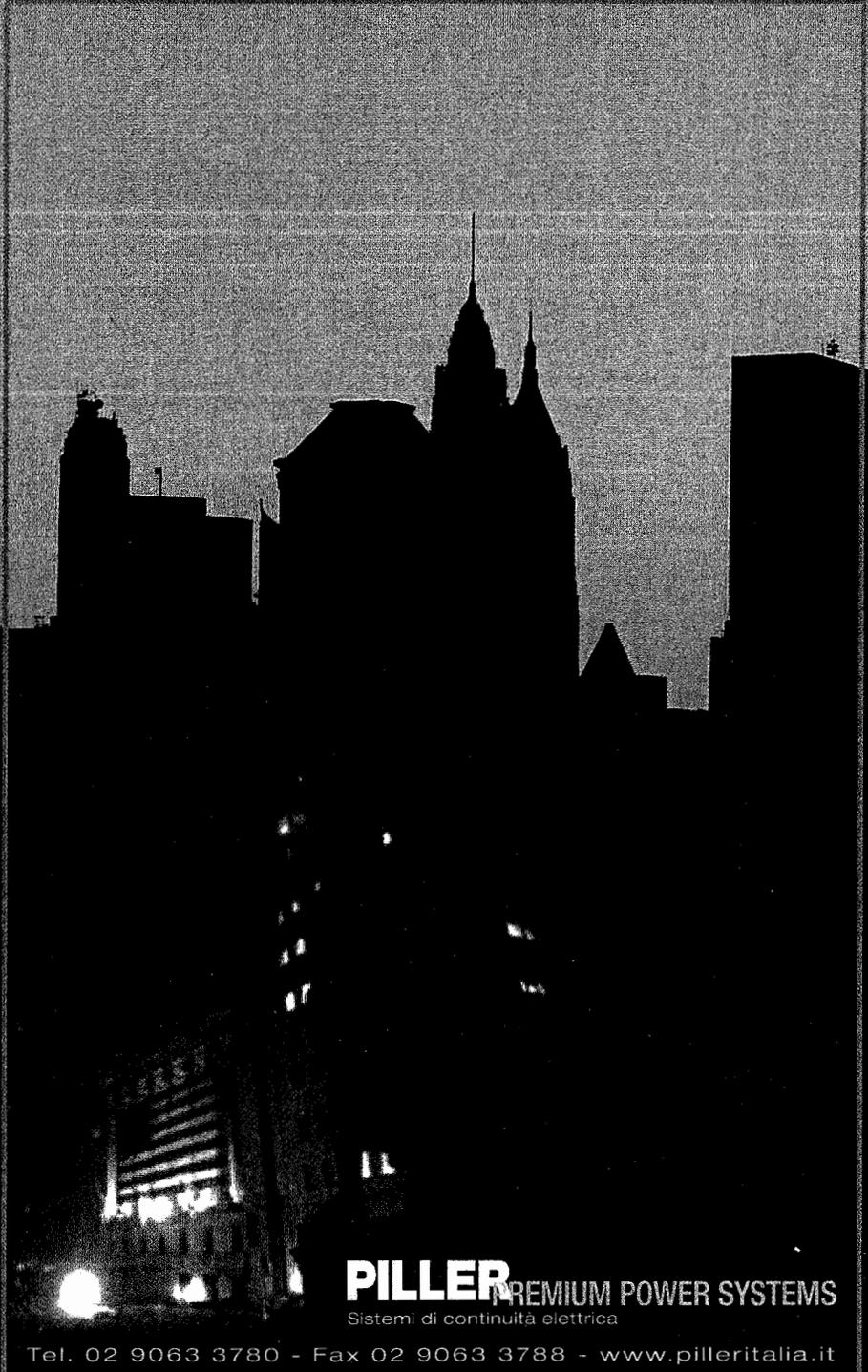


AEI

Volume 90

Settembre 2003

Rivista ufficiale dell'Associazione
Elettrotecnica ed Elettronica Italiana
Seguito de "L'Elettrotecnica"
fondata dall'AEI nel 1914



NORMATIVA
Impianti
fotovoltaici

ENERGIA
Libera
concorrenza?

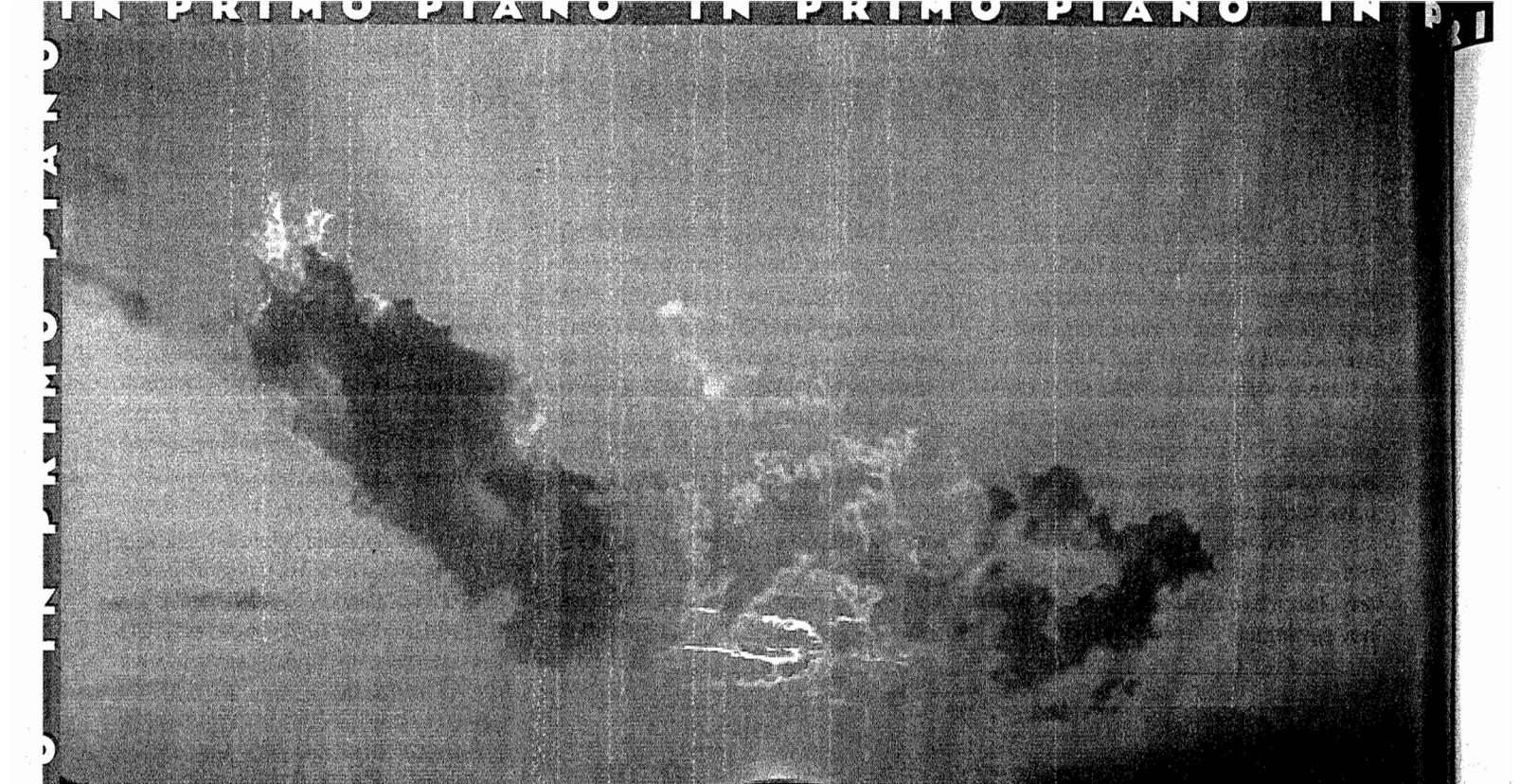
AEI INFORMA
Attività e
programmi

PILLER PREMIUM POWER SYSTEMS
Sistemi di continuità elettrica

Tel. 02 9063 3780 - Fax 02 9063 3788 - www.pilleritalia.it

IN PRIMO PIANO

Meteorologia



Sovratensioni di origine atmosferica

L'analisi, tramite dati e modelli accurati, delle correlazioni tra fulmini e guasti di linea è essenziale per valutare correttamente il tipo di protezioni da impiegare per i diversi tipi di reti

