



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU

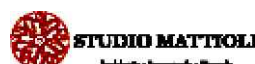


M2 C2 Investimento 4.2 "Sviluppo trasporto rapido di massa"

RTI Progettisti:

SYSTRA

SOTECNI
SYSTRA GROUP



PROGETTO DEFINITIVO DELLA SECONDA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (TRATTO NORD LINEA VERDE)

INGEGNERIA DI SISTEMA ELABORATI GENERALI

Criteri per la messa a terra

COMUNE DI BOLOGNA
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE
ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO
ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETERIA TECNICA

ing. Barbara Baraldi
arch. Virginia Borrello
ing. Giulio Cimbali
geom. Agnese Fero
ing. Stefania Guadagnini
geom. Luciano Notte
ing. Lisa Ombra
ing. Marco Pesare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

RESPONSABILE DI COMMESSA
ING. PAOLO MARCHETTI

COORDINATORE TECNICO
ING. ALESSANDRO PIAZZA

SISTEMA TRANVIARIO
ING. SANTI CAMINITI

ARCHITETTURA E INSERIMENTO URBANISTICO
ARCH. SEBASTIANO FULCI DE SARNO

OPERE A VERDE
ARCH. NICOLA CANTARELLI

OPERE STRUTTURALI
ING. STEFANO TORTELLA

SEGNALAMENTO E TELECOMUNICAZIONI
ING. ANGELA TORTORELLA

AMBIENTE
PROF. MATTEO MATTIOLI

SICUREZZA
ARCH. SERGIO MOSCHEO

ARCHEOLOGIA
DOTT. CRISTINA BIGAZZI

BIM MANAGER
GEOM. MIRKO CASAROLI

RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE
ING. SANTI CAMINITI

IMPIANTI TECNOLOGICI
ING. SIMONE VILLA

STUDI TRASPORTISTICI
ING. ANDREA SPINOSA

VIABILITA' INTERFERENTE E SOTTOSERVIZI
ING. PIETRO CAMINITI

IDRAULICA E IDROLOGIA
ING. ANDREA BENVENUTI

DEPOSITO
ING. GIORGIO COLETTI

ARMAMENTO
ING. MAURIZIO FALZEA

GEOLOGIA E GEOTECNICA
DOTT. GEOL. ANTONIO PAONE

TRAZIONE ELETTRICA
ING. DOMENICO D'APOLLONIO

IMPIANTI MECCANICI
ING. SALVATORE GIUA

COMMESSA	FASE	LOTTO	WBS	DISCIPLINA	TIPO	NUMERO	REV.	SCALA	NOME FILE
B381	C	D	X00	STM	XXX	RT 05	A	-	B381C-D-X00-STM-XXX-RT-05-A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	Ago. 2023	PRIMA EMISSIONE	G. IASEVOLI	A. TORTORELLA	S. CAMINITI
B					
C					
D					

Indice

1. PREMESSA.....	3
2. ACRONIMI.....	4
3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
4. DEFINIZIONI	5
4.1 TERRA DI STRUTTURA	5
4.2 TERRA COMUNE ESTERNA (TCE)	6
4.3 TERRA DI TRAZIONE	6
4.4 DISPOSITIVO DI LIMITAZIONE DELLA TENSIONE	6
4.5 ZONA DELLA LINEA AEREA DI CONTATTO E DEL PANTOGRAFO (O CONO DI CADUTA).....	7
5. SISTEMA COMPLESSIVO DI MESSA A TERRA.....	7
5.1 FERME	8
5.2 SOTTOSTAZIONI DI PIENA LINEA	8
5.3 LINEA	9
5.4 TERRA DI TRAZIONE (O CIRCUITO DI RITORNO).....	9
5.5 TERRA DI SCARICATORI	10
5.6 MESSA A TERRA DELLA LINEA DI CONTATTO (COLLEGAMENTO A ROTAIA)	11
5.7 SCHERMI CAVI MT	12
6. PROVVEDIMENTI CONTRO I PERICOLI DA ELETTROCUZIONE	13
6.1 DIMENSIONAMENTO TERMICO PER I CONDUTTORI DI TERRA.....	13
6.2 COLLEGAMENTI CON LA RETE MT	15
6.2.1 CRITERI DI CALCOLO E REQUISITI GENERALI PER LE RETI TERRA DI SSE	15
6.2.2 CRITERI DI PROGETTO E VERIFICA DEGLI IMPIANTI DI TERRA.....	16
6.2.3 CONSIDERAZIONI GENERALI	19

6.2.4	METODO DI MISURA DELLA RESISTENZA DI TERRA CON METODO VOLT-AMPEROMETRICO	20
6.3	COLLEGAMENTI CON LA RETE B.T.	21
6.4	SISTEMA DI TRAZIONE IN CORRENTE CONTINUA	24
6.4.1	CIRCUITO DI RITORNO DI PIENA LINEA	24
6.4.2	APPARECCHIATURE CONTENENTI PARTI O COMPONENTI RELATIVE AL SISTEMA DI TRAZIONE C.C.	25
6.4.3	SCELTA DEL DISPOSITIVO DI LIMITAZIONE DELLA TENSIONE	25
6.4.4	COLLEGAMENTI PROTETTIVI A TERRA/ BINARIO	26

1. PREMESSA

Il presente documento, relativo al sistema della nuova Linea Verde della città di Bologna, si prefigge quanto segue:

- individuare le cause che possono dar luogo a situazioni di pericolo da elettrocuzione derivante dai contatti diretti ed indiretti;
- fornire di conseguenza indicazioni atte a definire i provvedimenti necessari per garantire la sicurezza elettrica degli impianti fissi, del pubblico e del personale addetto all'esercizio.

Si sottolinea qui il fatto che i provvedimenti da adottarsi sono rivolti a diverse tecnologie e sottosistemi facenti parte della linea tranviaria, che dovranno quindi implementarne i principi nei loro progetti fin dalle fasi iniziali.

