



L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.

DIVISIONE GENERAZIONE ED ENERGY MANAGEMENT
AREA TECNICA SVILUPPO E REALIZZAZIONE IMPIANTI

GUIDA DI PROGETTO

Documento / Document no.

999GG00473

Pagina
Sheet

1 di 24
of

TITOLO
Title

CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI AT

**GUIDA DI PROGETTO PER IMPIANTI DI MESSA A
TERRA**

Indice Sicurezza
Security Index

Uso Aziendale

SISTEMA
System

93R

TIPO DOCUMENTO
Document Type

GG

DISCIPLINA
Discipline

E

FILE
File

999GG0047302.doc

REV

DESCRIZIONE DELLE REVISIONI / Description of Revisions

01 ADEGUAMENTO ALLA NORMATIVA VIGENTE E REVISIONE GENERALE

02 REVISIONATI CAPITOLI 2.2 e 7.4

02

24/05/06

RO

Paronelli G.

Botta

Frisoni/Amagliani

REV

Data
Date

Scopo
Scope

Preparato
Prepared by

Collaborazioni
Co-operations

Controllato
Checked by

Approvato
Approved by

Questo documento è proprietà di Enel Produzione Spa. E' severamente proibito riprodurre anche in parte il documento o divulgare ad altri le informazioni contenute senza la preventiva autorizzazione scritta.

This document is property of Enel Produzione Spa. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent.

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 2 di of 24

INDICE

1. SCOPO DEL DOCUMENTO	3
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.1 DOCUMENTI ENELPOWER.....	4
2.2 NORME, LEGGI E DECRETI	4
2.3 PUBBLICAZIONI	4
3. CONSIDERAZIONI GENERALI	5
4. DATI OCCORRENTI PER IL DIMENSIONAMENTO	6
4.1 CORRENTE DI GUASTO A TERRA.....	6
4.1.1 SISTEMA AT.....	6
4.1.2 SISTEMA MT DEI GENERATORI	6
4.1.3 SISTEMA MT (ALIMENTAZIONE SERVIZI AUSILIARI)	7
4.1.4 SISTEMA BT.....	7
4.1.5 SISTEMA IN CORRENTE CONTINUA.....	7
4.2 CORRENTE DI TERRA	8
4.3 RESISTIVITÀ DEL TERRENO.....	8
4.4 DETERMINAZIONE TENSIONI AMMISSIBILI DI PASSO E DI CONTATTO.....	9
5. DIMENSIONAMENTO DELLA RETE DI TERRA.....	11
5.1 DESCRIZIONE.....	11
5.2 IMPEDENZA DI TERRA	11
5.3 DIMENSIONAMENTO DEL DISPERSORE	12
5.4 VERIFICA TENSIONI DI PASSO E DI CONTATTO.....	12
6. SCELTA DEI MATERIALI E DIMENSIONAMENTO TERMICO	15
6.1 MATERIALI.....	15
6.2 VERIFICA TERMICA.....	15
6.3 SEZIONI STANDARD	16
7. PRESCRIZIONI REALIZZATIVE IMPIANTO DI TERRA	17
7.1 MODALITÀ DI POSA	17
7.2 ZONE DI PARTICOLARE PERICOLO.....	17
7.2.1 Recinzioni	17
7.2.2 Messa a terra delle guaine dei cavi interrati.....	18
7.2.3 Scaricatori di sovratensione	18
7.3 MESSA A TERRA APPARECCHIATURE	18
7.4 CONTROLLO SOVRATENSIONI FUORI DAI LIMITI DELL'IMPIANTO.....	18
7.4.1 Funi di guardia.....	18
7.4.2 Parti metalliche in uscita dai limiti dell'impianto.....	19
7.4.3 Circuiti elettrici uscenti dai limiti di impianto	20
8. APPENDICI.....	22
8.1 APPENDICE "A" - ASPETTI PARTICOLARI PER LE CENTRALI IDROELETTRICHE	22
8.2 APPENDICE "B" - ASPETTI PARTICOLARI PER LE STAZIONI ISOLATE IN SF6 (BLINDATE)	23
8.2.1 Considerazioni generali	23
8.2.2 Verifica delle tensioni di passo e di contatto.....	23
8.3 APPENDICE "C" - COEFFICIENTI DI SPAZIATURA DELLA RETE DI TERRA.....	24

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473	
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02	24/05/06
		Pagina Sheet	3 di of 24

1. SCOPO DEL DOCUMENTO

La presente guida di progetto fornisce i criteri di dimensionamento di massima della rete di terra per Centrali elettriche e stazioni elettriche AT.

Vengono dati i criteri di dimensionamento sia della rete interrata (terra primaria), sia dei collegamenti di terra alle singole apparecchiature (terra secondaria).

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 4 di of 24

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 DOCUMENTI ENELPOWER

Rif. 1.1 999.GG.00490 “Impianti elettrici - dettagli tipici per impianto di terra” .

2.2 NORME, LEGGI E DECRETI

- Rif. 2.1 Omissis
- Rif. 2.2 Omissis
- Rif. 2.3 Omissis
- Rif. 2.4 Norma CEI 7-1 “Conduttori di rame e leghe di rame per linee elettriche aeree” (1997).
- Rif. 2.5 Norma CEI 11-37 “Guida per l'esecuzione degli impianti di terra di impianti utilizzatori in cui siano presenti sistemi con tensione maggiore di 1kV (Ediz. 07/2003)
- Rif. 2.6 Norma CEI 11-1 “Impianti elettrici con tensione superiore a 1kV in corrente alternata (1999)/ V1 (2000)
- Rif. 2.7 Norma CEI 11-8 (*) “Impianti di messa a terra” (1998).
(Citata nel testo) (*) Integrata nella Norma CEI 11-1 (1999)
- Rif. 2.8 Norma CEI 11-17 “Impianti di produzione, trasporto e distribuzione di energia elettrica. Linee in cavo” (1997) /V1 (2003).
- Rif. 2.9 Norma CEI 64-8/5 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua” (2004). Parte 5 Scelta ed installazione dei componenti elettrici.
- Rif. 2.10 ANSI/IEEE Std. 80-2000 “IEEE guide for safety in AC Substation grounding.”
- Rif. 2.11 Tabella UNEL 01417 Piatti di rame trafilato a spigoli vivi per conduttori elettrici.
- Rif. 2.12 ANSI/IEEE Standard 665-1995 Guide for generating station grounding

2.3 PUBBLICAZIONI

- Rif. 3.1 FIRST DRAFT CIGRE STUDY COMMITTEE 23 WG08
“Report on earthing systems in power plants” Aug 96

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina di Sheet of 5 24

3. CONSIDERAZIONI GENERALI

L'impianto di terra deve essere in grado di assicurare la sicurezza del personale in caso di guasti a terra, disperdendo la relativa corrente di guasto e garantendo in tali condizioni tensioni di passo e di contatto inferiori a quanto previsto nelle norme in tutte le zone dell'impianto.

