

RIVISTA

R.Andolfato, L.Fellin, R.Turri

***"Analisi di impianti di terra a frequenza industriale: confronto tra indagine sperimentale e simulazione numerica"***

L'Energia Elettrica, Vol. 74, N.2,  
1997

NOTE

---

Allego, per maggior chiarezza, originali delle figure 7 e 8.

# Analisi di impianti di terra a frequenza industriale: confronto tra indagine sperimentale e simulazione numerica

ROBERTO ANDOLFATO • LORENZO FELLIN • ROBERTO TURRI  
*Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università degli Studi di Padova*

Vengono illustrati i risultati di un confronto critico tra i valori rilevati nel corso di una sistematica indagine sperimentale condotta sull'impianto di terra di una cabina primaria AT/MT e i corrispondenti valori ottenuti mediante simulazione numerica. Nella prima parte del lavoro viene fornita una sintetica descrizione delle procedure di calcolo adottate, con particolare attenzione al calcolo delle tensioni di contatto e di passo effettive (tenendo in considerazione la distorsione del campo di corrente introdotta dalla presenza del corpo umano). Nella seconda parte viene descritto l'impianto di terra della cabina primaria AT/MT oggetto dell'indagine e vengono illustrate le principali misure effettuate per la determinazione della curva di resistività apparente del mezzo disperdente e delle tensioni di contatto e di passo lungo direttrici prestabilite. Tali misure sono infine messe a confronto con i corrispondenti valori calcolati evidenziando le potenzialità e i limiti dell'approccio numerico adottato.

## 1. Introduzione

Lo studio degli impianti di terra, un tempo condotto mediante procedimenti grafici, modelli analitici semplificati e l'uso della vasca elettrolitica, può oggi contare sul supporto di codici di calcolo per elaboratore più o meno sofisticati, che consentono di effettuare simulazioni sempre più aderenti alla realtà determinando:

- la resistenza di terra di dispersori di forma qualsiasi;
- la distribuzione delle correnti nei dispersori e nel mezzo disperdente;
- le tensioni di contatto e di passo indisturbate (ed eventualmente effettive, in presenza del corpo umano);
- le tensioni trasferite a corpi perturbanti connessi al dispersore o fisicamente distinti da esso, nelle seguenti condizioni operative:

- mezzo disperdente omogeneo;
- mezzo disperdente omogeneo a strati;
- presenza di corpi perturbanti in numero e forma qualsiasi connessi o meno al dispersore.

Il problema è stato ampiamente e approfonditamente affrontato in passato sia dal punto di vista teorico per quanto riguarda lo studio dei fenomeni elettromagnetici associati alle correnti circolanti nei conduttori e nel terreno (si vedano per esempio gli ottimi trattati di Sunde [1] e Klewe [2]), sia sotto il profilo pratico-sperimentale, allo scopo di ricavare formulazioni analitiche di interesse applicativo. Queste, seppur limitate nella loro applicabilità a complessi dispersori relativamente semplici e di forma regolare, costituiscono ancor oggi un valido ausilio al progettista e sono di riferimento per le normative internazionali sugli impianti di terra [3, 4].

A parte i rari casi di complessi dispersori isolati di forma particolarmente semplice, lo studio del com-

portamento degli impianti di terra deve essere condotto con modelli numerici (in grado di simulare più accuratamente i fenomeni elettromagnetici associati alla corrente di guasto dispersa nel terreno da dispersori di forma comunque complessa e in presenza di altri corpi perturbanti) e con l'ausilio del calcolatore. Allo scopo, nell'ultimo ventennio sono state sviluppate e proposte in letteratura una varietà di procedure più o meno sofisticate adatte al calcolo numerico che, a partire dalle prime formulazioni (si vedano per esempio [5, 6]), sono state successivamente integrate ed estese allo scopo di migliorarne l'efficienza di calcolo e il grado di applicabilità.

Un approccio classico adottato è quello delle sottoaree di Maxwell (o metodo di simulazione con sorgenti equivalenti) integrato dall'applicazione del metodo delle immagini elettriche, per simulare mezzi disperdenti omogenei a strati. Esso comporta la soluzione di un sistema di equazioni lineari risolvibile con procedura diretta o con procedure iterative.

La realizzazione di un codice di calcolo numerico per l'analisi di impianti di terra, sia pur adottando opportune ipotesi che riducono sensibilmente la complessità del problema (quali limitare il campo di applicazione alle basse frequenze e considerare il mezzo disperdente omogeneo a strati), rimane comunque un compito impegnativo, in particolare se si cerca di garantire un utilizzo sufficientemente flessibile, in grado di tener conto di un quadro operativo piuttosto ampio e articolato.

Il presente lavoro rientra in un più vasto programma di ricerca avente l'obiettivo di realizzare un programma di calcolo per lo studio di sistemi di terra complessi, con sviluppo in aria e nel terreno, che tenga in considerazione i fenomeni di interazione conduttivi, induttivi e capacitivi, integrabile con modelli circuitali

del sistema elettrico connesso. Questa prima fase prevede, oltre all'analisi teorica, la messa a punto della struttura generale del programma con riferimento alle strutture interrate e a interazioni di tipo conduttivo. Nella memoria, dopo una sintetica descrizione delle caratteristiche salienti della procedura sviluppata e del relativo programma di calcolo, viene illustrato un confronto critico e dettagliato tra le misure effettuate su un impianto di terra di geometria complessa e i relativi risultati di simulazione. Tale confronto consente di verificare le possibilità di applicazione della procedura e i limiti di validità della stessa.

## 2. Descrizione del programma di simulazione

La struttura del codice è modulare e comprende (Figura 1):

- modulo preprocessore per la modellizzazione del sistema dispersore;
- modulo preprocessore per la modellizzazione del mezzo disperdente;
- modulo preprocessore per la valutazione degli effetti di uno strato isolante superficiale;

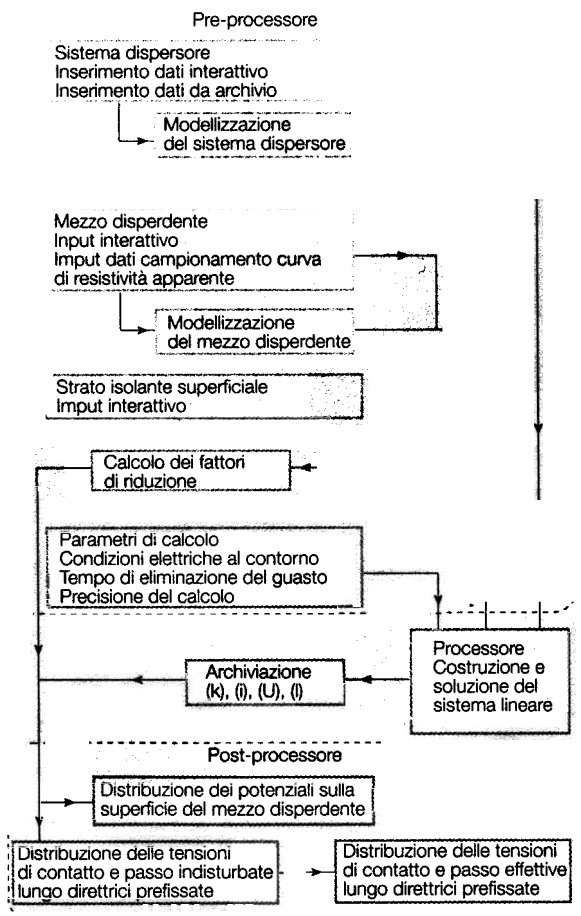


Figura 1 Schema a blocchi del programma; (k) matrice dei coefficienti del sistema lineare associato ai dati di ingresso t; (i) correnti disperse dalle sorgenti equivalenti; (U) potenziali assunti dai componenti del sistema dispersore a corrente imposta; (I) correnti disperse dai componenti del sistema dispersore a potenziale imposto.

- modulo processore per il calcolo della distribuzione delle correnti disperse e dei potenziali o correnti relativi rispettivamente ai componenti del sistema dispersore a corrente, o a potenziale, imposti;
  - modulo postprocessore per il calcolo della distribuzione dei potenziali sulla superficie del mezzo disperdente;
  - modulo postprocessore per il calcolo delle tensioni di contatto e passo indisturbate ed effettive.
- Sono inoltre presenti i necessari moduli per l'archiviazione, la visualizzazione grafica e la stampa dei risultati. Il codice di calcolo è basato sul metodo di simulazione con sorgenti equivalenti e sul principio delle immagini elettriche e opera su modelli numerici del sistema dispersore (impianto di terra e qualsiasi altro conduttore ad esso collegato e non) e del mezzo disperdente (terreno) con opportune condizioni al contorno.