Marina Bernardi, Stefano Malgarotti,
Adalberto Porrino *CESI SpA*
Carlo Alberto Nucci,
Mario Paolone
Università di Bologna

L'attività del progetto di ricerca denominato QUAFOR (QUALità della FORnitura), sviluppato dal CESI in quest'ultimo triennio e inserito nel più ampio programma di ricerca di sistema finanziato per mezzo del fondo creato con il Decreto ministeriale MICA del 26/01/2000 e successivi, ha per obiettivo l'analisi, la definizione e lo sviluppo di metodologie e soluzioni innovative per il miglioramento della qualità del servizio elettrico.

In particolare, nell'ambito dei fenomeni meteorologici che influenzano la qualità del servizio, il CESI e il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna stanno analizzando l'impatto che le sovratensioni indotte dall'impulso elettromagnetico (LEMP, *Lightning Electro-Magnetic Pulse*) generato da un fulmine al suolo in prossimità della linee aeree ha sulla qualità del servizio dei sistemi di distri-

buzione. Calcoli e osservazioni hanno mostrato che sovratensioni causate dal LEMP possono manifestarsi con ampiezze tali da risultare critiche per le comuni linee aeree di distribuzione in media tensione e questo fenomeno risulta essere una causa frequente di sovratensioni e di conseguente disservizio. La conoscenza del fenomeno è essenziale per quantificare l'effetto dell'induzione da scarica atmosferica su diverse tipologie di linee e per valutare correttamente il tipo di protezioni da impiegare per i diversi tipi di reti. La recente evoluzione dei modelli di scarica del fulmine, da un lato, e dei codici di propagazione ed accoppiamento del campo alle linee, dall'altro, hanno consentito negli ultimi anni di avere a disposizione degli strumenti potenti di studio dei fenomeni di sovratensione indotta da scariche atmosferiche. L'esistenza sul territorio italiano di una re-

te LLS (*Lightning Location System*) permette, inoltre, di correlare direttamente i guasti rilevati in linea alla possibile scarica di fulmine origine del guasto stesso e di verificare il comportamento delle protezioni al singolo evento. Questa possibilità può unirsi all'informazione data dai suddetti codici per il calcolo delle sovratensioni indotte dal fulmine, per ottenere una metodologia di correlazione guasto-fulmine di elevata precisione, permettendo quindi un ulteriore approfondimento della conoscenza del comportamento del fulmine delle linee aeree.

1. Comportamento delle linee di media tensione al fulmine

La conoscenza delle caratteristiche delle so-

vratensioni di origine atmosferica è necessaria alla scelta dei mezzi di protezione e dei livelli di isolamento.

Le sovratensioni atmosferiche nelle reti MT possono essere classificate in due categorie:

- ▶ sovratensioni dovute a fulminazione diretta;
- ▶ sovratensioni dovute a fulminazione indiretta (sovratensioni indotte).

1.1. FULMINAZIONI DIRETTE

Dato il livello relativamente basso di isolamento sulle linee MT, non vi è distinzione tra la fulminazione diretta dei conduttori e la fulminazione delle strutture di supporto con conseguente scarica inversa struttura-conduttore.

Il numero previsto di fulminazioni dirette

N_d per anno e per 100 km, su una linea di distribuzione può essere valutato attraverso la seguente formula [1]:

$$N_d = K_0 N_g (b + 10,5 H^{0,75}) \cdot 0,1$$

dove:

- N_g è la densità di fulmini a terra (numero di fulmini per km² per anno);
- H è l'altezza media della linea in metri;
- b è la distanza orizzontale fra i conduttori esterni in metri;
- K_0 è il coefficiente orografico.

Il coefficiente orografico tiene conto della conformazione del terreno nelle vicinanze della linea. Infatti, la forma del terreno influenza il campo elettrostatico, che a sua volta condiziona il percorso del canale discendente del fulmine. Il fulmine che colpisce una linea MT inietta due onde di corrente in entrambe le direzioni pari a circa 1/2 della corrente totale di fulmine. Fino al momento della scarica in linea la corrispondente tensione è quindi uguale a metà della corrente di fulmine moltiplicata per l'impedenza d'onda della linea (circa 400 Ω). Il 95% dei fulmini presenta una corrente di picco superiore a 14 kA e quindi la sovratensione supererà il livello d'isolamento a impulso atmosferico della linea generando scariche tra fase e terra e tra le fasi. A questo punto, l'onda di tensione che si propaga lungo la linea è influenzata dal numero e dalla posizione delle scariche che avvengono sulla linea stessa. In corrispondenza di ogni scarica la sovratensione si riduce, fintantoché l'onda di tensione non si sia ridotta al di sotto del livello di isolamento della linea. La figura 1 mostra un esempio di sovratensione ad una distanza di 600 m dal punto fulminato, calcolata mediante modello digitale al calcolatore [2, 3]; la linea è stata colpita con un fulmine di media ampiezza da 30 kA.

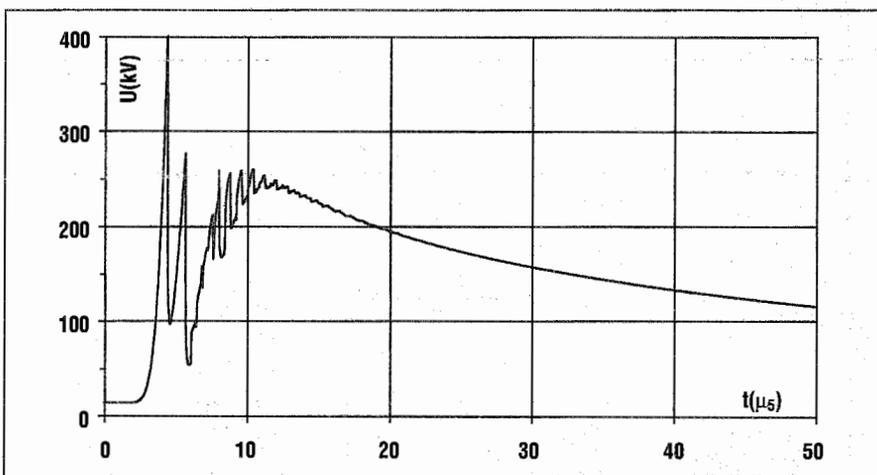


Figura 1 Sovratensione tipica per fulmine diretto su una linea MT.

