

# INFLUENZA DELLA DIPENDENZA DALLA FREQUENZA DI CONDUCIBILITA' E PERMETTIVITA' DEL TERRENO SUI CAMPI IRRADIATI DA UN FULMINE

*Paolo Molfino, Giorgio Molinari, Mansueto Rossi*

DINAEL, Università di Genova  
Via Opera Pia 11A, 16145, Genova

Uno degli aspetti connessi alla modellistica del fulmine e, di conseguenza, alla quantificazione delle sovratensioni indotte dal campo elettrico da esso irradiato sulle linee di trasmissione, è la valutazione dell'influenza di una conducibilità finita del terreno [1]. Di tale influenza si tiene normalmente conto, in modo approssimato, con la cosiddetta formula di Cooray-Rubinstein [2]. Il calcolo dei campi senza fare ricorso alla precedente approssimazione richiede la valutazione, numericamente onerosa con procedure di integrazione standard, dei cosiddetti integrali di Sommerfeld. Recentemente [3,4] è stato proposto un nuovo algoritmo che ne consente un'implementazione efficiente in termini di tempi di calcolo; questo algoritmo ha permesso una estensiva validazione della suddetta formula al variare dei parametri tipici del problema.

Un ulteriore passo per ottenere un modello matematico più aderente alla realtà è rappresentato dal considerare la variazione con la frequenza dei parametri del terreno: ciò permette anche di valutare i limiti di validità dell'approssimazione insita nel considerare la conducibilità e la permittività costanti. Un'analisi di questo tipo è stata condotta in [5]; per le proprietà del terreno sono state assunte le espressioni [6]:

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + (f/f_n)^2}, \quad \sigma(f) = \sigma_0 + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{n=1}^N \frac{a_n f_n (f/f_n)^2}{1 + (f/f_n)^2} \quad (1)$$

mentre le componenti non nulle del campo elettromagnetico sono state calcolate come:

$$\begin{cases} E_{zL} = E_{ziL} - \frac{jI(0, \omega)}{2\pi\omega\varepsilon_0} \int_0^{+\infty} \frac{\mu_E}{n^2\mu + \mu_E} \cdot J_0(\lambda r) \cdot e^{-\mu z} \cdot \frac{\lambda^3}{\mu} Q(\lambda) d\lambda, \\ E_{rL} = E_{riL} - \frac{jI(0, \omega)}{2\pi\omega\varepsilon_0} \int_0^{+\infty} \lambda^2 J_1(\lambda r) e^{-\mu z} \frac{\mu_E}{n^2\mu + \mu_E} Q(\lambda) d\lambda, \\ H_{\phi L} = H_{\phi iL} - \frac{I(0, \omega)}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\mu_E}{n^2\mu + \mu_E} \cdot J_1(\lambda r) \cdot e^{-\mu z} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu} Q(\lambda) d\lambda. \end{cases} \quad (2)$$

dove il pedice "i" indica i campi ideali (calcolati considerando il terreno conduttore perfetto, [1]),  $k = \omega/c$  e  $k_E$  t.c.  $k_E^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) \mu_0 + j\omega \mu_0 \sigma(\omega)$  sono i numeri d'onda in aria e nel terreno,  $n$  è l'indice di rifrazione ( $n^2 = k_E^2/k^2$ ),  $\mu_E^2 = \lambda^2 - k_E^2$ ,  $\mu^2 = \lambda^2 - k^2$  e  $J_n$  è la funzione di Bessel del primo tipo e di ordine  $n$ . La funzione  $Q(\lambda)$  è data da:

$$Q(\lambda) = \int_0^H e^{\left(j\frac{\omega}{v} - \mu - \frac{1}{\alpha}\right) dz'} = \left( e^{\left(j\frac{\omega}{v} - \mu - \frac{1}{\alpha}\right)H} - 1 \right) / \left( j\frac{\omega}{v} - \mu - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (3)$$

Per la corrente di fulmine è stata usata la seguente espressione:

$$I(z', \omega) = I(0, \omega) P(z') e^{\frac{j\omega z'}{v}} \quad (4)$$

La corrente alla base del canale  $I(0, \omega)$  è stata modellizzata come la somma di due funzioni di Heidler con parametri tipici di un “subsequent stroke” (picco circa 12 kA), mentre per l’attenuazione  $P(z')$  è stato utilizzato il modello MTLE con costante di attenuazione pari a 2 km. In figura 1, è riportato il confronto fra i risultati ottenuti per la componente radiale del campo elettrico ad una quota di 10m e a 200m dal punto d’impatto del fulmine, considerando tre casi: sia  $\epsilon$  che  $\sigma$  variabili con la frequenza, solo  $\sigma$  variabile, entrambe costanti (e pari al valore medio delle espressioni (1) sul campo di frequenze considerato).

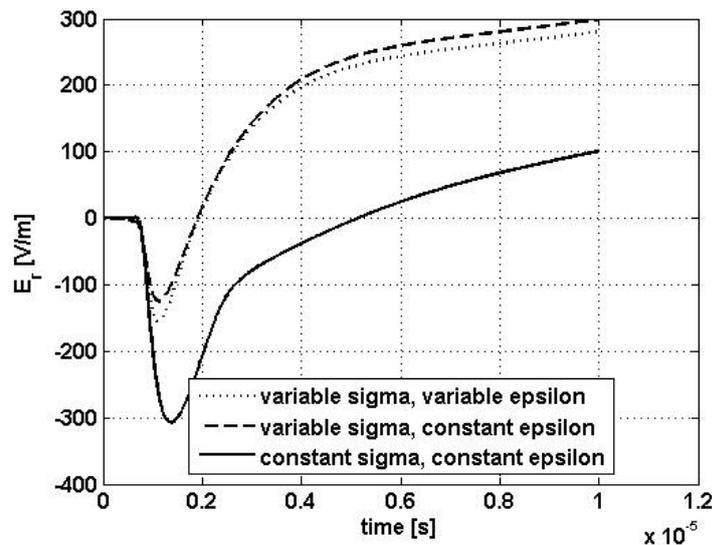


Figura 1- Componente radiale del campo elettrico

## Referenze

- [1] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz and, C. Mazzetti, “Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines”, *IEEE Trans. On EMC*, **38**, pp. 250-264, (1996)
- [2] M. Rubinstein, “An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate and long range”, *IEEE Trans. on EMC*, **38**, pp. 531-535 (1996)
- [3] F. Delfino, R. Procopio, and Rossi, “Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground: 1. Theory and numerical evaluation of the electromagnetic fields”, *J. Geophys. Res.*, D05110 (2008).
- [4] F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi, F. Rachidi, and C. A. Nucci, (2008), Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground: 2. Validity assessment of simplified approaches, *J. Geophys. Res.*, D05111 (2008)
- [5] F. Delfino, R. Procopio, and M. Rossi, “Influence of frequency-dependent soil electrical parameters on the evaluation of lightning electromagnetic fields in air and underground”, *J. Geophys. Res.*, D11113 (2009)
- [6] C. L. Longmire and K. S. Smith, Mission, a universal impedance for soils, Topical Report for Period July 1 – September 30, Defense Nuclear Agency, Santa Barbara, Calif. (1975)