Tali sottosistemi sono principalmente:

- Circuito di ritorno di trazione
- Segnalamento
- Telecomunicazioni e sistema di telecontrollo/telecomando (SCADA)
- Alimentazione elettrica di trazione e linea di contatto
- Alimentazione elettrica in media e bassa tensione
- Impianti di terra

Per ottenere un efficace risultato nell'applicazione dei principi qui esposti, è anche richiesto uno stretto coordinamento con l'Ente Distributore di energia e con le Municipalità locali, che possono avere strutture e/o apparecchiature ubicate nell'area di influenza della rete tranviaria, quindi soggette ad osservare le prescrizioni del presente documento.

2. ACRONIMI

BT	Bassa Tensione
CA	Corrente Alternata
CC	Corrente Continua
MT	Media Tensione
SSE	Sottostazione Elettrica
VLT	Voltage Limiting Device.

3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Si riportano di seguito le principali norme di riferimento, a titolo esemplificativo non esaustivo:

- CEI EN 50522 “Messa a terra degli impianti elettrici a tensione superiore a 1 kV c.a.
- CEI 64-8 “Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua”
- CEI EN 50122-1 “Applicazioni ferroviarie – Installazioni fisse. Parte 1: Provvedimenti di protezione concernenti la sicurezza elettrica e la messa a terra” (ed. 2012)
- CEI EN 50122-2 “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Impianti fissi – Parte 2: Protezione contro gli effetti delle correnti vaganti causate da sistemi di trazione a corrente continua” (ed. 2012)
- Ente Nazionale di Unificazione (UNI) Norme Applicabili
- Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) Norme Applicabili
- D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106, “Testo unico sulla salute e la sicurezza sul lavoro”.

4. DEFINIZIONI

La Norma EN 50122-2 (ed. 2012) prevede l'esistenza di tre sistemi di masse metalliche denominate:

- Terra di struttura del sistema di trazione (TS);
- Terra comune esterna (TCe);
- Terra di trazione o circuito di ritorno.

Inoltre definisce:

- Dispositivo di limitazione della tensione;
- Zona della linea aerea di contatto e del pantografo.

Viene qui inoltre fornita una definizione del cosiddetto circuito di terra di protezione della linea di contatto.

Per tutte le altre definizioni si rimanda alle normative di riferimento, in particolare alla EN50122 (ed. 2012).

4.1 TERRA DI STRUTTURA

La Norma EN 50122-2 (ed. 2012) dà per il sistema "Terra di struttura" la seguente definizione:

"interconnessione elettrica delle armature delle strutture...", "armature delle strutture di cemento armato elettricamente collegate per tratti significativamente lunghi" ove dette strutture sono riconducibili a gallerie, ponti, viadotti ecc...

Tale terra di struttura include i ferri di armatura della galleria o delle altre strutture, e dell'eventuale conduttore equipotenziale collegato ad essi in parallelo.

Per quanto riguarda le linee tranviarie tale Terra di struttura può considerarsi non presente, eccettuati i tratti ove siano presenti strutture del tipo suddetto di dimensioni significative.

Ove però sia presente un circuito di terra di protezione, quest'ultimo può considerarsi effettivamente Terra di Struttura, ai fini delle prescrizioni fornite dal presente documento.

4.2 TERRA COMUNE ESTERNA (TCE)

La Norma EN 50122-2 (ed. 2012) dà per il sistema “Terra comune esterna” la seguente definizione:

“insieme delle strutture metalliche interrate in vicinanza della linea di trazione e delle relative strutture ferroviarie e non collegate metallicamente ad esse ed in nessun caso afferenti al sistema di trazione”.

Tale sistema include le strutture adiacenti alla linea, normalmente interrate (tubazioni, sottoservizi ecc...), non collegate al sistema di trazione ma potenzialmente soggette a correnti vaganti.

4.3 TERRA DI TRAZIONE

La Norma EN50122-2 (ed. 2012) dà per il circuito di ritorno (altrimenti definibile anche come “Terra ferroviaria” o “Terra di trazione”) la seguente definizione:

“Tutti i conduttori che costituiscono una via prestabilita della corrente di ritorno della trazione e della corrente nelle condizioni di guasto”

In generale, la terra ferroviaria è costituita dai binari.

4.4 DISPOSITIVO DI LIMITAZIONE DELLA TENSIONE

“Dispositivo per la limitazione della tensione fra le masse ed il circuito di ritorno per realizzare un collegamento aperto in condizioni normali di esercizio”.

Il dispositivo si commuta in chiusura per determinati valori di tensione e, a seguito dell'intervento:

- si ripristina automaticamente dopo un massimo di 10 s
- non si ripristina automaticamente (in tal caso deve essere prevista una procedura per rilevare ed eliminare in modo rapido la causa dell'evento, e ripristinare sia le condizioni di collegamento aperto, sia le condizioni di sicurezza provvedendo al ripristino o alla sostituzione del dispositivo stesso)

Il dispositivo in oggetto verrà denominato nel seguito anche VLD (Voltage Limiting Device).

4.5 ZONA DELLA LINEA AEREA DI CONTATTO E DEL PANTOGRAFO (O CONO DI CADUTA)

Si definisce come segue:

“Zona i cui limiti non sono generalmente superati né da una linea di contatto danneggiata, né da un pantografo in tensione che abbia sviato, o da suoi frammenti”

Le dimensioni minime di tale zona sono definite secondo normativa EN 50122-1 (ed. 2012).

Le dimensioni X, Y e Z della zona della linea di contatto e della zona del captatore di corrente da utilizzare sono:

$X = 3 \text{ m}$; $Y = 3 \text{ m}$; $Z = 1 \text{ m}$.

5. SISTEMA COMPLESSIVO DI MESSA A TERRA

Il sistema complessivo di terra sarà così costituito da:

- Terra di Trazione costituita dal circuito di ritorno;
- Terra di Struttura normalmente non presente, o presente solo in corrispondenza di punti singolari, ossia di tratte ove siano presenti manufatti che presentino armature metalliche o parti conduttrici strutturali collegate fra loro per sezioni significativamente lunghe, quali gallerie o viadotti (è riconducibile alla Terra di struttura l'eventuale sistema costituito da componenti conduttori longitudinali, normalmente in ferro, annegati nella soletta in cemento armato (o struttura equivalente) a supporto della sede tranviaria. Tale sistema viene interrotto elettricamente e reso accessibile ad intervalli);
- Terra Comune Esterna, costituita dalle strutture metalliche interrate nel terreno circostante;
- Dispersori di terra (che hanno la funzione di disperdere le correnti di guasto verso la terra lontana) di fermata, sottostazione o linea, che sono da considerarsi parte della Terra Comune Esterna.