Deve inoltre dare analoghe garanzie in caso di intervento degli scaricatori di sovratensione o di fulminazione su strutture dell'impianto, essendo anch'esse collegate allo stesso impianto di terra.

Quanto sopra può essere ottenuto realizzando una bassa resistenza di terra, compatibilmente con i vincoli economici e con gli spazi disponibili

Oltre alle funzioni di sicurezza per le persone e le apparecchiature, l'impianto di terra deve assicurare il corretto funzionamento di apparecchiature e circuiti elettrici, vincolando alcuni punti di questi al potenziale di terra.

Nei capitoli seguenti vengono dati i criteri di dimensionamento, accompagnati da note di carattere sintetico.

Per maggiori approfondimenti si rimanda alle Norme citate al par 2.

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 6 di of 24

4. DATI OCCORRENTI PER IL DIMENSIONAMENTO

4.1 CORRENTE DI GUASTO A TERRA

Per dimensionare l'impianto di terra occorre determinare le correnti di guasto ai vari livelli di tensione presenti nell'impianto:

4.1.1 SISTEMA AT

Essendo il neutro del sistema ai vari livelli di tensione collegato francamente a terra, la corrente di guasto I_g è quella di guasto monofase a terra nel nodo di rete AT.

Occorre verificare se la corrente più elevata che il dispersore di impianto deve dissipare si verifica per guasto interno all'impianto stesso oppure all'esterno, sulle linee collegate (v. rif 2.10).

La corrente di guasto I_g è la somma del contributo di rete I_{gr} e del contributo dei generatori di centrale I_{gc} :

$$I_g = I_{gr} + I_{gc}$$

Il contributo dei generatori I_{gc} si richiude sulla messa a terra del neutro dei trasformatori elevatori lato AT, senza originare conduzione nel terreno.

Nel caso di guasto a terra interno all'area dell'impianto, se il sistema di terra è collegato alle funi di guardia delle linee (come normalmente avviene) una parte della I_{gr} si richiude sul neutro remoto attraverso le funi di guardia e le messe a terra dei tralicci, senza generare conduzione nel terreno dell'impianto (fig. 1, pag 23).

In prima approssimazione dovrà comunque essere trascurato il contributo delle funi di guardia.

La corrente I_{gr} è quindi la corrente che viene dispersa nel terreno.

Il valore di questa corrente, che deve essere fornito dal Gestore della rete, è dell'ordine di qualche decina di kA

Questa corrente rappresenta di norma il valore di guasto a terra più elevato nell'impianto e viene quindi utilizzata come base per il dimensionamento del dispersore di terra.

Nel caso di guasto immediatamente esterno all'impianto, la corrente I_{gr} si richiude sulle messe a terra remote attraverso le funi di guardia, mentre la terra dell'impianto è attraversata dalla corrente I_{gc} , che diventa quindi la corrente dimensionante per il dispersore di terra dell'impianto.

Il tempo di eliminazione del guasto si può assumere pari a 0,5 secondi, che corrisponde al tempo di intervento delle protezioni di rinalzo sul sistema AT.

4.1.2 SISTEMA MT DEI GENERATORI

Il sistema che fa capo ai terminali dei generatori è messo a terra mediante alta resistenza e pertanto è considerato a neutro isolato.

La corrente di guasto monofase a terra è dell'ordine di alcune decine di A, ed inoltre, essendo il sistema a fasi segregate, il guasto è assai poco probabile e non comporta conduzione nel terreno.

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 7 di of 24

4.1.3 SISTEMA MT (ALIMENTAZIONE SERVIZI AUSILIARI)

Il sistema è normalmente a 6 kV con il neutro messo a terra mediante alta resistenza e quindi è da considerarsi a neutro isolato.

La corrente di guasto monofase a terra è dell'ordine di alcune decine di A.

Il guasto monofase a terra tuttavia può evolvere in guasto bifase a terra, facendo circolare nel circuito interessato correnti dell'ordine di una decina di kA.

In tali condizioni il tempo massimo di eliminazione del guasto è 160 ms.

4.1.4 SISTEMA BT

Il sistema funziona a 400V (distribuzione a tre fili) o a 230V (distribuzione a quattro fili) con il centro stella dei trasformatori di distribuzione 6/0,4 kV collegato francamente a terra (sistema TN).

La corrente di guasto monofase a terra può essere intorno alla decina di kA e si può calcolare come segue:

$$I_g = E / (Z_l + Z_g + Z_{pe} + Z_t)$$

ove: Z_l impedenza della linea affetta da guasto

Z_g impedenza del guasto

Z_{pe} impedenza dei conduttori di protezione e di terra

Z_t impedenza del trasformatore

Il tempo di eliminazione del guasto sui QP (Quadri primari) è di 70 ms (protez. diretta) o 160 ms (protezione di rincalzo); sui QMM (Quadri manovra motori) è rispettivamente di 20 e 160 ms.

4.1.5 SISTEMA IN CORRENTE CONTINUA

Le tensioni impiegate sono 220 e 110V ed il sistema è isolato da terra, per cui il primo guasto a terra non comporta regime perturbato.

Il secondo guasto a terra comporta la circolazione di correnti dell'ordine della decina di kA nel circuito e nei conduttori di terra.