### 2.1. Il metodo numerico di simulazione

Lo studio dei campi di corrente nel terreno a frequenza industriale applica le equazioni di Maxwell scritte per il regime periodico sinusoidale e la legge di Ohm per grandezze specifiche, ricorrendo, per una più agevole soluzione, all'espressione del campo elettrico mediante il relativo potenziale scalare ed alle classiche approssimazioni valide per campi quasi stazionari. In tali ipotesi, le equazioni generali di Maxwell possono tradursi nelle:

$$\text{rot } E = 0, \text{ rot } H = J, J = \sigma E \quad (1)$$

$$\text{div } (\epsilon E) = q, \text{ div } (\mu H) = 0 \quad (2)$$

con:

- $E$  = campo elettrico;
- $H$  = campo magnetico;
- $J$  = densità di corrente;
- $\epsilon$  = costante dielettrica;
- $q$  = densità di carica elettrica;
- $\mu$  = permeabilità magnetica;
- $\sigma$  = conducibilità elettrica.

Dalle (1) e (2), ricordando che i campi irrotazionali in spazi semplicemente connessi ammettono potenziale scalare e che i campi vettoriali definiti come rotazionali di campi vettoriali arbitrari sono solenoidali, si ottiene che i campi elettrici stazionari ammettono una funzione potenziale scalare  $U$  che soddisfa, in assenza di carica spaziale, l'equazione di Laplace:

$$\text{div grad } U = \Delta^2 U = 0 \quad (3)$$

Nel caso di campi elettrici stazionari in mezzi di propagazione conduttivi, la soluzione generale della (3), considerando un mezzo disperdente omogeneo, isotropo, lineare e indefinito è data, in forma integrale, dalla [1]:

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\sigma} \int \frac{\text{div } J}{r} dV = \frac{1}{4\pi\sigma} \int \frac{J}{r} dS \quad (4)$$

dove  $V$  rappresenta il volume che racchiude le sor-

genti di corrente,  $S$  ne rappresenta la superficie ed  $r$  individua il punto che assume il potenziale  $U(r)$ .

In generale, la distribuzione della densità di corrente superficiale non è nota e quindi la (4) non consente una soluzione diretta: è possibile pervenire a una soluzione numerica della (4) mediante il metodo di simulazione con sorgenti di corrente equivalenti [7].

L'applicazione di tale metodo richiede il frazionamento della superficie disperdente  $S$  in un numero  $n$  di porzioni (sorgenti equivalenti) tale per cui:

**a** le loro dimensioni siano sufficientemente ridotte da poter considerare che ognuna di esse disperda corrente con densità costante;

**b** la loro geometria sia tale per cui è possibile determinare un'espressione analitica del potenziale e del campo da esse generato quando, considerate isolate, si trovano a disperdere una corrente uniformemente distribuita sulla loro superficie in un mezzo omogeneo, isotropo, lineare e indefinito (per esempio sorgenti sferiche, cilindriche, anulari, ad arco, a forma di disco).

La discretizzazione secondo tale criterio consente di sostituire la (4) con la:

$$U(r) = \sum_{i=1}^n k_i i_i \quad (5)$$

dove  $k_i$  rappresenta il mutuo accoppiamento conduttivo tra la  $i$ -esima sorgente equivalente ed il punto individuato da  $r$  e  $i_i$  rappresenta la corrente dispersa dalla stessa sorgente equivalente.

I coefficienti  $k_i$  sono facilmente determinabili nota l'espressione analitica richiesta dalla condizione **b**: in particolare, si avrà:

$$k_i = \frac{U_i(r)}{i_i} \quad (6)$$

Le correnti  $i_i$  rappresentano le incognite del sistema. Nell'ipotesi che la sorgente di corrente non sia eccessivamente estesa e che la conducibilità del materiale con cui è realizzata sia di alcuni ordini di grandezza superiore alla conducibilità del mezzo disperdente, è lecito ipotizzare che la sua superficie  $S$  costituisca con buona approssimazione una superficie equipotenziale. Nelle condizioni di validità di tale ipotesi, applicando la (6) ad  $n$  punti scelti opportunamente sulle altrettante sorgenti equivalenti secondo cui  $S$  è frazionata, si perviene a un sistema lineare di ordine  $n$  del tipo:

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,n} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n,1} & k_{n,2} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ U \\ \vdots \\ U \end{bmatrix} \quad (7)$$

dove i coefficienti  $k_{ij}$  rappresentano il mutuo accoppiamento conduttivo tra le sorgenti equivalenti, le correnti  $i_i$  rappresentano le incognite ed il potenziale  $U$  (assunto dalla superficie  $S$ ) il vettore dei termini noti. Si noti che, per il principio di reciprocità,  $k_{ij} = k_{ji}$  e pertanto la matrice dei coefficienti risulta simmetrica. Risolto il sistema lineare e note pertanto le correnti  $i_i$ , mediante l'applicazione della (5) si può calcolare il po-

tenziale di un punto  $r$  qualsiasi del mezzo disperdente. La tecnica di simulazione utilizzata può essere adottata anche in presenza di più elettrodi costituenti un sistema dispersore comunque articolato.

Si supponga di avere  $Ne$  elettrodi distinti su ognuno dei quali possa essere adottata l'ipotesi di equipotenzialità.

Una volta frazionati gli  $Ne$  elettrodi in  $m_1, m_2, \dots, m_{Ne}$  sorgenti equivalenti e calcolati i coefficienti di mutuo accoppiamento conduttivo  $k_{ij}$  per l'intero sistema dispersore, si perviene ad un sistema lineare del tipo:

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,n} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n,1} & k_{n,2} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

con:

$$n = \sum_{i=1}^{Ne} m_i$$

$$u_i = U_j \quad 1 + \sum_{k=1}^{j-1} m_k \leq i \leq \sum_{k=1}^j m_k$$

Il sistema ha  $n + Ne$  incognite e risulta determinato dall'aggiunta di  $Ne$  condizioni supplementari riguardanti l'assegnazione del potenziale di alcuni corpi, oppure il valore della corrente scambiata con il mezzo disperdente o ancora il valore dell'impedenza di interconnessione tra corpi diversi: il sistema risultante contiene tutte le informazioni circa le mutue interazioni tra singole sorgenti equivalenti (microinterazioni) e tra corpi appartenenti al sistema dispersore (macrointerazioni). La corrente scambiata è ovviamente nulla nel caso di corpi a potenziale flottante.

## 2.2. Estensione a terreno omogeneo a strati

L'analisi del paragrafo 2.1. ha validità generale ma limitatamente a mezzi disperdenti omogenei isotropi lineari e indefiniti. Il terreno, come mezzo disperdente, può ragionevolmente essere considerato lineare e isotropo, ma raramente può essere ritenuto omogeneo e, data la posizione degli usuali dispersori nei confronti della superficie di separazione tra terreno e aria, non può mai essere considerato indefinito.

Le disomogeneità nella conducibilità del mezzo disperdente solitamente si presentano in modo più marcato nel senso della profondità: si può dunque ammettere lecita l'approssimazione di ritenere il terreno una struttura multistrato con conducibilità uniforme in ogni strato [8, 9].

La superficie di separazione tra terreno e aria e le superfici di separazione tra i vari strati orizzontali del modello di mezzo disperdente possono essere considerate mediante l'introduzione di alcune serie infinite di sorgenti immagine, opportunamente disposte in funzione della posizione reciproca tra sorgente origine e superfici di separazione tra mezzi diversi, in tal modo riconducendo lo studio del campo a quello in un mezzo omogeneo e indefinito.

Ne consegue un maggior onere computazionale in quanto, per il calcolo di ognuno dei coefficienti del sistema lineare (7) e per la successiva applicazione di espressioni del tipo (5), si devono considerare non solo le sorgenti equivalenti origine ma anche le loro immagini. L'ordine massimo delle immagini da prendere in considerazione è funzione della posizione reciproca tra sorgenti e superficie di separazione, del coefficiente di riflessione tra mezzi diversi e della precisione con la quale si intende condurre il calcolo. Il codice di calcolo sviluppato considera un numero di immagini variabile da caso a caso, seguendo il criterio di mantenere costante l'errore di troncamento relativo nel calcolo dei coefficienti di auto e mutua interazione.

### 2.3. Tensioni di contatto e di passo effettive (presenza del corpo umano)

Le norme CEI 11-8 stabiliscono le modalità di misura delle tensioni di contatto e di passo, imponendo l'uso di un voltmetro dotato di resistenza interna  $R_h$  pari a  $1000 \Omega$  e di due sonde voltmetriche composte da altrettante piastre metalliche di superficie pari a  $200 \text{ cm}^2$  premute sulla superficie del terreno con una forza pari a  $250 \text{ N}$ . Tali prescrizioni intendono simulare la resistenza interna del corpo umano e la sua resistenza di contatto con il mezzo disperdente, in modo che le tensioni misurate siano prossime a quelle effettive. Queste sono sempre inferiori ai corrispondenti valori indisturbati e la loro corretta valutazione può consentire economie di dimensionamento dell'impianto di terra.

