

Università degli Studi di Trieste
Facoltà di Ingegneria

APPUNTI del CORSO di Elettrotecnica

Impianti di terra

prof. ing. Stefano Longhi

a.a. 2017-2018

IMPIANTI DI TERRA

Generalità

Norma 11-1

La Norma CEI 11-1 va applicata a tutti agli impianti elettrici che così vengono descritti:

- Stazione elettrica (o cabina elettrica)
E' un'area elettrica chiusa con apparecchiature e/o trasformatori in reti di trasmissione o di distribuzione comprese le cabine elettriche di MT/BT
- Impianto o impianti di generazione ubicati in un unico sito
L'impianto comprende generatori e unità di trasformazione, con tutte le apparecchiature associate e tutti i sistemi elettrici ausiliari. Sono esclusi i collegamenti tra impianti di generazione ubicati in siti diversi
- L'impianto elettrico di una fabbrica, di uno stabilimento industriale o di altri fabbricati industriali, agricoli, commerciali o di pubblici servizi.
I collegamenti tra aree elettriche chiuse (comprendenti anche le stazioni e le cabine elettriche), collocate nel medesimo sito, sono considerati parte degli impianti, ad eccezione di quando tali collegamenti costituiscono parte di una rete elettrica di trasmissione o di distribuzione

La Norma introduce nuovi termini, nuovi simboli e nuove definizioni che per maggior chiarezza sono, anche se solo in parte, di seguito riportati:

Tensioni

Tensione nominale di un sistema

Valore arrotondato appropriato della tensione per denominare o identificare un sistema.

Tensione massima (minima) di un sistema

Tensione più elevata (più bassa) che può verificarsi in qualunque momento ed in qualunque punti in condizioni regolari di esercizio non tenendo conto delle variazioni temporanee dovute a guasti, a brusche variazioni di carico, ecc.

Tensione nominale verso terra di un sistema

Si definisce tale nei:

- sistemi trifasi con neutro isolato o con neutro messo a terra con impedenza, la tensione nominale
- sistemi trifasi con neutro direttamente o efficacemente messo a terra, la tensione stellata corrispondente alla tensione nominale
- sistemi monofasi, o a corrente continua, senza punto di mezzo a terra, la tensione nominale
- sistemi monofasi, o a corrente continua, con punto di mezzo a terra, la metà della tensione nominale

Classificazione dei sistemi in categorie secondo la loro tensione nominale

In relazione alla loro tensione nominale i sistemi elettrici si dividono in:

- *sistemi di Categoria 0 (zero)*, quelli a tensione nominale minore o uguale a 50 V se a corrente alternata o a 120 V se a corrente continua (non ondulata)
- *sistemi di Categoria I (prima)*, quelli a tensione nominale minore da oltre 50 V fino a 1000 V se in corrente alternata o da oltre a 120 V fino a 1500 V compreso se in corrente continua (bassa tensione)
- *sistemi di categoria II (seconda)*, quelli a tensione nominale oltre 1000 V se in corrente alternata od oltre 1500 V se in corrente continua fino a 30000 compreso (media tensione)
- *sistemi di categoria III (terza)*, quelli a tensione nominale maggiore di 30000 V (alta tensione)

Impianto di terra

- Terra
Termine per designare il terreno sia come luogo che come materiale conduttore, per esempio humus, terricci, sabbia, chiaretto e pietra
- Terra di riferimento (terra lontana)
Zona della superficie del terreno al di fuori dell'area di influenza di un dispersore o di un impianto di terra, dove cioè tra due punti qualsiasi non si hanno percettibili differenze di potenziale dovute alla corrente di terra
- Dispersore
Conduttore in contatto elettrico con il terreno, o conduttore annegato nel calcestruzzo a contatto con il terreno con un'ampia superficie (per esempio una fondazione)
- Conduttore di terra
Conduttore che collega una parte dell'impianto che deve essere messo a terra ad un dispersore o che collega tra loro più dispersori, ubicato al di fuori del terreno od interrato nel terreno e ad esso isolato (quando il collegamento tra una parte dell'impianto ed il dispersore è realizzato per mezzo di giunzioni scollegabili, sezionatori, scaricatori, scaricatori spinterometrici, contascariche di scaricatore, ecc., si considera conduttore di terra solo la parte del collegamento permanentemente connessa al dispersore)
- Conduttore equipotenziale
Conduttore che assicura il collegamento equipotenziale
- Impianto di terra
Sistema limitato localmente costituito da dispersori o da parti metalliche in contatto con il terreno di efficacia pari a quella dei dispersori (per esempio fondazioni di sostegni, armature, schermi metallici di cavi), di conduttori di terra e di conduttori equipotenziali
- Mettere a terra
collegare una parte conduttrice al terreno tramite impianto di terra

- Messa a terra
L'insieme di tutti i mezzi e di tutte le operazioni necessarie per realizzare la messa a terra
- Dispersore orizzontale
Dispersore generalmente interrato fino ad una profondità di circa 1 m. Questo può essere costituito di nastri, di tondini, o di conduttori cordati che possono essere disposti in modo radiale, ad anello, a maglia, o da una loro combinazione
- Picchetto di terra
Dispersore generalmente interrato od infisso per una profondità superiore ad 1 m. Questo può essere costituito da un tubo, da una barra cilindrica o da altri profilati metallici
- Cavo con funzione di dispersore
Cavo le cui guaine, i cui schermi o le cui armature hanno funzione di un dispersore a nastro
- Dispersore di fondazione
Struttura conduttrice annegata nel calcestruzzo a contatto elettrico con il terreno attraverso un'ampia superficie
- Dispersore per il controllo del potenziale di terra
Conduttore che per la sua forma e la sua disposizione è principalmente utilizzato per ridurre il gradiente del potenziale sulla superficie del terreno piuttosto che per ottenere un definito valore della resistenza di terra
- Dispersore di fatto
Parte metallica in contatto elettrico con il terreno o con l'acqua, direttamente o tramite calcestruzzo, il cui scopo originale non è di mettere a terra, ma soddisfa tutti i requisiti di un dispersore senza compromettere la sua funzione originale (esempi di dispersori di fatto sono le tubature, le palificazioni metalliche, le armature del calcestruzzo, le strutture in acciaio delle costruzioni, ecc.)

Tipologie di messa a terra

- Messa a terra di protezione
Messa a terra di una parte conduttrice, non destinata ad essere attiva, con lo scopo di proteggere le persone dallo shock elettrico.
- Messa a terra di funzionamento
Messa a terra di un punto del circuito attivo richiesta per il corretto funzionamento degli impianti e dei suoi componenti elettrici.
- Messa a terra per la protezione contro le fulminazioni (scariche atmosferiche)
Messa a terra per la dissipazione di una corrente di fulmine (scarica atmosferica) verso terra.

