

Dispensori di terra

per sistemi elettrici di distribuzione

Nuove soluzioni per bonifica e realizzazione

ROBERTO ANDOLFATO, ROBERTO TURRI *Dip. di Ingegneria Elettrica, Università di Padova*
GASTONE GUIZZO *ENEL S.p.A. Direzione Distribuzione Triveneto*
MARIANO PIVA *IRT S.p.A.*

Vengono illustrate alcune possibilità offerte dall'utilizzo di elementi infissi a media e grande profondità nella bonifica e realizzazione di impianti di terra per reti gestite con centro stella a terra. Nella prima parte del lavoro viene discussa la possibilità di bonifica di dispersori di impianto con picchetti infissi a grande profondità. Viene quindi descritto nel dettaglio un intervento di bonifica di una Cabina Primaria esistente. Nella seconda parte viene trattato il problema della bonifica dei dispersori di linea confrontando le caratteristiche di dispersori di nuova geometria a quelli tradizionali unificati ENEL. Nella terza parte vengono riportati alcuni dati relativi ad otto interventi di bonifica con la tecnica dei dispersori a grande profondità su altrettante CP dell'ENEL Direzione Distribuzione Triveneto.

1. Introduzione

La bonifica di dispersori per Cabine Primarie (di seguito CP) esistenti o la realizzazione di nuovi impianti sono spesso rese difficoltose da problemi legati alla limitata disponibilità di spazio (per bonifica si intende qui l'insieme dei provvedimenti su impianti esistenti che si rendono necessari a seguito di variazioni dei fattori che determinano la sicurezza - per esempio un aumento della corrente di guasto rispetto a quella di progetto - ed atti alla riduzione delle tensioni di contatto e di passo di un dispersore entro i limiti concessi dalle vigenti normative).

Nei nuovi impianti il problema risulta a volte accentuato dalla riduzione degli ingombri delle apparecchiature fuori terra ottenuta grazie ai migliori livelli di isolamento offerti da alcuni gas.

Ovviamente il problema ammette diverse soluzioni egualmente efficaci ma la restrizione posta sulla disponibilità di superficie riduce notevolmente le possibilità di scelta.

Considerati gli obiettivi del lavoro, di seguito si farà riferimento ad interventi di bonifica di impianti esistenti, essendo le nuove realizzazioni caratterizzate dalle medesime problematiche.

Si ricorda inoltre come le attuali norme CEI in materia siano in corso di revisione a seguito dell'armonizzazione delle norme nazionali a livello europeo attuata dal CENELEC: le considerazioni e gli sviluppi riportati nel seguito mantengono comunque validità inalterata anche alla luce delle nuove norme.

2. Interventi di bonifica di impianti di terra

La sicurezza di un impianto elettrico, con riferimento al suo dispersore, si ritiene garantita qualora siano soddisfatte le prescrizioni di cui alle vigenti norme CEI

11-8 circa il contenimento dei valori massimi delle tensioni di contatto e di passo effettive.

Queste dipendono dalla geometria del dispersore, dalle caratteristiche fisiche del mezzo disperdente (e di eventuali strati superficiali di materiale ad alta resistività) e naturalmente, dall'entità della corrente dispersa.

Inoltre, il valore massimo delle tensioni di contatto e di passo tollerate dal corpo umano dipende dal tempo di applicazione e quindi dal tempo di intervento delle protezioni, secondo una curva tensione - tempo desunta dalle norme IEC.

Un intervento di bonifica teso al rispetto di tali vincoli può agire, anche contestualmente, su diversi fronti quali la rete di alimentazione del guasto, il mezzo disperdente, la geometria del dispersore. Gli interventi meno invasivi riguardano il mezzo disperdente in superficie e la geometria del dispersore, ma per comprendere in quale direzione sia più opportuno procedere, si ritiene utile premettere alcune considerazioni di carattere generale.

2.1. Corrente di guasto monofase a terra

Nelle reti gestite con centro stella a terra, un guasto monofase a terra rappresenta un cortocircuito e la conseguente corrente può assumere valori rilevanti: tale corrente può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$I_g = \frac{\sqrt{3}U}{|Z_d + Z_i + Z_o + 3R_t|} \quad (1)$$

dove U rappresenta la tensione nominale del sistema, Z_d , Z_i , Z_o le impedenze dei bipoli alle sequenze rispettivamente, diretta, inversa ed omopolare visti dalla sezione di guasto, ed R_t la resistenza verso terra in corrispondenza alla sezione di guasto. La corrente I_g dipende quindi sia dalle caratteristiche e dalla configurazione della rete che dalla resistenza di guasto R_t : quest'ultima, nel caso di guasto franco a terra in CP assume normalmente valori dell'ordine di $1 \div 4 \Omega$ in funzione della resistenza di terra del dispersore di

impianto e degli elementi drenanti connessi (ad esempio funi di guardia di linee aeree o guaine di cavi).

Le correnti di guasto monofase a terra comunicate dalla società distributrice fanno normalmente riferimento al caso in cui R_t sia nulla e non superano normalmente i seguenti valori in funzione della tensione del sistema:

- 132 kV – 15 kA
- 220 kV – 25 kA
- 380 kV – 30 kA

Da notare che questi sono i valori massimi prevedibili, mentre l'esperienza pratica dimostra che i valori tipici sono spesso sensibilmente inferiori: ad esempio, nell'area Triveneta, il valore medio di I_g per reti a 132 kV è pari a circa 9 kA.

Il modulo della somma delle impedenze dei bipoli alle sequenze è generalmente di qualche decina di Ohm ed è quindi immediato concludere come anche i più elevati valori di R_t ragionevolmente ipotizzabili non sono tali da modificare in modo apprezzabile I_g . Ai fini pratici, la corrente I_g si può supporre dunque impressa da un generatore di corrente ideale.

2.2. Drenaggio di parte della corrente di guasto

Si consideri un impianto connesso ad una o più linee aeree ognuna dotata di fune di guardia e si supponga che il dispersore di impianto attraverso di esse sia collegato ai dispersori di linea.

In caso di guasto monofase a terra solo una parte I_{rt} di I_g interessa il dispersore: la parte rimanente viene drenata dalle funi di guardia e fa ritorno alle sorgenti che alimentano il guasto attraverso il terreno, passando per i dispersori di linea dei sostegni, o attraverso le funi di guardia stesse.

Il drenaggio da parte delle funi di guardia può essere considerato legato a due effetti separati:

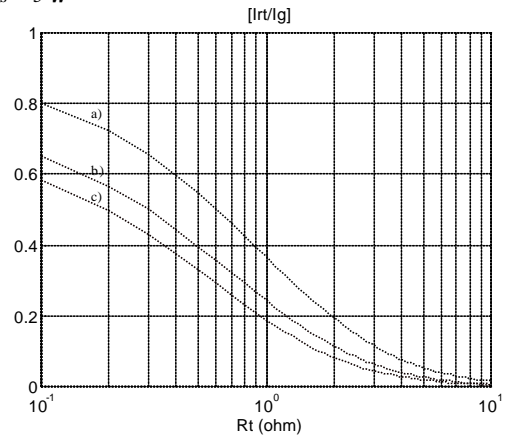
- il primo interessa solamente le funi di guardia delle linee che alimentano il guasto ed è dovuto all'accoppiamento induttivo tra le spire costituite dai conduttori di fase ed il terreno e le spire costituenti le funi di guardia;
- il secondo riguarda tutte le funi di guardia ed è legato alla ripartizione della corrente di guasto sul parallelo tra la resistenza di terra del dispersore di impianto e l'impedenza di ingresso di ognuna delle funi di guardia.

E' possibile calcolare la ripartizione delle correnti di guasto negli impianti di terra e nelle funi di guardia anche in sistemi complessi di grandi dimensioni: allo scopo in letteratura sono state proposte varie metodologie (vedasi per esempio [1] [2]). La guida CEI 11-37, comunque, fornisce elementi utili ad una stima approssimata, ma attendibile, dell'entità del drenaggio da parte delle funi di guardia applicabile in configurazioni semplici.

Sulla base di tali elementi e di specifiche procedure facilmente implementabili su PC è possibile ottenere degli abachi di qualche utilità in corrispondenza a qualsiasi configurazione di rete. Ad esempio, in figura 1 sono riportati due abachi che forniscono le distribuzioni di $I_{rt}/I_g(R_t)$ nel caso in cui l'impianto sia connesso a due linee aeree entrambe alimentanti il guasto e dotate

di funi di guardia. Gli abachi sono differenziati in funzione della resistenza di terra dei dispersori di linea. Tali abachi, pur rappresentando una situazione particolare, consentono di trarre conclusioni di carattere generale. Va precisato anche che i valori corrispondenti ad $R_t > 2 \Omega$ (quindi di scarso interesse pratico), sono stati ottenuti per estrapolazione e quindi vanno considerati con qualche cautela.

(I) $R_s = 5 W$



(II) $R_s = 50 W$

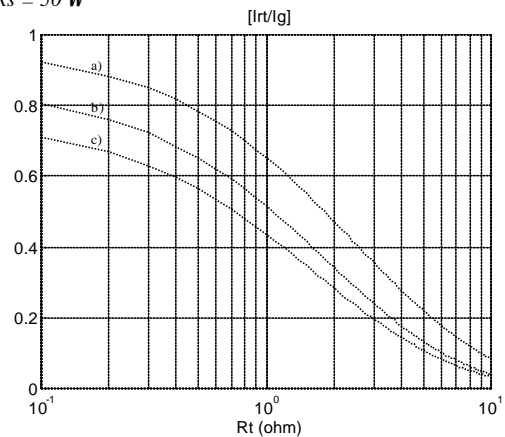


Figura 1 Distribuzioni I_{rt}/I_g in funzione della resistenza di terra di impianto e delle caratteristiche delle funi di guardia
a): fune di guardia in acciaio (66 mm^2)
b): fune di guardia in alumoweld (81 mm^2)
c): fune di guardia in copperweld (58 mm^2)

2.3. Bonifica mediante riduzione di R_t

La bonifica di un dispersore di CP mediante riduzione di R_t rappresenta spesso una soluzione preferibile ad altre in quanto consente di eliminare le interferenze tra dispersore e strutture esterne (di proprietà ENEL o di terzi) difficilmente controllabili nel tempo.