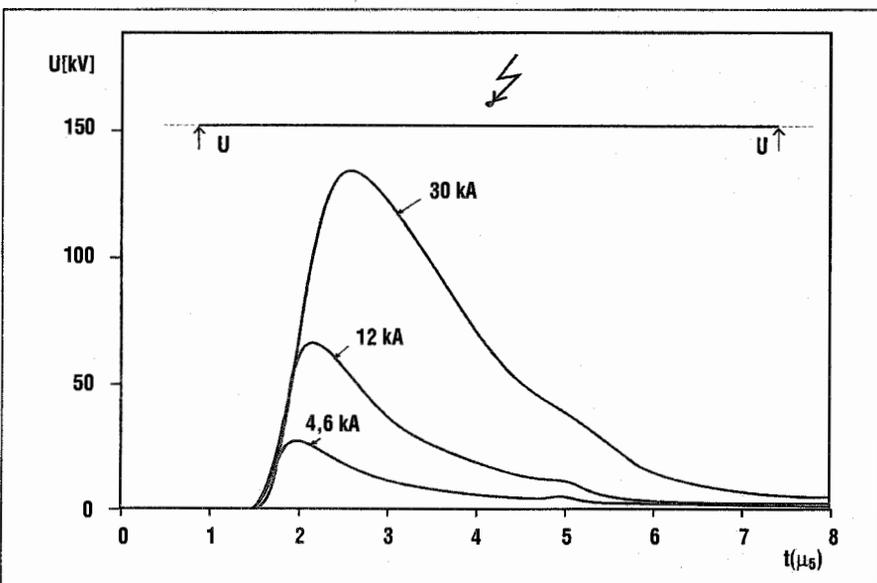


Figura 2 Sovratensioni indotte su una linea MT da un colpo di fulmine al suolo avente differenti correnti di picco e la medesima pendenza del fronte di/dt(max) = 40 kA/μs (cfr. [3] e [4]).

1.2. FULMINAZIONI INDIRETTE

La fulminazione indiretta si verifica quando un fulmine nube-suolo colpisce il terreno o oggetti nelle vicinanze di una linea. Tale colpo di fulmine induce sulla linea stessa delle sovratensioni che possono essere maggiori dei livelli di isolamento. La distanza minima per cui un fulmine colpisce il suolo invece della linea (fulminazione indiretta) dipende, principalmente, dall'altezza della linea e dall'ampiezza del-

la corrente del fulmine: più elevate sono le altezze e le correnti, più elevata è la massima distanza di captazione laterale della linea [4]. Le sovratensioni indotte sono approssimativamente le stesse su ogni conduttore della linea e hanno una polarità opposta alla polarità della corrente del fulmine. Dato che la corrente del fulmine è negativa per circa il 90% dei casi, alle nostre latitudini, le sovratensioni indotte risultano principalmente di polarità positiva. La valutazione delle sovratensioni indotte può avvenire tramite modelli semplificati [5] o attraverso modelli complessi implementati in appositi programmi di calcolo [6]. Nella figura 2 si riporta il risultato della simulazione di sovratensione indotta per fulmini di diversa ampiezza di corrente.

2. Protezioni classiche contro le sovratensioni atmosferiche

Gli apparecchi di protezione contro le sovratensioni appartengono a due categorie principali:

▶ spinterometri;

▶ scaricatori a ossidi metallici, prevalentemente ossido di zinco (ZnO), a caratteristica non lineare.

Vi è poi un dispositivo ibrido che utilizza entrambi i dispositivi:

▶ dispositivi spinterometro-scaricatore (DSS) risultanti dalla integrazione di un normale spinterometro a corno con uno scaricatore MT ad ossido metallico con corno spinterometrico (SCS)

2.1. SPINTEROMETRI

Lo spinterometro è realizzato mediante due elettrodi separati da uno spazio d'aria, nel quale è interposta un'asta fissata alla cappa di un isolatore (dispositivo anti-uccello). Nella figura 3 è raffigurato uno spinterometro unificato ENEL (DK4441). Quando il valore della tensione supera il livello di scarica (o di *innescò*), gli elettrodi vengono cortocircuitati da un arco e la tensione ai loro terminali praticamente si annulla.

Lo spinterometro, per la particolare configurazione a corno, possiede una certa capacità di autoestinzione della corrente se-

guente all'innescò, che di fatto è la corrente di cortocircuito del sistema nel punto di installazione dello spinterometro stesso.

L'innescò dello spinterometro provoca le seguenti conseguenze sulla rete elettrica:

▶ sopraelevazione della tensione delle fasi sane nel caso di innescò monofase nei sistemi a neutro isolato;

▶ sollecitazioni dovute alla corrente di cortocircuito per le reti con neutro a terra con bassa impedenza e nel caso di intervento polifase.

2.2. SCARICATORI AD OSSIDO DI ZINCO (ZNO)

Sono dispositivi di protezione a caratteristica non lineare costituiti da blocchi ad ossido metallico posti in parallelo dell'elemento da proteggere (vedi la figura 4). Alla tensione nominale di funzionamento del sistema essi conducono solo correnti dell'ordine di qualche milliampere, mentre all'insorgere di una sovratensione la resistenza del componente diminuisce drasticamente contribuendo a limitare la sovratensione stessa al livello di protezio-

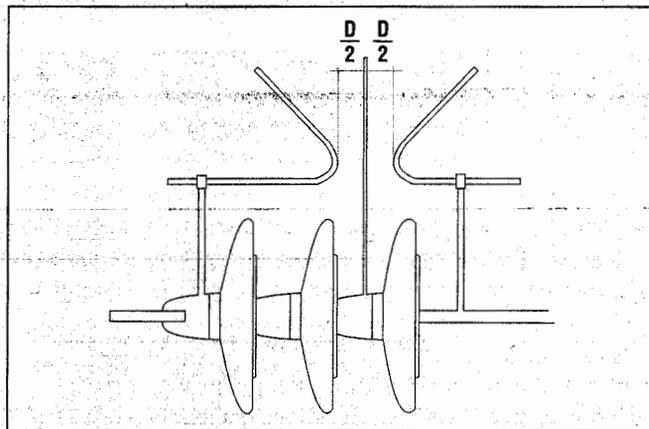


Figura 3 Spinterometro a corno a semplice amarro.

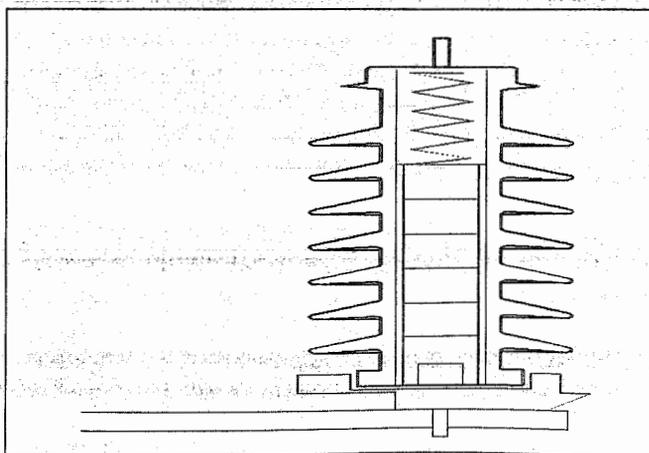


Figura 4 Scaricatore a Ossido di Zinco.

ne desiderato (tensione residua).