Tensioni riferite agli impianti di terra

- Tensione totale di terra (U_E)
Tensione tra un impianto di terra e la terra di riferimento (fig.1)
- Potenziale della superficie del terreno (ϕ)
Tensione tra un punto sulla superficie del terreno e la terra di riferimento (fig.1)

- Tensione di contatto (U_T)
Parte della tensione totale di terra dovuta ad un guasto a terra a cui può essere sottoposta una persona. Si assume convenzionalmente che la corrente fluisca attraverso il corpo umano da una mano ai piedi (distanza orizzontale di 1 m dalla massa)
- Tensione di contatto a vuoto (U_{ST})
Tensione che si manifesta durante un guasto a terra tra le masse ed il terreno quando queste masse non vengono toccate
- Tensione di passo (U_S)
Parte della tensione totale di terra dovuta ad un guasto a terra a cui può essere sottoposta una persona con un passo di ampiezza pari ad 1 m. Si assume che la corrente fluisca attraverso il corpo umano da piede a piede. Tensione di passo a vuoto USS è la tensione che si manifesta tra due punti del terreno a distanza di 1 m in assenza di persone
- Tensione di contatto ammissibile (U_{TP})
Valore di tensione di contatto ammissibile in relazione al tempo di intervento delle protezioni
- Contatto diretto
Contatto di persone con parti attive
- Contatto indiretto
Contatto di persone con masse durante un cedimento dell'isolamento

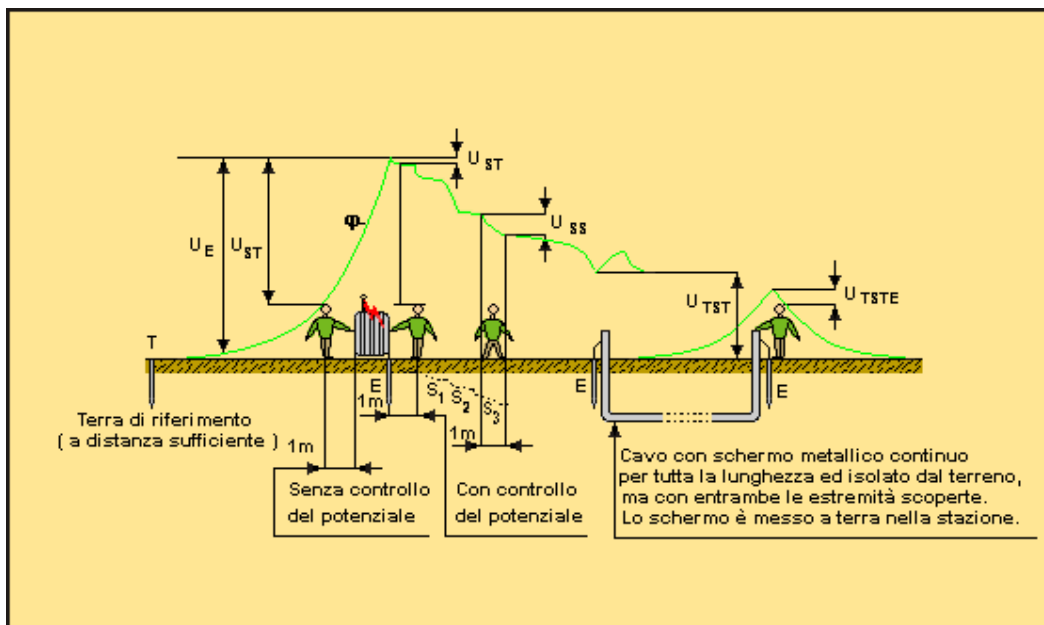


Fig. 1 – Definizioni relative alle tensioni negli impianti

Differenze di potenziale

- Collegamento equipotenziale
Collegamento elettrico tra masse per ridurre al minimo le differenze di potenziale tra queste
- Controllo del potenziale
Controllo del gradiente di potenziale di terra, principalmente sulla superficie del terreno, per mezzo di dispersori (fig.1)
- Potenziale trasferito
Aumento del potenziale di un impianto di terra, causato da una corrente di terra, trasferito per mezzo di un conduttore collegato (per esempio lo schermo metallico di un cavo, un conduttore PEN, una tubatura, una rotaia) ad aree a basso livello di potenziale o a potenziale nullo rispetto alla terra. Ciò dà luogo ad una differenza di potenziale tra il conduttore e ciò che lo circonda. La definizione si applica anche quando un conduttore è collegato alla terra di riferimento e transita nell'area soggetta ad un livello di potenziale maggiore
- Isolamento del posto di manovra
Provvedimento per aumentare la resistenza tra il pavimento di un posto di manovra ed il terreno in modo da non sottoporre l'operatore a tensioni non ammissibili
- Impianto di terra globale
Impianto di terra realizzato con l'interconnessione di più impianti di terra che assicura, data la vicinanza degli impianti stessi, l'assenza di tensioni di contatto pericolose. Tale impianto permette la ripartizione della corrente di terra in modo da ridurre l'aumento di potenziale di terra negli impianti di terra singoli. Si può dire che tale impianto forma una superficie quasi equipotenziale. Questa definizione è limitata alle reti di trasmissione e di distribuzione del Distributore pubblico, ad esempio nel caso di aree urbane concentrate, ed agli impianti utilizzatori alimentati in AT o in MT collegati all'impianto di terra globale ad esso inclusi
- Massa
Parte conduttrice di un componente elettrico che può essere toccata e che in condizioni ordinarie non è in tensione, ma che può diventarlo in condizioni di guasto
- Massa estranea
Parte conduttrice che non fa parte dell'impianto elettrico ed è in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra
- Conduttore PEN
Conduttore che in un sistema di bassa tensione svolge sia la funzione di conduttore di protezione che di conduttore di neutro
- 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 negli impianti di bassa tensione
 - dispersore
 - punto di terra della sorgente o neutro artificiale

Guasti a terra e tipi di resistenza

- Guasto a terra
Collegamento conduttivo causato da un guasto tra conduttore di fase del circuito principale e la terra od una parte collegata a terra. Il collegamento conduttivo può anche avvenire tramite arco elettrico. I guasti a terra di due o più conduttori di fase dello stesso impianto in due punti diversi, sono designati come guasti a terra doppi o multipli
- Corrente di guasto a terra (I_F)
Corrente che fluisce dal circuito principale verso terra, o verso parti collegate a terra, nel punto di guasto (punto di guasto a terra)
- Corrente di terra (I_E)
Corrente che fluisce verso terra tramite l'impedenza collegata a terra. La corrente di terra è la parte della corrente di guasto a terra che determina la tensione totale di terra
- Fattore di riduzione (r)
Il fattore di riduzione (r) di una linea trifase è il rapporto tra la corrente di terra e la somma delle correnti di sequenza zero nei conduttori di fase del circuito principale ($r=I_E/3I_0$), in un punto lontano dal punto di cortocircuito e dall'impianto di terra di un impianto elettrico
- Resistività del terreno (ρ_E)
Resistenza elettrica specifica del terreno
- Resistenza di terra (I_E)
Resistenza tra il dispersore e la terra di riferimento
- Impedenza di terra (Z_E)
L'impedenza tra l'impianto di terra e la terra di riferimento

La tabella seguente riepiloga i termini vecchi e nuovi con la corrispondente simbologia

VECCHIA DESIGNAZIONE	DESCRIZIONE	NUOVA DESIGNAZIONE
U_T	Tensione totale di terra	U_E
U_C	Tensione di contatto	U_T
U_{CO}	Tensione di contatto a vuoto	U_{ST}
---	Tensione di contatto ammissibile	U_{TP}
U_P	Tensione di passo	U_S
U_{PO}	Tensione di passo a vuoto	U_{SS}
R_C	Resistenza del corpo umano	R_B
R_T	Resistenza di terra	R_E
R_{TC}	Resistenza della persona verso terra	R_{EB}
I_G	Corrente di guasto a terra	I_F
I_T	Corrente di terra	I_E