La riduzione di R_t si può ottenere mediante l'estensione orizzontale o verticale del dispersore, oppure, in via alternativa, collegandovi i conduttori di terra della rete MT. L'individuazione della soluzione ottimale richiede in ogni caso analisi specifiche ed in talune situazioni può essere conveniente adottare più azioni combinate. In molti casi però, l'esperienza acquisita dimostra che il collegamento al dispersore di CP di conduttori di terra appartenenti al sistema MT non risulta conveniente in quanto richiede successivi interventi di bonifica ai dispersori delle cabine secondarie ENEL o di utenze MT private poste in prossimità della CP.

Per tale motivo, nel seguito viene considerata la sola bonifica mediante estensione del dispersore.

Ora, fissato un valore per la resistenza di terra dei dispersori di linea, gli abachi di figura 1 indicano, com'è intuitivo, che Irt aumenta riducendo Rt . E' lecito pertanto porsi il problema circa la reale efficacia della bonifica di un dispersore agendo sulla riduzione di Rt considerato che, in tal caso, l'aumento di Irt potrebbe compensare o compromettere i vantaggi derivanti.

Per la linearità del sistema, le massime tensioni di contatto e di passo imperturbate generate da un dispersore immerso in un mezzo omogeneo avente resistività r e disperdente la corrente Irt possono essere espresse con relazioni del tipo:

$$V_{co} = Kc \ r \ Irt \quad (2)$$

$$V_{po} = Kp \ r \ Irt \quad (3)$$

dove Kc e Kp sono costanti che dipendono solamente dalla geometria del dispersore.

Normalmente, il rispetto dei limiti imposti alle tensioni di passo non pone difficoltà rilevanti ed è sufficiente fare riferimento alla sola condizione relativa alle tensioni di contatto. Fissate le caratteristiche del mezzo disperdente, la bonifica è efficiente se è tale da ridurre il prodotto $Kc \ Irt$.

Nel caso di dispersori aventi geometria complessa, il coefficiente Kc è calcolabile solo mediante appositi codici di calcolo. Per dispersori aventi geometrie semplici e tradizionali come nel caso di reti magliate si dispone invece di espressioni analitiche per il calcolo di Kc che possono risultare utili (il caso di reti magliate con picchetti si può ancora analizzare introducendo qualche approssimazione) [3] [4].

2.3.1. BONIFICA DI DISPERSORI MAGLIATI MEDIANTE ESTENSIONE

Nel caso di dispersori con conformazione a rete magliata a maglia quadra di lato L , prive di picchetti si ha [5]:

$$Kc = \frac{a}{p^b} \quad (4)$$

dove p rappresenta il perimetro della rete ed a e b sono coefficienti funzioni di L . La resistenza di tali dispersori può essere ottenuta con espressioni del tipo:

$$Rt = r \frac{c}{p^d} \quad (5)$$

dove ancora, c e d sono coefficienti dipendenti da L .

Combinando le (4) e (5) e raggruppando i coefficienti si ottiene:

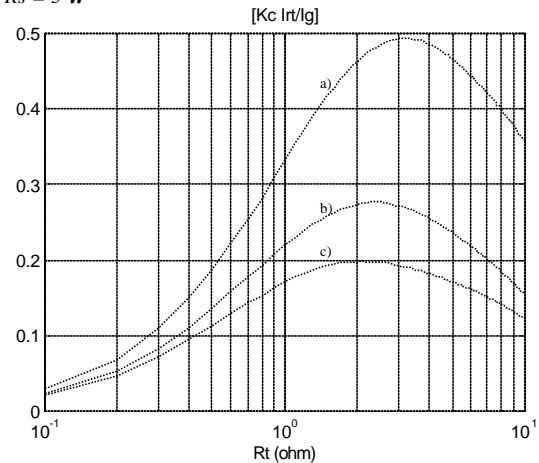
$$Kc = k \left(\frac{Rt}{r} \right)^{\frac{b}{d}} \quad (6)$$

Il coefficiente k e l'esponente b/d dipendono da L : ai fini delle considerazioni che seguono possono essere utilizzati dei valori medi validi ad esempio per $L = 8$ m ($k = 0,907$, $b/d = 1,40$). Diventa quindi interessante tracciare la funzione $kc \ Irt(Rt)$: in figura 2 sono rappresentati i casi con $Rs = 5$ e 50Ω e $r = 1 \Omega$ m.

Dalla figura 2 si evince come la bonifica mediante estensione della rete (con lato di maglia costante) possa

essere o meno efficace in funzione delle condizioni di partenza. Nel caso in cui l'impedenza di ingresso dei circuiti drenanti sia bassa (valori di Rs modesti e funi di guardia in copperweld) la bonifica di dispersori con valore iniziale di Rt elevato può risultare difficile e richiede il superamento di un valore critico (posto a circa $Rt = 2 \Omega$ se $Rs = 5 \Omega$ e le funi di guardia sono in copperweld).

(I) $Rs = 5 \ W$



(II) $Rs = 50 \ W$

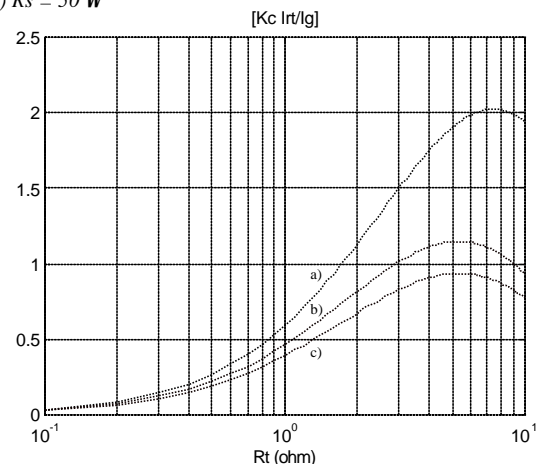


Figura 2 Distribuzioni $Kc \ Irt/Ig$ in funzione della resistenza di terra di impianto e delle caratteristiche delle funi di guardia
a): fune di guardia in acciaio (66 mm²)
b): fune di guardia in alumoweld (81 mm²)
c): fune di guardia in copperweld (58 mm²)

Il punto di massimo delle distribuzioni di figura 2 non dipende ovviamente dalla resistività del terreno e dipende poco dal lato di maglia: dipende invece da Rs e dal materiale costituente le funi di guardia. Si osservi anche che, nel caso in cui l'impedenza di ingresso dei circuiti drenanti sia bassa, i punti di massimo di tali distribuzioni si collocano in una fascia di Rt piuttosto comune. Gli impianti caratterizzati da tali valori sarebbero pertanto gestiti in condizioni critiche. Nella maggior parte dei casi pratici però tali massimi si registrano per valori di Rt elevati: in tal caso, la bonifica per estensione porta sempre a risultati positivi. E' però necessario poter procedere con l'estensione fino a valori tali per cui essa risulta efficace, cosa spesso impedita da problemi contingenti. Ne può derivare la necessità di ricorrere ad altri espedienti.

2.3.2. BONIFICA DI DISPERSORI MAGLIATI MEDIANTE ELEMENTI DI PROFONDITÀ

In linea di principio, un dispersore potrebbe essere realizzato con un solo elemento infisso a grande profondità: in tal caso, il mancato controllo del potenziale in superficie fa sì che la tensione di contatto imperturbata equivalga praticamente alla tensione totale di terra. Per un dispersore costituito da un solo elemento infisso si ha quindi:

$$K_c = \frac{R_t}{r} \quad (7)$$

Confrontando la (6) con la (7), è immediato notare come il coefficiente K_c di un elemento infisso diminuisce con R_t meno di quanto non accada nel caso di dispersore magliato.

Nel caso di un dispersore magliato integrato da elementi infissi a grande profondità, cautelativamente si può porre:

$$K_c = K_{co} \frac{R_t}{R_{to}} \quad (8)$$

dove K_{co} e R_{to} sono relativi al solo dispersore magliato in assenza di elementi infissi. In ogni caso, all'uso di elementi infissi consegue in un certo senso un degrado del coefficiente K_c e rimane da verificare se la bonifica è realmente efficace, ovvero se produce una diminuzione del prodotto $K_c Irt$. La distribuzione $K_c Irt$ (R_t) assume in tal caso (a meno di un fattore di scala), lo stesso andamento della distribuzione $R_t Irt$ (R_t), ovvero della tensione totale di terra. La tensione totale di terra rappresenta in ogni caso un indice significativo dell'efficacia della bonifica. Le distribuzioni di figura 3 sono derivate immediatamente dalla figura 1.

L'intervento di bonifica con riduzione di R_t è anche intuitivamente più efficace quando ad esso consegue una riduzione della tensione totale di terra. La figura 3 indica come ciò accada in funzione delle condizioni al contorno (ovvero dalla tipologia delle funi di guardia e dalla resistenza dei dispersori di linea) e dalla resistenza di terra iniziale dell'impianto, e risultati più agevoli nel caso in cui l'impedenza di ingresso dei circuiti drenanti sia elevata.

