

## Guasti a terra nelle linee MT prodotti da fulminazioni indirette

Il numero di sovratensioni indotte da fulminazioni indirette su linee aeree di distribuzione che superano una certa ampiezza e in grado di provocare una scarica a terra, è calcolato grazie ad un metodo che si basa sulla tecnica di Monte Carlo e sui modelli per il calcolo delle sovratensioni recentemente sviluppati nel quadro di una collaborazione internazionale italo-svizzera. Il metodo viene confrontato con quello proposto nella guida IEE Std. 1410-1997 dal quale differisce sia per i più accurati modelli impiegati per il calcolo delle sovratensioni indotte, sia per il procedimento statistico.

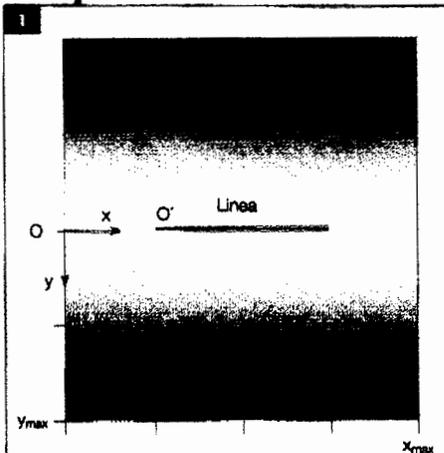


Figura 1 Area attorno alla linea in cui sono considerati i punti di impatto dei fulmini (vista dall'alto).

### 1 Introduzione

Il coordinamento dell'isolamento delle linee aeree mediante il metodo statistico si basa sul calcolo del rischio di scarica, che può essere valutato una volta noti in forma statistica sia il comportamento dell'isolamento, sia il verificarsi della sovratensione [1]. Il presente lavoro presenta un metodo di stima del numero annuale di scariche dell'isolamento sulle linee MT, dovute a sovratensioni indotte da fulminazioni indirette<sup>1</sup>, in funzione della tensione di tenuta e al variare di alcuni parametri in gioco.

### 2 Il metodo proposto

Il metodo proposto consiste:

- nel calcolo delle sovratensioni indotte da fulminazioni indirette mediante i modelli implementati nel codice di calcolo LIOV [2, 3], sviluppato nell'ambito di una collaborazione internazionale tra l'Università di Bologna, il Politecnico di Losanna e l'Università di Roma "La Sapienza".
- nella valutazione statistica, mediante il metodo di Monte Carlo, del numero delle scariche a terra provocate da tali sovratensioni.

Il calcolo delle sovratensioni avviene in due fasi:

1. dapprima è valutato il campo elettromagnetico irradiato dal canale di fulmine partendo dalla corrente alla base di esso;
2. successivamente viene calcolata la sovratensione indotta risultante dall'interazione campo-linea.

Per il punto 1., nel codice LIOV sono implementati rispettivamente il modello linea di trasmissione modificato (MTL) [4] per la descrizione della distribuzione spazio-temporale della corrente di fulmine, e le equazioni del campo elettromagnetico nella forma presentata in [5]. Per tener conto dell'effetto della conducibilità finita del suolo sul campo elettrico orizzontale è utilizzata la formula approssimata di Cooray-Rubinstein [6, 7] (la componente verticale del campo elettrico si calcola, con buona approssimazione, assumendo il suolo perfettamente conduttore).

Per il punto 2., è impiegato il modello d'accoppiamento proposto da Agrawal et al. [8], opportunamente adattato al caso di linee su di un suolo di resistività finita [3], a più conduttori [9], e dotate di messe a terra periodiche del conduttore di neutro o della fune di guardia [10].