2.3. IL DISPOSITIVO SPINTEROMETRO SCARICATORE (DSS)

Come dispositivo ibrido formato da entrambi i dispositivi descritti in precedenza è stato realizzato il DSS (*Dispositivo Spinterometro Scaricatore*). Questo dispositivo è costituito da uno scaricatore a ZnO in serie ad uno spinterometro a corna come indicato nella figura 5.

Il dispositivo presenta le seguenti caratteristiche:

- ▶ in funzionamento nominale lo scaricatore non assorbe corrente, quindi non è soggetto ai fenomeni di invecchiamento. Inoltre non essendo soggetto alla tensione di servizio e alle sovratensioni permanenti e transitorie può essere realizzato con capacità termica minore dello scaricatore a ZnO tradizionale;
- ▶ la caratteristica di intervento del DSS è pari a quella di un semplice spinterometro; per contro è in grado di interrompere in tempi molto brevi la corrente di cortocircuito evitando la conseguente interru-

zione del servizio;

- ▶ il DSS può funzionare anche con scaricatore fuori servizio, limitando le proprie funzionalità al solo spinterometro;
- ▶ lo scaricatore può essere montato con facilità su uno spinterometro preesistente.

3. Benefici dalla sostituzione di spinterometri con scaricatori

La differenza fondamentale fra spinterometro e scaricatore sta nel fatto che l'intervento dello scaricatore non provoca scatto della linea (a patto che non vi siano altre scariche sugli isolamenti di linea) contrariamente all'intervento dello spinterometro, che non provoca scatto solamente nel caso in cui la corrente si estingua in tempi brevi. I fulmini provocano un numero consistente di inneschi di spinterometri e scaricatori e quindi, come si vedrà nel seguito, l'esatta conoscenza delle correlazioni fra scatti di linea e fulminazioni, oltre che la valutazione del beneficio atteso dalla sostituzione degli spinterometri con scaricatori sono punti fon-

damentali per la qualità del servizio della rete elettrica MT.

Nel caso di fulminazione diretta della linea l'alternativa fra scaricatore e spinterometro non ha influenza sul numero delle interruzioni; infatti con fulminazione diretta anche con scaricatori si hanno scariche sugli isolatori di linea, dal momento che la tensione di linea raggiunge un valore pari alla somma della tensione residua dello scaricatore e della tensione di terra del dispersore cui lo scaricatore è collegato, tensione che nella maggioranza dei casi è superiore alla tenuta dell'isolamento di linea.

Nel caso di sovratensioni da fulminazione indiretta, caratterizzate da tempi alla cresta molto brevi, gli scaricatori hanno una certa capacità di proteggere l'isolamento di linea in quanto la sopraelevazione della tensione di terra del dispersore cui è collegato lo scaricatore rimane trascurabile rispetto alla tensione residua dello scaricatore stesso, data la corrente associata alla sovratensione piuttosto piccola. La protezione dell'isolamento di linea si limita però a un'area molto ristretta, a causa della brevità dei tempi alla cresta delle sovratensioni indotte.

Nel seguito si riportano due figure esemplificative della protezione di una linea MT, rispettivamente con spinterometro e scaricatore, a fronte di una sollecitazione dovuta ad un fulmine di ampiezza data.

Considerando le aree riportate nelle due figure, il vantaggio G conseguente alla sostituzione di spinterometri con scaricatori si può calcolare mediante la seguente formula:

$$G = \frac{N_{spint} - N_{scar}}{N_{spint}} = \frac{p \cdot (I_m - I_m) + I_{pi} - I_{pi}}{N_{spint}}$$

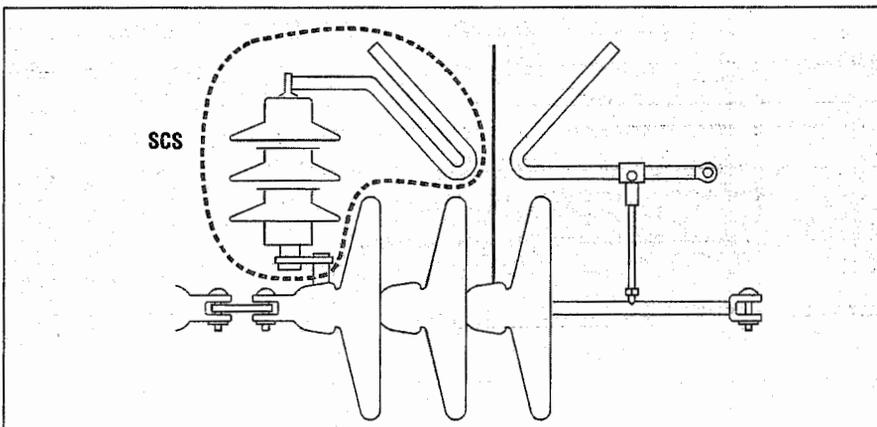


Figura 5 DSS, dispositivo spinterometro-scaricatore.

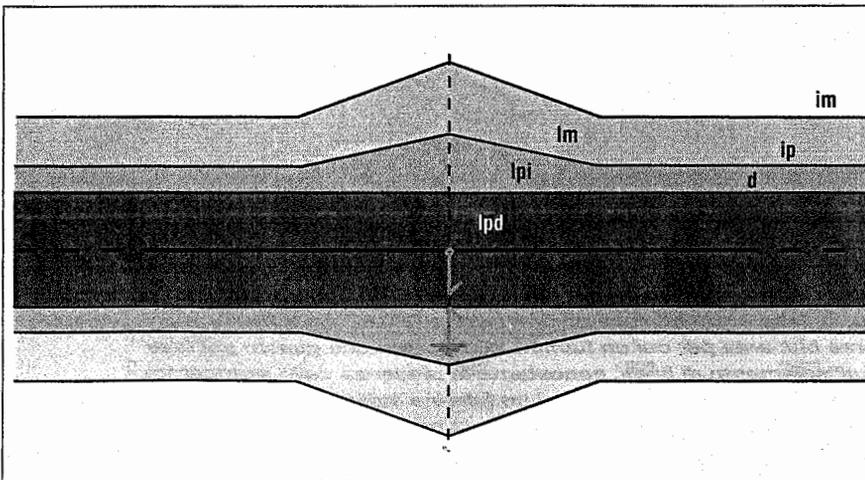


Figura 6 Tracciato in pianta di una linea MT in corrispondenza del punto in cui la linea entra ed esce da una cabina MT/BT protetta da uno spinterometro.

Area blu: area per cui il fulmine diretto provoca innesco polifase sullo spinterometro o guasto polifase sull'isolamento di linea.
 Area azzurra: area per cui un fulmine indiretto provoca innesco polifase sullo spinterometro o guasto polifase sull'isolamento di linea.
 Area gialla: area per cui il fulmine provoca innesco monofase sullo spinterometro o guasto monofase sull'isolamento di linea.

dove:

- N_{spint} è il numero di scatti della linea armata con spinterometri;
- N_{scar} è il numero di scatti della linea armata con scaricatori;
- p è la probabilità che un guasto monofase provochi scatto della linea (indicativamente, $p = 1$ per linea con corrente d'arco monofase superiore a 50 A; $p = 0$ per linea in una rete con bobina di compensazione).

Come si vede dalle figure 6 e 7, il vantaggio G è legato al diverso comportamento della linea (con spinterometri e con scaricatori): in vicinanza della cabina e all'aumentare della distanza tra una cabina e la successiva G diminuisce. Applicando questo metodo ad una linea reale si ottiene il seguente andamento del coefficiente G nella figura 8 (per maggiori dettagli si veda [7]).

