

MODELLI ELETTROTERMICI A LARGA BANDA NEL DOMINIO DEL TEMPO DI SISTEMI DI ELETTRONICA DI POTENZA AD ELEVATA VELOCITA' DI COMMUTAZIONE

Daniele Romano, Giuseppe Pettanice, Giulio Antonini,

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

La modellazione elettromagnetica (EM) a larga banda ha acquisito negli anni un'importanza sempre maggiore come strumento di prototipazione virtuale di sistemi avanzati di elettronica di potenza, consentendo di riprodurre con elevata accuratezza il funzionamento di convertitori ad elevata velocità di commutazione, allo scopo di caratterizzare i fenomeni parassiti e il loro impatto sulle prestazioni dinamiche dei dispositivi di commutazione. Di conseguenza, diventa importante l'ottimizzazione del layout di tali sistemi per utilizzare appieno le capacità di commutazione rapida delle nuove generazioni di transistor di potenza MOSFET e soprattutto di quelli Wide Band Gap (WBG) e ad alta mobilità elettronica al nitruro di gallio (GaN-HEMT) e al carburo di silicio. La modellazione elettromagnetica per la previsione dei fenomeni parassiti e l'ottimizzazione del layout sono dunque elementi costitutivi della progettazione di moduli di potenza di moderna generazione [1]. La Fig. 1 illustra l'esempio di un modulo di potenza caratterizzato dallo schema funzionale illustrato nella Fig. 1.a e dal layout fisico in Fig. 1.b.

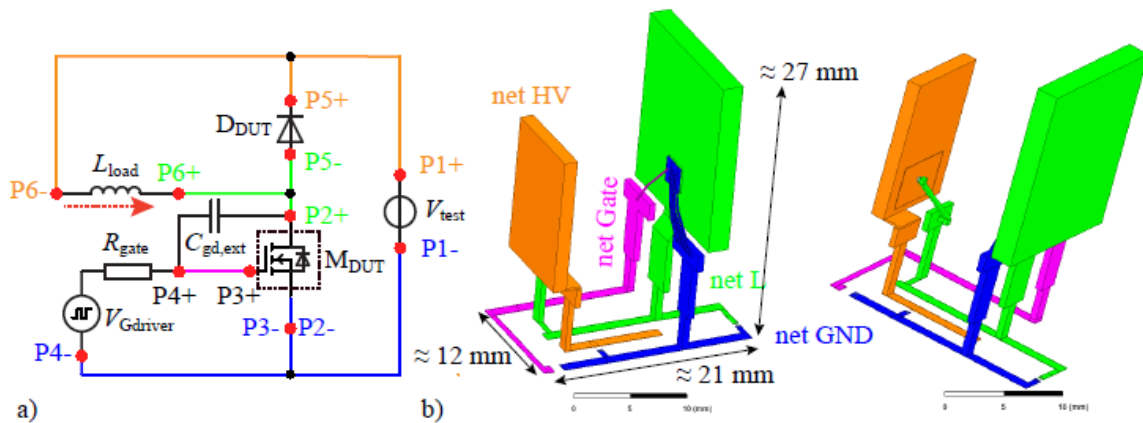


Fig. 1 – Modellazione elettromagnetica di moduli di potenza ad elevata velocità di commutazione. a) Schematico del circuito caratterizzato da 6 porte; b) layout fisico caratterizzato da interconnessioni, un diodo di ricircolo e un MOSFET di potenza ad elevata velocità di commutazione.

La modellazione di tale sistema attraverso il metodo PEEC ha già consentito di ottenere una buona accuratezza rispetto ad altri metodi e software commerciali, come illustrato in Fig. 2 [1].