La Terra di trazione dovrà essere isolata dalla Terra di Struttura (se esistente) e dalla Terra Comune esterna, secondo quanto illustrato ai paragrafi seguenti.

5.1 FERMATE

Tutte le strutture metalliche ed i ferri di armatura dei manufatti e delle banchine di fermata saranno collegati al dispersore di terra di fermata, al quale a sua volta sarà collegata la barra di terra del quadro di distribuzione in bassa tensione di fermata.

I pali della linea aerea posati nell'area di banchina dovranno essere collegati a terra al dispersore.

I dispersori di terra di fermata saranno atti a garantire condizioni di sicurezza per le persone a seguito di possibili guasti ai circuiti di distribuzione in bassa tensione.

I seguenti requisiti dovranno inoltre essere rispettati:

- dovranno essere effettuate misure di resistività in corrispondenza di ciascun sito prima della stesura del dispersore;
- i componenti dell'impianto di terra dovranno essere tali da sopportare le massime sollecitazioni derivanti dalle condizioni di guasto che possono interessare il sistema senza alcun deterioramento, danneggiamento o compromissione delle caratteristiche meccaniche o della durata nel tempo dei componenti stessi;
- si prevederanno appositi collegamenti per misure in posizioni idonee;
- dovranno essere previsti pozzetti ispezionabili;
- i collegamenti fra diversi elementi del dispersore saranno normalmente effettuati tramite saldatura;
- adeguate prove e verifiche dovranno essere effettuate, quali: verifica della continuità elettrica del sistema; misura della resistenza di terra del dispersore; verifica delle sezioni dei conduttori costituenti l'impianto.

5.2 SOTTOSTAZIONI DI PIENA LINEA

Tutte le strutture metalliche e i ferri di armatura dei manufatti della sottostazione saranno collegati alla rete di terra di sottostazione, a sua volta collegata al conduttore equipotenziale.

I criteri costruttivi di tale dispersore di terra prevedono una rigorosa separazione dai dispersori di terra delle fermate e da eventuali altri dispersori relativi ad apparecchiature e/o strutture lungo linea.

Ciò per evitare in linea di principio sia trasferimenti di tensione pericolosi, sia un'alterazione di eventuali campi elettrici esterni che possa creare pericolo di corrosione per strutture metalliche interrate.

Le reti di terra di sottostazioni adiacenti possono essere collegate attraverso gli schermi dei cavi MT con eventuali conduttori in parallelo, se necessario ai fini del contenimento delle tensioni di passo e contatto.

Per quanto concerne i criteri relativi al dimensionamento delle reti di terra delle SSE, si rimanda al paragrafo 6.2.2.

5.3 LINEA

Le apparecchiature ubicate lungo linea verranno messe a terra sia attraverso dispersore locale, sia tramite conduttore di protezione (PE) collegato alla barra di terra del relativo quadro di distribuzione, in funzione dell'ubicazione delle apparecchiature stesse all'interno od all'esterno del cono di caduta della linea di contatto.

5.4 TERRA DI TRAZIONE (O CIRCUITO DI RITORNO)

Il circuito di ritorno, costituito dai binari di corsa, dovrà essere isolato da terra secondo i criteri esposti nel documento "Provvedimenti protettivi contro le correnti vaganti".

Dovranno inoltre essere seguiti tutti provvedimenti legati a migliorare la conduttività longitudinale dei binari, allo scopo sia di minimizzare le correnti vaganti sia di migliorare le condizioni di sicurezza.

In corrispondenza delle sottostazioni dovranno prevedersi collegamenti in cavo isolato fra le rotaie e il negativo di dimensioni adeguate commisurate alle correnti di ritorno del sistema. Il livello di isolamento dei cavi negativi (compresi anche i collegamenti di parallelo rotaia-rotaia, binario- binario e di continuità) dovrà essere riferito alla tensione nominale della linea aerea, per tenere conto della possibilità di guasto linea-rotaia (oltre che per fornire maggiore garanzia rispetto al problema delle correnti vaganti).

Tutti i collegamenti negativi alla rotaia (siano essi di ritorno in SSE, di continuità, parallelo o protezione) dovranno essere effettuati in posizioni e con modalità compatibili col sistema di segnalamento (con eventuale interposizione di connessioni induttive ove richiesto).

5.5 TERRA DI SCARICATORI

Sono stati previsti scaricatori installati all'esterno della sottostazione (in testa ai pali di alimentazione della linea di contatto), con le seguenti modalità:

- gli scaricatori dovranno essere collegati ad un proprio dispersore di terra, separato da quello di sottostazione, costituito da uno o più picchetti di terra in pozzetto ispezionabile collocato ad una distanza massima di 1 m dal palo;
- eventuali collegamenti dal pozzetto principale ad altri picchetti dovranno essere sigillati;
- il dispersore di terra dovrà avere una resistenza (di solito il valore è dato dal fornitore) adeguata a garantire il corretto funzionamento dello scaricatore stesso, comunque dell'ordine dei 5 Ω normali (10 Ω in casi particolari); tali valori sono relativi ai tipi ad ossido di zinco comunemente usato;
- la connessione verso terra dovrà sempre essere il più breve possibile e dovranno essere evitati angoli o curve strette nel cavo di collegamento (ciò deve essere garantito anche nel caso lo scaricatore si trovi in sottostazione).

Il dimensionamento e le caratteristiche tecniche sono state determinate in funzione dei dati della simulazione elettrica di trazione:

Permanent working voltage	1 kV	
Nominal voltage	1.25 kV	
Nominal discharge current	10 kA	
High current pulse	2 x 100 kA	

Gli scaricatori dovranno garantire un bassissimo livello di dispersione di corrente verso terra, il valore dovrà essere dichiarato dal fornitore e la sua accettabilità valutata nell'ambito del sistema generale.

Per apparecchiature a palo, tutta la carpenteria di sostegno e relativi accessori dovrà essere isolata dal palo stesso.