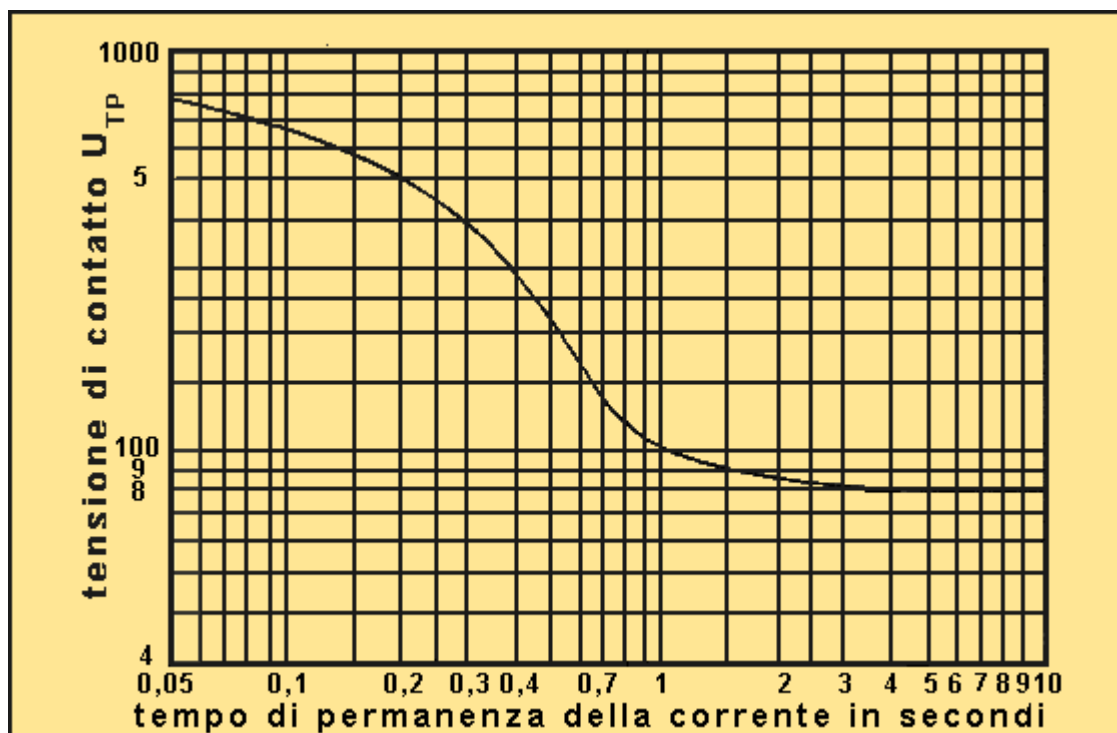
Il tempo di eliminazione del guasto è di 20 ms.

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.		Documento Document no.
	GUIDA DI PROGETTO		999GG00473
			REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet	9 di 24 of

4.4 DETERMINAZIONE TENSIONI AMMISSIBILI DI PASSO E DI CONTATTO

Le correnti di guasto a terra (I_G) sono interrotte in un tempo che dipende dalle caratteristiche del guasto e dal sistema di protezione previsto. In ogni caso il tempo totale di interruzione generalmente non supera 0,5 s (i tempi di intervento delle protezioni devono essere valutati impianto per impianto in funzione dell'assetto della rete elettrica). L'impianto di terra deve essere dimensionato, in relazione ai tempi di intervento delle protezioni, in modo che il valore della sua resistenza e la geometria del dispersore sia tale da permettere di contenere le tensioni di passo (U_P) e di contatto (U_C), sia all'interno sia all'esterno della centrale. L'andamento dei valori delle tensioni di contatto ammessi U_C (V) (U_{TP} secondo la nuova norma CEI 11-1) in funzione della durata del guasto t_F (s) sono riportati nella curva di fig. 4.1 e riassunti nella tabella 4.2. 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.

Figura 4.1 - Tensioni di contatto ammissibili U_{TP} (U_C per la vecchia norma CEI 11-8) per correnti di durata limitata secondo la Norma CEI 11-1.



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

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 10 di of 24

Bisogna notare che i valori sono profondamente cambiati tra la vecchia Norma 11-8 (1989) e la nuova Norma 11-1 per i seguenti motivi:

- La nuova Norma CEI 11-1 non considera più costante la resistenza del corpo umano ma decrescente al crescere della tensione;
- I valori di tensione indicati sono assoluti e non tengono conto dell'errore nelle misurazioni introdotto dalla resistenza interna non infinita dello strumento di misura.

Di seguito vengono forniti i valori delle tensioni di passo e di contatto massime ammissibili secondo la nuova Norma 11-1 confrontati con la vecchia Norma CEI 11-8 (edizione 1989), definite come tensioni applicate al corpo umano, per tempi di eliminazione del guasto.

Tab.4. 2 - Tensioni di contatto ammissibili U_{TP} per correnti di durata limitata

Durata del guasto (s)	Tensione di contatto ammissibile U_c (V) (U_{TP} secondo CEI 11-1)	
	Nuova norma CEI 11-1	Vecchia norma CEI 11-8
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

Nota: nella misurazione della tensioni di passo e contatto bisognerà tener conto dell'errore introdotto dalla resistenza interna degli strumenti di misura.

Il dimensionamento dell'impianto di terra dovrà dare origine a tensioni uguali od inferiori.

Occorre includere nella verifica l'effetto della resistenza di contatto piede-terreno, che gioca un ruolo non trascurabile se esiste uno strato superficiale ad alta resistività (ghiaia, asfalto).

La resistenza di contatto piede-terreno può essere assimilata ad un dispersore avente una resistenza pari a $3 \rho_s C_s$, ove ρ_s è la resistività dello strato superficiale e C_s è un coefficiente correttivo, che può prudenzialmente essere assunto pari a 0,6 per uno strato di ghiaia bagnata (resistività 1100 Ohm x m) di spessore 10-15 cm (v rif 2.10 cap 5).

Ad esempio, assumendo come tempo di intervento delle protezioni 0,5 s diventa:

La tensione di contatto ammissibile (riferita alla superficie del terreno) in queste condizioni diventa :

$$V_c = 220 (1,5 \cdot 0,6 \rho_s + 1000) / 1000 = 437 \text{ V}$$

Analogamente la tensione di passo ammissibile alla superficie del terreno diventa:

$$V_p = 220 (6 \cdot 0,6 \rho_s + 1000) / 1000 = 1090 \text{ V}$$

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 11 di of 24

5. DIMENSIONAMENTO DELLA RETE DI TERRA

5.1 DESCRIZIONE

L'impianto di terra è fisicamente costituito da:

- dispersore o rete di terra (terra intenzionale)
- strutture ed apparecchiature in contatto con il terreno e collegate metallicamente con la rete di terra (dispersore di fatto)
- reti di terra esterne al perimetro di centrale ma metallicamente collegate (ad esempio le funi di guardia delle linee, o nel caso delle centrali idroelettriche, rete di terra della stazione, situata ad una certa distanza dalla centrale.