4. Utilizzo degli LLS e dei modelli di sovratensione

Per poter meglio comprendere l'effetto delle protezioni sulle linee elettriche si possono utilizzare alcuni strumenti che da qualche anno sono a disposizione. Essi sono da un lato i LLS (*Lightning Location System*) e dall'altro i complessi modelli software di simulazione delle sovratensioni indotte.

In particolare, sul territorio italiano è presente un LLS di proprietà del CESI, in funzione dal 1994. Questo sistema, denominato Sistema Italiano Rilevamento Fulmini - SIRF [8], rileva ogni scarica di fulmine del tipo nube-suolo sull'intero territorio italiano. SIRF è costituito da sedici sensori dislocati sul suolo italiano, più altri installati in Austria, Svizzera e Francia. Per ogni scarica di fulmine nube-suolo SIRF è in grado di rilevare e archiviare le informazioni di: tempo, latitudine, longitudine, intensità di corrente, polarità, numero di colpi successivi. L'efficienza di rilevamento nominale di SIRF è del 90%, e la precisione sull'individuazione del punto di impatto è mediamente di 500 m.

Tramite le registrazioni di SIRF si può valutare l'effetto delle scariche atmosferiche sulle linee di MT, verificando le registrazioni dei fulmini nube-suolo e correlandole con i guasti verificati sulle linee stesse. Questo permette di trovare il tasso di incidenza dei guasti originati da fulmine (ful-

minazioni dirette e indirette) per ogni linea esaminata. Inoltre, è possibile confrontare il comportamento di una stessa linea in presenza di diversi metodi di protezione, stimandone benefici ed efficacia. Alcuni lavori sono stati già pubblicati su questo metodo e si riassumono brevemente nel paragrafo 5.

La disponibilità di software complessi in grado di modellare la risposta a dei sistemi di distribuzione alle sovratensioni causate dal fulmine permette da un lato di simulare la propagazione e l'accoppiamento del campo EM del fulmine alle linee, dall'altro di descrivere elettricamente una linea di MT, considerando la sua reale topologia e i dispositivi di potenza e di protezione ad essa connessi. Tutto ciò consente di ricostruire il tipo di sovratensione generata da una scarica di fulmine su ogni linea componente un sistema elettrico di distribuzione complesso, e, conseguentemente, il possibile guasto derivante. Questo metodo permette di verificare l'opportunità di protezioni specifiche in diversi punti delle linee e permette di fornire una stima del livello di guasti prodotti dal fulmine per sola sovratensione indotta.

Nel caso di quest'analisi si è utilizzato il codice di simulazione noto come LIOV-EMTP96 [9-13], sviluppato dalle Università di Bologna, Roma e Losanna in collaborazione con CESI, e riconosciuto a livello internazionale come uno tra i più completi ed accurati codici esistenti. Nel codice LIOV sono implementati rispettivamente

il modello *Modified Transmission Line* [9] per la descrizione della distribuzione spaziotemporale della corrente di fulmine, e le equazioni del campo elettromagnetico nella forma presentata in [14]. Per tener conto dell'effetto della conducibilità finita del suolo sul campo elettrico orizzontale viene utilizzata la formula approssimata di Cooray-Rubinstein [15, 16] (la componente verticale del campo elettrico si calcola, con buona approssimazione, assumendo il suolo perfettamente conduttore). Per quanto concerne il modello di accoppiamento tra il campo elettromagnetico generato dal fulmine e la linea, nel codice LIOV è impiegato il modello proposto da Agrawal et al. [17], opportunamente adattato al caso di linee su di un suolo di resistività finita [18], a più conduttori [19], e dotate di messe a terra periodiche del conduttore di neutro o della fune di guardia [20, 21]. Il codice consente di effettuare il calcolo delle sovratensioni partendo da una qualsiasi funzione rappresentante la corrente di fulmine al suolo.

Applicando entrambi i sistemi a nostra disposizione, SIRF da un lato e LIOV-EMTP96 dall'altro, si possono studiare fulmini realmente registrati nelle vicinanze dell'impianto di linea in esame e delle sue linee di media tensione; si possono valutare le sovratensioni che dovrebbero essersi generate su ciascuna linea secondo il modello LIOV-EMTP96 a valle delle correnti di fulmine registrate e delle posizioni dei punti di impatto; si può confrontare il valore delle sovratensioni previste con il li-

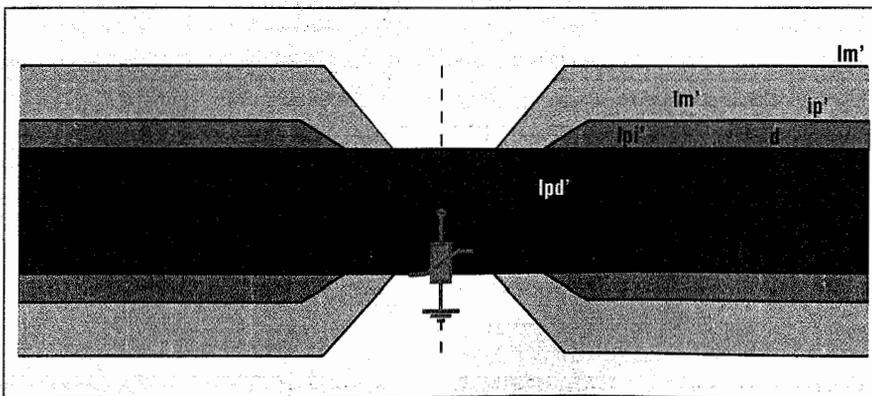


Figura 7 Tracciato in pianta di una linea MT in corrispondenza del punto in cui la linea entra ed esce da una cabina MT/BT protetta da uno scaricatore. Area blu: area per cui un fulmine diretto provoca guasto polifase sull'isolamento di linea, nonostante la presenza dello scaricatore. Area verde scuro: area per cui un fulmine indiretto provoca guasto polifase sull'isolamento di linea, nonostante la presenza dello scaricatore. Area verde chiaro: area per cui il fulmine provoca guasto monofase sull'isolamento di linea, nonostante la presenza dello scaricatore.

vello di isolamento delle linee e decidere infine quali guasti effettivamente registrati siano attribuibili a sovratensioni indotte da fulmini.

Il modello LIOV-EMTP96 viene applicato per la prima volta alle correlazioni con i fulmini registrati da SIRF, in alternativa ai modelli più semplici utilizzati finora. Come primo passo è necessario quindi domandarsi se il modello di sovratensione utilizzato sia in grado di spiegare l'evidenza sperimentale. Se così fosse si avrebbe quindi una possibile metodologia accurata per assegnare a ciascun guasto di linea il fulmine che lo ha generato, se esso esiste, e valutare quali interventi di protezione ha causato. Tutto ciò apre un vasto scenario applicativo nell'ambito della qualità del servizio.

5. Correlazione tra eventi di fulminazione e guasti nei sistemi di distribuzione

Un valido esempio di correlazione tra guasti di linee MT, intesi qui come interventi delle protezioni ed eventuale scatto interruttore, e fulmini è rappresentato da una campagna di registrazioni durata dal 1992 al 1999, nata da una collaborazione tra CESI ed ENEL. Durante questa campagna sono state esaminate otto stazioni primarie, in tre regioni italiane, per un totale di circa 160 linee MT, a 10kV, 15kV e 20kV, ed una lunghezza di linea totale di circa 4500 km. I risultati sono stati pubblicati altrove [22-24] e presentano una

chiara evidenza della correlazione al fulmine nell'ordine del 20-30%, che sale ad una correlazione del 50% dei guasti con il periodo temporalesco. Qui riportiamo solo lo schema dell'esperimento, sia come esempio di applicazione dei dati di LLS, sia perché una piccola parte dei dati è stata utilizzata per valutare il possibile futuro impiego del codice LIOV-EMTP96.