È perciò opportuno che anche il modello numerico consideri la deformazione del campo di corrente determinata dalla corrente che percorre il corpo umano. A tal fine, si ritiene utile, come fatto in [10], introdurre nella simulazione il circuito di misura stabilito dalle norme CEI 11-8, considerando le due piastre metalliche e la resistenza  $R_h$ , ottenendo in tal modo risultati direttamente confrontabili con le misure effettuate

sul campo e con i limiti imposti dalle normative.

Le piastre sono assimilate a corpi perturbanti e quindi frazionate in  $m$  sorgenti equivalenti alle quali si applicano le procedure precedentemente descritte nel caso di sistema dispersore composto da  $Ne$  corpi distinti.

Con riferimento al caso più semplice in cui vi sia un solo dispersore (Figura 2), indicando con 1, 2 e 3 rispettivamente il dispersore e i due elettrodi di misura, il sistema lineare associato al dispersore e al circuito di misura diviene:

$$\begin{bmatrix} [k]_{1,1} & [k]_{1,2} & [k]_{1,3} \\ [k]_{2,1} & [k]_{2,2} & [k]_{2,3} \\ [k]_{3,1} & [k]_{3,2} & [k]_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{n+2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [U_1] \\ [U_2] \\ [U_3] \end{bmatrix} \quad (9)$$

La soluzione del sistema richiede i vincoli sulle tensioni di contatto effettive:

$$U_3 = U_2, U_2 = U_1 - R_h \sum_{i=n+1}^{n+2m} i_i \quad (10)$$

e sulle tensioni di passo effettive:

$$U_3 = U_2 - R_h \sum_{i=n+m+1}^{n+2m} i_i, \sum_{i=n+1}^{n+2m} i_i = 0 \quad (11)$$

La soluzione del sistema lineare (9) consente di calcolare le tensioni di contatto e di passo in corrispondenza a un solo punto sulla superficie del mezzo disperdente: per il calcolo su un numero elevato di punti (come solitamente richiesto in applicazioni pratiche), occorre procedere di volta in volta al ricalcolo di parte dei coefficienti della matrice  $[k]$  e alla successiva soluzione del nuovo sistema lineare. Il codice di calcolo sviluppato fa fronte a tale onere computazionalmente gravoso avvalendosi di vantaggiose tecniche iterative integrate da algoritmi di accelerazione (calcolo incrementale).

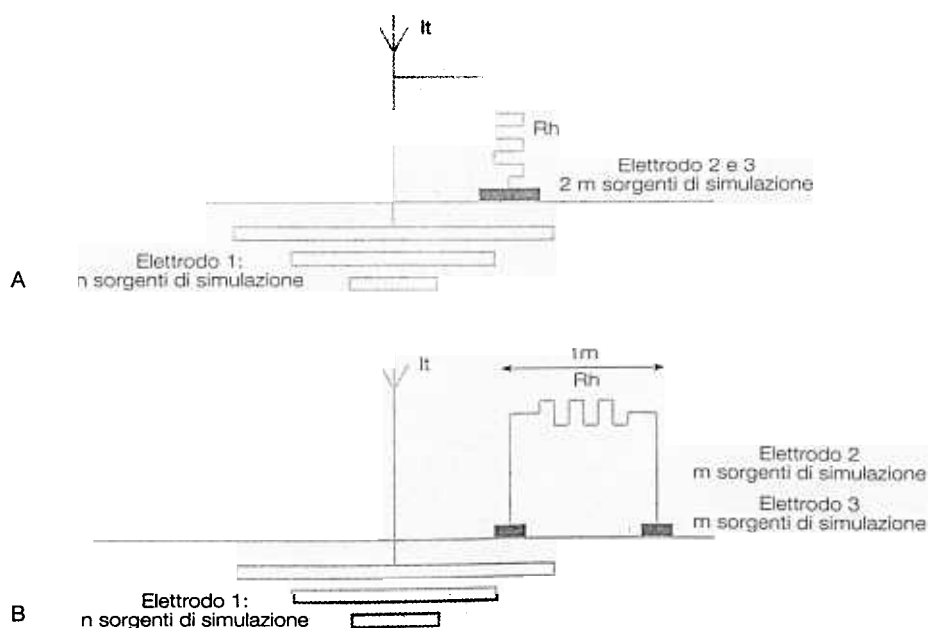


Figura 2 Modello del sistema dispersore con simulazione del circuito di misura delle tensioni effettive: A modello per il calcolo delle tensioni di contatto effettive; B modello per il calcolo delle tensioni di passo effettive.

### 2.4. Campo di applicazione

Il campo di applicazione della procedura sopra descritta si colloca nel dominio di validità dell'ipotesi di lavoro adottata di campo quasi stazionario in assenza di correnti di spostamento. In un mezzo conduttivo le correnti di spostamento si possono trascurare se vale:

$$\omega \ll \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (12)$$

In tal caso, il campo elettromagnetico può essere ritenuto quasi stazionario fino a distanza dalla sorgente (sistema dispersore) definibile analiticamente dalla:

$$d \ll 2 \pi \delta \quad (13)$$

con  $\delta$  (spessore di penetrazione del campo elettromagnetico) calcolabile con la:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}} \quad (14)$$

A titolo di esempio, per un tipico mezzo disperdente caratterizzato da permeabilità magnetica relativa unitaria, costante dielettrica relativa pari a 10 e resistività pari a 200  $\Omega\text{m}$ , le correnti di spostamento sono trascurabili fino a frequenze pari a circa 9 MHz e, a 50 Hz, la distanza dalla sorgente entro cui il campo elettromagnetico può ritenersi quasi stazionario è definita da  $d \ll 6300$  m.

Il programma si presta quindi a risolvere la maggioranza dei casi riscontrabili nella pratica impiantistica a bassa frequenza. Usualmente si intendono a bassa frequenza i campi con frequenza compresa tra 0 e 10 kHz. Entro tale intervallo di frequenze i campi elettrici e magnetici si possono considerare disaccoppiati e possono essere studiati separatamente. Appartengono a tale intervallo i campi a 50 e 60 Hz tipici della trasmissione, distribuzione e utilizzo dell'energia elettrica e le relative armoniche principali, nonché i campi generati da sorgenti diffuse, quali i sistemi di trazione elettrica in corrente continua e in corrente alternata e la maggior parte delle apparecchiature industriali utilizzate per applicazioni elettrotermiche.

### 2.5. La modellizzazione del mezzo disperdente

La caratterizzazione del terreno, considerato lineare e isotropo (ma non omogeneo), è determinata dalle funzioni scalari  $\sigma = \sigma(x, y, z)$ ,  $\mu = \mu(x, y, z)$ ,  $\epsilon = \epsilon(x, y, z)$ .

Nei limiti di validità delle ipotesi di cui al paragrafo 2.3. è sufficiente caratterizzare il mezzo disperdente mediante la sola conducibilità, rappresentabile per le ipotesi di cui al paragrafo 2.2. quale semplice funzione scalare a gradini  $\sigma = \sigma(z)$  (terreno omogeneo a strati).

La difficoltà nell'assegnazione dei parametri (spessore e conducibilità) ai diversi strati del modello di mezzo disperdente (a partire da misure necessariamente effettuate solo in superficie), consiglia inoltre di adottare modelli a numero di strati ridotto, tipicamente tre: uno strato superficiale (eventuale) detto anche "strato intenzionale", introdotto per motivi

funzionali o per abbattere le tensioni effettive di contatto o di passo (solitamente costituito da uno strato di ghiaia o asfalto), e due "strati di fatto".

I parametri dello strato intenzionale possono essere determinati mediante misure dirette su campione.

I parametri dei due strati di fatto devono viceversa essere determinati con modalità indirette sulla base di valori misurati solitamente ottenuti con il metodo di Wenner. Come noto, tale metodo consente di determinare il valore di resistività apparente  $\rho_m$  secondo la

$$\rho_m = R_w 2 \pi a \quad (15)$$

$R_w$  (resistenza di Wenner) è il rapporto tra la tensione misurata tra gli elettrodi voltmetrici e la corrente impressa tra gli elettrodi amperometrici;

$a$  è la distanza interelettrodica tra gli elettrodi di misura (equispaziati).

Effettuando più misure di resistività apparente al variare di  $a$ , è possibile determinare la curva di resistività apparente  $\rho_m(a)$ .

La riduzione del mezzo disperdente a un modello a doppio strato richiede la determinazione dei parametri ottimali da assegnare alla resistività dello strato superficiale  $\rho_1$ , al suo spessore  $h$ , e alla resistività del mezzo sottostante  $\rho_2$ ; ciò può ottenersi ricorrendo a procedure numeriche.

Applicando il principio delle immagini elettriche alla configurazione degli elettrodi di misura di Wenner si ottiene il valore calcolato della resistività apparente:

$$\rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{k=1}^{\infty} v^k \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2kh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2kh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (16)$$

con  $v$  (coefficiente di riflessione tra mezzo 1 e mezzo 2) calcolabile con la:

$$v = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (17)$$

La (16) fornisce il valore di resistività che si misurerebbe (a pari configurazione degli elettrodi di misura) se il mezzo disperdente corrispondesse effettivamente a un perfetto doppio strato.