Dopo il funzionamento, lo scaricatore dovrà sempre auto ripristinarsi in condizione di circuito aperto; in caso di guasto (ossia nel caso l'apparecchiatura rimanga in stato di chiuso anche dopo la scarica), lo scaricatore drenerebbe verso terra una corrente non sufficiente a far aprire l'extrarapido di SSE e commisurata al valore di resistenza di terra del dispersore, con conseguente pericolo di produrre una tensione di passo pericolosa in corrispondenza del pozzetto di terra.

Dovrà pertanto essere garantito che la modalità di guasto dello scaricatore stesso evolva verso una condizione di circuito aperto entro tempi compatibili con la norma EN 50122-1 (ed. 2012) in funzione del livello di tensione dell'impianto.

Non sono previsti dispositivi di sconnessione automatica dello scaricatore.

5.6 MESSA A TERRA DELLA LINEA DI CONTATTO (COLLEGAMENTO A ROTAIA)

La linea di contatto necessita di essere collegata a rotaia, sia per le normali operazioni di manutenzione, sia durante eventuali situazioni di emergenza.

Se i sezionatori afferenti alla linea stessa sono a tre posizioni tale funzione può essere svolta a livello di manovra del sezionatore stesso; in caso contrario la messa in sicurezza della linea viene affidata a dispositivi o fioretti di messa a terra (anche nel primo caso è sempre e comunque raccomandato di usare tali dispositivi anche per realizzare una messa a rotaia a vista).

Per realizzare tale funzione, quando la rotaia è prontamente accessibile (tratti in ballast, o binario posato su soletta in cemento armato o simile) il dispositivo si collega direttamente alla rotaia stessa.

Per i tratti in sede stradale, dove la rotaia è di solito a gola ed annegata nella sede stessa, si utilizza un dispositivo con apposite ganasce per il collegamento diretto alla rotaia stessa.

5.7 SCHERMI CAVI MT

Lo schermo dei cavi MT di arrivo è frequentemente collegato a terra ad entrambe le estremità, cioè sia lato cabina ENEL sia lato sottostazione elettrica del sistema di trazione. Questa prassi è comune nelle aree urbanizzate con alta/media densità di consumi elettrici, ed è in accordo con la definizione di impianto di terra globale (ossia di un impianto di terra realizzato con l'interconnessione di più impianti).

Tale accorgimento permette la ripartizione delle correnti di guasto col collegamento fra la terra dell'ente distributore e quella della sottostazione elettrica di conversione, portando così ad una riduzione delle tensioni totali di terra e conseguentemente delle tensioni di passo e contatto negli impianti di terra singoli, a tutto vantaggio della sicurezza.

Tuttavia, possono presentarsi circostanze in cui il collegamento ad entrambe le estremità non è perseguibile, come le seguenti:

- caso di collegamenti con cabine dell'ente distributore il cui impianto di terra può trasferire valori molto elevati di tensione totale di terra;
- diverse disposizioni dell'ente distributore stesso;
- casi in cui la situazione dei campi elettrici nel terreno porti alla circolazione negli schermi di valori elevati di corrente;
- casi in cui la possibile contiguità fra sottostazioni di trazione o dell'ente distributore ed i binari, o possibili percorsi paralleli fra la rete di media tensione ed i binari stessi possano provocare la circolazione negli schermi di elevati valori di corrente di trazione

Di conseguenza, in sede di progetto esecutivo/costruttivo dovranno essere svolte comunque valutazioni più precise circa la convenienza di collegare gli schermi ad entrambi i lati, coordinandosi opportunamente con l'Ente distributore. Tale valutazione, e la conseguente scelta di collegare gli schermi dei cavi deve essere condivisa con l'Ente distributore e, per questo motivo, si rimanda alla successiva fase progettuale, essendo

peraltro influente sulla quantificazione economica dei lavori oggetto della presente progettazione.

Risulta evidente che, nel caso in cui gli schermi siano collegati a terra solo ad un'estremità, occorrerà tenere in considerazione le possibili tensioni trasferite che si possono manifestare all'estremità isolata, adottando opportuni accorgimenti che consistono principalmente nel rendere inaccessibile con adeguato isolamento tale estremità.

Nel caso in cui lo schermo dei cavi di interconnessione fra SSE adiacenti risulti collegato a terra ad una sola estremità, occorre comunque prevedere una predisposizione per il collegamento a terra ad entrambe le estremità e per un ulteriore eventuale conduttore di rinforzo, denominato conduttore di terra, da collegarsi in parallelo allo schermo ed avente sezione opportuna (in funzione della effettiva sezione dello schermo e della percentuale di corrente di guasto circolante nello stesso).

Nel caso di collegamento dello schermo ad entrambi i lati, si raccomanda la predisposizione per un adeguato monitoraggio in sottostazione della corrente circolante nello schermo stesso, allo scopo di controllare ed eventualmente rettificare la configurazione adottata: a tal fine si potrà prevedere la possibilità di disconnettere da terra lo schermo ad una delle estremità a seconda delle esigenze.

Allo scopo di ridurre il pericolo e comunque l'entità di eventuali correnti convogliate negli schermi, questi ultimi dovranno essere adeguatamente isolati da terra per tutto il loro percorso.

Alla luce di quanto sopra, la rete di terra delle singole sottostazioni è stata progettata senza considerare in forma cautelativa il contributo degli impianti di terra adiacenti.

6. PROVVEDIMENTI CONTRO I PERICOLI DA ELETTROCUZIONE

6.1 DIMENSIONAMENTO TERMICO PER I CONDUTTORI DI TERRA

Per quanto riguarda il dimensionamento termico dei conduttori di terra appartenenti alla SSE, occorre valutare quale sia la situazione più gravosa fra le due di seguito elencate:

- corto circuito lato corrente continua;
- corto circuito lato corrente alternata (B.T.).

I valori di corrente di corto circuito in MT sono tali da non essere dimensionanti da un punto di vista termico per i conduttori di terra.