Il calcolo del dispersore di terra dovrà includere anche quello della eventuale stazione elettrica di centrale, opportunamente collegato a quello principale.

Nota: per gli aspetti caratteristici degli impianti di terra delle centrali idroelettriche vedi Appendice A

5.2 IMPEDENZA DI TERRA

Il calcolo della impedenza di terra si può ridurre a quello della sola resistenza dato che nella maggior parte dei casi si può trascurare il contributo della reattanza.

Si assume come base di calcolo che solo il dispersore di centrale e le reti di terra esterne collegate diano luogo alla trasmissione di corrente nel terreno, dato che del contributo del dispersore di fatto si è già tenuto conto nel determinare la corrente I_t , sia pure in via approssimativa.

Detto contributo può comunque essere valutato a posteriori in sede di misura della resistenza di terra.

La resistenza di terra del dispersore di centrale può essere calcolata in prima approssimazione assumendo che il dispersore a maglia interrata copra tutta l'area dell'impianto ed assimilandolo ad una piastra metallica circolare equivalente di raggio r :

$$r = (A / \pi)^{0.5} \quad \text{ove } A \text{ è la superficie della rete in } m^2$$

e la resistenza di terra può essere così calcolata:

$$R = \rho / 4r \quad \text{ove } \rho \text{ è la resistività media del terreno in Ohm } \times m$$

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 12 di of 24

5.3 DIMENSIONAMENTO DEL DISPERSORE

La maglia di terra viene dimensionata in via preliminare coprendo con una griglia a maglia quadrata l'intera area dell'impianto o ciascuna delle singole aree non adiacenti ma facenti parte dello stesso impianto .

Il passo di maglia della rete interrata si fissa in genere $p = 20$ m. Valori maggiori possono creare gradienti di tensione eccessivi nella zona centrale delle singole maglie.

Nelle stazioni AT possono essere usati passi inferiori per ridurre la resistenza totale a parità di area occupata, ed anche per permettere un più agevole collegamento di terra delle apparecchiature,

In base a p si calcola la lunghezza totale L del conduttore interrato.

L va maggiorato opportunamente per tener conto del contributo degli eventuali picchetti di terra (puntazze).

In prima istanza, nel progetto, non verranno comunque previsti picchetti.

5.4 VERIFICA TENSIONI DI PASSO E DI CONTATTO

La tensione di terra dovuta all'immissione della massima corrente di guasto nella rete di terra è:

$$V_t = R I_t$$

Se V_t non è maggiore di 1,2 volte le tensioni ammissibili di passo e di contatto, non è necessaria la verifica di queste ultime.

Se invece ciò non avviene, occorre verificare le tensioni di passo e di contatto.

Il calcolo può essere effettuato mediante modelli matematici su calcolatore oppure mediante le formule semplificate seguenti (V.Rif. 2.10).

Nota: L'uso di modelli matematici come il CYMGR della CYME è sempre consigliabile, specialmente in casi particolari come reti di terra particolarmente asimmetriche o con profondità diverse da quanto indicato al par 7, oppure quando la resistività del terreno non è uniforme e pertanto è necessario usare un modello a due strati con due differenti resistività. Il calcolo manuale dovrebbe essere riservato solamente a casi di particolare semplicità, con dispersori a passo regolare e terreno omogeneo, come, ad esempio reti di terra in aree esterne alla centrale con rete di terra indipendente.

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 13 di of 24

FORMULE APPROSSIMATE:

La massima tensione di passo si può calcolare come segue:

- all'interno della rete di terra:

$$V_{p1} = 0,16 \rho I_t / L$$

- sulla periferia della rete di terra:

$$V_{p2} = K_s K_i \rho I_t / L$$

dove K_s e K_i sono coefficienti che tengono conto della spaziatura dei conduttori di terra e del numero delle vie in parallelo esistenti.

L' Appendice C dà i criteri di calcolo per questi coefficienti.

In prima approssimazione si può assumere il prodotto $K_s K_i$ pari a 0,7.

La massima tensione di contatto si può calcolare come segue:

- all'interno della rete di terra:

$$V_{c1} = 0,7 \rho I_t / L$$

- sulla periferia:

$$V_{c2} = K_m K_i \rho I_t / L$$

dove K_m e K_i hanno significato analogo a quanto detto sopra. In prima approssimazione si può assumere il prodotto $K_m K_i$ pari a 1,4.

EVENTUALI PROVVEDIMENTI CORRETTIVI

Se le tensioni di passo e di contatto all'interno della rete di terra sono maggiori di quelle ammissibili, occorre aumentare la lunghezza totale di conduttore L oppure modificare la geometria della rete in modo da variare i coefficienti K (v. Appendice C).

Se le tensioni di passo e di contatto non sono invece verificate in periferia della rete si può ricorrere all'installazione di picchetti lungo la periferia o all'aumento della profondità della maglia periferica rispetto a quella adottata al centro, dato che il gradiente di potenziale diminuisce con l'aumentare della distanza del dispersore dalla superficie (V. Appendice C).

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 14 di of 24

SIMBOLOGIA

SIMBOLO	UNITA' DI MISURA	DESCRIZIONE
I_g	kA	Corrente totale di guasto a terra
I_{gr}	kA	Contributo ad I_g da parte della rete
I_{gc}	kA	Contributo ad I_g da parte dei generatori
I_t	kA	Frazione di I_g usata per il dimensionam.
E	kV	Tensione nominale del sistema
Z_l	Ohm	Impedenza della linea affetta dal guasto
Z_{pe}	Ohm	Impedenza dei collegam. alla maglia terra
Z_e	Ohm	Impedenza del trasformatore
r	m	Raggio equivalente dell'area dell'impianto
A	m ²	Area equivalente dell'impianto
ρ	Ohm · m	Resistività del terreno
R	Ohm	Resistenza del dispersore
V_t	V	Tensione del sistema di terra in caso di guasto
L	m	Lunghezza del conduttore interrato
S	mm ²	Sezione del conduttore
t	s	Tempo di eliminazione del guasto

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 15 di of 24

6. SCELTA DEI MATERIALI E DIMENSIONAMENTO TERMICO

6.1 MATERIALI

Il materiale normalmente da utilizzare per la rete di terra e relativi collegamenti è la corda di rame, che in aggiunta alla sua alta conducibilità è particolarmente resistente alla corrosione nel sottosuolo.