Il codice consente di effettuare il calcolo delle sovratensioni partendo da una qualsiasi funzione rappresentante la corrente di fulmine al suolo. Peraltro, per la valutazione statistica, si è approssimato l'andamento della corrente di fulmine mediante una rampa sino al raggiungimento al tempo  $t_f$  del valore di picco  $I_p$ , oltre il quale la corrente si mantiene al valore costante  $I_p$ . Il tempo di salita della forma d'onda trapezoidale è definito pari a  $t_f = T_{30}/0.6$ , dove  $T_{30}$  è la durata del fronte corrispondente all'intervallo fra i punti

30% e 90% del picco  $I_p$  sul fronte dell'onda [11].

Per determinare il numero di scariche a terra in funzione della tensione di tenuta dell'isolamento, la tecnica di Monte Carlo applicata [12] prevede la generazione di un numero adeguato d'eventi (almeno 10 000) caratterizzati da quattro valori. I primi due sono il valore di picco della corrente di fulmine  $I_p$  ed il valore del tempo di salita di essa  $t_f$ . Le distribuzioni di probabilità impiegate per tali parametri sono quelle pubblicate in [11], tenendo anche conto del fattore di correlazione tra esse. La seconda coppia di valori è costituita dalle coordinate del punto d'impatto. Diversamente dalla pratica usuale di considerare una linea di lunghezza infinita e di calcolare le tensioni indotte in corrispondenza del punto di essa più prossimo al punto di impatto (procedura che richiede l'uso di una sola coordinata), si ritiene più opportuno considerare, come mostrato in figura 1, una linea di lunghezza finita adattata alle estremità, all'interno di una superficie, ed estendere il calcolo delle

<sup>1</sup> Data l'altezza dei conduttori delle linee di distribuzione, generalmente inferiore a quella delle asperità circostanti, gli eventi di maggiore probabilità sono le fulminazioni "indirette" che, per un'area di 1 km<sup>2</sup> attorno alla linea, rappresentano oltre l'80% del totale. Nel seguito si farà pertanto riferimento solo a tale tipo di eventi.

sovratensioni a tutti i punti della linea. Ciò si giustifica osservando che, come mostrato anche da risultati sperimentali [13], nel caso di terreni resistivi, l'ampiezza massima della sovratensione lungo la linea non si verifica necessariamente nel punto più prossimo a quello d'impatto [14]. La superficie deve essere tale da racchiudere tutti gli eventi che determinano sovratensioni indotte maggiori del minimo valore di tensione di tenuta dell'isolamento considerato. Si noti che il metodo proposto consente di valutare la risposta alle fulminazioni indirette anche per sistemi con topologia più complessa, tipica delle reti di distribuzione, e di tenere conto delle terminazioni.

Sono considerate fulminazioni indirette gli eventi con punto di impatto esterno alla zona attorno alla linea delimitata dalla cosiddetta "distanza laterale"  $d_l$ . Essa è tradizionalmente stimata facendo uso del cosiddetto "modello elettro-geometrico" di Young, Clayton e Hileman [15], che fornisce la determinazione delle distanze critiche di fulminazione sul conduttore  $r_s$  e sul terreno  $r_g$  in funzione della corrente fulmine  $I_p$  alla base del canale. Per esse sono state proposte alcune diverse espressioni [16 - 18]. La distanza laterale può anche essere calcolata applicando modelli più recenti [19 - 22], ottenuti mediante un'analisi più accurata del fenomeno della scarica atmosferica (Tabella 1), e che forniscono direttamente l'espressione di  $d_l$  in funzione della corrente  $d_l = c + A \cdot I_p^b$  (1)

Nel metodo proposto, la velocità del colpo di ritorno può essere considerata sia variabile aleatoria, sia funzione del valore di picco della corrente mediante le relazioni proposte in letteratura [23], sia mantenuta costante ad un valore fisso.

Per ognuno degli eventi casuali generati si calcola l'ampiezza massima raggiunta dalla tensione indotta lungo la linea considerata. Tenendo conto del numero annuale di fulminazioni per  $\text{km}^2$  tipico della zona, si ottiene il grafico che riporta in ordinata il numero di tensioni indotte che superano il valore in ascissa. Tenendo poi in conto della caratteristica tensione-tempo degli isolatori, è possibile ricavare infine il numero di scariche a terra in funzione della tensione di tenuta.