Occorrerà pertanto considerare le due situazioni di guasto applicando le seguenti formule:

$$A_{Dcc} = \frac{\sqrt{I_{Gcc}^2 \cdot t}}{K} \quad ; \quad A_{Dbt} = \frac{\sqrt{I_{Gbt}^2 \cdot t}}{K}$$

dove:

A_{Dcc} [mm²] = sezione calcolata valutando la corrente di guasto a terra lato c.c. ;

A_{Dbt} [mm²] = sezione calcolata valutando la corrente di guasto a terra lato BT;

I_{Gcc} [A] = corrente di guasto a terra lato corrente continua;

I_{Gbt} [A] = corrente di guasto a terra lato bassa tensione;

t [s] = tempo di eliminazione del guasto;

k = coefficiente che tiene conto delle caratteristiche del materiale che costituisce il conduttore e delle temperature iniziali e finali (per conduttori in rame isolati con cloruro di polivinile si ha $K = 143$).

Normalmente il guasto a terra lato corrente continua risulta essere più gravoso dal punto di vista del dimensionamento termico rispetto al guasto a terra lato bassa tensione; tuttavia possono verificarsi casi in cui, a causa di taglie particolarmente grandi dei trasformatori per i servizi ausiliari, la sollecitazione termica dovuta ad un guasto a terra lato bassa tensione è maggiore della precedente.

Anche per i conduttori di terra appartenenti alle fermate o lungo linea, nelle zone comprese all'interno del cono di caduta, occorre verificare quale sia il caso più gravoso fra il guasto a terra lato corrente continua e lato bassa tensione, tenendo presente che,

con buona approssimazione, la corrente di guasto monofase a terra in lontananza dal trasformatore è pari alla metà della corrente di cortocircuito trifase.

Per i conduttori di terra appartenenti alle fermate o lungo linea, nelle zone esterne al cono di caduta, il dimensionamento termico verrà eseguito tenendo conto del solo valore di corrente di cortocircuito dovuto ad un guasto lato bassa tensione.

6.2 COLLEGAMENTI CON LA RETE MT

Normalmente i collegamenti con la rete MT si trovano in corrispondenza delle sottostazioni elettriche, che ricevono o una alimentazione diretta dall'ente distributore di energia, o una o più alimentazioni dalle sottostazioni elettriche adiacenti tramite l'eventuale anello di distribuzione MT interno al sistema tranviario, od entrambe le alimentazioni (ossia dall'ente distributore e dalla/e sottostazioni adiacenti).

I provvedimenti contro i pericoli da elettrocuzione dovuti a guasti lato corrente alternata (rete media tensione) risultano in un corretto dimensionamento degli impianti di terra (reti di terra delle sottostazioni elettriche di conversione).

Si rimanda al paragrafo successivo per la definizione dei criteri di dimensionamento e della relativa metodologia di calcolo, tenendo in considerazione le caratteristiche della rete di alimentazione ENEL in MT, le caratteristiche del sistema di distribuzione in MT del sistema tranviario, le caratteristiche delle apparecchiature installate, il tipo di collegamento a terra degli schermi dei cavi MT ed i valori limite di tensione totale di terra, tensioni di passo e di contatto.

Per il dimensionamento ai fini della sicurezza, questi ultimi valori sono stabiliti dalla norma CEI EN 50522. Per quanto riguarda la tipologia del guasto da considerare per il dimensionamento dell'impianto di terra in corrispondenza delle sottostazioni elettriche, la corrente di guasto monofase a terra è il valore di riferimento.

6.2.1 CRITERI DI CALCOLO E REQUISITI GENERALI PER LE RETI TERRA DI SSE

L'impianto tranviario oggetto di progettazione è alimentato da n. 2 sottostazioni elettriche, che trasformano e convertono la tensione a 15kV proveniente dalla rete dell'ente fornitore nella tensione continua a 750V di alimentazione della linea di contatto.

Il sistema riceve alimentazione a 15kV in corrispondenza della SSE 12; l'altra SSE è interconnessa tramite cavo di distribuzione MT ed il sistema è interconnesso alla rete MT della Linea Rossa.

I valori delle correnti di corto circuito, sia trifase che monofase a terra, ipotizzati sono i seguenti:

- Corrente di guasto trifase: $IG3f = 12,5kA$
- Corrente di guasto monofase a terra: $IG1f = 200A$ (tenendo anche conto del contributo alla corrente di guasto fornito dai collegamenti in cavo dell'anello MT questo valore deve essere pari a 250A)
- Tempo di interruzione assunto per guasto lato c.a. : 1s (valore cautelativo in quanto il tempo presunto è 370ms).

Al fine di controllare eventuali guasti lato c.c. ed il potenziale presente fra terra di SSE e polo negativo del raddrizzatore (collegato al binario), intervenendo in caso di sopraelevazione della tensione oltre i limiti consentiti, la rete di terra delle SSE è collegata al negativo per mezzo di un dispositivo di limitazione della tensione, secondo quanto riportato nella norma CEI EN 50122-1.

6.2.2 CRITERI DI PROGETTO E VERIFICA DEGLI IMPIANTI DI TERRA

La presenza, all'interno di ciascuna sottostazione, di un sistema di trasformazione MT/bt richiede la realizzazione di un dispersore di terra adeguato a disperdere la corrente di guasto MT monofase a terra secondo le disposizioni della Norma CEI EN 50522, tenendo conto del tempo d'intervento delle protezioni lato ente fornitore.

Per quanto riguarda la corrente di guasto monofase a terra, si dovrà tenere conto del contributo alla corrente di guasto stessa fornito dai collegamenti in cavo fra una sottostazione e l'altra che costituiscono l'anello di media tensione di distribuzione primaria. Per tale motivo i valori di guasto possono differire da sottostazione a sottostazione a seconda della distanza delle stesse dal punto di consegna nelle varie configurazioni.

Ovviamente per il calcolo della corrente di guasto occorrerà prendere a riferimento il caso peggiore.

I criteri costruttivi del dispersore di terra di SSE prevedono una rigorosa separazione dai dispersori di terra delle fermate e da eventuali altri dispersori relativi ad apparecchiature e/o strutture lungo linea.

Ciò per evitare in linea di principio sia trasferimenti di tensione pericolosi sia un'alterazione di eventuali campi elettrici esterni che possa creare pericolo di corrosione per strutture metalliche interrate.