Anche l'involucro dei condotti sbarra dei generatori, in alluminio, viene usato come conduttore di terra.

6.2 VERIFICA TERMICA

Il dimensionamento dei **conduttori del dispersore intenzionale** (la maglia interrata) viene fatto ipotizzando che la corrente totale di guasto (I_g =contributo rete+contributo generatori) si divida in due parti uguali nel punto di collegamento con il dispersore stesso.

Ciò significa che per le apparecchiature maggiori, per le strutture e per i collettori di terra occorre utilizzare almeno due conduttori di terra che a loro volta devono essere collegati al dispersore intenzionale in due punti distinti.

La corda del dispersore intenzionale verrà pertanto dimensionata per una corrente pari ad un quarto della corrente I_t .

Il dimensionamento dei **collettori di terra** o dei **collegamenti di terra** fra le apparecchiature ed il dispersore intenzionale va fatto scegliendo la corrente di guasto a terra più gravosa fra quelle relative alle singole apparecchiature collegate.

Per i **dispositivi fissi di messa a terra**, come ad esempio i sezionatori di terra, occorre considerare per il dimensionamento la corrente di corto circuito trifase.

La **sezione minima dei conduttori** si calcola come segue (V. Rif.3.1):

$$S = I_g / 4 K (t)^{0.5}$$

ove S è la sezione in mm², I_g la corrente di guasto in A, t il tempo di eliminazione del guasto in s, K un coefficiente dipendente dal tipo di materiale e dalle temperature.

Per il rame e l'acciaio, e per una temperatura iniziale di 30° C e finale di 200° C, K vale rispettivamente 159 e 58 (A⁻² s^{0.5}).

Per motivi di robustezza meccanica e degradazione chimica è opportuno usare sezioni superiori a quelle derivanti dal calcolo.

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 16 di of 24

6.3 SEZIONI STANDARD

Le sezioni standard da impiegare per i conduttori nudi sono le seguenti:

TIPO	SEZIONE	CORRENTE MASSIMA AMM. PER $t=0,5s$ (kA)
Corda di rame nudo (per il dispersore)	1X 70 mm ²	14
Corda di rame nudo (per condutt.terra app.)	1X120 mm ²	28
Corda di rame nudo (per condutt.terra app.)	2 x120 mm ²	56

Le sezioni per i conduttori isolati si calcolano con la formula sopra riportata, utilizzando come valore di K i dati riportati nella seguente tabella:

CONDUTTORE	ISOL: PVC	ISOL: EPR o XLPE	ISOL: G2
Rame	143	176	166
Alluminio	95	116	110
Acciaio	52	64	60

Se la sezione occorrente, determinata con la formula sopra riportata è superiore alle sezioni standard, occorre prevedere più conduttori in parallelo.

I piatti di rame devono essere scelti tra quelli indicati nelle tabelle UNEL 01417.

In ogni caso le sezioni minime ammesse per i conduttori di terra sono 6 mm² per il rame e 50 mm² per l'acciaio(v. CEI 11-8 Appendice B), salvo che per i sistemi di I categoria (con tensione inferiore a 1000V) per cui le sezioni dei **conduttori di protezione** dovranno avere i valori seguenti (CEI 64-8):

SEZ. CONDUTTORI DI FASE (mm ²)	SEZ. CONDUTTORE DI PROTEZ. (mm ²)
$S_r \leq 16$	$S_c = S_r$
$16 < S_r \leq 35$	$S_c = 16$
$S_r > 35$	$S_c = S_r / 2$

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 17 di of 24

7. PRESCRIZIONI REALIZZATIVE IMPIANTO DI TERRA

7.1 MODALITÀ DI POSA

Nella realizzazione del **dispersore** sono da evitare giunzioni tra materiali metallici aventi potenziali elettrochimici diversi.

Le giunzioni saranno effettuate mediante:

- Saldatura alluminotermica
- Morsetti a compressione o con bulloni
- Manicotti per tubi e picchetti

Per maggiori informazioni occorre fare riferimento ai dettagli tipici dell' impianto di terra.

La rete di terra deve essere interrata ad una profondità variabile fra 0,5 m ed 1 m.

Intorno a ciascun edificio della Centrale o Stazione deve essere realizzato un anello collettore periferico ad una distanza compresa tra 1 m e 5 m interconnesso in più punti al resto del dispersore.

I **conduttori di protezione** devono essere posati in modo da realizzare il percorso più breve possibile, in generale non superiore a 5 m.

I **collettori di terra** devono essere disposti baricentricamente rispetto alle apparecchiature da collegare e devono essere collegati al dispersore in due o più punti.

La **messa a terra dei ferri di armatura delle Opere civili** in calcestruzzo armato (dispersore di fatto) va effettuata legando ai ferri di armatura dei tondini di ferro saldabile a cui faranno capo i conduttori di terra, come indicato sui tipici dell' Impianto di terra.

Le fondazioni in calcestruzzo armato completamente interrate possono essere considerate già messe a terra e non necessitano quindi del collegamento di cui sopra.

Le apparecchiature metalliche interrate o immerse in acqua, ove possibile, non vanno collegate al dispersore se protette da un impianto di protezione catodica.

Per tutti gli aspetti riguardanti l'installazione occorre comunque fare riferimento ai Tipici di montaggio (rif. 1.1).

7.2 ZONE DI PARTICOLARE PERICOLO

7.2.1 Recinzioni

La messa a terra delle recinzioni metalliche è importante perché su dette recinzioni si hanno i valori delle tensioni di contatto più elevati dell' impianto.

In linea di massima la recinzione deve essere posizionata all'esterno del dispersore intenzionale.

Usando questa soluzione dovranno essere presi i seguenti provvedimenti nel caso di recinzione metallica:

- la messa a terra della recinzione, realizzata con un conduttore perimetrale interrato in corrispondenza della recinzione oppure esternamente a distanza di circa 1 m, dovrà essere separata dal dispersore intenzionale.
- la recinzione dovrà inoltre essere sezionata elettricamente in più tratte.
- se necessario dovrà essere aumentata la resistività superficiale del terreno predisponendo lungo la recinzione e soprattutto all'esterno di questa strati di pietrisco od asfalto.