L'esperimento era composto da un sistema di registrazione dei dati di fulmine e da alcuni sistemi di acquisizione delle manovre delle protezioni, installati in ciascuna delle otto stazioni primarie. Un software dedicato permetteva poi di interpretare e correlare le registrazioni effettuate. I dati delle scariche di fulmine sono stati registrati da dei sensori CIGRE - 10kHz nei primi due anni 1992 e 1993, mentre dal 1994 si sono utilizzati i dati registrati dalle rilevazioni di SIRF. SIRF è già stato descritto nel paragrafo 4 e si ricorda qui solo che la precisione sul dato di tempo è quella dichiarata dal sistema satellitare GPS, di 300 ns.

Il Sistema di Acquisizione Manovre (SAM), per registrare tutti i movimenti delle protezioni e degli interruttori di linea, è stato sviluppato appositamente ed è costituito da un insieme di schede di acquisizione e trattamento segnali che consentono di registrare 24 ore su 24 e archiviare i dati in un PC connesso. Il passo di campionamento dei segnali è di 10 ms, sufficiente quindi a distinguere e caratterizzare anche i cosiddetti autoestinguenti. Un esempio di segnale

registrato e interpretato da SAM è riportato nella figura 9. SAM, dotato di scheda di orologio interna, è sincronizzato con il tempo UTC e, di conseguenza, sincronizzato con i dati registrati dal SIRF.

Lo studio menzionato, riguardante la correlazione tra fulminazioni e guasti con i dati di SIRF e di SAM [24] ha preso in considerazione le seguenti tipologie di correlazione:

- a) correlazione di tempo: ogni fulminazione è legata ad un guasto se questo avviene entro una finestra temporale di un secondo;
- b) correlazione spaziale: ogni fulmine è correlata ad un guasto se la distanza del punto di impatto del fulmine dalla linea è minore di un valore critico. Tale valore critico viene calcolato per ciascun fulmine in base all'intensità di corrente ed al BIL (*Basic Insulation Level*) della linea, tramite l'espressione di Rusck [5]. Il campione di fulmini è selezionato nell'area di insidenza delle linee in esame;
- c) correlazione spazio-tempo: ogni fulminazione è legata ad un guasto se questo avviene entro una finestra temporale di un secondo e se la distanza del punto di impatto del fulmine dalla linea è minore del valore critico ottenuto con l'espressione di Rusck.

6. Correlazione tra eventi di fulminazione e guasti da sovratensioni

Il metodo di correlazione in tempo e distanza si può applicare utilizzando un modello di sovratensione evoluto rispetto a quello di Rusck che, ricordiamo, è valido solo per suolo perfettamente conduttore e linea infinita. In questo studio si è deciso di correlare i dati relativi ai fulmini (Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini SIRF) ed agli interventi delle protezioni del sistema di distribuzione precedentemente studiato (Sistema di Acquisizione Manovre SAM) tramite il criterio c), utilizzando LIOV-EMTP96 per la valutazione delle sovratensioni generate.

- In questo studio di dettaglio sostanzialmente si applica il modello LIOV-EMTP96 per:
- ▶ simulare le linee reali;
 - ▶ introdurre i fulmini, registrati realmente, nel modello e propagare i campi rispettivi;
 - ▶ confrontare i guasti previsti dal modello

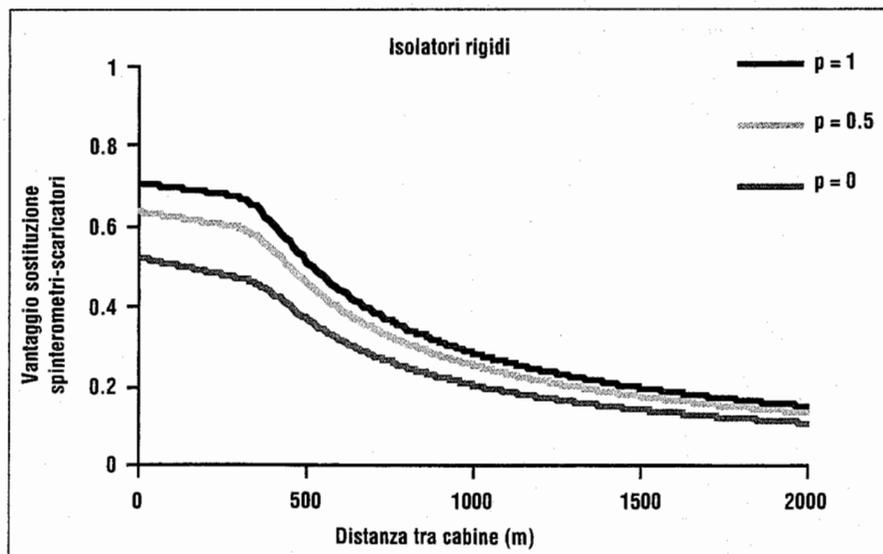


Figura 8 Linea armata con isolatori rigidi: vantaggio ottenibile dalla sostituzione di spinterometri con scaricatori al variare della distanza tra due cabine secondarie.

con i guasti correlati da SAM+SIRF con il solo criterio di correlazione in tempo, assunto come risultato di riferimento;

► verificare il numero di guasti indotti secondo il modello al cadere dei fulmini reali registrati, e operare un confronto di prestazione tra l'utilizzo di LIOV e la semplice espressione usata nella campagna citata nel paragrafo 5

6.1. DATI ANALIZZATI

Per questo studio ci si è limitati all'analisi di una sola sottostazione primaria, ovvero alla cabina ENEL di trasformazione primaria 150 kV/15 kV denominata Erba. La cabina primaria di Erba ha presentato in assoluto il minor numero di correlazioni guasto-fulmini. Si è analizzato un anno di dati, tra quelli raccolti nell'esperimento menzionato, concentrandosi sul periodo 01/01/1997 -31/12/1997.

Lo studio riportato nel paragrafo 5, effettuato sul sistema elettrico di Erba, nel periodo 01/01/1997-31/12/1997, aveva utilizzato i criteri di correlazione a) b) e c), ed in particolare la formula di Rusck nel criterio di correlazione in tempo e distanza. I risultati relativi al criterio a), considerando tale criterio come il più attendibile, sono mostrati nella tabella 1. Nella prima colonna sono riportati il numero degli interventi delle protezioni, in periodi in cui era in atto un temporale, correlati a fulminazioni (49) e non correlati a fulminazioni (219), mentre nella seconda colonna il numero degli interventi degli interruttori nei giorni in cui non è stata rilevata attività temporalesca.

I risultati relativi al criterio c), considerando tale criterio come il più stringente, sono mostrati nella tabella 2. Nella prima colonna sono riportati il numero degli interventi delle protezioni, in periodi in cui era in atto un temporale, correlati a fulminazioni (1) e non correlati a fulminazioni (267), mentre nella seconda colonna il numero degli interventi degli interruttori nei giorni in cui non è stata rilevata attività temporalesca.