La determinazione dei parametri ottimali  $\rho_1$ ,  $h$ ,  $\rho_2$  può essere ottenuta minimizzando la funzione di tre variabili:

$$\Psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\rho_m(a_i) - \rho_c(a_i)}{\rho_m(a_i)} \right]^2 \quad (18)$$

I parametri ottimali individuano il modello a doppio strato che meglio approssima la reale stratificazione definita dalla  $\sigma = \sigma(z)$ .

Il metodo utilizzato per la minimizzazione della (18) è lo *steepest descent method* come suggerito in [11].

### 3. Indagine sperimentale

Allo scopo di verificare il grado di affidabilità della procedura sopra descritta, si è condotta, in collaborazione con l'ENEL - Compartimento di Venezia, una dettagliata indagine sperimentale su un tipico impianto di terra di cabina primaria AT/MT.

Oltre al rilievo sistematico delle tensioni di contatto e di passo, particolare attenzione è stata rivolta alle misure di resistività del terreno circostante la cabina primaria. Infatti, come descritto dettagliatamente nel seguito, una sufficientemente corretta modellizzazione del terreno è cruciale per l'affidabilità della simulazione e tale modellizzazione non può che essere basata su una opportuna interpretazione delle misure di resistività apparente.

#### 3.1. Descrizione dell'impianto di terra della cabina primaria

La cabina è collegata in entra-esce alla rete di trasmissione a 132 kV e presenta la configurazione planimetrica riportata nella figura 3. Il dispersore intenzionale della cabina è costituito da un elemento magliato in corda di rame avente diametro 10,5 mm e sezione  $63 \text{ mm}^2$  interrato a 0,5 m di profondità e da un anello perimetrale con conformazione quadrata di lato pari a circa 65 m realizzato con la medesima corda disposto alla profondità di 2 m. A questo sono collegati spandenti inclinati e 8 picchetti di profondità disposti perifericamente, aventi diametro pari a 22 mm e lunghezza pari a 13 m, interrati a partire da 2 m sotto la superficie del mezzo disperdente.

Al dispersore intenzionale sono connessi alcuni dispersori di fatto, tra cui i ferri di armatura delle opere in calcestruzzo, le fondazioni della cabina MT e dei trasformatori AT/MT e i cunicoli dei cavi MT.

Al dispersore intenzionale sono inoltre connessi, tramite funi di guardia, i dispersori dei sostegni delle due linee aeree attestantisi alla cabina: la prima linea proviene da nord ed è dotata di fune di guardia in acciaio con diametro 10,5 mm e sezione  $66 \text{ mm}^2$ , la seconda da sud con fune in alumoweld con diametro 11,5 mm e sezione  $80 \text{ mm}^2$ . La campata media di entrambe le linee è pari a 300 m. I portali di ingresso della cabina sono connessi al sostegno di derivazione mediante due funi di guardia, ciascuna di lunghezza pari a 33 m.

Le guaine dei cavi MT in partenza dalla cabina sono dotate di giunto isolante; pertanto, esse non partecipano al drenaggio della corrente di guasto monofase a terra.

I sostegni delle due linee aeree attestantisi alla cabina sono dotati di dispersore unificato ENEL tipo MT3-91/3 (costituito da elementi strutturali 701/1 e 701/2). Nel modello del dispersore si sono tenuti in considerazione solo il sostegno di derivazione e il primo sostegno di ciascuna delle linee nord e sud; è stata comunque considerata la corrente drenata dalle funi di guardia anche oltre i primi sostegni.

La cabina è realizzata su terreno recintato mediante rete metallica plastificata fissata a sostegni in acciaio, ancorati a loro volta a basamento in calcestruzzo armato. La recinzione e il basamento risultano sezionati in diversi punti.

I percorsi per la viabilità interna sono asfaltati.

Al fine di verificare l'attendibilità del calcolo di potenziali trasferiti dal dispersore a elettrodi posti nelle vicinanze, si è provveduto a installare una struttura atta a simulare una recinzione composta da 6 picchetti in acciaio profilato a  $T 50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$  infissi per 50 cm entro l'area recintata della cabina a inter-

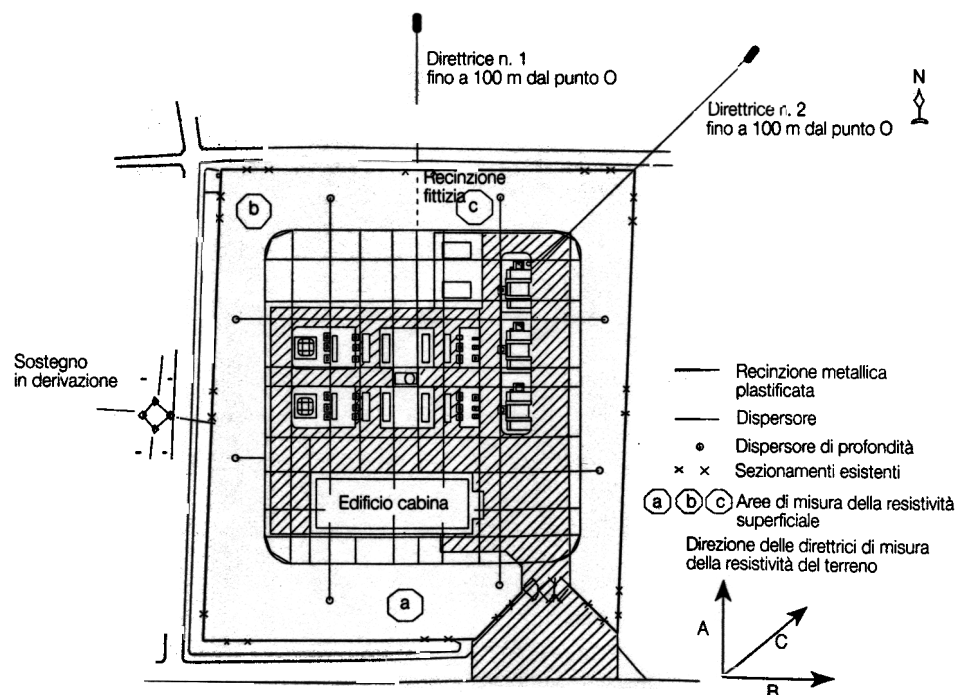


Figura 3 Planimetria generale della cabina primaria AT/MT.



distanza pari a 2 m e cortocircuitati fuori terra mediante una corda in rame da 63 mm<sup>2</sup> (tale struttura è nel seguito denominata "recinzione fittizia").

### 3.2. Misura delle tensioni di contatto e di passo

La misura delle tensioni di contatto e di passo è stata condotta con una corrente di prova pari a 70 A (50 Hz) impressa per mezzo di apposito generatore, utilizzando come elettrodo di richiusura a terra il dispersore di una seconda cabina a distanza di circa 6,5 km e, come via di richiusura fuori terra, la terna dei conduttori di fase della linea aerea di interconnessione.

La corrente drenata dalle funi di guardia ammonta complessivamente a 41,8 A (valore misurato): una parte di questa corrente si richiude a terra attraverso i dispersori dei sostegni (limitatamente ai tre sostegni considerati si sono misurati 3,1 A nel sostegno di derivazione della cabina, 2,7 A nel primo sostegno a sud e 5,1 A nel primo sostegno a nord), mentre la parte rimanente si richiude attraverso la fune di guardia (Figura 4).

Con riferimento alle direttrici rappresentate nella figura 3 si sono misurate:

- tensioni di contatto indisturbate lungo la direttrice 1 fino a distanza pari ad 1 km con passo 50 m;
- tensioni di contatto indisturbate e tensioni di contatto e di passo effettive lungo la direttrice 1 fino a distanza pari a 100 m con passo 1 m;
- tensioni di contatto indisturbate e tensioni di contatto e di passo effettive lungo la direttrice 2 fino a distanza pari a 100 m con passo 1 m.

Le misure sono state eseguite con strumenti in classe 0,5 e sono state depurate da disturbi esterni.

Considerando una corrente di guasto monofase a terra pari a 10 kA, il riporto delle tensioni di contatto e di passo misurate alle condizioni reali si ottiene moltiplicando i valori misurati per  $k_f = 143$ : le tensioni di contatto e di passo misurate riportate nelle figure 7 e 8 sono riferite a  $I_g = 10$  kA.