Le reti di terra di sottostazioni adiacenti potranno essere collegate fra loro attraverso gli schermi dei cavi MT (con eventuali conduttori in parallelo agli schermi) solo se strettamente necessario ai fini del contenimento delle tensioni di passo e contatto.

Normalmente gli schermi saranno quindi collegati a terra da un solo lato, adottando tutte le opportune precauzioni in merito alle tensioni trasferite che si possono manifestare all'estremità isolata.

Il dimensionamento dell'impianto di terra per l'edificio delle SSE in oggetto viene fatto in accordo alla normative citate (in particolare CEI EN 50522) e con le seguenti ipotesi di base:

- la tensione di passo e contatto con massima corrente di guasto a terra non devono superare sia all'interno che all'esterno di sottostazione il valore di 110 V (CEI EN 50522 Fig.4);
- la scelta di tale valore è dovuta al fatto che le protezioni intervengono in un tempo di 1,0 secondo, corrente di guasto 250 A.

La procedura utilizzata per progettare e realizzare gli impianti di terra è la seguente:

- determinazione della massima corrente di guasto a terra;
- misura della resistività del terreno nell'area interessata dall'impianto;
- progetto dell'impianto tenendo conto dei seguenti criteri:
 - utilizzo della massima area per la posa della corda di terra;

- garanzia di una adeguata protezione all'interno ed attorno il perimetro dell'edificio. All'esterno di quest'ultimo, eventuali collegamenti fra maglia di SSE e masse metalliche esterne (o altri dispersori di terra) possono costituire grave pericolo in quanto possono trasferire a distanza la tensione totale di terra dell'impianto. Per tale motivo, occorrerà verificare l'esistenza di possibili tubazioni metalliche interrato che attraversano l'area di SSE e prendere di conseguenza adeguati provvedimenti (ad esempio sezionamento della tubazione in corrispondenza dei punti di attraversamento, o adozione di superfici isolanti con asfaltatura o altre soluzioni);
- dispersori di terra verticali di dimensioni adeguate saranno posti lungo il perimetro della rete di terra ed in punti particolari della stessa in modo da aumentare la capacità disperdente. Posti in pozzetti ispezionabili, consentiranno le previste misure periodiche;
- disposizione di un dispersore di terra orizzontale a profondità opportuna;
- le giunzioni corda-corda dovranno essere effettuate da idonei connettori a compressione;
- i componenti dell'impianto di terra dovranno essere tali da sopportare le massime sollecitazioni derivanti dalle condizioni di guasto che possono interessare il sistema senza alcun deterioramento, danneggiamento o compromissione delle caratteristiche meccaniche o della durata nel tempo dei componenti stessi;
- internamente all'edificio di sottostazione, lungo il suo perimetro, sarà presente un collettore di terra;
- almeno quattro collegamenti dovranno essere previsti fra collettore e dispersore, realizzati attraverso corde in rame posate fra il dispersore stesso ed il collettore all'interno della sottostazione. I punti di ingresso in sottostazione di tali collegamenti dovranno essere protetti adeguatamente contro l'ingresso d'acqua;

- dovranno essere presenti anche collegamenti ispezionabili in corrispondenza delle connessioni con le armature in ferro dell'edificio.

Dopo il posizionamento della rete di terra e prima del suo interrimento si provvederà ad una verifica della resistenza risultante della rete di terra e, se necessario, si apporteranno le modifiche al progetto. Ad opera ultimata, completo delle strutture e attrezzature, si procederà alle seguenti misure:

- misura della resistenza di terra;
- misura della tensione di passo e di contatto nell'interno dell'edificio cui compete la rete di terra;
- misura della tensione di passo e di contatto all'esterno dell'edificio cui compete la rete di terra e nelle zone limitrofe.

Le misure devono essere fatte, per quanto possibile, con l'impianto nelle ordinarie condizioni di funzionamento. Se non si rilevano valori pericolosi delle tensioni di passo e di contatto l'impianto sarà ritenuto idoneo, in caso contrario si adotteranno tutti i provvedimenti locali necessari correttivi a riportare a valori accettabili (110V) i valori di tensione.

6.2.3 *CONSIDERAZIONI GENERALI*

Per migliorare ulteriormente la rete di terra al fine di ridurre le tensioni di passo e di contatto pericolose si consiglia quanto segue :

1. usare materiale non conduttore per le pareti esterne ed evitare l'impiego di parti metalliche collegate a terra che possono essere toccate all'esterno;
2. asfaltare la zona perimetrale della SSE fino alla recinzione;
3. non collegare elementi metallici al di fuori del perimetro della rete di terra, eventuali situazioni particolari saranno valutate separatamente;
4. posizionare la recinzione esterna ad una distanza minima di 2 metri dalla maglia di terra, prevedendola possibilmente in materiale isolante;
5. interrompere la recinzione se in struttura metallica o in cemento armato ogni 2 metri al massimo affinché la continuità metallica sia interrotta;

6. in caso di presenza di eventuali condotte idriche, cavi elettrici o altre strutture metalliche entranti o uscenti dalla SSE, inserire dei giunti isolanti a monte e a valle degli attraversamenti.

6.2.4 METODO DI MISURA DELLA RESISTENZA DI TERRA CON METODO VOLT-AMPEROMETRICO

I sistemi di misura della resistenza di terra sono numerosi e le tecniche sono ormai consolidate e in uso da molto tempo. Il metodo più diffuso e consigliato dalle norme CEI è il metodo della caduta di tensione o volt-amperometrico.

Il metodo prevede di iniettare una corrente alternata (la corrente continua non viene utilizzata perché essendo il terreno un conduttore di natura elettrolitica le misure potrebbero essere viziate da forze elettromotrici di tipo elettrolitico o da correnti continue vaganti) attraverso i dispersori in misura e di permetterne la richiusura attraverso un dispersore ausiliario.

La correttezza della misura dipende dalla posizione che assumono il dispersore ausiliario e l'elettrodo di tensione fra di loro e rispetto al dispersore in misura. Il dispersore ausiliario deve essere posto in un punto del terreno sufficientemente lontano rispetto a quello in prova in modo che la misura non sia viziata dall'influenza reciproca. Si può ritenere con buona approssimazione che ad una distanza di circa cinque volte la lunghezza del dispersore o cinque volte la diagonale se si considera una rete di dispersori cessi la zona di influenza fra i dispersori. L'andamento che assume la curva relativa ai potenziali del terreno in queste condizioni è quella della figura seguente;

Tale andamento è giustificato dal fatto che la sezione del "conduttore terreno" che è attraversato dalla corrente di prova non è costante in tutti i suoi punti. La sonda di tensione deve essere conficcata in un punto dove la resistenza può essere considerata trascurabile e il potenziale uguale a zero.