I risultati della tabella 2 mostrano chiaramente che, impiegando il criterio c), il numero degli eventi di fulmine che causano interruzioni è pari ad uno. Naturalmente tale risultato evidenzia una stima per difetto eccessiva degli eventi correlabili durante le giornate temporalesche [25, 26]. Questo si spiega in larga misura considerando le no-

tevoli approssimazioni introdotte dall'impiego della formula di Rusck.

6.2. CALCOLI EFFETTUATI CON LIOV-EMTP96

L'espressione di Rusck è stata quindi sostituita in questo studio da una procedura di calcolo in grado di gestire la risposta di un sistema di distribuzione complesso, il-

luminato dal campo elettromagnetico prodotto dal fulmine, considerando sia la presenza del terreno non perfettamente conduttore sia la topologia realistica delle linee costituenti il sistema elettrico. Tale procedura di calcolo è costituita dal codice di calcolo LIOV (*Lightning-Induced Over Voltage Code*). Il codice LIOV è stato interfacciato con l'EMTP96, in modo da

**Tabella 1 - Correlazione tra SIRF e SAM utilizzando il criterio a).
Adattato da [22]**

Numero di guasti		
Durante attività temporalesche		
Correlati a fulmini	Correlati al temporale	In assenza di attività temporalesche
49	219	373

**Tabella 2 - Correlazione tra SIRF e SAM utilizzando il criterio c).
Adattato da [22]**

Numero di guasti		
Durante attività temporalesche		
Correlati a fulmini	Correlati al temporale	In assenza di attività temporalesche
1	267	373

Tabella 3 - Correlazione SIRF-SAM utilizzando il criterio c). Per il valore della distanza critica i calcoli sono stati effettuati con il LIOV-EMTP96

Numero di guasti		
Durante attività temporalesche		
Correlati a fulmini	Correlati al temporale	In assenza di attività temporalesche
20	248	373

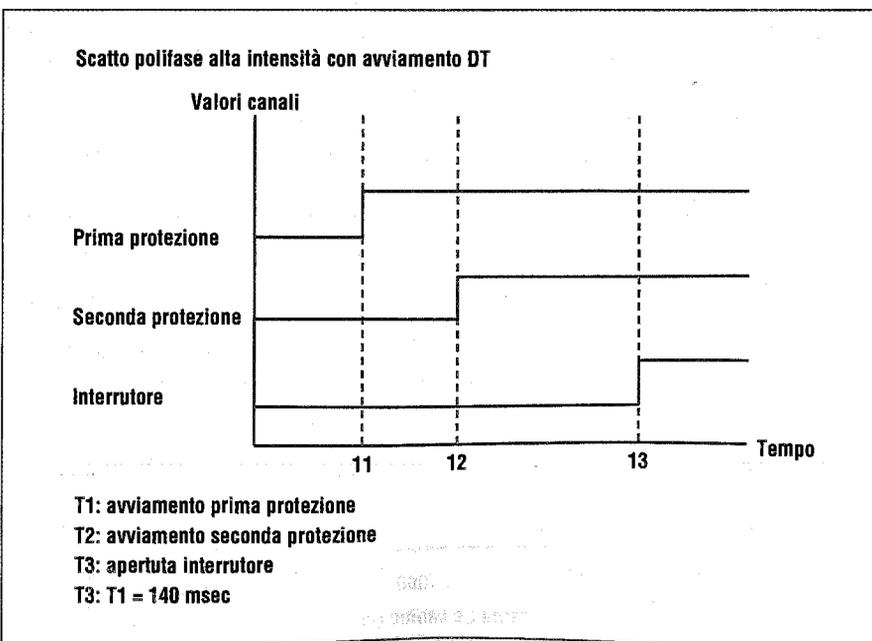


Figura 9 Esempio di guasto tramite registrazione dei movimenti di protezione effettuato da SAM.

estenderne le capacità di calcolo nel caso di sistemi di distribuzione aventi topologie complesse [11-13].

Il sistema di distribuzione facente capo alla cabina in esame è stato scomposto, per esigenze software, in 17 sottosistemi aventi tensione nominale di 15 kV e tensione di isolamento di 125 kV. Si sono utilizzate nella descrizione software del sistema solo le linee aeree costituenti i rami del sistema elettrico di distribuzione utilizzato, che peraltro sono la quasi totalità dei rami presenti. La disposizione dei conduttori riprodotta è quella reale, applicata al sistema elettrico di Erba, e risulta essere quella delle tipiche linee aeree italiane. Lo schema è riportato nella figura 10. I ful-

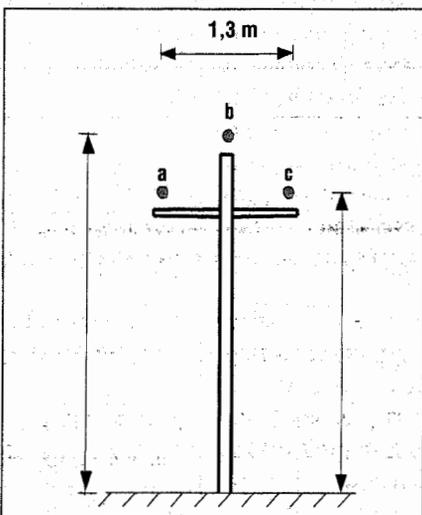


Figura 10 **Disposizione dei conduttori per le linee di Erba.**

mini considerati sono quelli rilevati da SIRF nell'intorno del sistema di linee aeree, fino ad una distanza di 2 km di margine dai rami più esterni. Per quanto concerne la conducibilità del terreno, è stato assunto per tale parametro, coerentemente con l'area nella quale il sistema è posizionato, il valore di 0,01 S/m.

La procedura di calcolo delle sovratensioni indotte per ogni evento registrato da SIRF non considera tutte le linee del sistema come illuminate dal campo elettromagnetico generato dall'evento stesso. Tale approssimazione è dovuta al fatto che considerare tutte le linee del sistema avrebbe comportato tempi e risorse di calcolo eccessive. Le linee posizionate a distanze superiori a qualche chilometro dal punto di impatto, comunque, subiscono effetti del LEMP che risultano trascurabili, pertanto l'approssimazione introdotta è pienamente soddisfacente. È stato quindi contemplato un insieme di linee la cui topologia è stata determinata come segue: per ogni punto di impatto sono state considerate illuminate solo le linee che avevano una terminazione interna ad una circonferenza avente un raggio adeguato. Tale raggio è stato posto pari ad 1 km e facente riferimento ad una circonferenza con centro nel punto di impatto del fulmine (vedi la figura 11).

Per quanto riguarda le terminazioni delle linee facenti parte del sistema illuminato è stato adottato il seguente criterio: nel caso in cui la terminazione di una linea facen-

te parte del sistema illuminato non sia connessa ad altre linee, si suppone che essa alimenti un trasformatore di distribuzione, pertanto, viste le frequenze tipiche delle sovratensioni indotte, quest'ultimo è stato approssimato con una resistenza di valore infinito. Nel caso in cui la terminazione di una linea facente parte del sistema illuminato sia connessa ad altre linee e sia anche esterna alla circonferenza, è stata considerata adattata sulla matrice delle impedenze d'onda.