### 3.3. Misure di resistività

La misura della resistività apparente è stata condotta cercando di contenere al minimo l'influenza del dispersore esistente in corrispondenza alla cabina. A tal proposito, sono state condotte tre serie di misure di resistività apparente lungo tre diverse direttrici A, B, C delle quali nella figura 3 ne è indicata la sola direzione (la scala utilizzata nella figura 3 non consente di rappresentare l'esatta posizione di tali direttrici poste a una distanza di 100-200 m dalla cabina). Le tre direttrici sono state scelte in modo da poter compensare eventuali gradienti di resistività trasversali, variando la distanza interelettrodica da 0,5 m fino a

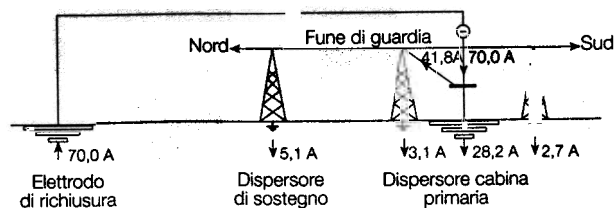


Figura 4 Distribuzione delle correnti nel circuito di misura.

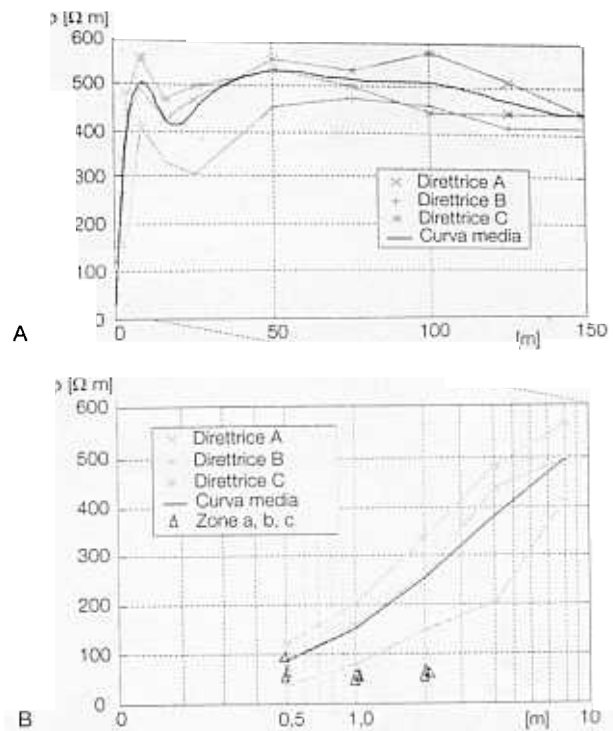


Figura 5 Curve di resistività apparente del mezzo disperdente in prossimità della cabina primaria: A lungo le direttrici A, B, e C; B in corrispondenza delle zone a, b, c.

valori dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni massime del sistema dispersore (circa 150 m). Inoltre, al fine di stimare il valore della resistività superficiale, sono stati effettuati alcuni rilievi in corrispondenza alle zone a, b, c indicate nella figura 3 entro l'area recintata della cabina.

Le figure 5 A e 5 B indicano, rispettivamente, le resistività apparenti valutate lungo le direttrici A, B, C e in corrispondenza alle zone a, b, c.

## 4. Simulazioni numeriche

### 4.1. Modello del sistema dispersore

L'impianto di terra della cabina primaria è stato simulato mediante 13 elettrodi distinti (ovvero elettrodi non connessi elettricamente ma interferenti conduttivamente all'interno dello stesso mezzo disperdente) rappresentativi rispettivamente di:

- elettrodo n. 1: dispersore di cabina;
- elettrodo n. 2: dispersore primo sostegno linea sud;
- elettrodo n. 3: dispersore primo sostegno linea nord;
- elettrodi n. 4 - 11: recinzione reale;
- elettrodo n. 12: recinzione fittizia;
- elettrodo n. 13: dispersore sostegno di derivazione.

La recinzione fittizia è stata simulata mediante elettrodi cilindrici aventi lunghezza pari a 0,5 m interrati con testa a 0,02 m dalla superficie del terreno.

La recinzione reale è invece stata approssimata con 8 elettrodi cilindrici orizzontali a potenziale flottante, rappresentativi ognuno di un tratto di recinzione compreso tra due sezionamenti sufficientemente distanziati (sono stati ignorati per semplicità i seziona-



menti ravvicinati, la cui presenza ha effetto trascurabile sulla distribuzione del potenziale nel terreno). Tra i vari dispersori di fatto è stato considerato solamente quello più significativo, cioè il dispersore costituito dai ferri di armatura delle fondazioni del locale destinato ai quadri MT.

Le approssimazioni assunte nel modello del sistema dispersore non sono legate a limiti del programma di calcolo bensì dalla necessità di contenere i tempi di calcolo in relazione al razionale utilizzo delle risorse hardware a disposizione.

#### 4.2. Modello del mezzo disperdente

Dalle misure di resistività effettuate esce un quadro della situazione piuttosto complesso; possono comunque essere individuate due tipologie di modello di mezzo disperdente valide, rispettivamente, in vicinanza e lontano dalla cabina.

Il mezzo disperdente vicino alla cabina appare costituito da uno strato superficiale (probabilmente di riporto) avente buone caratteristiche disperdenti con  $\rho = 80 - 100 \Omega m$  (misura da ritenersi approssimata per difetto a causa della vicinanza del dispersore) e spessore pari a circa 2,5 - 3 m sovrapposto al mezzo disperdente originario con  $\rho = 400 - 460 \Omega m$  ed estensione infinita nel senso della profondità; il mezzo disperdente lontano dalla cabina si differenzia per le caratteristiche dello strato superficiale, che presenta resistività comunque contenuta pari a  $\rho = 80 - 160 \Omega m$  e spessore di circa 1 - 1,5 m.

Estrapolando la curva della resistività apparente, è evidente che a grandi profondità (oltre 200 - 300 m) la resistività del mezzo disperdente tende a diminuire, mostrando un asintoto definito da  $\rho \approx 450 \Omega m$ .

Per procedere a una corretta assegnazione dei parametri al modello del mezzo disperdente, è utile tener conto che il gradiente del potenziale e la densità di corrente del campo prodotto da un dispersore assumono valori relativamente elevati in prossimità al dispersore stesso per degradare con legge pressoché quadratica a mano a mano che da esso ci si allontana. Ciò induce a prediligere modelli con resistività e spessore dello strato superficiale simili a quelli riscontrati in corrispondenza al dispersore; si deve però considerare che, come è intuitivo, l'assegnazione di parametri al modello di mezzo disperdente al solo fine di soddisfare condizioni locali nelle vicinanze del dispersore può comportare marcate deviazioni su grandezze del campo di corrente lontano da esso. Al fine di comprendere come giocano i parametri del modello del mezzo disperdente sull'andamento dei potenziali superficiali, nel caso di mezzi disperdenti a doppio strato, si può utilizzare la seguente espressione, che consente di ottenere il potenziale al suolo determinato da un elettrodo puntiforme o emisferico posto in superficie [1]:

$$V(r) = \frac{I}{2\pi r} \left[ \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1) e^{-\frac{\delta}{2h}r} \right] \quad (19)$$

con  $\delta$  ricavabile dalla tabella 1;

A distanza sufficientemente elevata (oltre la quale tut-

Tabella 1 - Valore di  $\delta$  in funzione del rapporto  $\rho_1/\rho_2$  per mezzo disperdente a doppio strato

$\rho_1/\rho_2$	100	10	0,1	0,02
	2	1,84	1,16	0,4

to accade come se il campo fosse determinato da un elettrodo puntiforme o emisferico), la (19) può essere adottata con una certa approssimazione anche nel caso di dispersori di forma qualsiasi. Da essa si deduce che:

- a grande distanza dal dispersore  $V(r)$  dipende solamente da  $\rho_2$  come se il mezzo disperdente fosse omogeneo;

- la presenza dello strato superficiale è sensibile vicino al dispersore in modo crescente con lo spessore  $h$ . Per quanto detto, tenuto conto dei tre gradi di libertà consentiti dal modello adottato (le resistività dei due strati e lo spessore dello strato superficiale), si dovranno prediligere valori di resistività e spessore dello strato superficiale simili a quelli riscontrati vicino al dispersore e valori di resistività dello strato profondo che considerino anche il valore asintotico cui tende la curva della resistività apparente per grandi profondità. Sulla base di queste riflessioni si è assunto:  $\rho_1 = 110 \Omega m$ ,  $h = 2,75 m$ ,  $\rho_2 = 455 \Omega m$ .

Per quanto concerne infine lo strato di asfalto che ricopre i sistemi di viabilità interna, si osserva che le riduzioni delle tensioni di contatto e di passo da esso determinate dipendono quasi esclusivamente dalla sua resistività e spessore.

Considerando per esempio uno strato superficiale avente resistività pari a 50 000  $\Omega m$  (resistività corrispondente ad asfalto umido) e spessore 10 cm, al variare della resistività del sottostante mezzo disperdente i fattori di riduzione delle tensioni di contatto  $F_{ch}$  e di passo  $F_{ph}$  (fattori per i quali moltiplicare le tensioni indisturbate per ottenere le corrispondenti tensioni effettive) sono calcolabili come nella tabella 2.