2.3.3. CONFRONTO TRA I DUE SISTEMI DI BONIFICA ANALIZZATI

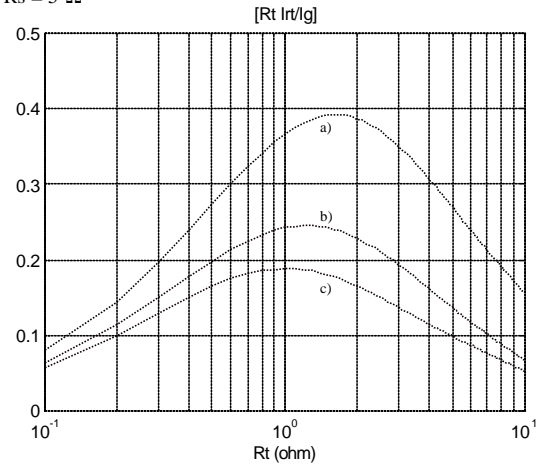
La bonifica per estensione appare più razionale sotto un profilo strettamente analitico mentre la bonifica con elementi infissi, producendo un degrado del coefficiente K_c , può introdurre difficoltà nel caso in cui l'impedenza di ingresso delle funi di guardia sia ridotta.

Ciò è stato confermato anche mediante simulazioni condotte al calcolatore con il codice di calcolo GSA (Grounding System and Soil Structure Analysis) [6].

E' stato verificato, ad esempio, come non sia possibile bonificare un piccolo dispersore magliato (immerso in un mezzo omogeneo e connesso alle funi di guardia in copperweld di due linee aeree con sostegni resistenza di linea con $R_s = 5 \Omega$) utilizzando un unico elemento infisso centralmente neppure scendendo a profondità molto elevate (fino a 200 m). Ad analogo risultato si è pervenuti nel caso in cui il mezzo disperdente non sia omogeneo ma abbia caratteristiche migliori in profondità.

L'elemento di profondità bonifica la zona vicina alla "testa" ma allontanandosi da tale zona, l'incremento di Irt è tale da compensare la riduzione di K_c . Occorre in tal caso ricorrere ad interventi supplementari che agiscano nel senso di migliorare il coefficiente K_c , come ad esempio l'infittimento delle maglie o l'uso di picchetti perimetrali non profondi.

(I) $R_s = 5 \Omega$



(II) $R_s = 50 W$

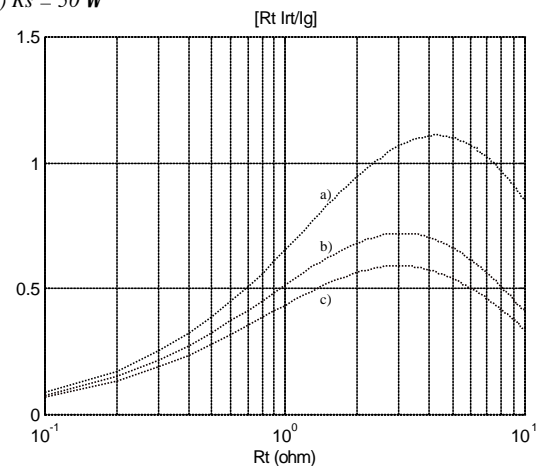


Figura 3 Distribuzioni $R_t Irt/Ig$ in funzione della resistenza di terra di impianto e delle caratteristiche delle funi di guardia
a): fune di guardia in acciaio (66 mm^2)
b): fune di guardia in alumoweld (81 mm^2)
c): fune di guardia in copperweld (58 mm^2)

In tal senso la bonifica del dispersore potrebbe essere ottenuta con minime riduzioni di R_t (e quindi minimi aumenti di Irt) agendo prevalentemente su K_c . L'uso di elementi infissi appare in tal caso inessenziale: in realtà, nella maggior parte dei casi pratici il massimo della distribuzione della tensione totale di terra si presenta per valori di R_t sufficientemente elevati da rendere efficace la bonifica (figura 2). Inoltre, l'uso di elementi infissi a grande profondità può divenire di grande utilità in un'ottica più ampia dove viene considerato non tanto il singolo dispersore di impianto ma il sistema costituito da dispersore di impianto e dalla successione di dispersori di linea ad esso connessi mediante funi di guardia. Inoltre, non vanno assolutamente trascurate considerazioni economiche, spesso favorevoli all'uso dei elementi infissi come sarà evidenziato e documentato nel seguito.

L'uso di elementi infissi a grande profondità non richiede estensioni orizzontali del dispersore iniziale e spesso è favorito dal comportamento del mezzo disperdente la cui resistività tende a diminuire con la profondità. Quest'ultima affermazione è supportata da numerose indagini sperimentali condotte da ENEL Direzione Distribuzione Triveneto, che portano a concludere come la resistività degli strati profondi del terreno, sia sempre sostanzialmente inferiore a quella del mezzo in superficie e non vari molto con il sito.

Si consideri infine come l'uso di elementi infissi a grande profondità spesso può fornire una soluzione radicale alla bonifica: trattando di sistemi elettricamente connessi, dispersori di impianto e dispersori di linea non possono essere considerati separatamente. Osservando le distribuzioni di figura 2 si nota come la bonifica di un dispersore di impianto connesso a funi di guardia si può ottenere anche aumentando R_t . In tal caso, I_{rt} evidentemente diminuisce, mentre la corrente di guasto monofase a terra I_g rimane sostanzialmente invariata: si ottiene di conseguenza un incremento della corrente drenata dalle funi di guardia e si finisce con il trasferire il problema sui dispersori di linea. La bonifica deve invece essere integrale e riferita al sistema elettrico.

L'idea di procedere a bonifica mediante infissioni a grande profondità è stata messa in pratica in casi concreti: nel seguito viene fornito qualche dettaglio riguardo ad uno di tali interventi.

3. Bonifica del dispersore di una Cabina Primaria esistente

La CP oggetto di bonifica è collegata in entra esci alla rete 132 kV e presenta la configurazione planimetrica di figura 4.

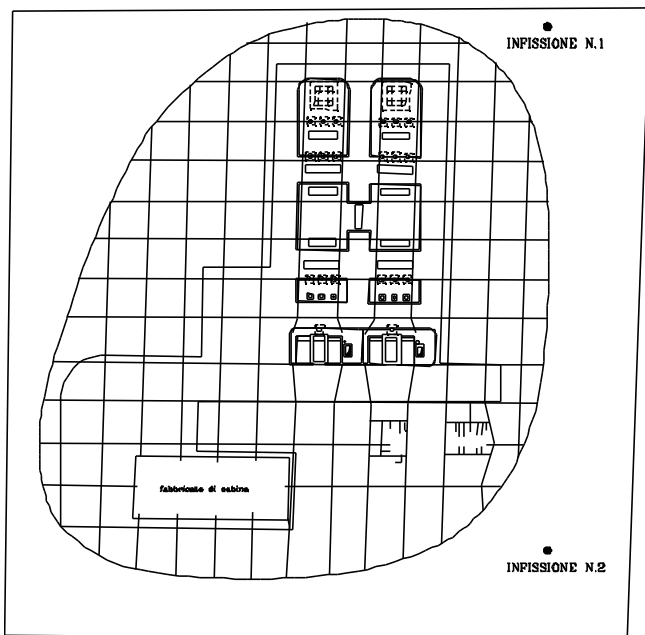


Figura 4 Planimetria generale della CP oggetto di bonifica

Il dispersore intenzionale della cabina è costituito da un elemento magliato in corda di rame avente diametro 10,5 mm e sezione 63 mm². La profondità di interramento è pari a 0,7 m per le maglie centrali e 2 m per l'anello periferico.

Al dispersore intenzionale sono connessi alcuni dispersori di fatto, tra i quali i ferri d'armatura delle fondazioni del fabbricato di cabina e dei trasformatori. Al dispersore di impianto sono inoltre connessi tramite funi di guardia i dispersori di linea dei sostegni delle due linee aeree a 132 kV attestatesi alla CP: le funi di guardia sono entrambe in acciaio con diametro 11,5 mm e sezione 79 mm².

La campata media di entrambe le linee è pari a 300 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.

3.1. Misure di resistività e modello del mezzo disperdente

Le misure di resistività apparente del terreno sottostante la CP sono state condotte cercando di limitare l'influenza dell'esistente dispersore. In proposito sono state condotte due serie di misure di resistività con il metodo di Wenner lungo altrettante direttrici mutuamente ortogonali con distanze interelettrodiche crescenti da 1 a 140 m. I risultati delle misure sono riportati in figura 5.

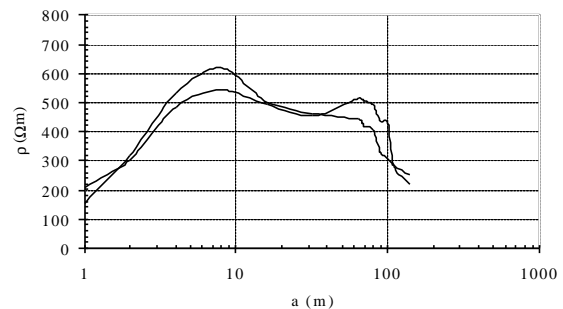


Figura 5 Curve di resistività apparente misurata lungo due direttrici ortogonali

Le distribuzioni di resistività apparente evidenziano un marcato gradiente di resistività in senso verticale mentre orizzontalmente le variazioni di resistività sono modeste. Si configura pertanto un modello di mezzo disperdente a strati orizzontali. Elaborando i valori medi della resistività apparente misurata, mediante specifico modulo del codice GSA [6], si ottiene un modello di mezzo disperdente a doppio strato con le seguenti caratteristiche [4] [7]:

$$r1 = 140 \Omega m, h1 = 0,5 m, r2 = 400 \Omega m$$

Le misure di resistività sono state eseguite ad una certa distanza dalla CP. L'esame stratigrafico del terreno in corrispondenza del dispersore indica la presenza di uno strato vegetale superficiale dello spessore compreso tra 0,8 e 2 m, di un sottostante strato di ghiaia fino a circa 68 m e di strati profondi alterni di ghiaia ed argilla. Le caratteristiche del modello a doppio strato in corrispondenza dell'impianto sono quindi più verosimilmente le seguenti:

$r1 = 180 \div 220 \Omega m$, $h1 = 1,0 \div 1,8 m$, $r2 = 450 \div 500 \Omega m$

Le misure effettuate indicano infine come a profondità superiori a 100 m la resistività subisca una brusca riduzione: anche se non immediatamente quantificabile si può ritenere che la resistività degli strati più profondi sia pari a circa $70 \Omega m$. Informazioni molto utili in proposito possono essere spesso tratte da indagini stratigrafiche specifiche oppure più facilmente consultando il Catasto dei pozzi o documentazione simile disponibile presso Comuni o Consorzi di Bonifica.