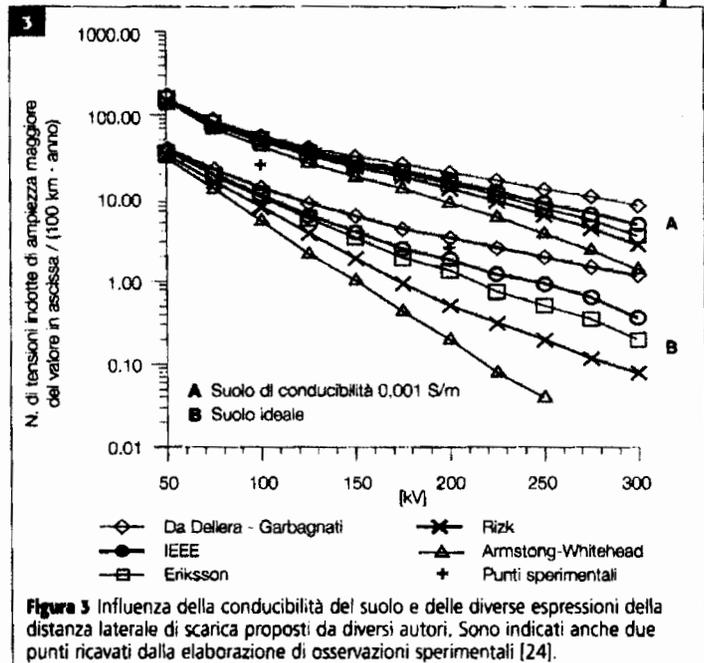
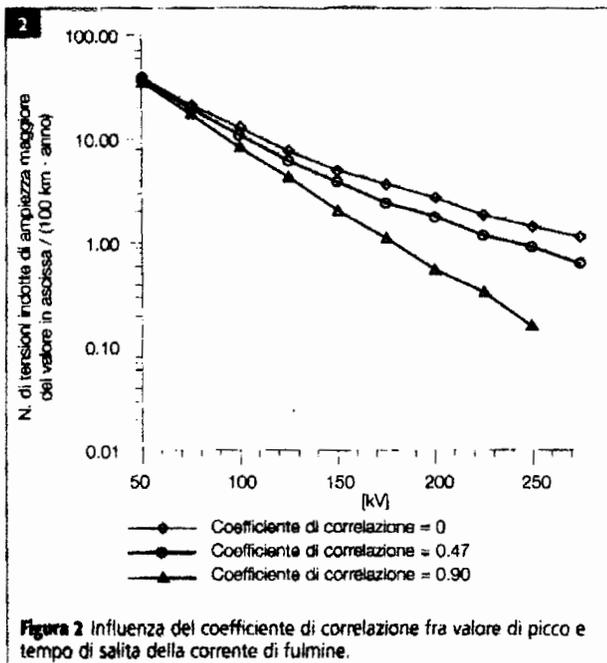
Tutti i risultati qui presentati sono ottenuti assumendo una densità di fulminazioni pari a 1 evento all'anno per  $\text{km}^2$ . Come consuetudine nella letteratura sull'argomento, i risultati sono riferiti a 100 km di linea.

In **figura 2** sono mostrati alcuni risultati ottenuti assumendo tre diversi valori del coefficiente di correlazione tra il valore di picco della corrente  $I_p$  ed il tempo di salita  $t_f$  per una di linea lunga 2 km ed alta 10 m, adattata alle estremità, assumendo una velocità del colpo di ritorno pari a  $1,5 \cdot 10^8$  m/s. Per tali simulazioni è stata adottata l'espressione della distanza laterale proposta dalla IEEE in [18]. Si noti che il valore del coefficiente di correlazione ha una notevole influenza sui risultati: un elevato valore comporta, infatti, che le correnti di fulmine con ampiezze elevate abbiano anche fronte di salita lento e quindi inducano tensioni minori rispetto ad eventi con correnti di grande ampiezza e breve tempo di salita.

