

CARATTERIZZAZIONE NEL DOMINIO DEL TEMPO DI SISTEMI ELETTRICI ED ELETTRONICI

Daniele Romano, Giuseppe Pettanice, Giulio Antonini

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia
P.le Pontieri, Montelucio di Roio
67100 L'Aquila

La modellazione elettromagnetica (EM) nel dominio del tempo sta assumendo un ruolo sempre più centrale nell'ambito della prototipazione virtuale dei moderni sistemi elettrici ed elettronici, ed in particolare nell'analisi delle interconnessioni interne ad essi. Rispetto alle tecniche di studio nel dominio della frequenza, i metodi nel dominio del tempo infatti consentono di includere nell'analisi componenti non lineari che rappresentano un aspetto sicuramente importante.

Il metodo PEEC (Partial Elements Equivalent Circuit) è un metodo numerico di analisi che permette la rappresentazione di un problema elettromagnetico tramite un problema equivalente di tipo circuitale [1]. Tale metodo, nella sua versione standard, si serve del Principio di Equivalenza di Volume [2], ed è basato sull'equazione integrale del campo elettrico (EFIE) e sulla legge di continuità della corrente elettrica [1]. Una volta operata una discretizzazione geometrica della struttura di interesse (mesh), attraverso l'introduzione dei cosiddetti elementi parziali, è possibile utilizzare le convenzionali tecniche di analisi circuitale come l'analisi nodale (NA) e l'analisi nodale modificata (MNA) [1], applicabili sia nel dominio del tempo, che in quello della frequenza.

Il metodo noto come Numerical Inversion of the Laplace Transform (NILT), è una tecnica numerica di antitrasformazione di funzioni rappresentate nel dominio di Laplace. Il metodo è stato introdotto in [3], e si è sempre dimostrato un valido strumento per l'analisi transitoria di circuiti a parametri concentrati e distribuiti.

Il metodo NILT è stato recentemente applicato con successo a modelli PEEC nel dominio di Laplace per ottenere le corrispondenti risposte transitorie [4]. Il principale vantaggio del metodo NILT rispetto ai convenzionali metodi *time-stepping* è che ogni campione calcolato nel tempo non dipende dal calcolo dei campioni precedenti [3]. Pertanto, il metodo NILT non è soggetto ai problemi di instabilità tipici dei metodi *time-stepping*. Inoltre, è possibile condurre i calcoli in parallelo essendo il processo chiaramente parallelizzabile. Un punto debole di questa tecnica risiede nella perdita di accuratezza nella riproduzione della risposta all'aumentare del tempo di valutazione.

Più recentemente è stato pubblicato un lavoro che propone una versione avanzata del metodo NILT (NILTn), che permette di preservare l'accuratezza su tempi di analisi più lunghi [5]. Tale avanzamento della tecnica è stato applicato a modelli PEEC *full-wave* con risultati molto incoraggianti [6]. A scopo di esempio, in Fig. 1 è riportato un sistema di dipoli, uno trasmittente e uno ricevente. La tensione ai capi del carico sul dipolo ricevente è riprodotta tramite la tecnica NILT convenzionale (NILT0) e tramite la tecnica NILT avanzata (NILT2). I risultati di riferimento sono ottenuti da una tecnica standard basata sull'analisi nel dominio della frequenza, successivamente riportati nel dominio del tempo attraverso la trasformata inversa di Fourier. È evidente come la tecnica NILT2 riesca a riprodurre più accuratamente il transitorio su tempi lunghi, rispetto alla versione standard NILT0.

Recentemente, è stato investigato l'utilizzo di una tecnica di antitrasformazione alternativa, nota come Fast Inversion of the Laplace Transform (FILT), storicamente utilizzata per riprodurre transitori in nano-antenne. Un confronto dettagliato tra le tecniche NILT e FILT è proposto in [7].

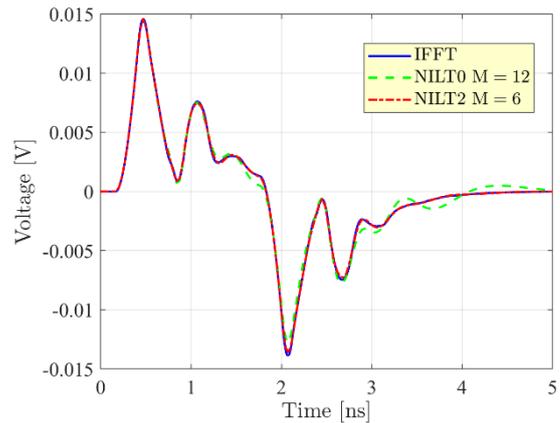
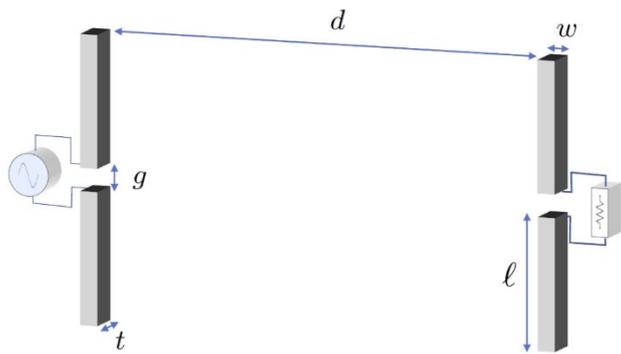


Fig. 1 –Tensione ai capi del carico sul dipolo ricevente.

- [1] A.E. Ruehli, G. Antonini, and L. Jiang, *Circuit Oriented Electromagnetic Modeling Using the PEEC Techniques*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2017.
- [2] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. IEEE-Press, 2001.
- [3] M. Nakhla, K. Singhal, and J. Vlach, “Numerical inversion of the Laplace transform”, *Electronics Letters*, vol. 9, no. 14, pp. 313–314, July 1973.
- [4] L. Lombardi, F. Loreto, F. Ferranti, A. Ruehli, M. S. Nakhla, Y. Tao, M. Parise, and G. Antonini, “Time domain analysis of retarded partial element equivalent circuit models using numerical inversion of Laplace transform”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 3, pp. 870–879, 2021.
- [5] Y. Tao, E. Gad, and M. Nakhla, “Fast and stable time-domain simulation based on modified numerical inversion of the Laplace transform”, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, pp. 1–1, 2021
- [6] F. Loreto, G. Pettanice, G. Antonini, E. Gad, M. S. Nakhla, Y. Tao, A. Ruehli, Modified Numerical Inversion of Laplace Transform Methods for the Time-Domain Analysis of Retarded Partial Elements Equivalent Circuit Models, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 64, n. 6, pp. 2179-2188, 2022.
- [7] F. Loreto, D. Romano, G. Pettanice, G. Antonini, A Comparative Analysis of Numerical Inverse Laplace Transform Methods for Electromagnetic Transient Analysis, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 71, no. 11, pages 4713-4724, November 2023.