3.2. Simulazioni precedenti l'intervento di bonifica

Misure condotte sull'impianto indicano una resistenza di terra complessiva (funi di guardia collegate) pari a:

- R misurata = $1,07 \Omega$

La corrente di misura si ripartisce tra dispersore e funi di guardia secondo le seguenti percentuali:

- dispersore: 39,3 %
- funi di guardia: 60,7 %

La resistenza di terra misurata del solo dispersore di impianto è pertanto indicativamente pari a:

- Rt misurata = $2,72 \Omega$

Tale valore è da ritenersi approssimato per eccesso in quanto influenzato dagli effetti di interferenza conduttiva con i dispersori di linea.

Supposto il mezzo disperdente a doppio strato con le seguenti caratteristiche:

- $r1 = 200 \Omega m$, $h1 = 1,4 m$, $r2 = 475 \Omega m$

la resistenza di terra calcolata risulta:

- Rt calcolata = $2,61 \Omega$

La rispondenza tra valore misurato e calcolato è buona.

La corrente di guasto monofase a terra vale (valore fornito):

- $Ig = 11,53 kA$

La ripartizione di Ig valutata mediante misure indica:

- $Irt = 4,53 kA$

Il tempo di intervento delle protezioni per guasto monofase a terra è pari a 0,5 s. Le massime tensioni di contatto e di passo effettive ammesse dalle norme CEI 11-8 sono pertanto:

- $Vcp\ max = 160 V$

Le principali prestazioni del dispersore in corrispondenza di una corrente dispersa pari a quella attesa sono riportate nelle figure 6 ÷ 8.

La figura 7 mostra chiaramente le carenze del dispersore con riferimento alle tensioni di contatto. Solo le tensioni di passo imperturbate superano i limiti normativi: quelle effettive sono invece ovunque limitate (figura 8). Il dispersore richiede quindi un intervento di bonifica.

3.3. Definizione dell'intervento di bonifica mediante simulazione

La bonifica del dispersore può ovviamente essere ottenuta in diversi modi.

Alla luce delle considerazioni sviluppate e tenuto conto delle difficoltà ad attuare una adeguata estensione della maglia esistente, si è valutata l'opportunità di procedere a bonifica con elementi infissi a grande profondità

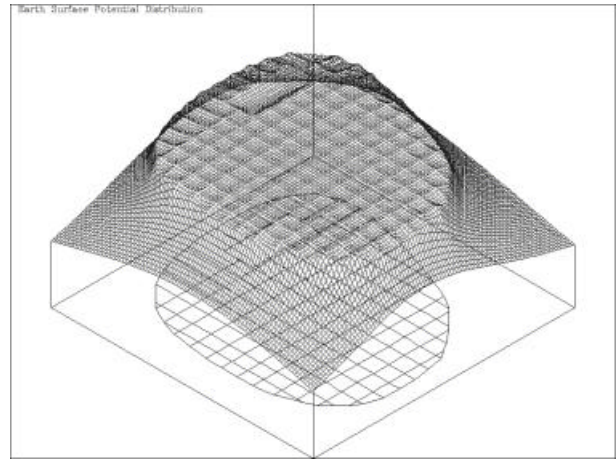


Figura 6 Distribuzione del potenziale in superficie

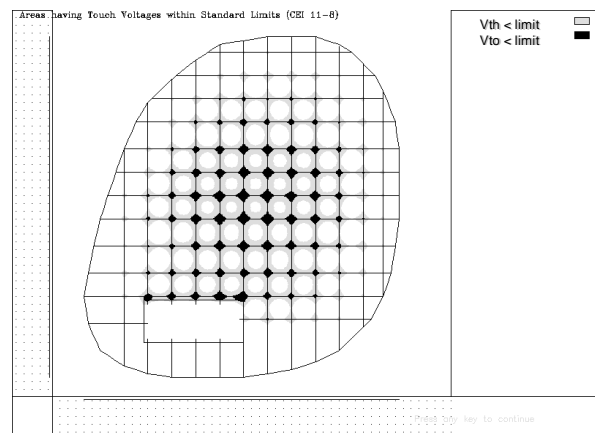


Figura 7 Zone dove le tensioni di contatto risultano entro i limiti ammessi (colore chiaro valori effettivi, colore scuro valori imperturbati)

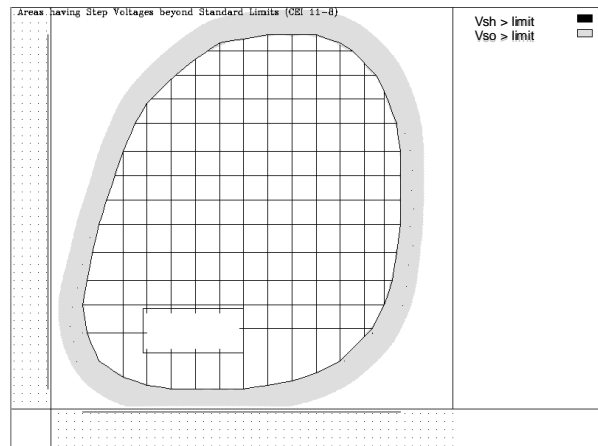


Figura 8 Zone dove le tensioni di passo imperturbate risultano oltre i limiti ammessi

sfruttando la marcata riduzione di resistività individuata oltre 100 m di profondità.

Tenuto conto delle caratteristiche delle funi di guardia delle linee connesse all'impianto e di un valore medio per la resistenza dei dispersori di linea pari a 50Ω , l'aumento della corrente Irt a seguito della bonifica è quello indicato dalla figura 1, caso II, curva a: in corrispondenza ad $Rt = 2,6 \Omega$ da tale curva si evince un rapporto $Irt/Ig = 0,38$ contro un valore misurato $0,393$.

L'accordo è buono e quindi si può ritenere il modello sostanzialmente corretto.

L'efficacia della bonifica mediante soli picchetti è garantita dall'andamento decrescente della distribuzione del potenziale di terra come indicato in figura 3, caso II, curva *a*.

Procedendo a bonifica mediante due elementi infissi a grande profondità, collocati in pianta come indicato in figura 9, al variare della lunghezza dei picchetti si ottengono i valori di *Rt* e *Irt* riportati in tabella 1.

Simulazioni al calcolatore indicano come già con picchetti di lunghezza pari a 125 m si possono ottenere risultati soddisfacenti.

In pratica, sono stati infissi due elementi di lunghezza rispettivamente pari a 118 e 124 m.

In tal caso, la resistenza di terra calcolata risulta:

- R_t calcolata = 0,827 Ω

Dalla figura 1, caso II, curva *a*, con $I_g = 11.530$ A si ottiene

- $I_{rt} = 8.002$ A

Tabella 1 - $I_{rt} = f[R_t(L)]$

Lunghezza picchetto (m)	R_t (Ω)	I_{rt} (A)**
0*	2,61	4.531
100	1,31	6.541
125	0,777	8.163
150	0,575	8.809
175	0,463	9.224

* prima dell'intervento di bonifica

** con $I_g = 11.530$ A

La distribuzione delle tensioni di contatto in corrispondenza della rete magliata dopo la bonifica sono indicate in figura 9.

Le tensioni di passo risultano ulteriormente ridotte e quelle di contatto in corrispondenza delle aree interessate da masse sono entro i limiti normativi.

Misure condotte successivamente alla bonifica hanno confermato le previsioni. In particolare, si è verificato come la corrente di misura si ripartisca tra dispersore e funi di guardia secondo le seguenti percentuali:

- dispersore: 73,7 %
- funi di guardia: 26,3 %

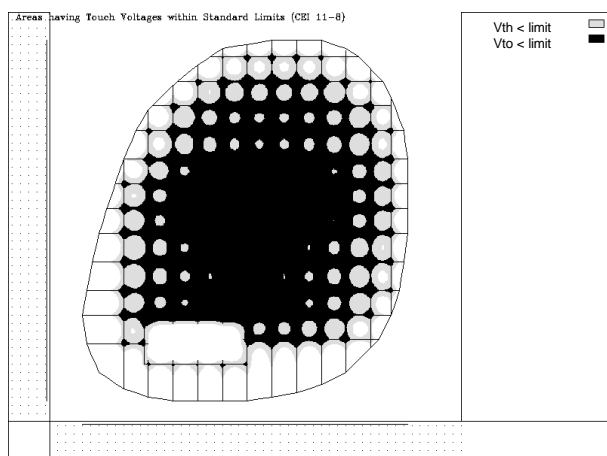


Figura 9 Zone dove le tensioni di contatto risultano entro i limiti ammessi: grigio chiaro valori effettivi, nero valori imperturbati)

La figura 1, caso II, curva *a* in corrispondenza di R_t calcolata fornisce una percentuale di corrente nel dispersore pari a:

- $I_{rt}/I_g = 70$ %

L'accordo tra valori calcolati e misurati è più che buono.

La resistenza di terra misurata complessiva del dispersore con funi di guardia collegate è pari a:

- R_t misurata = 0,620 Ω

a cui corrisponde una resistenza di dispersore di impianto:

- R_t misurata = 0,842 Ω

Anche in tal caso, considerati gli effetti di interferenza conduttiva tra dispersore di impianto e dispersori di linea, l'accordo tra valore calcolato e misurato è buono.