Tab. 1 - Confronto tra nuova e vecchia simbologia secondo la Norma CEI 11-1

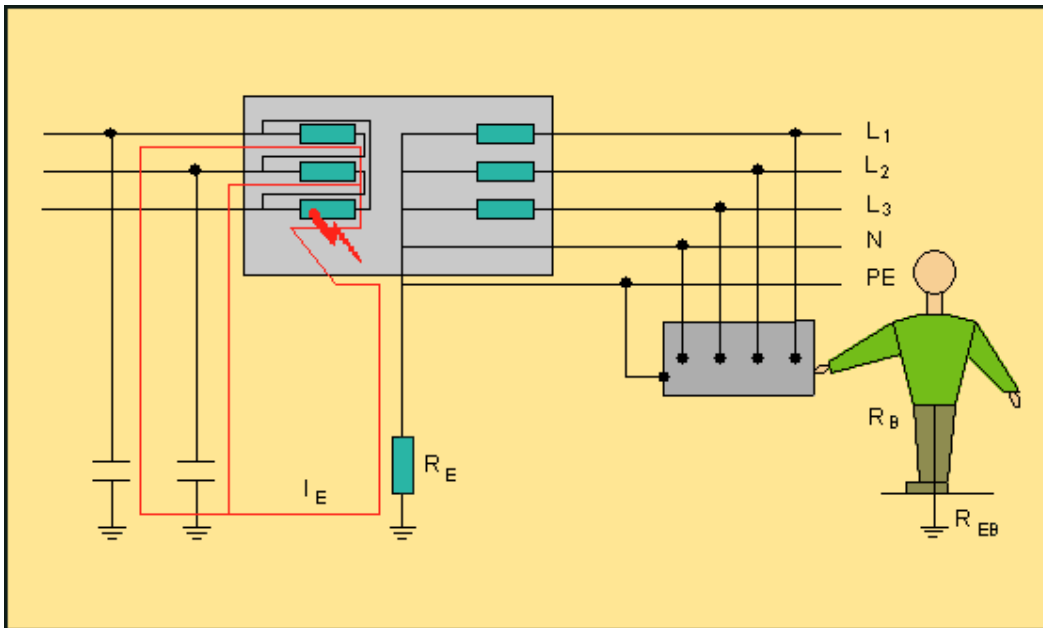


Fig. 2 – Nuovi simboli relativi alle condizioni di un guasto a terra in alta tensione

L'impianto di terra

L'impianto di terra costituisce un mezzo che permette alla corrente di guasto di disperdersi o di richiudersi, tramite una resistenza di basso valore, attraverso il terreno. Può svolgere funzioni diverse se è installato dall'utente o dal distributore e se il sistema di distribuzione è un TT o un TN.

In una cabina primaria o secondaria dell'ente distributore possono entrare solo persone autorizzate. La sicurezza dalle tensioni di contatto è quasi sempre garantita perché l'impianto di terra, costituito in genere da una rete magliata o da un anello di piccole dimensioni che circonda la cabina, crea una buona equipotenzialità (purtroppo non così facile da ottenere nelle più diffuse tipologie d' impianto dell'utente, soprattutto nelle zone in cui sono installate le masse alimentate in bassa tensione).

Secondo la Norma questi impianti risultano idonei se la tensione totale di terra U_E è inferiore a 1,5 UTP oppure, adottando i provvedimenti M di cui all'allegato D della Norma CEI 11-1, anche se raggiunge 4 UTP (tab. 4). I provvedimenti M specificati dalla norma consistono in alcune misure di protezione su pareti e pavimenti e su recinzioni, di controllo dei potenziali ai margini degli impianti e di equipotenzialità delle aree interessate. Non potendo rispettare queste condizioni è necessario effettuare la misura delle tensioni di passo e di contatto.

Le tensioni di passo, essendo all'interno di queste aree la superficie praticamente equipotenziale, sono quasi sempre inferiori a quelle ammissibili. Qualora non fosse possibile trascurare si applicano i limiti U_{TP} moltiplicati per 3, essendo 3 il fattore di percorso nel corpo umano da piede a piede (inteso come rapporto tra il valore della corrente che comporta una certa probabilità di fibrillazione nel tragitto piede-piede e il valore di corrente che nel percorso mani-piedi determina la stessa probabilità di fibrillazione).

L'andamento dei valori delle tensioni di contatto ammessi U_{TP} (V) in funzione della durata del guasto t_F (s) sono riportati nella curva di fig. 3 e riassunti nella tabella 2.

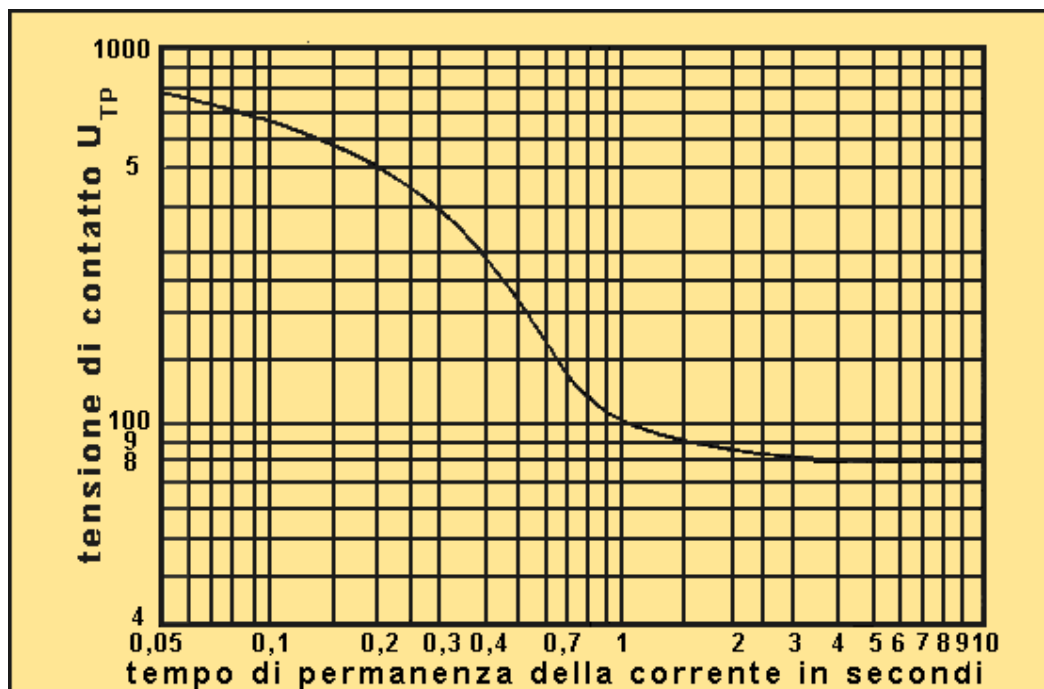


Fig. 3 – Tensioni di contatto ammissibili U_{TP} per correnti di durata limitata.

Note:

- 1) - La curva rappresenta il valore della tensione che può essere applicata al corpo umano da mano nuda a piedi nudi, con un valore dell'impedenza del corpo umano avente una probabilità pari al 50 % di non essere superata dalla popolazione, con una curva corrente tempo che presenta la probabilità del 5% di provocare fibrillazione ventricolare e con nessuna resistenza addizionale.
- 2) - La curva è relativa a guasti a terra in impianti di alta tensione
- 3) - Se la durata della corrente è molto più lunga di quanto mostrato nel grafico, si può usare per U_{TP} un valore di 75 V

Il confronto con la vecchia norma 11-8, che ammetteva un margine del 20% per la tensione totale di terra, ($U_E \leq 1.2 U_{TP}$ che poteva essere aumentato fino 1,8 con una rete di terra orizzontale avente perimetro non superiore a 100m), sembrerebbe rivelare una norma più restrittiva, ma i nuovi valori introdotti compensano largamente tale margine. Nella CEI 11-1 si tiene infatti conto della minor probabilità che un guasto si manifesti in alta tensione piuttosto che in bassa tensione.