Lo schema di collegamento sopra rappresentato presuppone un'alimentazione dalla rete tramite un trasformatore di sicurezza e l'impiego di un voltmetro e di un amperometro.

Innanzitutto, prima di far circolare corrente nel circuito di misura, occorre verificare che il voltmetro non indichi alcuna tensione dovuta a correnti di dispersione estranee al circuito di prova la cui origine, se ne fosse rilevata la presenza, dovrà essere individuata ed eliminata. Si alimenta quindi con un generatore facendo circolare una corrente nel circuito di prova tra il dispersore in misura e il dispersore ausiliario.

Se si indica con I la corrente che circola nel circuito e con U_E la tensione indicata dal voltmetro, applicando la legge di Ohm si può calcolare la resistenza di terra R_E :

$$R_E = U_E / I.$$

6.3 COLLEGAMENTI CON LA RETE B.T.

I collegamenti con la rete B.T. si trovano in corrispondenza delle fermate della linea tranviaria, che sono alimentate mediante il quadro di distribuzione B.T. ubicato nelle sottostazioni elettriche facenti parte del sistema tranviario.

L'alimentazione viene realizzata mediante doppio cavo, uno derivato da sezione normale e l'altro derivato da sezione continuità.

Il neutro del cavo di arrivo, proveniente dalla sottostazione del sistema di trazione, deve essere messo a terra solo in corrispondenza della sottostazione stessa, per evitare sia trasferimenti di tensione fra terra di sottostazione e parti accessibili di fermata, sia collegamenti fra diversi dispersori che potrebbero alterare il campo elettrico preesistente. Non dovrà quindi in tal caso essere presente nel cavo di collegamento nessun conduttore di protezione (PE), e saranno utilizzati interruttori differenziali in corrispondenza della sottostazione, che alimenterà le fermate con sistema TT.

La terra di fermata sarà sempre unica, senza distinzione alcuna fra terra del quadro di distribuzione e quella di banchina, ed occorrerà evitare collegamenti con la terra di SSE tramite l'eventuale schermo del cavo di arrivo, che dovrà essere collegato a terra solo ad un'estremità, ed adeguatamente isolato e protetto all'altra estremità.

Si rileva che un difetto di isolamento del neutro porterebbe alla possibilità di circolazione indesiderata di corrente di ritorno nel conduttore di neutro stesso in caso di intervento del dispositivo di limitazione della tensione.

Inoltre si deve considerare che il neutro di arrivo può assumere in fermata la tensione totale di terra di SSE in caso di guasto, e che i circuiti B.T. devono quindi sopportare tale tensione accidentale.

La fermata deve avere un dispersore di terra con una resistenza di terra di valore coordinato con la tipologia delle protezioni prevista in sottostazione (normalmente si può prendere a riferimento, in maniera cautelativa, il valore base di 10Ω , prescrivendo l'uso di interruttori differenziali da 0,3 A nel quadro di distribuzione B.T. di sottostazione, quindi con un adeguato coefficiente di sicurezza. Tuttavia valori più elevati, dell'ordine dei 50Ω , possono essere accettati in aree ove venga rilevata una elevata resistività del terreno.

La terra di fermata (e quindi tutte le parti ad essa collegate, siano o no all'interno del cono di caduta) è collegata al circuito di ritorno tramite dispositivo di limitazione della tensione.

Per i collegamenti a terra delle apparecchiature:

- le utenze, apparecchiature e strutture metalliche ubicate in banchina, alimentate dal relativo quadro di distribuzione di fermata, saranno collegate al dispersore di cui sopra;
- i collegamenti a terra delle apparecchiature saranno effettuati con conduttori PE.

Per quanto riguarda le apparecchiature lungo linea:

- in generale si dovrà cercare di mantenere fuori dal cono di caduta tutte le utenze, apparecchiature e strutture metalliche, in modo da evitare la protezione con collegamento a rotaia. Eventualmente in alcuni casi è possibile adottare l'interposizione di barriere fisiche per elementi di relativamente piccole dimensioni, sempre allo scopo di evitare il collegamento a rotaia;
- le utenze elettriche a singolo isolamento (classe I), ubicate al di fuori del cono di caduta della linea aerea, sono collegate normalmente con sistema TN, ossia messe a terra attraverso il conduttore di protezione PE proveniente dalla fonte di alimentazione. E' da evitare in questi casi il collegamento di queste apparecchiature al circuito di terra di protezione, ove esistente;

- le utenze elettriche a singolo isolamento (classe I), ubicate all'interno del cono di caduta della linea aerea, sono collegate ad un dispersore di terra locale non facente capo alla terra della fonte di alimentazione (quindi con sistema TT), con collegamento dedicato a rotaia tramite dispositivo di limitazione della tensione; in caso di presenza di circuito di terra di protezione, a sua volta collegato a rotaia tramite VLD, possono essere collegate al conduttore di terra stesso. In entrambi i casi la resistenza equivalente verso terra dovrà seguire i criteri sopra esposti per la terra di fermata, prescrivendo l'uso di interruttori differenziali;
- le utenze elettriche a singolo isolamento (classe I), ubicate all'interno del cono di caduta, verranno alimentate con sistema TN e quindi messe a terra attraverso conduttore di protezione PE in corrispondenza della fonte di alimentazione;
- le utenze elettriche completamente a doppio isolamento (classe II) non sono collegate a terra né tramite conduttore PE né tramite terra locale. Se la classe II lato B.T. garantisce almeno un livello di isolamento lato c.c. (corrispondente alla tensione nominale lato c.c.), il pericolo di trasferimento di tensione lato B.T. in caso di guasto c.c. non sussiste (essendo il conduttore PE, come sopra rimarcato, non presente, ed avendo i conduttori di fase e neutro una tensione di tenuta sufficiente). Per tal motivo il collegamento a rotaia tramite VLD, anche nel caso le apparecchiature rientrino all'interno del cono di caduta, può essere omissis. Si sottolinea comunque che tale soluzione va applicata a piccole apparecchiature quali semafori, paline, segnali ecc...
- in generale, le apparecchiature alimentate con sistema TN non dovranno mai essere collegate al circuito di terra di protezione (se esistente), in quanto così facendo si collegherebbe il neutro del sistema di distribuzione ad un sistema di terra collegato a rotaia tramite VLD;
- inoltre, tutte le apparecchiature da proteggere con collegamento a rotaia contenenti parti appartenenti al sistema B.T. non dovranno avere un collegamento diretto ma solo tramite VLD, per evitare un trasferimento di corrente di ritorno nel sistema di distribuzione che sarebbe immediato in caso di guasto terra-neutro lato B.T. (non