La bonifica così attuata si è dimostrata risolutiva anche nei confronti dei dispersori di linea.

Il problema del contenimento delle tensioni di contatto e di passo è spesso critico per i primi sostegni: anche a questo riguardo, l'uso di elementi infissi può fornire interessanti alternative. In proposito sono stati condotti specifici studi che hanno portato ai risultati descritti nel seguito.

4. Uso di elementi profondi nella realizzazione di nuovi dispersori

Finora si è trattato principalmente delle possibilità offerte dall'uso di infissioni di profondità nella bonifica di dispersori esistenti: ci si chiede ora se la medesima tecnica può apportare benefici anche nella realizzazione di nuovi impianti.

Senza la pretesa di voler trarre conclusioni di carattere generale, viene sviluppato di seguito un esempio basato su ipotesi piuttosto tipiche, in grado quindi di fornire indicazioni utili per numerose altre applicazioni.

Si consideri una classica CP entra esci con due stalli AT e le seguenti caratteristiche e condizioni al contorno:

- apparecchiature ed edificio di cabina occupano nel complesso un'area rettangolare 72 x 42 m;
- le funi di guardia delle linee in arrivo e partenza sono in acciaio e sono connesse al dispersore;
- la resistenza di terra dei dispersori di linea è mediamente pari a $R_s = 50 \Omega$;
- il mezzo disperdente si può approssimare con un modello a due strati con $r1 = 200 \Omega\text{m}$, $h1 = 80$ m, $r2 = 100 \Omega\text{m}$;
- la corrente di guasto vale $I_g = 9,8$ kA ed il tempo di intervento delle protezioni $t_i = 0,5$ s.

Adottando criteri progettuali convenzionali ne deriva un dispersore a maglie quadre 6 x 6 m di forma rettangolare con spigoli opportunamente arrotondati e dimensioni complessive 132 x 102 m interrato a 0,5 m di profondità per la parte centrale e 2 m per l'anello perimetrale (figura 10).

Tale dispersore presenta una resistenza di terra:

- $R_t = 0,674 \Omega$

Dalla figura 1, caso II, curva *a* deve essere:

- $I_{rt} = 7.250$ kA

La distribuzione del potenziale di terra e delle tensioni di contatto del dispersore di figura 10 con $I_{rt} = 7.250 \text{ A}$ sono rappresentate nelle figure 11 e 12. Le tensioni di passo sono ovunque contenute entro i limiti normativi e le tensioni di contatto sono limitate nella zona centrale dove sono presenti le masse.

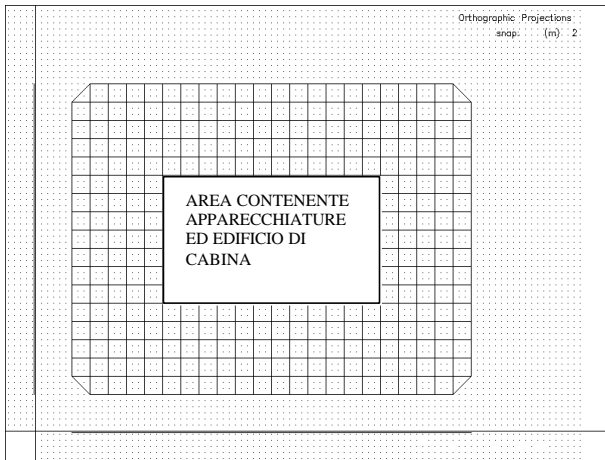


Figura 10 Proiezioni ortogonali del modello di dispersore convenzionale

Modesti incrementi di I_g restringono rapidamente la zona dove le tensioni di contatto rientrano entro i limiti rendendo necessari provvedimenti mitigatori come, ad esempio, l'uso di strati superficiali di materiali isolanti: nelle condizioni specificate il dispersore di figura 10 è dimensionato al limite di idoneità.

Gli stessi risultati possono essere ottenuti utilizzando in alternativa un dispersore composto da una rete magliata di dimensioni ridotte integrata con elementi infissi a grande profondità fino a raggiungere il sottostante mezzo disperdente a bassa resistività. Un esempio di soluzione è rappresentato in figura 13. I due elementi verticali sono infissi fino alla profondità di circa 140 m e sono isolati rispetto a terra per i primi 3 m.

La resistenza di terra del dispersore di figura 13 è pari a:

- $R_t = 0,508 \Omega$

Di conseguenza, fissata $I_g = 9,8 \text{ kA}$, dalla figura 1, caso II, curva a si ottiene:

- $I_{rt} = 7.640 \text{ A}$

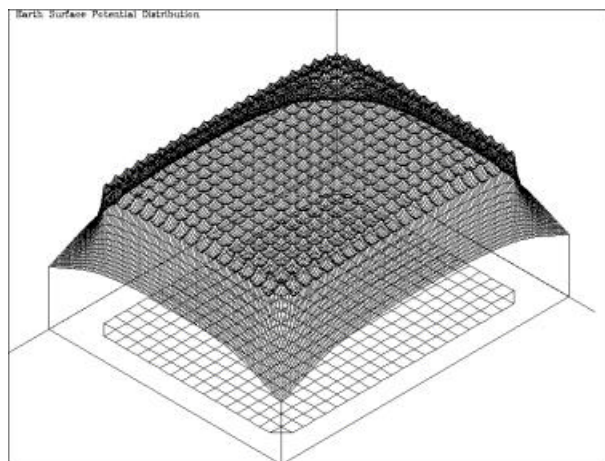


Figura 11 Distribuzione del potenziale in superficie (dispersore convenzionale)

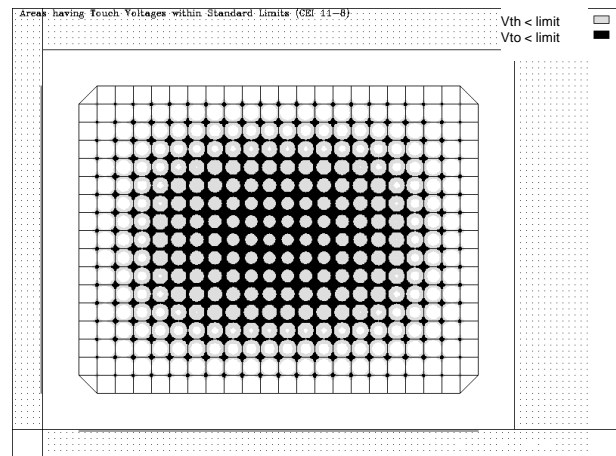


Figura 12 Zone dove le tensioni di contatto risultano entro i limiti ammessi: grigio chiaro valori effettivi, nero valori imperturbati (dispersore convenzionale)

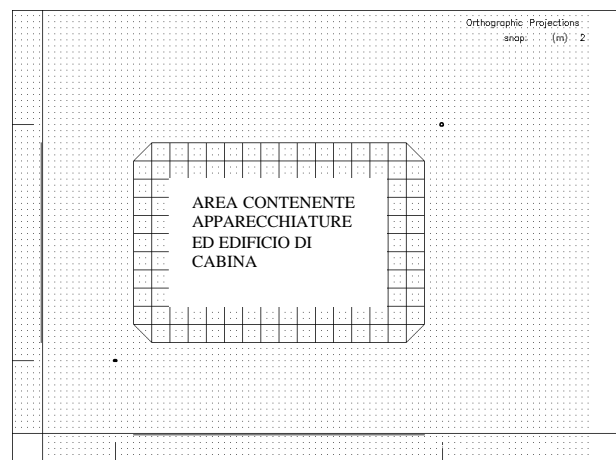


Figura 13 Proiezioni ortogonali del modello di dispersore con elementi di profondità

La distribuzione del potenziale di terra e delle tensioni di contatto del dispersore di figura 13 con $I_{rt} = 7.640 \text{ A}$ sono rappresentate nelle figure 14 e 15. Le tensioni di passo sono ovunque contenute entro i limiti normativi. Le tensioni di contatto sono limitate nella zona centrale dove sono presenti le masse.

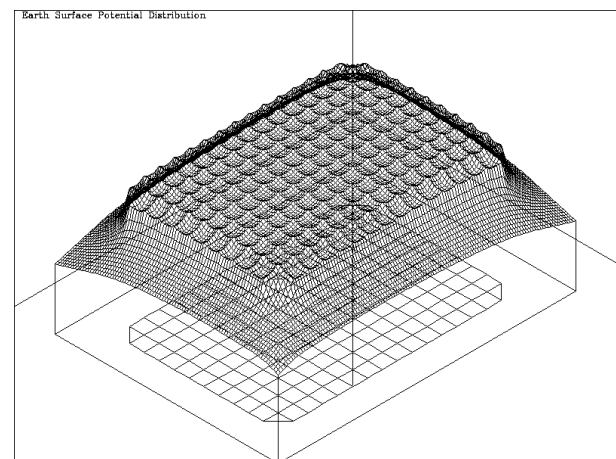


Figura 14 Distribuzione del potenziale in superficie (dispersore con elementi di profondità)

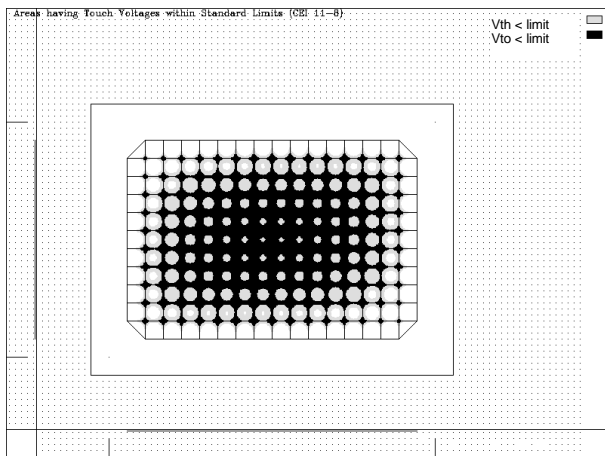


Figura 15 Zone dove le tensioni di contatto risultano entro i limiti ammessi: grigio chiaro valori effettivi, nero valori imperturbati (dispersore con elementi di profondità)

Si poteva pervenire ad analoghi risultati non con due ma con quattro o più infissioni: a parità di lunghezza complessiva però, con un numero inferiore di infissioni aumenta la frazione di dispersore a contatto con il terreno profondo dotato di buona conducibilità. Quanto all'interferenza tra i due dispersori verticali, si consideri che la parte più efficace ai fini della dispersione ha lunghezza ridotta e rispetta facilmente la regola pratica che vuole per i picchetti un distanziamento almeno pari al doppio della lunghezza.