Il rilievo delle tensioni di contatto fino a 1 km può essere utilizzato per determinare la tensione totale di terra del dispersore: infatti, tenuto conto della (19) si ha:

$$V_t = V_{co}(r) + \frac{I}{2\pi r} \left[ \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1) e^{-\frac{\delta}{2h}r} \right] \quad (20)$$

con  $V_t$  tensione totale di terra e  $V_{co}(r)$  tensione di contatto indisturbata nel punto individuato da  $r$  lungo la direttrice 1, sufficientemente lontano dal dispersore affinché possa ritenersi applicabile la (19). Dalla (20), con il modello di mezzo disperdente

Tabella 2 - Fattori di riduzione delle tensioni di contatto e di passo ottenuti mediante l'introduzione di uno strato superficiale di asfalto con spessore 10 cm e resistività 50 000  $\Omega m$  per alcuni valori di resistività del mezzo sottostante

	$\rho_1 = 50 \Omega m$	$\rho_1 = 100 \Omega m$	$\rho_1 = 150 \Omega m$	$\rho_1 = 200 \Omega m$
$F_{ch}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$
$F_{ph}$	$6,39 \cdot 10^{-3}$	$6,39 \cdot 10^{-3}$	$6,38 \cdot 10^{-3}$	$6,37 \cdot 10^{-3}$

adottato, si ottiene  $V_t = 60,03 \text{ V}$  (riferito alla corrente di prova di 70 A).

### 4.3. Risultati di simulazione

Con riferimento al modello di mezzo disperdente adottato sono stati calcolati:

- potenziali verso l'infinito dei 13 elettrodi separati costituenti il sistema dispersore (Tabella 3);
- distribuzione del potenziale sulla superficie del

mezzo disperdente in corrispondenza alla cabina primaria (Figura 6);

- tensioni di contatto indisturbate e tensioni di contatto e di passo effettive lungo le direttrici 1 e 2 della figura 3 (Figure 7 e 8).

In particolare, il potenziale dell'elettrodo 1 costituisce la tensione totale di terra del dispersore della cabina mentre i potenziali degli elettrodi 2 ÷ 13 rappresentano potenziali trasferiti.

Tabella 3 - Potenziali assunti e correnti disperse dagli elettrodi componenti il sistema dispersore			
ELETTRODO	DESCRIZIONE	POTENZIALE ASSUNTO (V)	CORRENTE DISPERSA (A)
	dispersore cabina		4471
2	dispersore sostegno sud		728
3	dispersore sostegno nord	4441	386
4	recinzione tratto 1	6489	0
5	recinzione tratto 2	6859	0
6	recinzione tratto 3	6936	0
7	recinzione tratto 4	6910	0
8	recinzione tratto 5	6813	0
9	recinzione tratto 6	7001	0
10	recinzione tratto 7	7435	0
11	recinzione tratto 8	7359	0
12	recinzione fittizia	8671	0
13	dispersore sostegno derivazione	9483	525

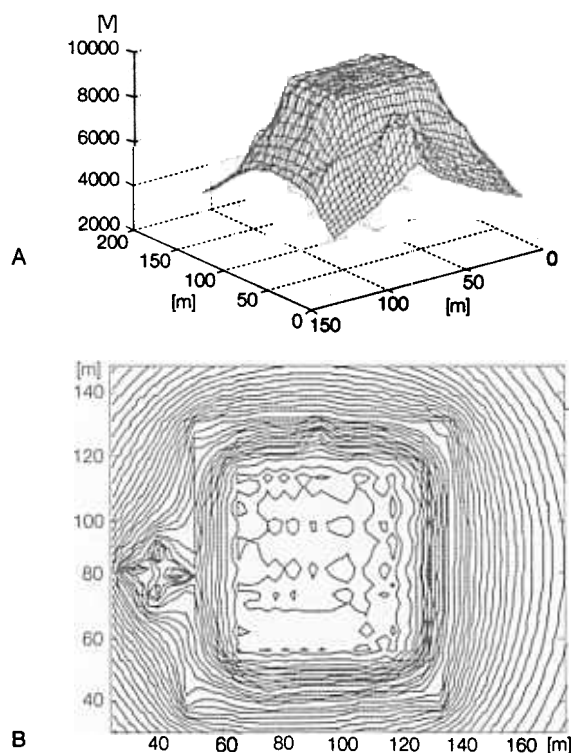


Figura 6 Potenziali sulla superficie del mezzo disperdente in corrispondenza dalla cabina primaria e del sostegno di derivazione: A rappresentazione tridimensionale; B curve equipotenziali.

La rappresentazione grafica della distribuzione, di potenziale sulla superficie del terreno (Figura 6), pur fornendo indicazioni di carattere squisitamente qualitativo, permette un'immediata identificazione delle eventuali zone critiche.

### 4.4. Confronto tra valori misurati e valori calcolati

Fin da un primo esame qualitativo delle Figure 7 e 8 si può riconoscere che la simulazione numerica è in grado di riprodurre con buona fedeltà la reale distribuzione dei potenziali sulla superficie del terreno conseguenti alla corrente di guasto dispersa dall'impianto di terra.

Gli scostamenti osservabili tra i valori misurati e calcolati sono generalmente inferiori al 5 ÷ 7% (da notare che la precisione e la ripetibilità delle misure nell'ambito degli impianti di terra è comunque raramente inferiore al 5%).

Le massime differenze in valore assoluto tra tensioni di contatto misurate e calcolate si riscontrano lontano dal dispersore ( $d > 150 + 160 \text{ m}$ ) dove tali tensioni assumono i valori massimi. Ciò è imputabile alla scelta dei parametri del modello del mezzo disperdente: dovendo necessariamente adottare il medesimo modello in tutto il campo di calcolo, per la scelta di tali parametri si è privilegiato (come esposto al paragrafo 4.2.) un modello che in superficie meglio ap-

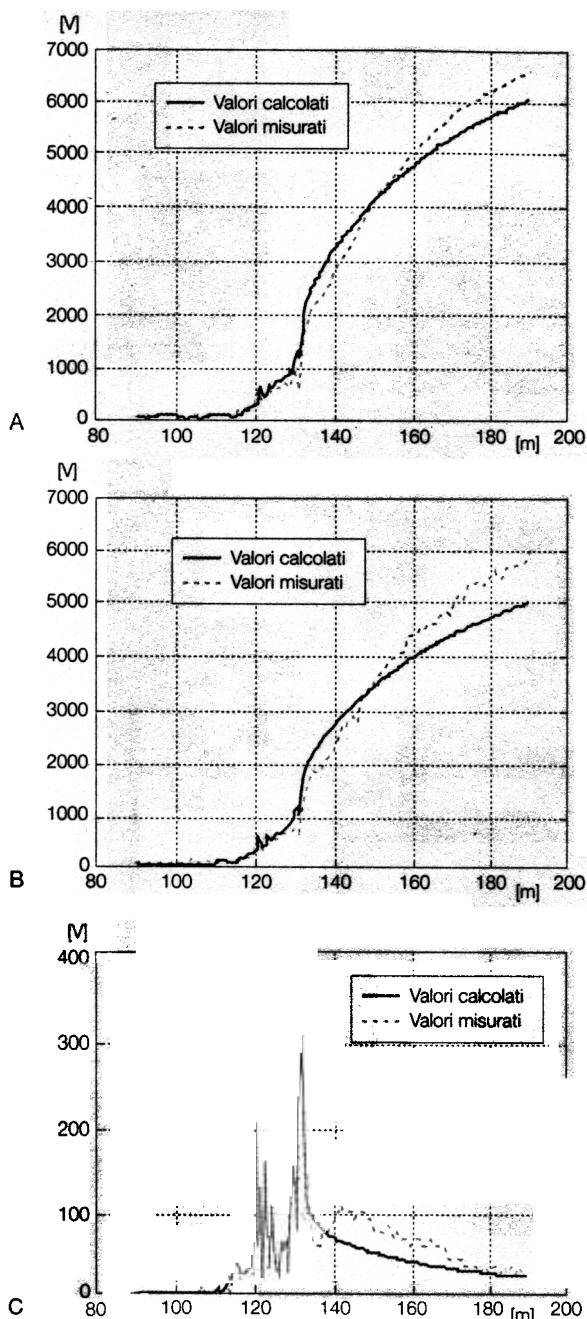


Figura 7 Valori misurati e calcolati lungo la direttrice 1 della figura 3: A tensioni di contatto indisturbate; B tensioni di contatto effettive; C tensioni di passo effettive.

prossima il terreno in corrispondenza al dispersore di cabina, con conseguente perdita di accuratezza nelle zone di calcolo distanti dal dispersore.