La **figura 3** mostra l'influenza della conducibilità del terreno sui risultati, e ciò per le diverse possibili espressioni della distanza laterale di scarica menzionate in precedenza. Si osserva che la resistività del terreno (curve **A**) determina un aumento del numero delle sovratensioni indotte a causa dell'effetto di tale parametro sul campo elettrico incidente [3, 14].

**Tabella 1** Valore dei parametri A, b e c della relazione (1). Adattata da [19]

	c	A	b
Eriksson [20]	-	0.67 $h^{0.6}$	0.7 4
Rizk [21]	-	1.57 $h^{0.45}$	0.6 9
Dellera e Garbagnati [22]	3 $h^{0.6}$	0.028 h	1



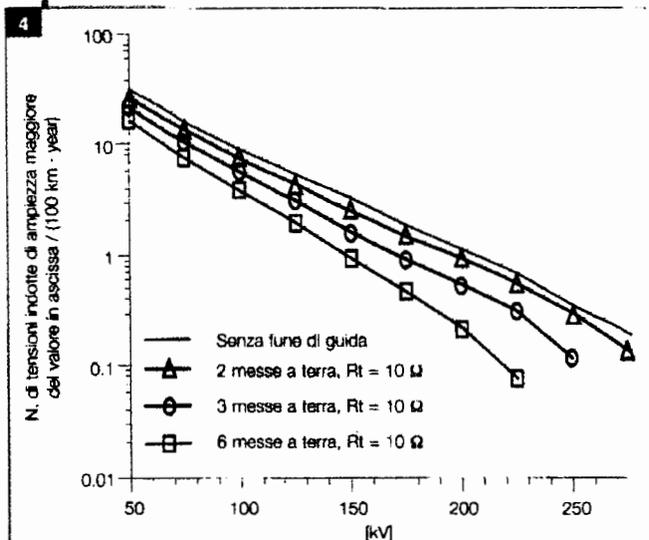


Figura 4 Influenza del numero di messe a terra della fune di guardia, con resistenza di messa a terra pari a 10 Ω.

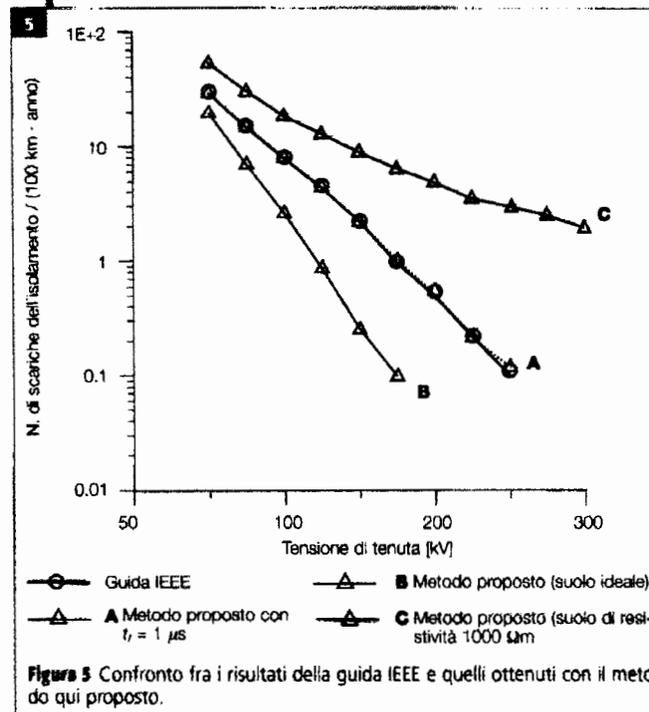


Figura 5 Confronto fra i risultati della guida IEEE e quelli ottenuti con il metodo qui proposto.