Un'altra opportunità per il distributore è fornita dal cosiddetto "impianto di terra globale". L'esperienza ha dimostrato che nelle aree ad elevata urbanizzazione, dove le cabine sono tra loro interconnesse attraverso i cavi MT e i relativi impianti di terra sono a loro volta interconnessi mediante le guaine metalliche dei cavi stessi, si viene a creare una rete di terra che copre un'area corrispondente alla zona urbanizzata. All'interno di tale area la superficie può essere considerata "quasi equipotenziale" e le tensioni di passo e di contatto sono di norma sempre inferiori ai massimi valori ammessi. I distributori possono

quindi evitare di preoccuparsi di queste tensioni che si stabiliscono sull'impianto di terra globale e sulle cabine di cui sono proprietari.

Purtroppo non è chiaro se di questa agevolazione possano avvalersi gli utenti proprietari di cabine MT/BT perché la Norma, anche se le cabine hanno l'impianto di terra collegato all'impianto di terra globale e presentano quindi caratteristiche riconducibili a quelle dell'ente distributore, non fornisce indicazioni in tal senso.

Se le condizioni supposte non possono essere rispettate e quindi le tensioni di contatto non rientrano nei limiti ammessi, gli impianti di terra devono essere separati. La zona di media tensione (le parti pericolose devono essere rese inaccessibili) deve essere separata da quella di bassa tensione, trasformando il sistema in un TT.

<i>Durata del guasto</i> $T_F (s)$	<i>Tensione di contatto ammissibile U_{TP} (V)</i>	
	<i>Nuova norma CEI 11-1</i>	<i>Vecchia norma CEI 11-8</i>
10	80	50
2	85	50
1	103	70
0,8	120	80
0,7	130	85
0,6	155	125
0,5	220	160
0,2	500	160
0,14	600	160
0,08	700	160
0,04	800	160

Tab. 2 - Tensioni di contatto ammissibili U_{TP} per correnti di durata limitata

La separazione dei due impianti deve garantire che nell'impianto di bassa tensione non si possano verificare pericoli per le persone o per le apparecchiature elettriche. Questo lo si ottiene se nell'impianto di terra di bassa tensione la tensione totale di terra dovuta ad un guasto sull'alta tensione risulta inferiore a quelli stabiliti dalla norma e riassunti nella tabella 3.

Nei sistemi TT, particolari attenzioni occorrono per collegare il neutro della rete di distribuzione di bassa tensione all'impianto di terra della cabina di trasformazione:

la tensione totale di terra U_E non deve oltrepassare i:

250 V, quando il tempo di intervento delle protezioni sull'alta tensione per guasto a terra è superiore ai 5 s

500 V quando il tempo è inferiore a 5 s.

Si vuole evitare in tal modo che gli apparecchi siano sollecitati da una tensione verso terra troppo elevata che ne potrebbe far cedere l'isolamento. Infatti nei sistemi TT, dove le masse sono collegate ad un impianto di terra diverso da quello del neutro, l'isolamento

degli apparecchi utilizzatori è sollecitato verso terra dalla tensione totale di terra più la tensione di fase U_0+U_E (fig. 4).

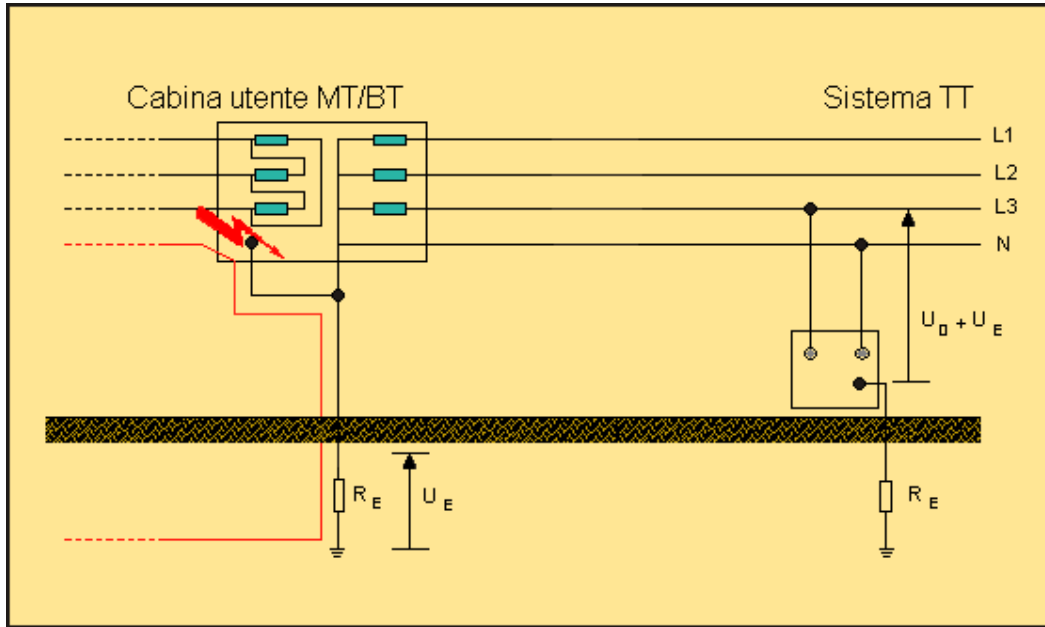


Fig. 4 – In un sistema TT l'isolamento degli apparecchi è sollecitato verso terra da una tensione U_0+U_E

La seguente tabella (Tab 3) fornisce i limiti di tensione di contatto U_{TP} che non devono essere superati per poter collegare il neutro alla terra di cabina: U_E deve essere inferiore o uguale a $X U_{TP}$ dove X è un coefficiente che varia da 2 a 5 in funzione del numero di volte che il conduttore di neutro è collegato a terra lungo la rete di distribuzione.

Tipo di sistema BT	Durata del guasto	Prescrizioni per un impianto comune di messa a terra dovute a ⁽²⁾⁽³⁾	
		Tensione di contatto	Sollecitazione di tensione
TT ⁽⁴⁾	$T_F \leq 5s$	Non applicabile ⁽⁸⁾	$U_E \leq 500V$
	$T_F > 5s$		$U_E \leq 250V$
TN ⁽⁵⁾	Tempi di figura 4	$U_E \leq U_{TP}$ ⁽⁶⁾	Non applicabile
		$U_E \leq XU_{TP}$ ⁽⁷⁾	

(1) Per definizioni riguardanti il tipo dei sistemi di BT vedere la CEI 64/8 (HD 384.3. sistemi IT, con conduttore di protezione di BT collegato all'impianto di terra di sistemi di alta tensione, sono considerati al punto b) in quanto essi sono di solito utilizzati per impianti industriali. Non sono presi in considerazione altri impianti IT

(2) U_E è il potenziale del dispersore dell'impianto comune di terra

(3) E' necessario prendere in considerazione che il potenziale della stazione elettrica potrebbe essere influenzato dai potenziali trasferiti, per esempio da guaine dei cavi collegate ad impianti vicini

(4) Si deve considerare la tensione di tenuta dei componenti elettrici di bassa tensione (basata sulla CEI 64/8)

(5) Si devono prendere in considerazione le tensioni di contatto (sicurezza delle persone)

(6) Condizione sufficiente ma non necessaria, in alternativa alla condizione $U_T \leq U_{TP}$

(7) Il conduttore PEN dell'impianto di bassa tensione è collegato a terra in diversi punti in modo da controllare la tensione impressa al neutro. Il valore comune per X è 2. L'esperienza dimostra che in casi particolari possono essere ammissibili valori fino a 5. Questa condizione non si applica agli impianti utilizzatori

(8) Si considera trascurabile l'eventualità di guasto sull'alta tensione e contemporaneo guasto sulla bassa tensione per rottura dell'isolamento sul/i componente/i

Tab. 3 - Prescrizioni per sistemi comuni di messa a terra per l'alimentazione degli impianti a bassa tensione al di fuori di un sistema di messa a terra di sistemi di alta tensione.