Per quanto riguarda le tensioni di passo, le massime differenze in valore assoluto si localizzano in prossimità della recinzione fittizia, dove le deformazioni del potenziale sulla superficie del mezzo disperdente sono notevoli. Si ricorda che la recinzione fittizia (a potenziale flottante) è stata posta in loco appositamente per creare artificialmente una zona critica per il calcolo, caratterizzata da elevata distorsione del potenziale. Anche in questa zona critica, comunque, la simulazione numerica risulta più che soddisfacente, riproducendo con buona approssimazione le tensioni di contatto e di passo effettivamente misurate. Le tensioni misurate presentano un andamento di-

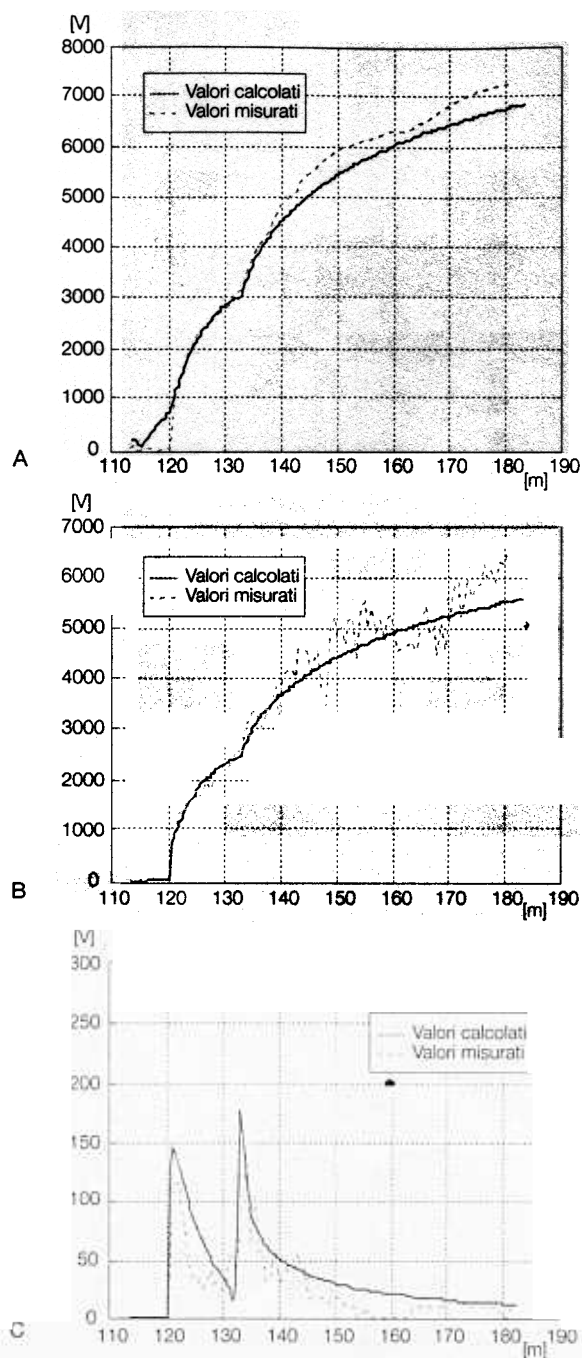


Figura 8 Valori misurati e calcolati lungo la direttrice 2 della figura 3: A tensioni di contatto indisturbate; B tensioni di contatto effettive; C tensioni di passo effettive.

scontinuo, che non si ravvisa nelle corrispondenti tensioni calcolate: ciò è dovuto molto probabilmente alle disomogeneità superficiali del mezzo disperdente reale che non sono state considerate nel modello di simulazione. Le tensioni di contatto e di passo effettive misurate e calcolate rispecchiano l'andamento delle corrispondenti tensioni indisturbate, rimanendo comunque ad esse inferiori a causa delle cadute di tensione sulla resistenza di contatto tra elettrodi di simulazione del corpo umano e mezzo disperdente.

#### 4.5. Interpretazione degli scostamenti tra risultati di simulazione e misure

a scostamenti in prossimità della recinzione fittizia nella figura 7 (ascissa 120 + 130 m): le tensioni di

contatto (indisturbate ed effettive) in prossimità della recinzione fittizia mostrano un andamento crescente nel calcolo e uniforme nelle misure. Ciò è imputabile al fatto che:

- la recinzione fittizia è stata simulata con elementi non affioranti dal terreno;
- il passo di campionamento delle misure è diverso da quello del calcolo.

Il fatto che i punti di misura siano diversi da quelli di campionamento, pur lungo una stessa direttrice, ma in una zona ad andamento del potenziale deformato dalla presenza della recinzione fittizia e caratterizzato da potenziale superficiale localmente molto elevato, fa ritenere che l'errore riscontrato sia riducibile semplicemente diminuendo il passo di campionamento del calcolo: simulazioni ulteriori compiute con passo 0,1 m portano infatti a situazioni più prossime a quelle misurate;

*b* *inflexione delle tensioni di contatto misurate (indisturbate ed effettive) della figura 7 (ascissa 135 m):* è imputabile a un accoppiamento conduttivo tra dispersore e recinzione maggiore di quello ricavabile dalle disposizioni geometriche della figura 3. Trattasi di una perturbazione locale, probabilmente dovuta a interdistanze effettive inferiori a quelle deducibili dalla cartografia o da variazioni locali di resistività che non inficiano la validità del modello;

*c* *tensioni di contatto indisturbate misurate della figura 8 (ascissa < 120 m):* non trovano spiegazione plausibile. La zona circostante tale tratto è perimetrale al dispersore e non può essere interessata da tensioni di contatto indisturbate tanto ridotte (è vero che tale zona risulta asfaltata ma ciò non dovrebbe modificare le tensioni di contatto indisturbate in quanto l'influenza dello strato di asfalto dovrebbe risultare evidente solamente nella determinazione delle tensioni di contatto effettive). La spiegazione è con ogni probabilità da ricercare nel valore della resistenza interna del voltmetro utilizzato per la misura, non sufficientemente elevata da poter considerare la misura indisturbata;

*d* *inflexione presente nelle tensioni di contatto misurate (indisturbate ed effettive) della figura 8 (ascissa 165 m):* è molto probabilmente dovuta all'effetto di un conduttore interrato (di cui non si hanno informazioni) intersecante la direttrice 2 attorno a  $160 \div 165$  m di ascissa. Ovviamente tale inflessione non è presente nelle curve calcolate, in quanto nel modello di sistema dispersore non si è tenuto conto di elementi conduttori diversi da quelli riportati al paragrafo 4.1. L'inflexione appare troppo marcata per essere spiegata con la disomogeneità superficiale del mezzo disperdente.

## 5. Conclusioni

L'obiettivo principale del lavoro può dirsi raggiunto: confrontare, mediante una verifica in campo, i risultati conseguiti tramite una procedura di simulazione

numerica messa a punto per l'analisi di impianti di terra comunque complessi, in mezzi disperdenti stratificati e in regime di bassa frequenza.

La procedura di simulazione, non nuova nei suoi fondamenti teorici, è stata sviluppata interamente a partire dalle equazioni di Maxwell, pur sotto alcune assunzioni semplificative, peraltro non eccessivamente limitative, interpretandole numericamente tramite un'applicazione dinamica del principio delle immagini elettriche.

L'adozione della procedura per la valutazione dei potenziali associati a un dispersore già realizzato e le successive misure in campo su di esso hanno evidenziato scostamenti massimi nei valori corrispondenti dell'ordine del 5%, pari o inferiori agli errori strumentali che normalmente accompagnano questo tipo di misure nel terreno, fatta eccezione soltanto per alcune situazioni locali imputabili a difetti di misura o a inesatta riproduzione del modello della tipologia del sito.

L'unica limitazione intrinseca al metodo di analisi numerica proposto è legata al modello adottato per la simulazione del mezzo disperdente: esso non consente infatti di considerare variazioni di resistività secondo direzioni diverse da quella verticale; l'adozione di un maggior numero di strati rappresentativi del terreno non produce, sotto questo profilo, sensibili vantaggi, traducendosi invece in appesantimenti formali e aumenti dei tempi di calcolo.

È perciò allo studio un diverso approccio tendente a ridurre tale limitazione mediante l'impiego di opportuni fattori di riduzione da applicare alle tensioni di contatto e di passo, onde poter considerare anche le disomogeneità superficiali del mezzo disperdente.

In ogni caso, il modello proposto appare un valido strumento per la progettazione e l'analisi degli impianti di terra, specie laddove esso sia utilizzato unitamente all'esperienza e all'intuizione del progettista, soprattutto in ordine alle misure preliminari di resistività e agli accorgimenti per un'adeguata modellizzazione del mezzo disperdente.

È infine significativo porre in evidenza la disparità di risorse richieste, rispettivamente, per l'esecuzione delle misure (con ingente dispiegamento di personale e mezzi e la costante dipendenza dalla situazione meteorologica) e per la modellizzazione e la successiva elaborazione dati (tempi dell'ordine di qualche giorno lavorativo impiegato da un solo operatore).