5. Valutazioni economiche della bonifica mediante elementi di profondità

Ogni azione tesa ad apportare migliorie, di qualsiasi natura esse siano, non può prescindere da valutazioni economiche che si traducono in un'analisi di costi e relativi benefici.

La bonifica di dispersori mediante elementi infissi a grande profondità rappresenta spesso una soluzione concreta sotto il profilo tecnico. Al pari di altre tecniche, anche la bonifica con elementi profondi va integrata con elementi di minor costo ed importanza quali ad esempio la verniciatura di sostegni interni o interventi sulle recinzioni, interventi che comunque non incidono economicamente in modo sensibile.

Sulla base di esperienze in campo si è inoltre verificato come la tecnica di bonifica con elementi profondi possa trarre i massimi benefici se adottata contestualmente all'uso di composti integrativi che consentono di migliorare sensibilmente il contatto tra la superficie del dispersore ed il mezzo disperdente. L'uso di tali composti era un tempo guardato con sospetto a causa di un decadimento delle caratteristiche ritenuto troppo rapido, ma oggi il mercato offre composti particolarmente stabili.

Nelle presenti realizzazioni si è adottato un composto integrativo argilloso semifluido con bassa resistività (electric wire compound), che ha dimostrato di

possedere le necessarie caratteristiche di conducibilità e stabilità.

A favore dell'uso di elementi infissi a grande profondità gioca inoltre, come già detto, la ridotta resistività degli strati più profondi del terreno.

Si ritiene utile in questo ambito riportare i principali risultati di alcune esperienze di bonifica mediante infissioni di picchetti a grande profondità realizzate dall'ENEL Direzione Distribuzione Triveneto. In tabella 2 sono riportate le caratteristiche degli otto impianti considerati, prima e dopo l'intervento di bonifica

Tabella 2 Caratteristiche di dispersori prima e dopo l'intervento di bonifica con elementi profondi

CP	I_g (kA)	T_i (s)	R_t' (Ω)*	R_t'' (Ω)**	Elem. profondi n. / Σl (m) ***
A	5,56	0,5	1,55	0,73	3 / 300
B	7,92	0,5	1,11	0,72	2 / 260
C	8,26	0,5	1,00	0,53	1 / 139
D	8,61	0,6	0,64	0,53	2 / 145
E	11,53	0,5	1,07	0,62	2 / 248
F	8,21	0,5	0,97	0,62	1 / 254
G	8,56	0,6	0,68	0,44	1 / 157
H	9,33	0,6	0,82	0,25	2 / 308

* R_t' valore di R_t prima dell'intervento di bonifica

** R_t'' valore di R_t dopo l'intervento di bonifica

*** numero di elementi infissi e loro lunghezza complessiva

Tabella 3 Costi della bonifica mediante tecniche tradizionali e mediante elementi di profondità

CP	Costo tecnica tradizionale (M€)	Costo tecnica con elementi di profondità (M€)
A	149,0 *	81,4
B	39,1	66,5 **
C	132,1	42,8
D	121,5	58,4
E	152,6	80,0
F	129,3	94,8
G	101,6	64,2
H	103,6	57,1

* non sono possibili altri interventi se non l'estensione orizzontale della maglia di terra

** intervento motivato per compatibilità con altre strutture

In tabella 3 vengono invece evidenziati i costi degli interventi di bonifica realizzati con l'uso di tecniche tradizionali ed elementi profondi rispettivamente: in sintesi, si può ritenere che, a parità di altre condizioni, la bonifica con uso di infissioni profonde consente una riduzione dei costi, rispetto alla tecnica tradizionale, quantificabile in circa il 37%.

In tutti i casi la bonifica di dispersori esistenti è stata ottenuta utilizzando elementi in tubo di acciaio inox forato con spessore 3 mm e diametro esterno 42 mm in barre di lunghezza 6 m. Tali tubi sono stati inseriti in un foro di diametro 120 mm, realizzato tramite trivellazione e quindi riempito con il composto integrativo descritto, il quale, andando ad occupare le intercapedini formatesi nel terreno all'atto della perforazione migliora notevolmente le caratteristiche del dispersore.

Durante la fase di trivellazione sono state eseguite misure di resistenza di terra ad intervalli di circa 6 m: ogni volta, i valori ottenuti sono stati analizzati alla luce dei dati disponibili circa la resistività apparente e la stratigrafia del terreno al fine di decidere dove sospendere la trivellazione. Si osserva, a titolo di esempio, la figura 16 dove sono riportate le distribuzioni delle resistenze di due elementi profondi infissi per la bonifica della CP E in funzione della profondità: si evince immediatamente che il maggior contributo in termini di riduzione della resistenza si riscontra tra 95 e 110 m di profondità per la presenza di uno strato di argilla, mentre non è economicamente vantaggioso infiggere gli elementi oltre i 120 m in quanto si incontra terreno costituito da ghiaia cementata.

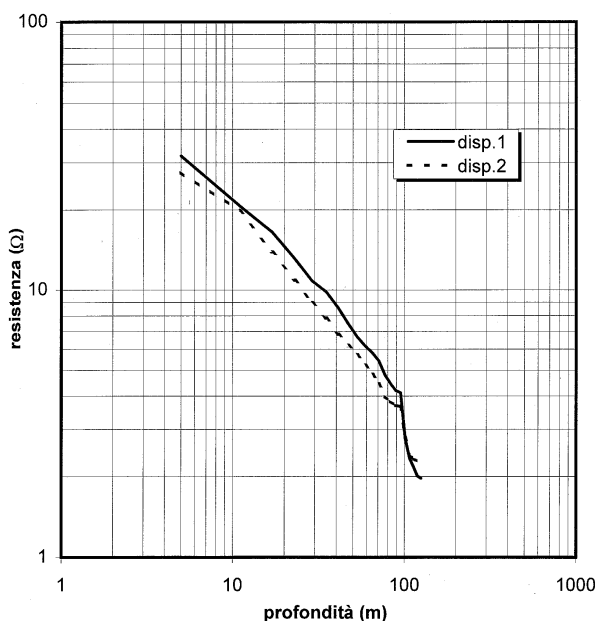


Figura 16 Distribuzione della resistenza di terra di due elementi profondi infissi per la bonifica della CP E

I valori finali di resistenza sono risultati pari a 1,97 e 2,28 Ω rispettivamente per profondità di infissione di 124 e 118 m.

Le distribuzioni di figura 16 sono in buon accordo con le verifiche preliminari e quindi con i dati disponibili circa le curve di resistività apparente misurata e l'esame stratigrafico del terreno.

Tutte le infissioni sono state realizzate all'esterno della maglia di terra, ed ubicate in posizioni diametralmente opposte alla distanza circa 10 m da eventuali recinzioni.

6. Dispensori di linea

I dispersori dei sostegni per elettrodotti dotati di fune di guardia connessa a dispersori di officine elettriche sono chiamati a svolgere le seguenti funzioni:

- contenere le tensioni di contatto e di passo quando il sostegno è percorso da corrente dovuta a guasti verso terra in linea o officina elettrica connessa;
- ridurre le sollecitazioni elettriche sugli isolatori per sovratensioni derivanti da scariche atmosferiche che colpiscono il sostegno o la fune di guardia;

- consentire il corretto funzionamento delle protezioni.

I dispersori di linea devono quindi essere efficienti tanto a frequenza industriale quanto ad alta frequenza, come può aversi in caso di transitori, quanto infine ad impulso nel caso di scariche atmosferiche.

6.1. Soluzione convenzionale

Attualmente la maggior parte dei dispersori di linea sono realizzati in conformità ai fogli di unificazione ENEL che prevedono sei dispersori di linea (indicati con le sigle MT1 ÷ MT6) diversificati in funzione della resistività del mezzo disperdente per valori di resistività compresi tra 0 e 2.000 Ωm.

I dispersori di linea unificati ENEL hanno conformazione prevalentemente radiale con "raggi" orizzontali, al più integrati da brevi elementi inclinati posti alle estremità.

Al variare della resistività del terreno cambia la composizione dei dispersori: in particolare cambia la lunghezza dei singoli raggi ed eventualmente il loro numero.

6.2. Nuova soluzione

I dispersori unificati ENEL, pur essendo in generale idonei ad assolvere le funzioni cui sono chiamati, in alcune situazioni, ed in particolare nel caso di terreni ad elevata resistività, possono essere convenientemente sostituiti con altri dispersori aventi diversa geometria che consentono di raggiungere migliori prestazioni con riferimento tanto a sollecitazioni a frequenza industriale quanto ad impulso.

Tale risultato è emerso da un lavoro di ricerca che ha portato alla definizione di dispersori di linea dotati di una nuova geometria che ottimizza esigenze tecniche ed economiche. Tale geometria (figura 17) è applicabile nel caso maggiormente frequente di sostegni a quattro montanti, pur essendo facilmente estendibile ad altre tipologie di sostegni.