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 18 di of 24

7.2.2 Messa a terra delle guaine dei cavi interrati

Le guaine metalliche degli eventuali cavi interrati devono essere messe a terra per evitare sovratensioni pericolose.

Le messe a terra e la guaina stessa devono essere dimensionate per la massima corrente di terra prevedibile.

7.2.3 Scaricatori di sovratensione

I collegamenti a terra degli scaricatori devono essere il più possibile brevi ed a bassa resistenza.

E' ammesso usare per il collegamento le strutture di sostegno in acciaio a condizione che la sezione disponibile presenti una resistenza inferiore a quella di un conduttore di rame di sezione standard e che i collegamenti siano di dimensioni adeguate e non presentino resistenze addizionali quali vernici, ruggine ecc.

7.3 **MESSA A TERRA APPARECCHIATURE**

Il conduttore di protezione deve essere separato dal cavo di alimentazione della apparecchiatura, come indicato nei dettagli tipici impianto di terra (v. par. 2.1)

7.4 **CONTROLLO SOVRATENSIONI FUORI DAI LIMITI DELL'IMPIANTO**

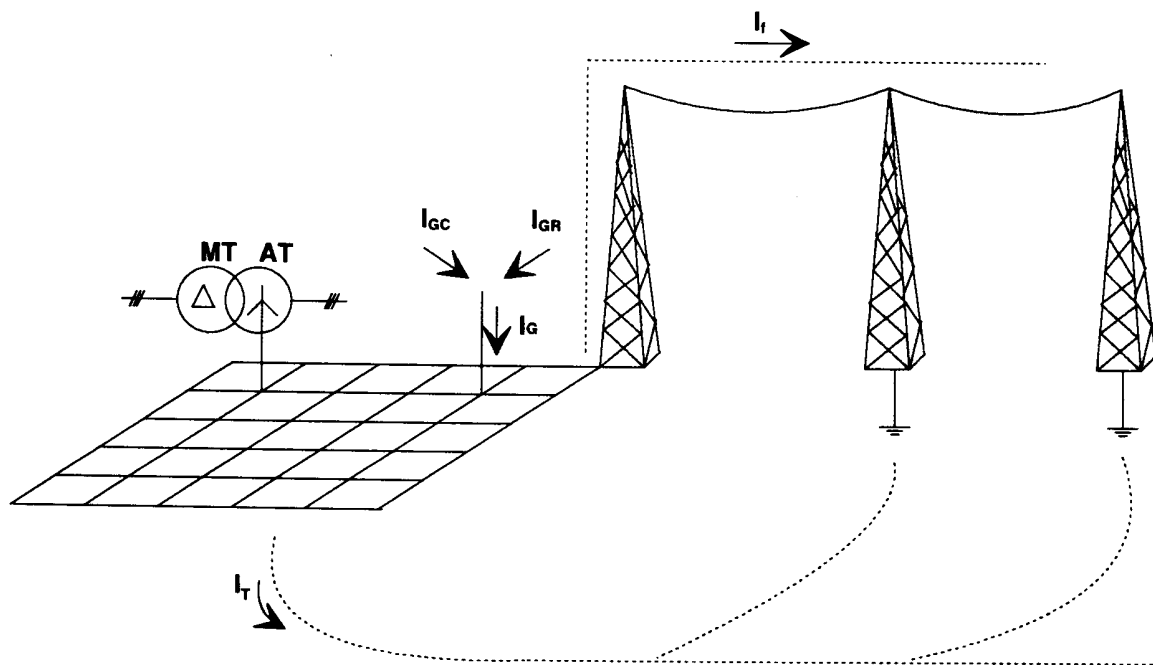
7.4.1 Funi di guardia

Per evitare di esportare sovratensioni di guasto fuori dai limiti dell'impianto risulta evidente che le funi di guardia se collegate ad entrambi gli estremi dei dispersori di stazione, drenano una consistente quota della corrente di guasto a terra verso la sorgente di alimentazione cioè il centro stella del trasformatore di rete.

Dove il collegamento è possibile il contributo delle funi di guardia può essere considerato nel progetto di terra dell'impianto utilizzatore. Ovviamente il coinvolgimento delle funi di guardia impone nel ritorno della corrente di guasto l'obbligo di controllare la sicurezza dei primi pali delle linee entranti nell'impianto nei riguardi della tensione di contatto: in buona sostanza bisognerà verificare le tensioni di passo e di contatto in prossimità dei sostegni, andando a migliorare adeguatamente i dispersori dei primi sostegni qualora tali tensioni risultassero superiori ai limiti di sicurezza consentiti.

(Vedere figura su pagina seguente)

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.		Documento Document no. 999GG00473	
	GUIDA DI PROGETTO		REV. 02	24/05/06
			Pagina Sheet	19 di of 24



FIGURA

7.4.2 Parti metalliche in uscita dai limiti dell'impianto

Tutte le parti metalliche aeree o interrate in uscita dal dispersore generale di terra, devono essere interrotte in almeno due punti all'esterno dell'impianto con l'adozione di giunti isolanti. E' inoltre importante considerare che, tensioni pericolose trasferite all'esterno dei limiti dell'impianto si possono riscontrare anche con dei conduttori che non necessariamente collegati metallicamente all'impianto di terra di centrale, si trovano a transitare in prossimità del dispersore stesso. (Interferenza dell'impianto di terra su conduttori metallici esterni)

Pertanto, potrebbe essere necessario provvedere all'inserzione di giunti e/o tratti isolanti anche su questi conduttori metallici previo accordi che dovranno essere concordati tra il gestore dell'impianto elettrico di centrale e quello delle parti metalliche che transitano.

Occorre precisare, che il numero esatto dei giunti isolanti da interporre e la relativa distanza fra i giunti stessi, saranno in funzione sia delle verifiche progettuali dell'impianto di terra che delle misurazioni effettuate in posto qualora vengano riscontrati valori di tensione superiori a quelli di sicurezza ammessi dalle normative.