In figura 3, sono indicati anche due punti ricavati dall'elaborazione di osservazioni sperimentali [24, 25].

In figura 4 sono mostrati i risultati per una linea di 2 km, con 2 conduttori, adattata alle estremità. I due conduttori (fase e fune di guardia) sono posti a 9 e 10 m di altezza rispettivamente. Sono considerati il caso in cui la fune di guardia è assente ed alcuni casi in cui la fune è presente e messa a terra: alle estremità (2 messe a terra); ogni 1000 m (3 messe a terra) ed ogni 400 m (6 messe a terra). La resistenza di messa a terra è 10 Ω.

### 3 Confronto con il metodo adottato nelle Norme IEEE

Il metodo della guida IEEE Std 1410-1997 [26] differisce da quello proposto sia per quanto attiene alla valutazione delle sovratensioni indotte, sia per l'approccio statistico<sup>2</sup>. Per il primo punto, esso impiega la formula semplificata di Rusck [28], che fornisce l'ampiezza massima della sovratensione indotta  $V_{max}$  (in kV) nel punto più prossimo alla fulminazione di una linea infinitamente lunga su di un suolo perfettamente conduttore. Essa si applica al caso di una corrente di fulmine con forma d'onda a gradino di ampiezza  $I_p$  (in kA):

$$V_{max} = 30 \cdot \frac{I_p \cdot h}{d} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - 0.5 \cdot v^2)}} \right)$$

con  $h$  altezza della linea (in m),  $d$  distanza della linea dal punto di impatto (in m).  $v$  è il rapporto tra la velocità del colpo di ritorno e quella della luce.

Il procedimento statistico della guida IEEE si riassume come segue: l'ampiezza della corrente di fulmine viene variata tra 1 e 200 ad intervalli di 1 kA. Per ogni valore di corrente, sono calcolate la distanza minima  $y_{min}$ , entro la quale il fulmine colpirebbe direttamente il conduttore di linea, e la distanza massima  $y_{max}$  oltre la quale la sovratensione indotta non provocherebbe una scarica a terra. Il numero  $F_p$  di scariche dell'isolamento all'anno, per chilometro di linea è dato dalla somma di tutti i contributi relativi agli intervalli considerati

$$F_p = 2 \cdot \sum_{i=1}^{200} (y'_{max} - y'_{min}) \cdot N_g \cdot P_i$$

dove  $N_g$  è la densità di fulminazioni a terra espressa in eventi per km<sup>2</sup> all'anno e  $P_i$  è

la probabilità che la corrente si trovi all'interno dell'intervallo  $i$ -esimo. La distribuzione di probabilità delle ampiezze della corrente di fulmine adottata nella guida IEEE è

$$P(I_p \geq I_p^*) = \frac{1}{1 + (I_p^*/31)^{2.6}} \quad I_p^* \leq 200 \text{ kA}.$$

Il valore di  $y_{min}$ , è ottenuto dalla seguente espressione della distanza laterale di

$$\text{scarica } y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (0.9 \cdot r_s - h)^2} \text{ dove } r_s = 10 \cdot I_p^{0.65}$$

La guida IEEE specifica che la sovratensione indotta produce una scarica dell'isolamento quando supera del 50% la tensione di tenuta all'impulso "standard" 12/50 μs, in virtù della tipica forma d'onda "a coda breve" delle sovratensioni indotte [29].

<sup>2</sup> Anche in ambito CIREN [27] è stata proposta una formula per la stima del numero di tensioni indotte maggiori di un valore di tensione di isolamento. La formula è stata ricavata sulla base dei risultati sperimentali presentati in [25]. Gli autori si ripropongono di discutere ulteriormente tale questione nell'ambito di un lavoro più esteso che è in corso di pubblicazione nelle pagine Internet della rivista.