Per ogni punto di impatto si considera che esso sia correlato ad un guasto se, assieme al criterio di correlazione in tempo, la sovratensione indotta, calcolata tramite il codice LIOV-EMTP96 relativamente al sistema considerato illuminato, eccede la tensione di scarica della linea. Quest'ultima viene così determinata: la tensione di scarica dell'isolamento della linea in oggetto viene determinata in base a quanto riportato nello Standard IEEE 1410-1997 [27], nel quale si specifica che la sovratensione indotta produce una scarica dell'isolamento quando supera del 50% la tensione di tenuta (CFO, *Critical Flashover Voltage*), all'impulso standard 1,2/50 ms, in virtù della tipica forma d'onda a coda breve delle sovratensioni indotte [28]. Pertanto, assumendo per la linea in questione un CFO pari a 125 kV, la tensione di scarica risulterà pari a 187,5 kV.

Per quanto concerne i parametri della corrente di fulmine non ottenibili dal sistema SIRF, quali la forma d'onda della corren-

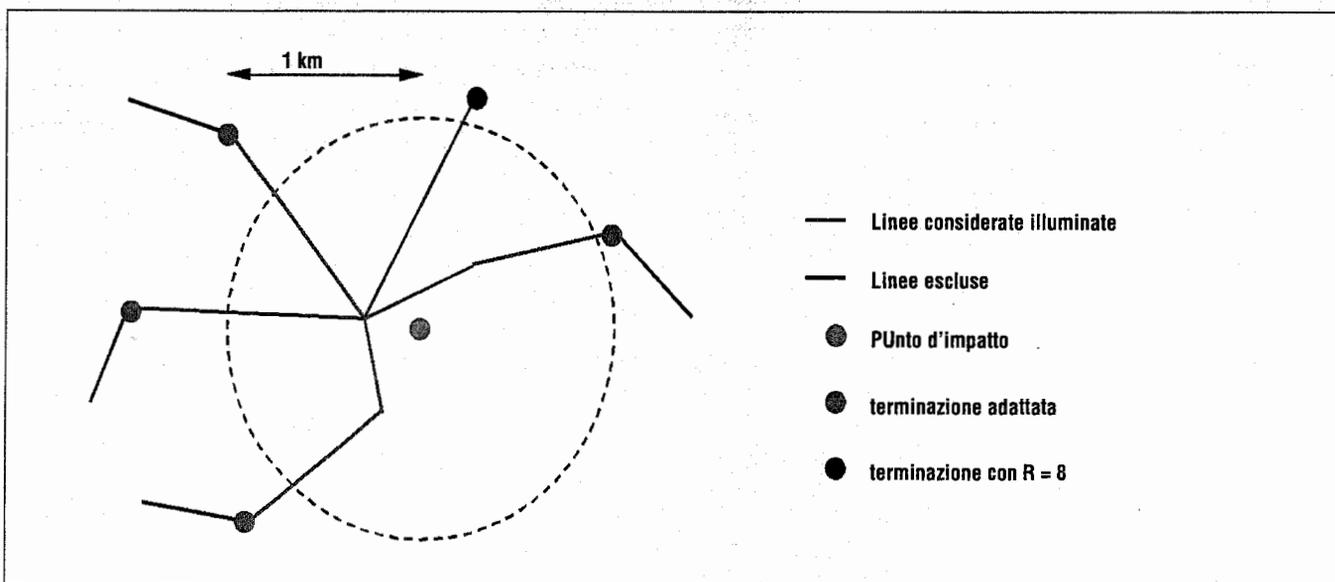


Figura 11 **Determinazione della topologia del sistema illuminato dal campo elettromagnetico in base al punto d'impatto del fulmine**

te di fulmine alla base del canale e il suo tempo di salita, in prima approssimazione la corrente è stata assunta come avente forma d'onda trapezoidale, con un tempo di salita al valore massimo di 2 μ s. È stata inoltre considerata la presenza della tensione di esercizio della linea. In particolare, successivamente al calcolo della sovratensione indotta nei nodi del sistema, il valore della tensione di esercizio alla frequenza industriale è tenuto in conto come termine aggiuntivo della tensione incidente. La giustificazione risiede nel fatto che la corrente che circola in linea prima della fulminazione non influisce sull'entità delle sovratensioni indotte e, quindi, le equazioni di accoppiamento rimangono invariate. Inoltre, non conoscendo la fase della tensione di esercizio alla frequenza industriale al momento della fulminazione, essa è stata sommata alla tensione indotta tramite una procedura di tipo statistico, considerando come variabile aleatoria la fase della tensione su uno dei tre conduttori a partire da una distribuzione di probabilità uniforme. Le tensioni sui rimanenti due conduttori sono calcolate assumendo che le tensioni sulle tre fasi costituiscano un sistema simmetrico di sequenza diretta. Nella tabella 3 sono riportati i risultati riguardanti i guasti correlati a fulminazioni tramite la procedura precedentemente esposta. I guasti correlati sono suddivisi per ciascun sottosistema della cabina primaria Erba e per tipologia di guasto.

Considerando la complessità del sistema e le diverse approssimazioni, nonché l'errore sulla valutazione del punto d'impatto da parte del SIRF, i risultati della tabella 3, ottenuti utilizzando il metodo di LIOV-EMTP96, mostrano un maggiore livello di correlazione tra guasti e fulminazioni indirette rispetto a quelli ottenuti con la procedura riportata nel paragrafo 5 (vedi la tabella 2). Il numero totale di guasti correlati con la procedura qui proposta risulta infatti essere pari a 20 contro il singolo guasto della tabella 2, avvicinandosi al valore di correlazioni ottenuto con il metodo di correlazione in tempo, come riportato nella tabella 1.

Naturalmente, la complessità dei modelli e le approssimazioni introdotte comportano un notevole intervallo di confidenza sui risultati ottenuti e, allo stesso tempo, conducono a successivi studi e approfondimenti della materia. Questi primi risultati, tuttavia, mostrano chiaramente come il tipo di modello per l'accoppiamento e la valutazione delle sovratensioni indotte sia di fondamentale importanza nelle analisi di correlazione spaziale fulmini-guasti di linea MT.

7. Conclusioni

La qualità del servizio si basa da un lato su ben assodati sistemi di protezione e dall'altro sulle valutazioni reali delle performance di linea. In questi ultimi anni sono comparsi sulla scena internazio-

nale degli strumenti che si stanno rivelando molto utili per queste valutazioni. Gli LLS, con la capacità di registrare ciascun fulmine ed i relativi dati di tempo di accadimento, punto di impatto e intensità di corrente, permettono analisi molto precise dei guasti in linea generati dai fulmini e della validità delle protezioni scelte. I modelli complessi di propagazione e accoppiamento del campo generato dal fulmine sulle linee elettriche, sviluppati di recente, oltre alla capacità di simulare realisticamente sistemi elettrici complessi, permettono di valutare l'effetto dei guasti da sovratensione indotta e di correlarli ai rispettivi eventi origine da fulminazione. In particolare, le prime analisi effettuate con i dati di SIRF e di LIOV-EMTP96 indicano chiaramente l'importanza di avere dati e modelli accurati per affrontare la correlazione fulmine-guasto in linea. È da sottolineare, inoltre, come, in mancanza di un metodo sicuro in tal senso, le correlazioni in tempo siano le più affidabili, ammesso che i due sistemi di rilevamento dei fulmini e dei guasti possano considerarsi perfettamente sincroni. Un risultato complementare è per noi la validazione del modello LIOV-EMTP96 nelle applicazioni di valutazione delle correlazioni ai guasti e nelle valutazioni delle sovratensioni indotte sulle linee. Da questo discende che tale modello può essere sicuramente utile anche per simulare l'effetto di vari tipi o vari posizionamenti di protezioni.