*Gli autori desiderano ringraziare il Compartimento ENEL di Venezia per la grande disponibilità mostrata durante la fase delle misure in campo. Sono altresì grati al prof. Antonio Paolucci per la cordiale e sapiente rilettura critica del testo.*

*Manoscritto ricevuto il 15 dicembre 1996.*

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sunde ED: *Earth conduction effects in transmission systems*. Ed. Van Nostrand Company Inc, New York, 1948.
- [2] Klewe HR]: *Interference between power systems and telecommunication lines*. Ed. E. Arnold Ltd, London, 1958.
- [3] Tagg GF: *Earth resistances*. Ed. George Newnes, London, 1964.
- [4] Laurent PG: Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre. *Revue Générale de l'Électricité*, Vol. 81, n. 7/8, 1972, p. 453-572.
- [5] Dawalibi F, Mukhedkar D: Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure: Part I, II e III. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-94, n. 2, 1975, p. 252-272.
- [6] Buccheri P, Cataliotti V, Morana G: Calcolo automatico di impianti di terra comunque complessi in terreni omogenei e non omogenei a doppio strato. *L'Energia Elettrica*, n. 6, 1977., p. 293-304.
- [7] CCITT (The International Telegraph and Telephone Consultative Committee): *DIRECTIVES*, Vol. II, Geneva, 1989.
- [8] Dawalibi F, Barbeito N: Measurement and computation of the performance of grounding systems buried in multilayer soils. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, n. 4, 1991, p. 1483-1490.
- [9] Takahashi T, Kawase T: Analysis of apparent resistivity in a multilayer earth structure. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, n. 2, 1990, p. 604-612.
- [10] Buccheri P, Mangione S, Parise G: Riduzione delle tensioni pericolose di un dispersore di terra per la presenza dell'uomo. *L'Energia Elettrica*, n. 9, 1985, p. 373-379.
- [11] *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. ANSI/IEEE:, Std. 81, 1983.

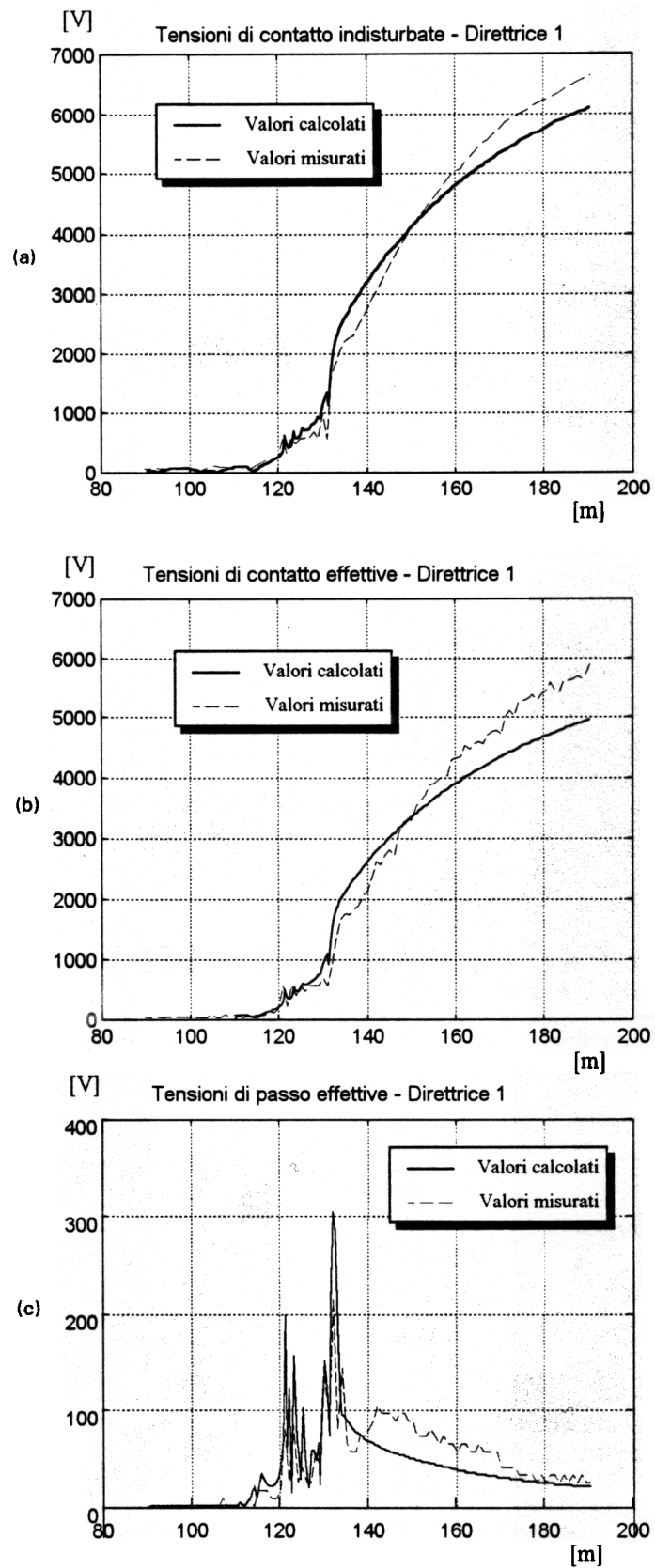


Fig. 7-Valori misurati e calcolati lungo la direttrice 1 di Fig. 3:  
a) tensioni di contatto indisturbate;  
b) tensioni di contatto effettive;  
c) tensioni di passo effettive.

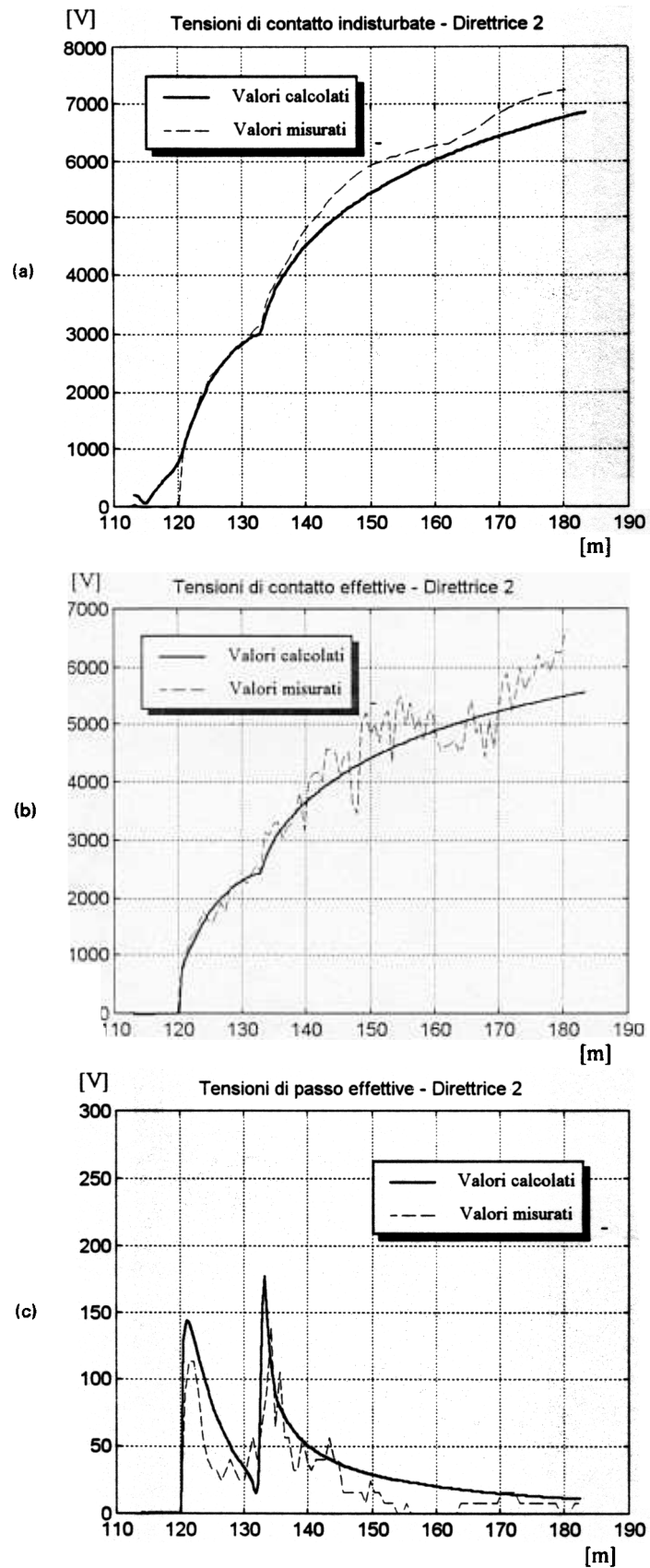


Fig. 8-Valori misurati e calcolati lungo la direttrice 2 di Fig. 3:  
 a) tensioni di contatto indisturbate;  
 b) tensioni di contatto effettive;  
 c) tensioni di passo effettive.