Si è dapprima verificato che il metodo di Monte Carlo consente di ottenere gli stessi risultati riportati sulla Guida IEEE, se le tensioni indotte sono calcolate mediante la formula di Rusck anziché con il programma LIOV, a parità di tutte le altre condizioni. Si sono quindi confrontati i risultati della guida IEEE con quelli ottenuti con il metodo proposto, per il quale è stato assunto il medesimo criterio di scarica dell'isolamento, al variare di alcuni parametri. In particolare (Figura 5)

- a. considerando il tempo di salita  $t_f$  costante per ogni evento pari a  $1 \mu s$ , e assumendo il suolo di conducibilità infinita (curva A);
- b. utilizzando per il tempo di salita  $t_f$  la distribuzione di probabilità proposta in [11] con coefficiente di correlazione tra  $I_p$  e  $t_f$  pari a 0,47, sempre assumendo la conducibilità del suolo infinita (curva B);
- c. come in b. ma assumendo la resistività del suolo pari a  $1000 \Omega \cdot m$  (curva C).

Si osserva che la curva B predice un numero di scariche decisamente inferiore a quello predetto dalla guida IEEE, mentre la curva A coincide in pratica con quella della guida. Quest'ultimo risultato si giustifica con la stretta somiglianza delle forme d'onda della corrente di fulmine nei due casi a. e b. e con la equivalenza del modello di Rusck e di Agrawal quando il suolo è perfettamente conduttore ed il canale di fulmine è verticale e perpendicolare ad esso [30]. È interessante inoltre notare come la curva C sia notevolmente superiore alla curva IEEE, nonostante il fattore di correlazione tra  $I_p$  e  $t_f$  sia il medesimo che per la curva B, è cioè in virtù del marcato effetto della conducibilità finita del suolo.

## 4 Conclusioni

Rispetto al metodo della guida IEEE Std 1410-1997, il metodo qui proposto consente una valutazione più accurata del numero di scariche dell'isolamento in seguito a sovratensioni indotte su linee aeree da fulminazioni indirette. In particolare, si basa su un modello di calcolo delle sovratensioni in grado di tenere conto degli effetti della conducibilità finita del suolo, di una forma d'onda più realistica della corrente di fulmine, della presenza di messe a terra di eventuali conduttori di guardia o di neutro, e consente di utilizzare anche la distribuzione statistica del tempo di salita della corrente di fulmine, oltre che dell'ampiezza, nonché un fattore di correlazione tra i due parametri.

Manoscritto ricevuto il 16 novembre 2000.

### RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano M. Bernardi, C. Mazzetti e F. Rachidi per le preziose discussioni sull'argomento e G. Furioli per i costruttivi commenti al presente lavoro.

