenza di terra nei sistemi TT e l'impedenza dell'anello di guasto nei sistemi TN.
- **Impiego di apparecchi di classe II** - l'isolamento principale e supplementare oppure rinforzato forniscono la protezione necessaria. Se l'isolamento principale viene a mancare la tensione di contatto è limitata dall'isolamento supplementare. In definitiva si può dire che la sicurezza è determinata dall'apparecchio stesso, che ha superato prove e collaudi in fabbrica, ed è influenzata dalle modalità d'uso e dalla manutenzione.
- **Bassissima tensione di sicurezza** - la protezione è ottenuta utilizzando sistemi a tensione non pericolosa e assicurandosi che tensioni pericolose non possano essere trasferite dal circuito di alimentazione primario o dalla terra verso il circuito secondario. L'alimentazione può essere ottenuta tramite sorgente autonoma o trasformatore di sicurezza. Se la sorgente è autonoma e se non esistono circuiti elettrici di altri sistemi verso i quali potrebbero prodursi guasti d'isolamento il sistema può essere definito 'intrinsecamente sicuro'. Viceversa se il sistema è alimentato tramite trasformatore di sicurezza o sorgente equivalente, occorre proteggersi dai pericoli derivanti dal circuito primario, dai circuiti a tensione non di sicurezza e dalla terra. Il circuito secondario può essere costituito da conduttori nudi, con isolamento principale, con isolamento doppio o rinforzato. Nel primo caso la protezione è affidata al doppio isolamento che separa il circuito primario dal circuito secondario mentre negli altri due casi si aggiunge la protezione offerta anche dall'isolamento principale o dall'isolamento doppio o rinforzato (ad esempio lampade portatili di classe II. Gli apparecchi di classe II alimentati a bassissima tensione di sicurezza non sono molto diffusi). Sono sistemi che si adattano bene, per parti limitate di impianto, negli ambienti più critici come ad es.: luoghi bagnati, luoghi conduttori ristretti (cunicoli metallici), bagni, piscine, nella realizzazione di giocattoli
- **Separazione elettrica** - la protezione consiste nel separare il circuito degli utilizzatori dagli altri circuiti e dalla terra con l'intento di limitare la tensione di contatto quando cede l'isolamento principale. Le sorgenti di alimentazione possono essere: una sorgente autonoma che alimenta più apparecchi, comprese le linee di alimentazione, con isolamento principale. Se si separano i circuiti secondari rispetto ad altri sistemi elettrici il pericolo può derivare solamente da un guasto verso terra del circuito secondario ed è tanto più probabile quanto è esteso il circuito. Quando la sorgente di alimentazione è ottenuta tramite un trasformatore d'isolamento le cause di pericolo possono derivare da un guasto d'isolamento verso terra, verso il primario o verso i circuiti di altri sistemi elettrici.

La sicurezza migliora se il trasformatore d'isolamento alimenta un solo apparecchio che può avere il solo isolamento principale (classe I), e garantire così una sicurezza equivalente a quella di un apparecchio con isolamento doppio o rinforzato, oppure può avere l'isolamento doppio o rinforzato (classe II) garantendo un grado di sicurezza maggiore rispetto al caso precedente. La protezione per interruzione automatica del circuito ha un utilizzo di carattere generale mentre le altre soluzioni vengono impiegate solo in casi particolari. La tabella raccoglie le misure di protezione fin qui descritte secondo una classifica di massima stilata in base alla sicurezza.

<i>Misura di protezione</i>		<i>Numero di guasti possibili</i>	<i>Classificazione in base alla sicurezza</i>
1	<i>Locali isolanti</i>	2	9
2	<i>Interruzione automatica dell'alimentazione</i>	2	6
3	<i>Isolamento doppio o rinforzato</i>	2	5
4	<i>Sorgente autonoma intrinsecamente sicura</i>	-----	1
5	<i>Bassissima tensione di sicurezza (SELV)</i> <i>Trasformatore di sicurezza.</i>	<i>Nessun isolamento</i>	2
6		<i>Isolamento principale</i>	3
7		<i>Isolamento doppio o rinf.</i>	4
8	<i>Separazione elettrica</i>	<i>Sorgente autonoma</i>	2
9		<i>Apparecchi con isolamento principale</i>	3
10		<i>Un solo apparecchio con isolamento principale</i>	3
11		<i>Un solo apparecchio con isolamento doppio o rinf.</i>	4

Classificazione di massima delle misure di protezione contro i contatti indiretti.

Una misura di protezione dai contatti indiretti è sempre necessaria, ma in alcuni casi, per motivi pratici o in considerazione del rischio ridotto, può non essere applicata: se le masse sono di dimensioni ridotte e non sono toccate o impugnature durante il normale funzionamento (viti, fascette ecc.), se si tratta di mensole porta isolatori di linee aeree purché non siano a portata di mano, i ferri di armatura dei sostegni in cemento delle linee elettriche se i ferri non sono accessibili (in effetti questi ferri essendo non accessibili non costituiscono una massa anche se, quando il cemento è bagnato, può diventare conduttore).

Contatto Diretto

- Conduttori Attivi
- Morsetti in Tensione
- Avvolgimenti Elettrici
- Portalampade
- Portafusibili

Sistemi di Protezione

Protezione Totale

- Isolamento delle Parti Attive
- Involucri
(rimovibili solo con attrezzi)
- Barriere
(rimovibili solo con attrezzi)

Protezione Parziale

- Ostacoli
- Allontanamento

Protezione Passiva

- Impiego Apparecchi con Isolamento Doppio o Rinforzato (Apparecchi di Classe II)
- Protezione per Isolamento Elettrico (Apparecchi di Classe III e Trasformatore di Isolamento)
- Locali Isolanti con Impiego di Apparecchi di Classe 0
- Locali Resi Equipotenziali a Non Connessi a Terra

Protezione Attiva

- Interruttore Differenziale
(Come Protezione Aggiuntiva)

Misure di Protezione dai Contatti Diretti

Contatto Indiretto

- Masse
- Masse Estranee

Sistemi di Protezione

Protezione Passiva

- Impiego Apparecchi con Isolamento Doppio o Rinforzato (Apparecchi di Classe II)
- Protezione per Separazione Elettrica (Trasformatore di Isolamento)
- Protezione per Mezzo di Luoghi Non Conduttori
- Protezione per Equipotenzializzazione del Locale Non Connesso a Terra
- Protezione Mediante Bassissima Tensione di Sicurezza (Sistema SELV, PELV e FELV)

Protezione Attiva

- Interruzione Automatica dell'Alimentazione
(Combinazione tra Impianto di Terra e un Dispositivo che Apre in Presenza di un Guasto:
Interruttore Differenziale, Interruttore Magnetotermico, Fusibile)

Misure di Protezione dai Contatti Indiretti