Durata del guasto t_F	Tensione totale di terra U_E	Su pareti esterne e su recinzioni intorno agli impianti	All'interno degli impianti	
			Impianto all'interno	Impianto all'esterno
$T_F > 5s$	$U_E \leq 4 \times U_{TP}$	M1 o M2	M3	M4.1 o M4.2
	$U_E > 4 \times U_{TP}$	Prova $U_T \leq U_{TP}$	M3	M4.2
$T_F \leq 5s$	$U_E \leq 4 \times U_{TP}$	M1 o M2	M3	M4.2
	$U_E > 4 \times U_{TP}$		Prova $U_T \leq U_{TP}$	

Tab.4. – Condizioni per l'adozione dei provvedimenti M per assicurare tensioni di contatto U_{TP} ammissibili

Quando l'accesso all'impianto è consentito soltanto a persone autorizzate e non esiste il rischio di trasferire potenziali pericolosi al di fuori dell'area del sistema, è possibile utilizzare valori delle tensioni di contatto ammissibili considerando resistenze addizionali. La Norma fornisce per questi casi le curve dei valori della tensione di contatto ammissibile a vuoto U_{STP} in funzione dei diversi valori di resistenza addizionale. Le resistenze addizionali tra corpo e terreno sono dovute alle calzature e al contatto verso terra che dipende dalla resistività del terreno.

Impianto di terra dell'utente comune per l'alta e la bassa tensione (sistema TN)

Fin'ora si è descritto l'impianto di terra dal punto di vista del distributore. Un sistema di alta tensione, collegato agli impianti dell'utente, alimenta in genere anche sistemi o parti di sistemi di bassa tensione. L'impianto di terra dei due sistemi è consigliabile che sia messo in comune realizzando un impianto di terra unico per il neutro e per le masse, sia in alta tensione sia in bassa tensione.

Contrariamente a quanto avviene per il sistema TN del distributore, le persone si trovano all'interno di un impianto di terra comune, che deve garantire la sicurezza sia per un guasto sull'alta tensione (CEI 11-1) sia per un guasto sulla bassa tensione (CEI 64-8).

Dal momento che un guasto sull'alta tensione influenza la sicurezza anche sulla bassa tensione occorre evitare che si stabiliscano tensioni di contatto superiori a U_{TP} (fig. 4). Per questo è sufficiente che siano verificate le condizioni riportate in tabella 3: se si vogliono evitare le misure delle tensioni di passo e di contatto si può considerare che, a favore della sicurezza, siano al massimo uguali alla tensione totale di terra: $U_E \leq U_{TP}$

Non è sempre possibile usufruire dell'ulteriore possibilità di cui dispongono gli enti distributori di considerare sicuro l'impianto se la tensione totale U_E è inferiore a $1,5 U_{TP}$ oppure, adottando i provvedimenti M, anche se raggiunge $4 U_{TP}$ (tab. 4). Solo in casi particolari le Norme acconsentono di estendere tale possibilità agli impianti utilizzatori dell'utente.

Se l'impianto di terra costituisce una rete a maglia su tutta la superficie dell'impianto utilizzatore oppure se l'impianto di terra in alta tensione dell'utente è separato dall'impianto di terra in bassa tensione (casi poco frequenti) si stabiliscono condizioni simili a quelle del distributore. La tensione totale di terra U_E può essere calcolata moltiplicando la corrente di terra I_E (o, a favore della sicurezza, la corrente di guasto I_F) per la resistenza di terra R_E

$$U_E = I_E \times R_E$$

La corrente di terra o di guasto e i tempi di intervento delle protezioni in alta tensione sono fornite, a richiesta, dall'ente distributore mentre la resistenza di terra può essere ricavata mediante calcoli o misure. In pratica si presentano alcuni casi tipici che descrivono in modo abbastanza completo gli impianti in alta tensione che alimentano un impianto utilizzatore in bassa tensione.

- Impianto di terra unico che ricopre, con una struttura a maglia, tutta l'area in cui sono installate le masse e la cabina

L'impianto di terra è comune sia per il neutro sia per la parte in alta e in bassa tensione (fig. 5). L'impianto, per un guasto sull'alta tensione, è conforme alle Norme se è rispettata una delle seguenti condizioni:

- $U_E \leq 1.2 U_{TP}$;
- $U_E \leq 4 U_{TP}$ e sono adottati i provvedimenti M ;
- le tensioni di contatto misurate sono inferiori alla tensione di contatto ammissibile U_{TP} e le tensioni di passo non superano $3 U_{TP}$.

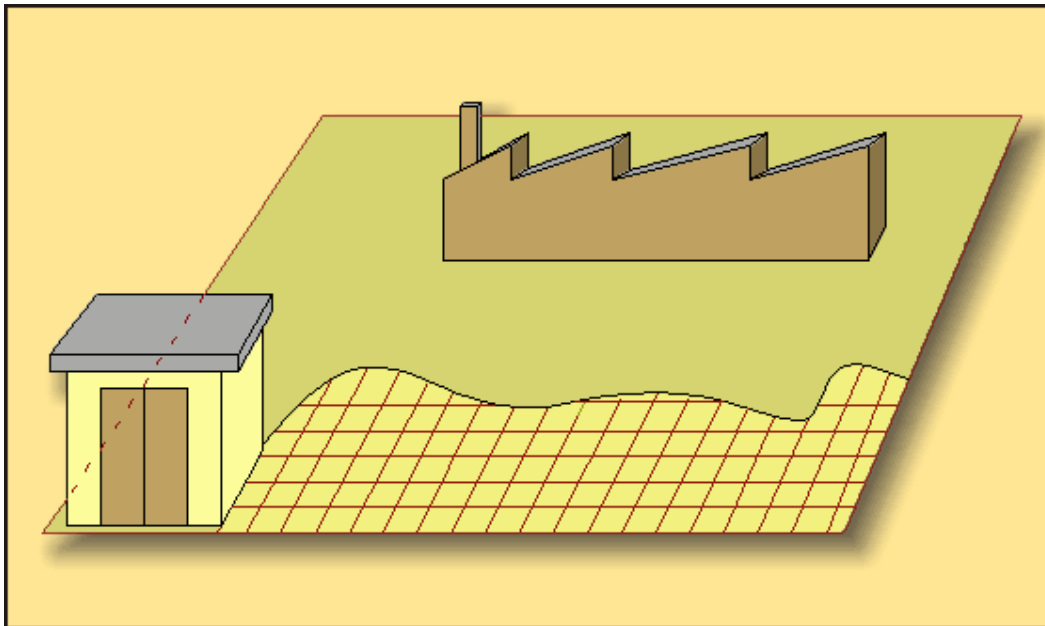


Fig. 5 - Impianto di terra unico che ricopre, con una struttura a maglia, tutta l'area in cui sono installate le masse e la cabina

- Impianto di terra unico al quale sono collegate la terra di cabina e quella delle masse

E' il caso che si presenta più frequentemente con l'impianto di terra unico sia per il neutro sia per le masse in alta e in bassa tensione. Non si sviluppa più secondo una struttura a maglia o ad anello, ma viene realizzato connettendo la terra di cabina con quella dell'impianto utilizzatore così come rappresentato in fig. 6. L'impianto, per un guasto sull'alta tensione, è conforme alle Norme se è rispettata una delle seguenti condizioni: - la tensione totale di terra non supera la tensione di contatto ammissibile ($U_E \leq U_{TP}$); - le tensioni di contatto misurate sono inferiori alla tensione di contatto ammissibile U_{TP} e le tensioni di passo non superano $3 U_{TP}$.