I dispersori di figura 17 sono caratterizzati da:

- anelli orizzontali: il dispersore è dotato di un solo anello nel caso di sostegno a fondazione unica (oppure a plinti ravvicinati), e diversamente di un anello per ogni plinto. Nel caso di più anelli, questi vengono intercorressi a formare un anello unico perimetrale. Ogni anello viene posto a circa 1 m dal montante di pertinenza ed interrato ad una profondità compresa tra 0,5 e 1,0 m;
- raggi: il dispersore è dotato di quattro raggi disposti simmetricamente a partire da ogni montante del traliccio, infissi nel terreno con inclinazione pari a circa 50° rispetto alla verticale in modo da risultare con una certa approssimazione mutuamente ortogonali. La lunghezza di ogni raggio viene commisurata alla resistività del terreno ai fini del contenimento della resistenza e dell'impedenza di terra;
- elementi di connessione: ogni raggio viene collegato al corrispondente montante del sostegno con un elemento quanto più corto e rettilineo possibile. L'anello perimetrale collega tra loro connessioni e raggi.

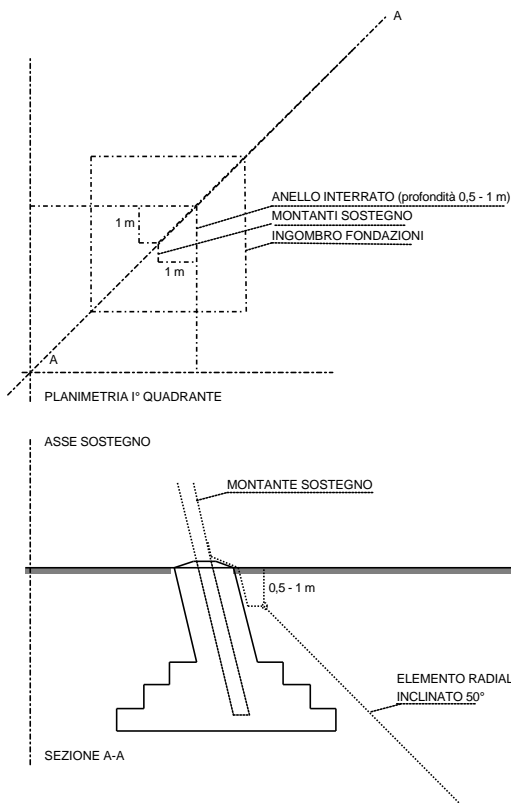


Figura 17 Geometria nuovi dispersori di linea

6.3. Confronto tra le due soluzioni

I vantaggi offerti a frequenza industriale dai nuovi dispersori sono stati valutati mediante simulazione.

Si consideri un sostegno avente base quadrata con lato 6 m, localizzato in un'area caratterizzata da mezzo disperdente omogeneo con resistività 225 o 450 Ωm.

Seguendo le indicazioni di cui alle unificazioni ENEL, nel primo caso si utilizzerà un dispersore MT3 (range di impiego da 150 a 300 Ωm) mentre nel secondo caso un dispersore MT4 (range di impiego da 300 a 600 Ωm). I valori di resistività indicata per il mezzo disperdente rappresentano esattamente i valori centrali dei range di impiego dei due dispersori unificati.

La resistenza di terra calcolata dei due dispersori unificati vale:

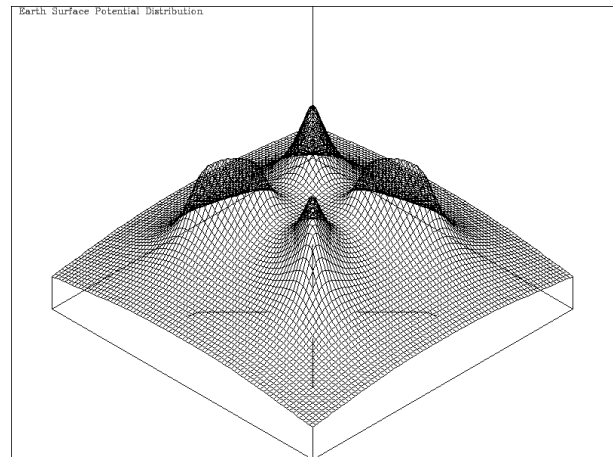
- $R_t \text{ MT3} = 9,61 \Omega$ ($r = 225 \Omega\text{m}$)
- $R_t \text{ MT4} = 13,3 \Omega$ ($r = 450 \Omega\text{m}$)

Ora si consideri il nuovo dispersore che, per quanto detto, sarà caratterizzato da un anello alla base del sostegno, di forma quadra con lato 8 m, e quattro elementi radiali inclinati a 50° rispetto alla verticale. La resistenza di terra del nuovo dispersore di linea, al variare della lunghezza dei raggi, è indicata in tabella 4. Come termine di confronto si consideri la resistenza di terra (essa, nel caso di dispersori di linea, condiziona fortemente la corrente dispersa): il dispersore MT3 può essere confrontato con il nuovo dispersore con raggi lunghi 4,5 m.

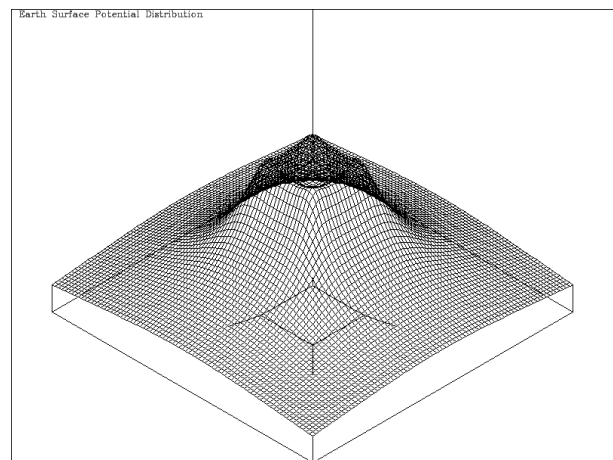
Imponendo una corrente dispersa pari a 500 A nei due casi si ottengono le distribuzioni di potenziale in superficie riportate in figura 18.

Tabella 4 $R_t = f(L)$

Lunghezza raggio (m)	R_t (Ω) ($r = 225 \Omega\text{m}$)	R_t (Ω) ($r = 450 \Omega\text{m}$)
3	10,9	21,8
4,5	9,68	19,4
6	8,69	17,4
7,5	7,88	15,8
9	7,20	14,4
10,5	6,62	13,2
12	6,13	12,3
15	5,34	10,7
18	4,73	9,47



(I) Dispersore MT3



(II) Nuovo dispersore con raggi lunghi 4,5 m

Figura 18 Distribuzione del potenziale in superficie

Si osservi come il nuovo dispersore presenti una distribuzione di potenziale meno distorta, e controllata fin dalla base del sostegno. Ciò si traduce in favorevoli condizioni per il contenimento delle tensioni di contatto e passo.

La situazione relativa alle tensioni di passo con una corrente dispersa pari a 500 A ed un tempo di intervento delle protezioni pari a 0,5 s è indicata in figura 19.

Si osservi come il nuovo dispersore riesca a confinare le tensioni di passo pericolose (in particolare interessano le tensioni di passo effettive) in una zona ristretta alla base del sostegno. Mediante ripetute simulazioni si è osservato come la massima corrente oltre la quale si

presentano tensioni di passo pericolose vale 400 A per il dispersore MT3 e 430 A per il nuovo dispersore. La situazione relativa alle tensioni di contatto è invece indicata in figura 20 con riferimento ad una corrente pari a 50 A per il dispersore MT3 e 85 A per il nuovo dispersore, sempre con un tempo di intervento delle protezioni pari a 0,5 s. Tali valori di corrente rappresentano i valori massimi oltre i quali le tensioni di contatto effettive superano i limiti ammessi rendendo necessari provvedimenti come la verniciatura del sostegno.

I vantaggi offerti dal nuovo dispersore, inoltre, aumentano con la resistività del terreno.

Il dispersore MT4 ad esempio può essere confrontato con il nuovo dispersore con raggi lunghi 10,5 m.

Ripetendo le simulazioni, come nel caso precedente, si riscontra che le massime correnti oltre le quali si presentano valori pericolosi di tensioni di passo sono 480 e 800 A rispettivamente per dispersore MT4 e nuovo dispersore. La situazione per quanto riguarda le massime correnti oltre le quali si presentano valori pericolosi di tensioni di contatto è ancora a favore del nuovo dispersore con circa 100 A contro i 50 A del dispersore MT4.

I nuovi dispersori peraltro presentano numerosi altri pregi anche con riferimento al comportamento ad impulso atmosferico [8] [9]. Le frequenze fondamentali associate alla corrente di fulmine sono normalmente comprese tra 0,3 e 100 kHz. A tali frequenze, il comportamento ad impulso di dispersori di dimensioni ridotte (come lo sono tipicamente i dispersori di linea) può essere valutato in condizioni stazionarie ed è quindi fortemente caratterizzato dalla loro resistenza di terra, parametro facilmente controllabile con la nuova geometria.

Un parametro molto utilizzato per caratterizzare un dispersore ad impulso è la sua impedenza di terra, definita come rapporto tra il massimo valore della tensione totale di terra ed il valore di cresta dell'impulso di corrente dispersa.