sempre rilevato dalle protezioni). Inserendo il dispositivo VLD per avere tale trasferimento dovrebbe verificarsi un doppio guasto (anche se non simultaneo);

- le apparecchiature contenenti sia parti e/o componenti relative al sistema di trazione in c.c., sia parti e/o componenti appartenenti al sistema di alimentazione B.T. (ad esempio sezionatori motorizzati afferenti alla linea di contatto), dovranno essere protette, in funzione delle loro caratteristiche costruttive e delle caratteristiche di isolamento di entrambi i circuiti e/o componenti in c.c. ed in B.T.:
- nel caso l'armadio (o il telaio metallico interno comune alla parte c.c. e B.T.), venga protetto con collegamento a rotaia tramite VLD;
- per la messa a terra del circuito B.T. non deve essere utilizzato un conduttore PE collegato all'armadio o al telaio;
- dovranno essere utilizzati circuiti e componenti B.T. a doppio isolamento;
- per l'alimentazione dei circuiti B.T. si useranno interruttori differenziali.

6.4 SISTEMA DI TRAZIONE IN CORRENTE CONTINUA

6.4.1 CIRCUITO DI RITORNO DI PIENA LINEA

Il circuito di ritorno di piena linea, essendo isolato da terra, può assumere un potenziale rispetto a terra in funzione della quantità e distribuzione dei carichi presenti e della distanza dalle sottostazioni di alimentazione.

Tuttavia tale potenziale deve mantenersi entro i limiti di sicurezza stabiliti dalla norma EN 50122-1, sia in condizioni normali di esercizio (quindi anche con una sottostazione fuori servizio) sia in condizioni di guasto (corto-circuito linea-rotaia).

Per tale motivo le protezioni previste (dispositivi per la limitazione della tensione o collegamento diretto a rotaia) collegate fra circuito di ritorno e terra (sia essa terra di sottostazione, fermata o lungo linea) hanno una funzione protettiva esclusivamente dedicata a guasti lato c.c. fra linea di contatto e strutture/apparecchiature/utenze o ubicate nel cono di caduta della linea di contatto, o contenenti parti e/o componenti

relative al sistema di trazione (quindi non riferita a possibili sovratensioni del binario, in quanto queste sono da considerarsi entro i limiti di sicurezza).

Sono stati verificati i potenziali di binario verso terra in condizioni di guasto e nella situazione più gravosa il valore riscontrato risulta pari a 600V e quindi ammissibile con un tempo di intervento delle protezioni pari a 0,1 sec.

6.4.2 APPARECCHIATURE CONTENENTI PARTI O COMPONENTI RELATIVE AL SISTEMA DI TRAZIONE C.C.

In generale gli elementi di supporto accessibili della linea di contatto, in caso di singolo isolamento, dovranno essere collegati ad un circuito di terra di protezione.

In caso di doppio isolamento, questo provvedimento non è necessario; occorre però che le apparecchiature o supporti (tipicamente pali adibiti all'alimentazione della linea e armadi sezionatori) che contengono o supportano risalite cavi o componenti in c.c. (anche se definibili ad isolamento rinforzato) vengano protette con collegamento a rotaia per garantire un percorso di ritorno alla corrente di guasto (sia che si trovino all'interno o all'esterno del cono di caduta della linea di contatto).

Si adotterà quindi il provvedimento di collegare l'apparato a rotaia o direttamente (con isolamento completo da terra), o tramite dispositivo di protezione VLD.

6.4.3 SCELTA DEL DISPOSITIVO DI LIMITAZIONE DELLA TENSIONE

Occorrerà utilizzare un dispositivo nelle seguenti situazioni:

- nelle sottostazioni di trazione, collegato fra il negativo di gruppo di piena linea e la terra;
- nelle fermate, collegato fra la terra di fermata ed il binario;
- lungo linea, a protezione di apparecchiature metalliche od elettriche ubicate nel cono di caduta della linea aerea;
- lungo linea, a protezione di apparecchiature elettriche contenenti anche parti relative al sistema di trazione;
- lungo linea, collegato fra il circuito di terra di protezione ed il binario.

I requisiti cui deve soddisfare detto dispositivo sono principalmente i seguenti:

- tempi di commutazione in chiusura, che devono soddisfare la tabella riportata dalla norma EN 50122-1
- auto-ripristino automatico entro 10 s;
- tenuta al corto-circuito in funzione delle caratteristiche dell'impianto;
- minimizzazione della dispersione di corrente di ritorno verso terra attraverso il dispositivo stesso.

6.4.4 COLLEGAMENTI PROTETTIVI A TERRA/BINARIO

Si deve garantire in ogni caso la protezione di tutte le strutture conduttrici che potrebbero trovarsi accidentalmente in tensione in caso di caduta della linea di contatto o di cedimento di un isolamento lato T.E., secondo quanto contemplato dalla Norma CEI EN50122-1.

La descrizione dei provvedimenti protettivi di strutture portanti apparecchiature elettriche, nonché di strutture di banchina di stazione si può trovare ai paragrafi precedenti, mentre per quanto riguarda i supporti e gli elementi relativi alla linea di contatto si rimanda a quanto detto sopra.

Per strutture non portanti apparecchiature elettrica si applicherà sempre la norma CEI EN 50122-1, evidenziando che per strutture di piccole dimensioni non è necessario alcun provvedimento.