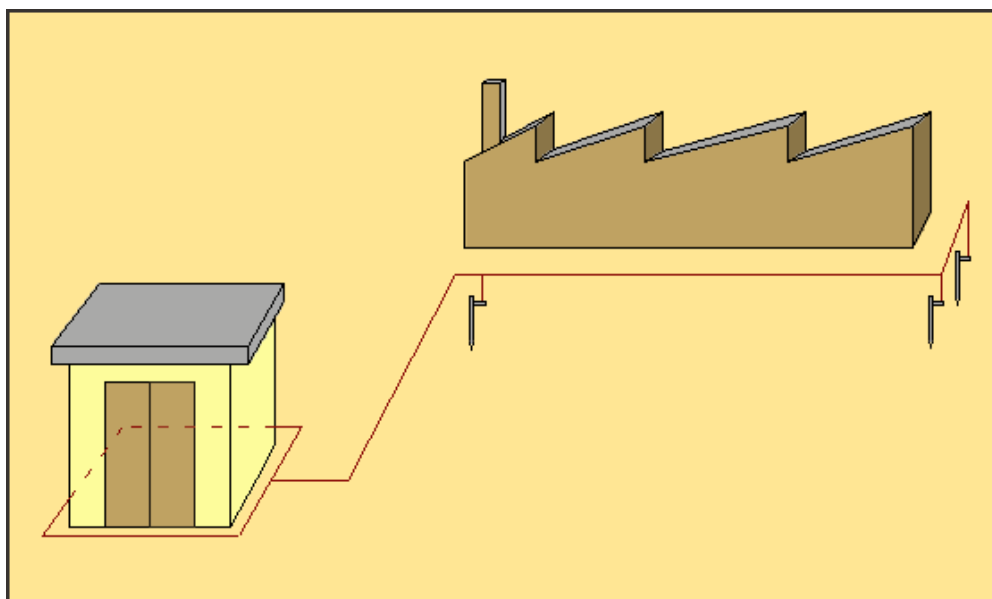


Fig. 6 - Impianto di terra unico al quale sono collegate la terra di cabina e quella delle masse

- Impianto di terra unico formato da un anello che racchiude al suo interno tutte le masse e la cabina

Anche questo caso si presenta abbastanza frequentemente. L'impianto di terra è unico sia per il neutro sia per le masse in alta e in bassa tensione e si sviluppa secondo una configurazione ad anello che comprende sia la cabina sia le masse dell'impianto utilizzatore (fig. 7).

Come per il caso precedente l'impianto, per un guasto sull'alta tensione, è conforme alle Norme se è rispettata una delle seguenti condizioni:

- la tensione totale di terra non supera la tensione di contatto ammissa $U_E \leq U_{TP}$;
- le tensioni di contatto misurate sono inferiori alla tensione di contatto ammissibile U_{TP} e le tensioni di passo non superano $3 U_{TP}$.

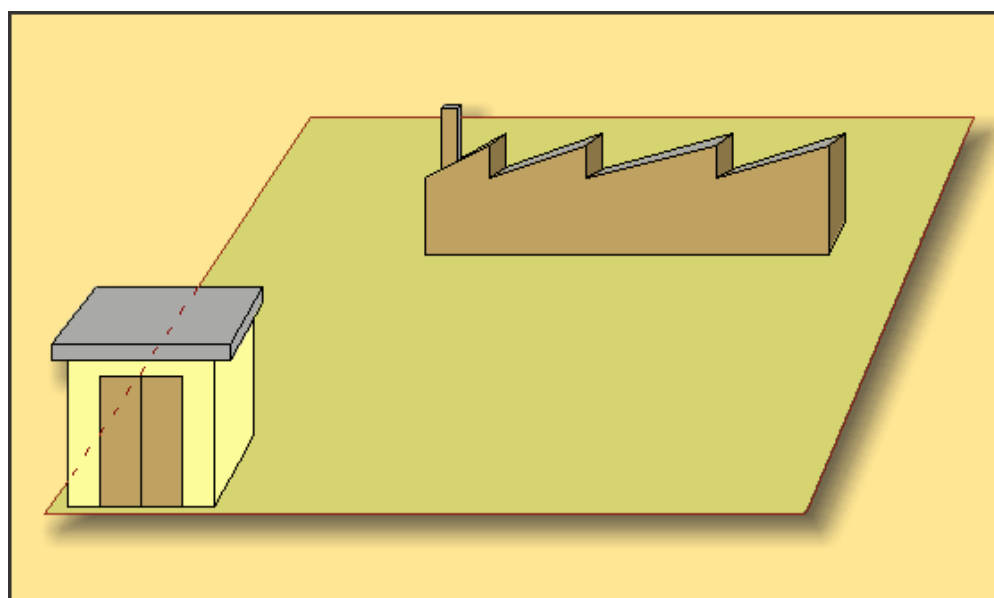


Fig. 7 - Impianto di terra unico formato da un anello che racchiude al suo interno tutte le masse e la cabina

○ Impianto di terra della cabina separato da quello dell'impianto utilizzatore

E' una soluzione generalmente non consigliabile che viene adottata quando la cabina è posizionata a grande distanza rispetto l'impianto utilizzatore (fig. 8). L'impianto, per un guasto sull'alta tensione, è conforme alle Norme se è rispettata una delle seguenti condizioni:

- La tensione totale di terra è inferiore o uguale a una volta e mezzo la tensione di contatto ammissibile $U_E \leq 1.5 U_{TP}$;
- La tensione totale di terra è uguale o inferiore a quattro volte la tensione di contatto ammissibile $U_E \leq 4 U_{TP}$; e sono adottati i provvedimenti M;
- le tensioni di contatto misurate sono inferiori alla tensione di contatto ammissibile U_{TP} e le tensioni di passo non superano $3 U_{TP}$.

Oltre a questo la tensione totale di terra U_E non deve superare:

- 250 V, se le protezioni interrompono un guasto a terra in alta tensione in tempi superiori ai 5s;
- 500 V se le protezioni interrompono il guasto in tempi inferiori ai 5 s.

Inoltre, la tensione d'isolamento verso terra del secondario del trasformatore AT/BT deve resistere alla somma della tensione totale di terra e della tensione di fase.

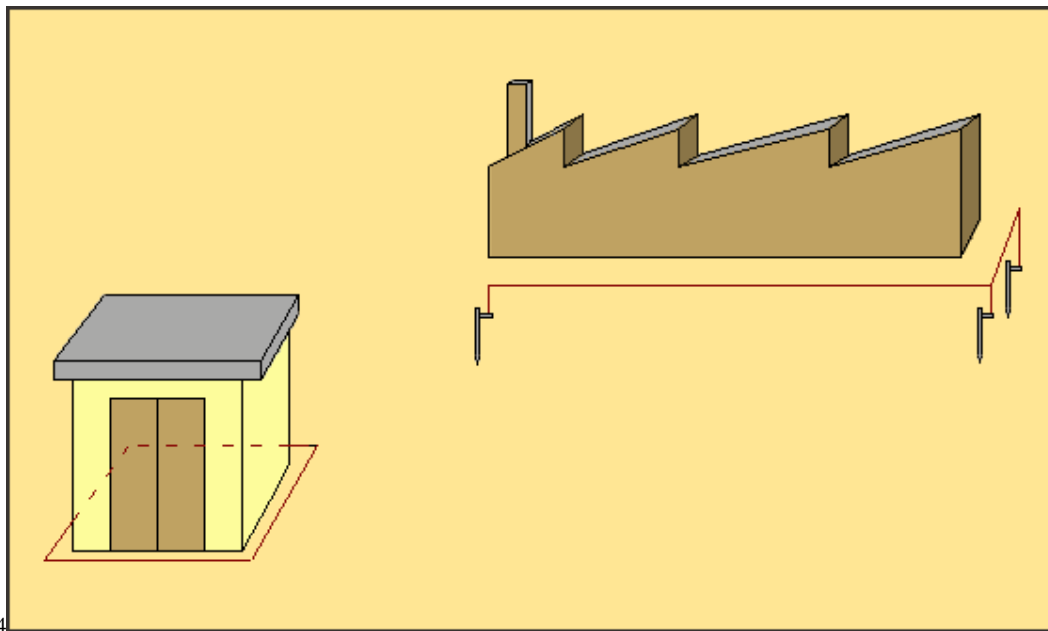


Fig. 8 - Impianto di terra della cabina separato da quello dell'impianto utilizzatore