In fase di misurazione tale distanza viene valutata sulla curva dell'andamento del potenziale elettrico all'esterno della rete di terra, scegliendo il punto dove il terreno sotto la corrente di guasto assume un potenziale di circa 250V.

(A tale proposito fare anche riferimento a quanto contenuto sull'argomento nelle norme CEI 11-1 e CEI 11-37)

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 20 di of 24

7.4.2.1 TUBAZIONI

Tutte le tubazioni metalliche (oleodotti, gasdotti, acquedotti ecc..) che escono dal dispersore generale di terra, devono essere interrotte in almeno due punti onde evitare tensioni di contatto pericolose.

Ciascuna interruzione deve essere realizzata in modo da impedire sia che una persona possa essere sottoposta a tensioni pericolose e sia che l'interruzione realizzata possa essere neutralizzata dalla conducibilità elettrica che è variabile in base al tipo di liquido contenuto nella tubazione stessa.

A tale proposito, sono state analizzate tre tipologie di interruzioni realizzate con giunti isolanti così come meglio rappresentato ed enunciato nei dettagli tipici di montaggio (Rif.to Paragrafo 2.1)

7.4.2.2 BINARI

I binari e le rotaie che fuoriescono dal dispersore generale di terra, devono essere interrotti fuori dalla periferie del dispersore con inserti isolanti situati nei giunti stessi dei binari, con canotti e rondelle isolanti per i bulloni, per una distanza mediamente uguale alla lunghezza di un treno, onde evitare che i vagoni cortocircuitino i giunti isolanti.

Naturalmente in caso di binari che vengono utilizzati per la trazione elettrica, dovranno essere presi opportuni accordi anche con il gestore della ferrovia.

A tale proposito fare anche riferimento a quanto rappresentato nei dettagli tipici di montaggio (Rif.to Paragrafo 2.1)

7.4.2.3 STRUTTURE METALLICHE

Un'analogia situazione a quella relativa alle tubazioni e alle rotaie si può creare nel caso di strutture metalliche uscenti dal dispersore di terra dell'impianto. E' ad esempio il caso delle travature di sostegno dei nastri trasportatori; onde evitare che la tensione di terra di Centrale venga portata all'esterno dell'impianto è necessario anche in questo caso provvedere all'interruzione elettrica con opportuni accorgimenti.

Le parti metalliche andranno isolate con doppia interruzione in prossimità del perimetro del dispersore di centrale e di quelli di altre unità interessate; tutti i tratti delle strutture metalliche che vengono ad essere resi così indipendenti dovranno essere messi a terra mediante dispersori propri fermo restando che ulteriori interruzioni intermedie andranno previste nel caso vengano misurati sul luogo valori di tensione superiori a quelli di sicurezza ammessi dalle normative.

7.4.3 Circuiti elettrici uscenti dai limiti di impianto

Il problema del trasferimento di tensioni pericolose deve essere considerato anche sui cavi e collegamenti elettrici che escono dall'area del dispersore principale di terra.

Questo comporta diversi aspetti:

- Lo spostamento di tensione di terra può provocare sovratensioni fra il circuito e la terra locale tali da superare i limiti di isolamento previsti.
- La stessa circostanza può creare tensioni pericolose al personale che opera per manutenzione sull'impianto a circuito fuori tensione.
- Un guasto nel circuito può provocare una corrente molto pericolosa (per entità in rapporto alla sua durata)

Relativamente ai sistemi di media tensione (6kV) questi essendo isolati riescono a sopportare in genere abbastanza agevolmente delle tensioni nell'ordine di quelle di guasto. Per i soli cavi occorre comunque provvedere ad interrompere gli schermi lungo il percorso (Per esempio in corrispondenza di una giunzione) e collegare a terra alle estremità i due tratti della schermatura e, se presente anche della relativa armatura (solo per cavi armati)

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 21 di of 24

Relativamente ai sistemi di bassa tensione (380V) qualora il trasformatore che alimenta il sistema ha il neutro collegato al dispersore locale non esistono grossi problemi; in caso contrario bisogna effettuare un'attenta verifica della corrente di guasto verso terra.

Un'altra condizione pericolosa da considerare è quello di un valore minimo di guasto a terra per alta resistenza tale da non fare intervenire alcuna protezione; in questo caso bisogna tenere conto della massima corrente di non intervento delle protezioni sulla linea di alimentazione e riferirne le tensioni provocate al valore di sicurezza di 65V.

Nel caso dell'alimentazione di circuiti di illuminazione stradale (per viali e recinzioni) che si estendono notevolmente al di là del dispersore generale di terra, è buona norma interrompere la continuità elettrica del sistema all'uscita del dispersore stesso inserendo un trasformatore di "isolamento" (rapporto 1:1) avente il secondario totalmente isolato verso il primario e verso la massa dimensionato per una tensione di prova di 8kV.

Il trasformatore di isolamento sarà collocato entro il perimetro del dispersore collegando a questo la massa (carcassa) mentre il neutro del suo secondario varrà lasciato isolato da terra.

In ogni caso quando il potenziale di guasto supera il valore di tensione nominale del sistema, è genericamente buona norma di sicurezza fuoriuscendo dall'area del dispersore generale di terra con cavi di B.T. interrompere la continuità elettrica del sistema inserendo opportuni trasformatori di isolamento con caratteristiche standard uguali a quanto sopra precisato per i circuiti di illuminazione stradale; ovviamente qualora il potenziale superi il valore di 8kV, il trasformatore sarà opportunamente dimensionato in funzione del potenziale elettrico progettato e successivamente verificato tramite misurazioni in campo.

Per quanto riguarda i cavi relativi ai sistemi di controllo e segnalazione i problemi legati alle tensioni pericolose trasferite all'esterno della rete di terra, sono più complessi e vanno esaminati caso per caso in relazione al tipo di circuito e alle possibili tensioni in questione. Di massima si può comunque dire che per circuiti a 110V c.c. e 127V c.a. l'estensione fino a 100-200m all'esterno della rete di terra non dovrebbe comportare inconvenienti; l'estensione all'esterno della rete per circuiti a tensione più bassa andrebbe evitata.

Qualora i cavi all'esterno della rete di terra siano posati in tubazioni metalliche, queste andranno interrotte in più punti del percorso inserendo pozzetti in muratura oppure inserendo in alternativa ai pozzetti tronchi di tubazioni in materiale isolante. (PVC o cemento)

Per ciò che riguarda infine i circuiti di telecomunicazione, questi andranno protetti interrompendo la continuità elettrica del sistema in uscita dai limiti dell'impianto inserendo degli opportuni traslatori dimensionati anch'essi per una tensione di prova di 8kV.