## bibliografia

- [1] Paris L: Coordinamento dell'isolamento. *L'Elettrotecnica*, Vol. LVII, n. 10, 1970, p. 566-580
- [2] Nucci CA, Rachidi F, Ianoz M, Mazzetti C: Lightning-induced overvoltages on overhead lines. *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 35, n. 1, 1993, p. 75-86.
- [3] Rachidi F, Nucci CA, Ianoz M, Mazzetti C: Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines. *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 38, n. 3, 1996, p. 250-264
- [4] Nucci CA, Mazzetti C, Rachidi F, Ianoz M: On lightning return stroke models for LEMP calculations. Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Lightning protection, Graz, Austria, Aprile 1988.
- [5] Uman MA, McLain DK, Krider EP: The electromagnetic radiation from a finite antenna. *American Journal of Physics*, Vol. 43, 1975, p. 33-38.
- [6] Cooray V: Lightning-induced overvoltages in power lines. Validity of various approximations made in overvoltage calculations. Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Conference on Lightning Protection, Budapest, 19-23 Settembre 1994.
- [7] Rubinstein M: An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range. *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 38, n. 3, 1996.
- [8] Agrawal AK, Price MJ, Gurbaxani SN: Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Trans. on EMC*, Vol. EMC-22, n. 2, 1980, p. 119-129.
- [9] Rachidi F, Nucci CA, Ianoz M, Mazzetti C: Response of multiconductor power lines to nearby lightning return stroke electromagnetic fields. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, n. 3, 1997, p. 1404-1411.
- [10] Paolone M, Nucci CA, Rachidi F: Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and of surge arresters. Proc. 4<sup>th</sup> European Symposium on EMC, Brugge, 11-15 Settembre 2000.
- [11] Anderson RB, Eriksson AJ: Lightning parameters for engineering applications. *Electra*, n. 69, 1980, p. 65-102.
- [12] Borghetti A, Nucci CA: Estimation of the frequency distribution of lightning induced voltages on an overhead line above a lossy ground: a sensitivity analysis. Proc. of 24<sup>th</sup> Int. Conference on Lightning Protection, Birmingham, 1998.
- [13] De la Rosa F, Valdivia R, Perez H, Loza J: Discussion about the inducing effects of lightning in an experimental power distribution line in Mexico. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, n. 3, 1988, p. 1080-1089.
- [14] Guerrieri S, Nucci CA, Rachidi F: Influence of the ground resistivity on the polarity and intensity of lightning induced voltages. Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, Canada, 1997.
- [15] Young FS, Clayton JM, Hileman AR: Shielding of transmission lines. *IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, Vol. S82, 1963, p. 132-154.
- [16] IEEE WG: Estimating lightning performance of transmission lines II - Updates to analytical models. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, n. 3, 1993, p. 1254-1267.
- [17] Armstrong HR, Whitehead ER: Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 87, 1968, p. 270-281.
- [18] IEEE WG: A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, n.4, 1985, p. 919-932.
- [19] Borghetti A, Nucci CA, Paolone M, Bernardi M: Effect of the lateral distance expression and of the presence of shielding wires on the evaluation of the number of lightning induced voltages. Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conference on lightning protection, Rodi, 18-22 Settembre 2000.
- [20] Eriksson AJ: An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 2, 1987, p. 871-886.
- [21] Rizk FAM: Modelling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, n. 4, 1990, p. 1983-1997.
- [22] Bernardi M, Dellers L, Garbagnati E, Sartorio G: Leader progression model of lightning: updating of the model on the basis of recent test results. Proc. of 23<sup>rd</sup> Int. Conference on Lightning Protection, Firenze, 1996
- [23] Borghetti A, Nucci CA: Frequency distribution of lightning induced voltages on an overhead line above a lossy ground. 5<sup>th</sup> Int. Symposium on Lightning protection, San Paolo, 1999.
- [24] Eriksson AJ: Discussion of paper Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground, by P. Chowdhuri. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, n. 3, 1989, p. 1982-1988.
- [25] Eriksson AJ, Meal DV: Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line. *IEE Proceedings C*, Vol. 129, n. 2, 1982, p. 59-69.
- [26] IEEE WG: Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. *IEEE Std 1410-1997*, 1997.
- [27] Joint CIREC/CIGRE WG (convener A. Porrino): Protection of MV and LV Networks Against Lightning. Part I: Basic Information. Proc. of CIREC 97, Birmingham, 1997.
- [28] Rusck S: Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks. *Transactions of the Royal Institute of Technology*, Stoccolma, n. 120, 1958.
- [29] Carrus A, Cinieri E, Fumi A, Mazzetti C: Breakdown behaviour of air spark-gaps with non-standard lightning voltages. Proc. of 7<sup>th</sup> Int. Conference on Gas Discharges and their Applications, Londra, 1982.
- [30] Cooray V: Calculating lightning-induced overvoltages in power lines: a comparison of two coupling models. *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 36, n. 3, 1994, p. 179-182.

Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone suoi AEI  
Dipartimento di Ingegneria Elettrica - Università di Bologna