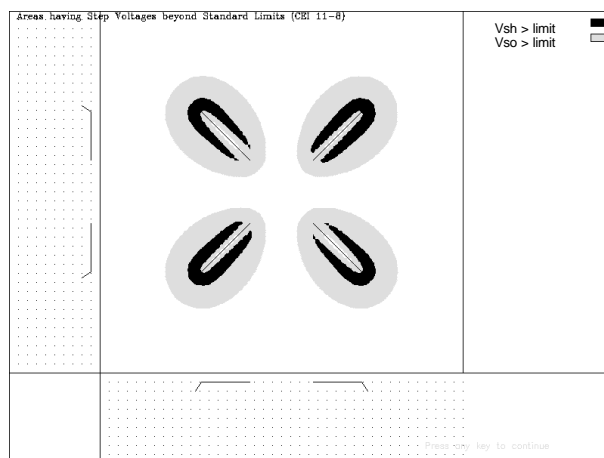
I nuovi dispersori di linea presentano valori contenuti di impedenza di terra grazie alla riduzione degli accoppiamenti conduttivi e capacitivi ma soprattutto induttivi tra i diversi elementi. La scelta del numero di raggi rappresenta inoltre un compromesso ideale tra le esigenze contrapposte di contenere gli effetti dell'impedenza interna (numero di raggi elevato) e della mutua interferenza (numero di raggi ridotto).

I raggi inclinati sono più efficaci rispetto a quelli orizzontali caratterizzanti i dispersori unificati ENEL: ai fini del comportamento ad impulso le norme CEI 81-1 attribuiscono a raggi verticali o inclinati efficienza doppia rispetto a quelli orizzontali.

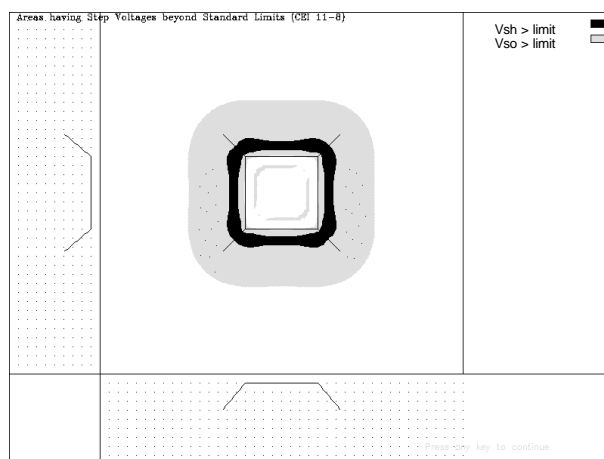
I nuovi dispersori consentono inoltre di sfruttare a favore della sicurezza gli effetti dovuti alla ionizzazione del terreno determinata dalle forti correnti di scarica.

Non ultimo, a favore dei nuovi dispersori vi sono dei vantaggi economici legati al razionale utilizzo dei materiali, alla riduzione dell'area occupata, alle limitate risorse (mezzi e personale) richieste per il particolare tipo di posa ed alla possibilità di sfruttare al massimo i vantaggi offerti dall'uso di composti integrativi. I nuovi

dispersori presentano infine l'ulteriore pregio dell'estensibilità, ottenibile semplicemente riprendendo le infissioni dei raggi (realizzati con elementi modulari innestabili).



(I) Dispersore MT3

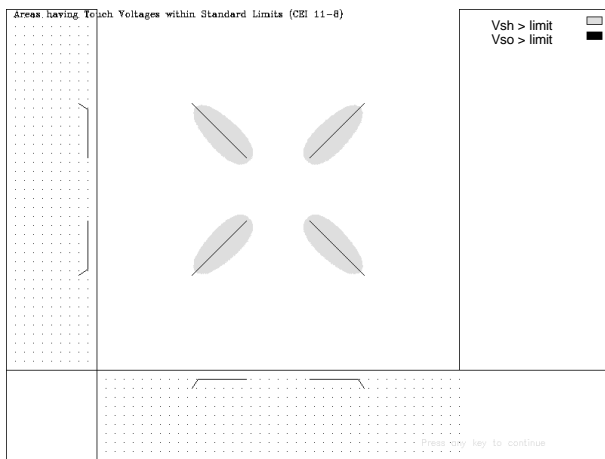


(II) Nuovo dispersore con raggi lunghi 4,5 m

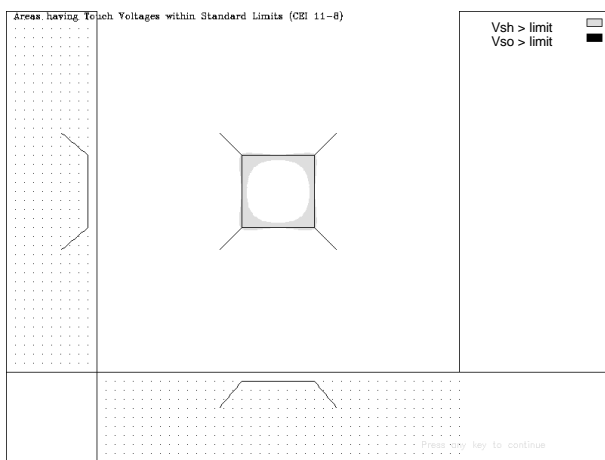
Figura 19 Zone dove le tensioni di passo risultano oltre i limiti ammessi: grigio chiaro valori imperturbati, nero valori effettivi

Volendo integrare il confronto tra vecchia e nuova soluzione con considerazioni economiche si può concludere molto sinteticamente quanto segue:

- se si considerano anche i costi evitati dovuti alla minor incidenza delle servitù connesse all'uso della nuova soluzione (che occupa una minore area in pianta), si può affermare che i costi diretti di realizzo dei dispersori nelle due soluzioni sono sostanzialmente equivalenti;
- la maggiore profondità di posa e di conseguenza la maggiore immunità da danneggiamenti e le minori interferenze con elementi metallici interrati superficiali riduce i costi indiretti derivanti dall'uso di dispersori aventi la nuova geometria proposta.



(I) Dispersore MT3



(II) Nuovo dispersore con raggi lunghi 4,5 m

Figura 20 Zone dove le tensioni di contatto effettive risultano entro i limiti ammessi

7. Conclusioni

Nel presente lavoro è stata analizzata in maniera sistematica, anche se necessariamente concisa, la tecnica di realizzazione di dispersori per impianti di terra a sviluppo prevalentemente verticale rispetto alla pratica tradizionale che predilige lo sviluppo orizzontale. Tale tecnica non rappresenta una novità, ma può essere oggi concorrenziale grazie alla disponibilità sul mercato di composti integrativi stabili nel tempo ed aventi le necessarie caratteristiche elettriche e fisiche.

Lo studio analitico preliminare ha fatto subito notare come sia fondamentale considerare l'effetto del drenaggio di parte della corrente di guasto ad opera delle funi di guardia degli elettrodotti (se gestite connesse ai dispersori), mettendo in luce i parametri che maggiormente ne caratterizzano l'importanza. Si è quindi discusso su quale sia il miglior modo di procedere a bonifica mediante riduzione di R_t , valutando i due casi estremi di sola estensione orizzontale o verticale mediante l'uso di elementi profondi. Si è messo in evidenza come, pur essendo entrambe le tecniche applicabili nella maggioranza dei casi pratici, vi siano motivazioni economiche e di

fattibilità che spesso inducono a preferire l'uso di elementi profondi. Tra le motivazioni, non ultima il fatto che la resistività degli strati più profondi del terreno sia molto spesso sostanzialmente inferiore a quella del mezzo in superficie. Si ribadisce inoltre come la bonifica di dispersori di impianto mediante elementi profondi può portare ad una soluzione radicale dei problemi del sistema costituito da dispersore di impianto e dispersori di linea senza richiedere altri interventi.

Si è quindi illustrata l'applicazione del criterio di bonifica mediante elementi profondi in un caso concreto, mostrando contestualmente come i modelli analitici e numerici proposti forniscano risultati consistenti con l'esito delle misure sperimentali.

Si è anche voluto mettere in evidenza con un esempio significativo come l'uso dei dispersori profondi possa essere conveniente pure nella realizzazione di nuovi dispersori.

Sono stati inoltre forniti dati relativi alla bonifica mediante elementi profondi di otto CP ENEL. In tutti i casi, la consistente riduzione della R_t di impianto ha contribuito efficacemente anche alla bonifica dei dispersori di linea sugli elettrodotti connessi alle CP.

Con riferimento ai dispersori di linea, si è voluto infine mostrare come i tradizionali dispersori unificati ENEL spesso possono essere convenientemente sostituiti con nuovi dispersori realizzati con elementi infissi con una certa inclinazione. La nuova geometria proposta per i dispersori di linea offre vantaggi consistenti tanto a frequenza industriale quanto con sollecitazioni ad impulso atmosferico.

Si ritiene che l'analisi parametrica e i numerosi esempi di applicazione presentati, oltre che di interesse pratico, possano costituire un concreto punto di partenza per la ridefinizione delle modalità per la bonifica e la realizzazione di dispersori di impianto e di linea per sistemi gestiti con centro stella a terra.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dawalibi F :Ground Fault Current Distribution between Soil and Neutral Conductors. . *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, PAS-99, n. 2, 1980.
- [2] Gatta F M, Illiceto F :Calculation of Current Flow in Grounding Systems os Substations and of HV Line Towers, in Line Shield Wires and Cable Sheath During Earth Faults. *ETEP*, Vol. 8, n.. 2, 1998
- [3] Tagg G F :*Earth Resistances*. George Newnes Limited, London, , 1964.
- [4] ANSI/IEEE Std. 80-1986, *IEEE guide for Safety in AC Substation Grounding*. 1986.
- [5] Carrescia V :*Manuale per gli impianti di terra*. ed. 1986
- [6] Andolfato R, Fellin L, Turri R :Analisi di impianti di terra a frequenza industriale: confronto tra indagine sperimentale e simulazione numerica. "*L'Energia Elettrica*", vol.74, n.2, p. 123-134, 1997
- [7] Sunde E D :*Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. D. Van Nostrand Compahy Inc., New York, 1949.
- [8] Takashima T, Nakae T, Ishibashi R :High frequency characteristics of impedances to ground and field distributions of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, vol. PAS - 100, n. 4, p. 1893-1900, 1981.
- [9] SES :*Technical Reference Manual on Grounding Electromagnetic Fields & Interference Analysis*. Vol. Main and Addendum, Montreal, 1992.