Accorgimenti particolari per le recinzioni

Le recinzioni metalliche senza rivestimento isolante devono essere messe a terra in diversi punti del loro perimetro avendo cura di:

- effettuare il collegamento all'impianto di terra del sistema di alta tensione se la recinzione è contenuta all'interno dell'impianto di terra
- effettuare il collegamento a dispersori separati dall'impianto di terra del sistema di alta tensione se la recinzione è all'esterno dell'impianto di terra

Le parti metalliche di recinzioni rivestite con materiale isolante non necessitano di collegamento a terra. I cancelli e qualunque altra apertura ricavata sulla recinzione che circonda una stazione elettrica devono essere collegati in modo da evitare che si stabiliscano potenziali pericolosi tra le parti delle recinzioni stesse.

Verifiche periodiche

Il DPR 547 art. 328 prescrive per gli impianti di terra una verifica prima della messa in funzione e periodicamente ad intervalli non superiori ai 2 anni.

Le cabine elettriche devono invece essere verificate a scadenze non superiori i 5 anni.

La norma stabilisce di verificare l'efficienza dell'impianto di terra mediante esame a vista e prove prima della messa in servizio e ad intervalli non superiori a: 6 anni per le stazioni elettriche del distributore; 3 anni per gli impianti utilizzatori posti a valle del punto di consegna dell'energia da parte del distributore comprese le stazioni elettriche del cliente.

In condizioni di ordinario funzionamento deve essere verificata la continuità dei conduttori di terra, deve essere effettuata la misura della resistenza di terra e, ove necessario, la misura della tensione di contatto ed eventualmente di passo.

Il dimensionamento dell'impianto di terra

Il dimensionamento dell'impianto di terra viene condotto sulla base di 3 criteri fondamentali:

1. Resistenza meccanica e alla corrosione
2. Tenuta termica
3. Sicurezza delle persone

Resistenza meccanica e alla corrosione - Tenuta termica

Il dispersore deve avere una buona resistenza meccanica e alla corrosione che può essere ottenuta adottando i materiali e le dimensioni minime previste dalla Norma come indicato in tab. 5.

I valori che la Norma CEI 11-1 riporta si discostano in parte da quelli previsti dalle Norme CEI 64-8 e CEI 81-1, relative agli impianti utilizzatori di bassa tensione e alla protezione contro i fulmini. Per proteggere dai guasti sia in AT che in BT e dai fulmini, gli impianti di terra, in genere, sono unici per cui è auspicabile per il futuro una revisione dei valori minimi.

Per quanto riguarda la resistenza meccanica la Norma prevede per i conduttori di terra, compresi quelli di protezione ed equipotenziali, una sezione minima di 16 mm² mentre, per tener conto della tenuta termica, oltre che rispettare le sezioni minime previste, è necessario considerare il valore e la durata della corrente di guasto (nel calcolo si può considerare il vero valore della corrente che interessa il conduttore che si deve dimensionare in quanto la corrente di solito si divide tra i diversi componenti dell'impianto di terra).

Quando il guasto viene interrotto in tempi inferiori ai 5 s (condizioni adiabatiche di riscaldamento), ponendo l'energia specifica sopportata dal conduttore superiore a quella lasciata passare dal dispositivo di protezione, la sezione del conduttore percorso dalla corrente di guasto può essere calcolata mediante la nota relazione:

$$A = \frac{I}{k} \sqrt{\frac{t}{I_n \frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta}}}$$

dove:

k e β sono dei coefficienti forniti dalla Norma che dipendono dai materiali

Θ_f e Θ_i sono le temperature finale e iniziale in gradi centigradi (tab. 5).

Per guasti interrotti in tempi superiori ai 5 s la sezione minima può essere desunta, in funzione della corrente, dai grafici forniti dalla Norma. In verità è bene evidenziare che, rispettando le sezioni minime indicate dalla Norma, in genere si soddisfa ampiamente anche il dimensionamento termico dei conduttori che risultano normalmente adatti anche per correnti di diversi kA.

<i>Materiale</i>	<i>β (°C)</i>	<i>k (Amm⁻²s^{1/2})</i>
Rame	234,5	226
Alluminio	228	148
Acciaio	202	78

Tab. 5 – Costanti dei materiali

Materiale		Tipo di dispersore	Dimensione minima				
			Corpo			Rivestimento/guaina	
			Diametro (mm)	Sezione trasversale (mm ²)	Spessore (mm)	Valori singoli (μm)	Valori medi (μm)
Acciaio	Zincato a caldo	Piattina ⁽²⁾		90	3	63	70
		Profilato (inclusi i piatti)		90(250)	3(5)	63	70
		Tubo	25		2	47	55
		Barra tonda per picchetto	16(20)			63	70
		Tondo per dispersore orizzontale	10				50
	Con guaina di piombo ⁽¹⁾	Tondo per dispersore orizzontale	8			1000	
	Con guaina di rame estruso	Barra tonda per picchetto	15			2000(500)	
	Con guaina di rame elettrolitico	Barra tonda per picchetto	14.2(15)			90	100
Rame	Nudo	Piattina		50	2		
		Tondo per dispersore orizzontale		25 ⁽³⁾			
		Corda	1.8*	25			
		Tubo	20		2		
	Stagnato	Corda	1.8*	25		1	5
	Zincato	Piattina		50	2	20	40
	Con guaina	Corda	1.8*	25		1000	
	Di piombo ⁽¹⁾	Filo tondo		25		1000	
* per cavetti singoli ⁽¹⁾ non idoneo per posa diretta in calcestruzzo ⁽²⁾ piattina, arrotondata o tagliata con angoli arrotondati ⁽³⁾ in condizioni eccezionali, dove l'esperienza mostra che il rischio di corrosione e di danno meccanico è estremamente basso, si può usare 16 mm² Nota: i valori riportati tra parentesi sono quelli comunemente utilizzati in Italia.							

Tab. 6 – Dimensioni minime dei componenti del dispersore secondo CEI 11-1

Sicurezza delle persone

La sicurezza delle persone viene ottenuta sostanzialmente con interventi atti a contenere le tensioni di passo e di contatto. Nei sistemi di media tensione con neutro isolato le tensioni di passo e di contatto ammissibili si possono determinare con i criteri di seguito indicati (fig. 9).