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 22 di of 24

8. APPENDICI

8.1 APPENDICE “A” - ASPETTI PARTICOLARI PER LE CENTRALI IDROELETTRICHE

Nelle Centrali idroelettriche si distinguono le seguenti situazioni:

A) Impianti di dimensioni e potenza medio-piccole

Questi impianti sono caratterizzati da:

- una centrale all'aperto in edificio autonomo;
- trasformatori elevatori e stazione AT all'aperto di modeste dimensioni;
- collegamento tra i gruppi e stazione in cavo o con condotto sbarre.

Per questi impianti, che si sviluppano su di un'unica superficie, si realizza una rete di terra a graticcio comune alla Centrale ed alla stazione AT.

B) Impianti di dimensioni e potenza medio-grandi

Questi impianti sono caratterizzati da:

- una Centrale realizzata all'interno di una o più caverne affiancate, di cui una per i gruppi di generazione (e pompaggio) ed una per i trasformatori elevatori (ed ove possibile la stazione AT blindata in SF₆);
- stazione elettrica AT all'aperto per l'interconnessione alla rete aerea a 150,220 o 380 kV;
- collegamento dei gruppi con l'esterno attraverso una galleria di accesso di alcune centinaia di metri, nella quale sono disposti i cavi AT di collegamento con la stazione esterna. Per collegamenti brevi e/o potenze limitate, i trasformatori sono di norma all'esterno ed il collegamento si realizza in cavo o con un condotto sbarre MT. I cavi AT o il condotto sbarre MT possono avere talora un percorso in pozzo distinto dalla galleria di accesso;
- edificio di controllo centralizzato dell'intero impianto all'aperto, collegato alla Centrale con caverie posate in parallelo ai cavi AT o al condotto sbarre MT.

In tale contesto non è possibile realizzare un'unica rete di terra e pertanto si realizza una rete di terra per la Centrale ed una rete di terra per la stazione AT. Le due reti di terra vengono quindi collegate elettricamente.

Le funzioni principali del dispersore sono:

- disperdere la corrente di guasto nel terreno nel caso di guasto a terra sul sistema AT;
- consentire l'intervento delle protezioni atte ad eliminare il guasto in poche decine o centinaia di millisecondi, onde contenere entro limiti accettabili le tensioni di passo e di contatto nell'area occupata dalla Centrale, la tensione totale di terra all'esterno della Centrale ed evitare effetti disastrosi conseguenti alla circolazione della corrente di guasto nei conduttori.

Affinchè il dispersore assolva costantemente le funzioni sopra esposte, deve soddisfare i seguenti requisiti:

- avere una bassa resistenza di terra;
- essere inalterabile nel tempo, cioè resistente alle sollecitazioni meccaniche ed alle sollecitazioni chimiche (aggressività del terreno e corrosione galvanica).

	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 23 di of 24

8.2 APPENDICE “B” - ASPETTI PARTICOLARI PER LE STAZIONI ISOLATE IN SF6 (BLINDATE)

8.2.1 Considerazioni generali

Durante il funzionamento normale di una stazione blindata a fasi separate, gli involucri sono percorsi per effetto induttivo da correnti prossime a quelle che passano nei conduttori di fase.

Dato che gli involucri sono tutti collegati a terra, ne deriva una richiusura di dette correnti attraverso i collegamenti di terra che mettono in parallelo gli involucri delle varie fasi.

Il Costruttore deve progettare le apparecchiature e la loro messa a terra in modo che la circolazione di dette correnti non provochi significative differenze di potenziale fra le varie parti del blindato.

Anche in caso di guasto a terra, sia interno al blindato che esterno, provoca la circolazione di notevoli correnti negli involucri, dando origine a cadute di tensione di tipo induttivo che possono aumentare le tensioni di passo e di contatto a cui l'operatore può essere soggetto.

8.2.2 Verifica delle tensioni di passo e di contatto

Il criterio per la verifica di dette tensioni per i blindati è, in base a quanto detto sopra:

$$(V_t^2 + V_{bmax}^2)^{0,5} < V_c \text{ ammissibile}$$

ove V_t è la tensione di passo o di contatto relative all'area in questione e V_{bmax} è la massima differenza di potenziale fra due punti del blindato in condizioni di guasto, che deve essere calcolata dal Costruttore in collaborazione con il Committente che fornirà i parametri della rete e dell'impianto.

Si rimanda al Rif 2.10 Cap 8 per ulteriori approfondimenti.

 L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.	CENTRALI ELETTRICHE E STAZIONI A.T.	Documento Document no. 999GG00473
	GUIDA DI PROGETTO	REV. 02 24/05/06
		Pagina Sheet 24 di of 24

8.3 APPENDICE “C” - COEFFICIENTI DI SPAZIATURA DELLA RETE DI TERRA

I coefficienti usati nelle formule semplificate di calcolo delle tensioni di passo e di contatto sono definiti come segue:

a) Tensione di passo

K_s : coefficiente di tipo geometrico che tiene conto del gradiente di potenziale alla periferia della rete di terra.

Assumendo che la massima tensione di passo si verifichi a distanza h dal limite della maglia, ed essendo h la profondità di interrimento della maglia stessa.

Per h compreso fra 0,25 e 2,5 m si ha:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

ove D è il passo della maglia in m

n è il numero dei conduttori in parallelo in una direzione

K_i : coefficiente correttivo che tiene conto della asimmetria di distribuzione della corrente nella maglia del dispersore:

$$K_i = 0.656 + 9.172n$$

b) Tensione di contatto

K_m : coefficiente di tipo geometrico che tiene conto del gradiente di potenziale al centro del dispersore.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

ove K_{ii} vale:

1 per dispersori con puntazze lungo il perimetro oppure sia lungo il perimetro che all'interno

$1/((2n)^{2/n})$ per dispersori senza puntazze oppure con poche puntazze, di cui nessuna sul perimetro

$$K_h = (1+h)^{0.5}$$

K_i : coefficiente correttivo come sopra.

Le formule sopra riportate, sono ricavate dalla IEEE Std 665- 1995.