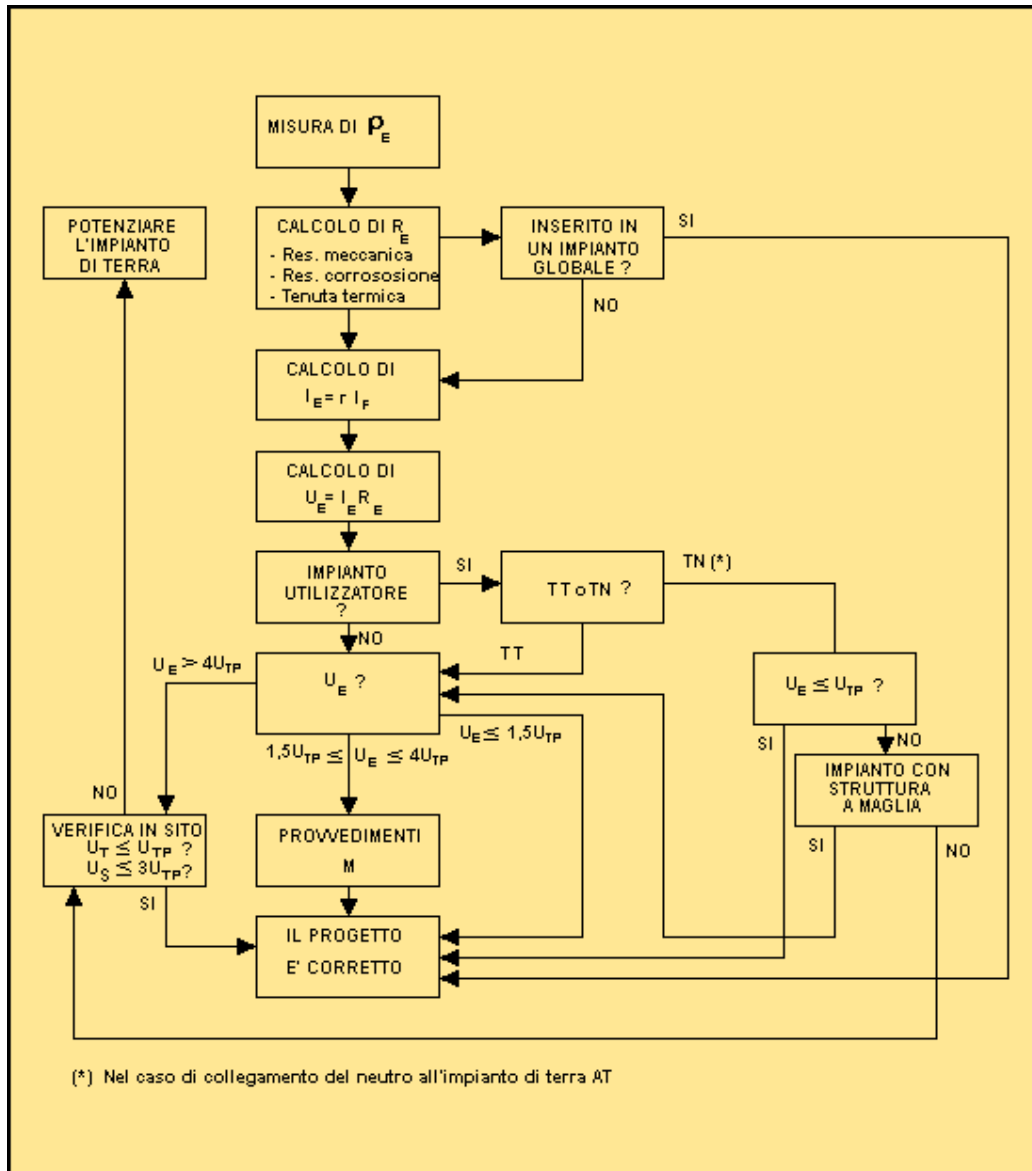
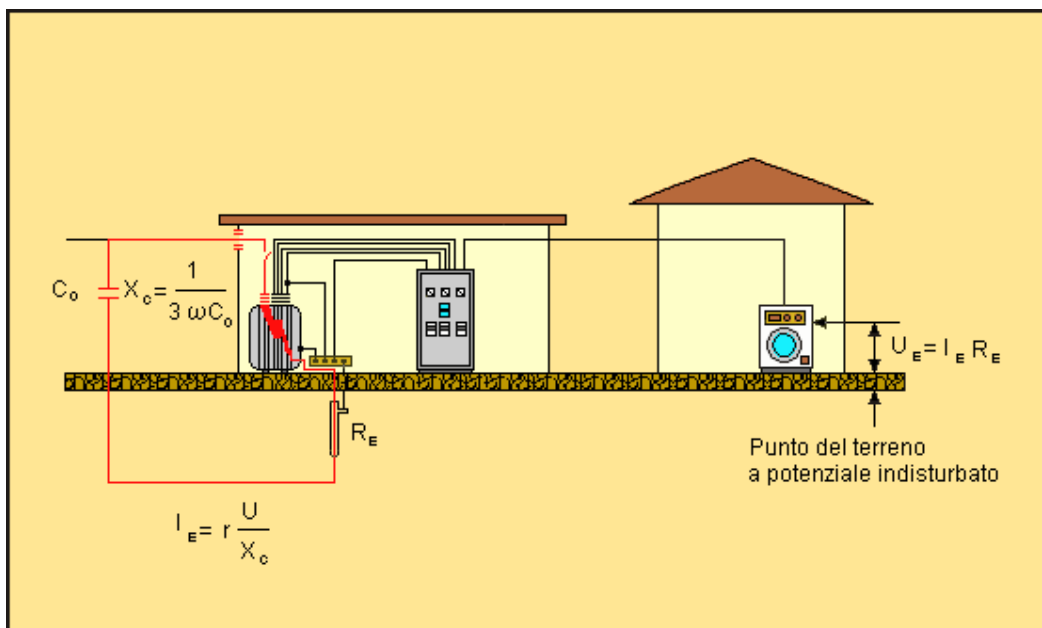


Fig. 9 – Dimensionamento dell'impianto di terra in funzione della tensione di passo U_S e di contatto U_T



- Fig. 10 – Corrente di terra I_E e fattori di riduzione r

- Si calcola la corrente di terra I_E o a favore della sicurezza quella di guasto I_F (fornita agli utenti dalla società distributrice) tenendo conto dell'eventuale fattore riduttivo r come indicato nella fig. 10.
- Si rileva la resistività del terreno ρ_E e si calcola R_E o si misura R_E con uno dei metodi indicati nell'allegato N.
- Si calcola la tensione totale di terra con l'usuale metodo $U_E = I_E R_E$.
- Se si tratta di un sistema TN (fornitura in AT) con neutro collegato all'impianto di terra in AT si confronta la tensione totale di terra U_E con la tensione di contatto ammissibile (fig. 4).
- La tensione totale di terra U_E è inferiore a quella di contatto ammissibile U_{TP} il dimensionamento è corretto e non è necessario adottare alcun provvedimento aggiuntivo.
- La tensione totale di terra U_E è superiore a quella di contatto ammissibile U_{TP} . E' necessaria una verifica sul posto per stabilire tramite misure se la tensione di contatto misurata U_T è inferiore alla tensione di contatto ammissibile U_{TP} e se le tensioni di passo U_S sono inferiori a tre volte U_{TP} . Se la verifica ha esito positivo il progetto è corretto.
- Se si tratta di un sistema TT si confronta la tensione totale di terra U_E con il valore della tensione di contatto ammissibile U_{TP} .
- Se la tensione totale di terra U_E non è superiore a una volta e mezzo quella di contatto ammissibile U_{TP} il dimensionamento è corretto e non è necessario adottare alcun provvedimento aggiuntivo.

- Se la tensione totale di terra U_E è compresa tra una volta e mezzo quella di contatto ammissibile U_{TP} e quattro volte quella di contatto ammissibile U_{TP} è possibile adottare i provvedimenti M prescritti nell'allegato D della Norma CEI 11-1 e il progetto può ritenersi corretto.
- Se la tensione totale di terra U_E è superiore a quattro volte quella di contatto ammissibile U_{TP} si rende necessaria la misura delle tensioni di passo U_S e di contatto U_T . Se le tensioni di contatto misurate risultano inferiori alla tensione di contatto ammissibile e se le tensioni di passo misurate risultano inferiori a tre volte la tensione di contatto ammissibile il progetto può ritenersi corretto.