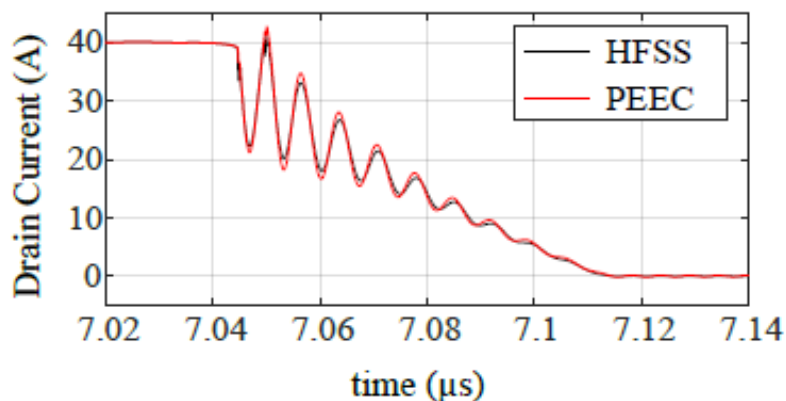


Fig. 2 – Transitorio della corrente di drain ottenuto mediante il metodo PEEC e il metodo agli elementi finiti di un software commerciale (HFSS).

L'ampio range di frequenza di interesse, a partire dalla soluzione in continua [2], e l'elevata complessità geometrica dei sistemi da modellare e ottimizzare rendono il problema a larga banda e multiscala. Inoltre, l'effetto della temperatura sulla conducibilità elettrica dei conduttori richiede di considerare i fenomeni elettrotermici accoppiati e, dunque, di affrontare lo studio del problema con un approccio multifisico [3] anche in un ambiente di simulazione puramente circuitale [4].

L'attività ricerca si propone di sviluppare una metodologia basata sul metodo PEEC che consenta di condurre lo studio nel dominio del tempo in modo efficiente e accurato utilizzando lo stato dell'arte della simulazione elettromagnetica per metodi integrali e sviluppando nuove metodologie per l'analisi elettrotermica che renda possibile l'utilizzo del modello all'interno di una procedura di ottimizzazione.

[1] L. Lombardi, R. Raimondo, G. Antonini, "Electrothermal Formulation of the PEEC Method", *Wiley International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 31, no.4, July/August, 2018.

[2] I. Kovacevic, D. Romano, G. Antonini, U. Grossner, J. Ekman, "Electromagnetic Modeling Approaches Towards Virtual Prototyping of WBG Power Electronics", in *Proceedings of International Power Electronics Conference -ECCE Asia- (IPEC-Niigata 2018)*, Niigata (Japan), pages 20-24, May 2018.

[3] I. Kovacevic, D. Romano, G. Antonini, U. Grossner, J. Ekman, "A More Accurate Electromagnetic Modeling of WBG Power Modules", in *Proceedings of 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago (USA), May 2018.

[4] D. Romano, L. Lombardi, G. Antonini, U. Grossner, I. Kovacevic, "Analytical Formulas for the Computation of the Electric Field in the Partial Element Equivalent Circuit Method with Conductive, Dielectric, and Magnetic Media", in *Transactions on Magnetics*, Vol. 55, no. 10, pp. 1-13, 2019.

[5] D. Romano, I. Kovacevic, M. Parise, U. Grossner, J. Ekman, G. Antonini, "Rigorous dc Solution of Partial Element Equivalent Circuit Models Including Conductive, Dielectric, and

Magnetic Materials”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, no. 3, pp. 870-879, 2019.

[6] D. Romano, G. Antonini, U. Grossner, I. Kovacevic, “Circuit synthesis techniques of rational models of electromagnetic systems: A tutorial paper”, *Wiley International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 32, no. 5, pp. e2612, 2019.

[7] G. Antonini, F. Di Murro, J. Ekman, I. Kovacevic, U. Grossner, M. Lucido, F. Frezza, D. Romano, “Semi-Analytical Form of Full-Wave Self Interaction Integrals Over Rectangles”, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Virtual conference, September 2020.

[8] I. Kovacevic, D. Romano, G. Antonini, L. Lombardi, U. Grossner, “Full-Wave Computation of the Electric Field in the Partial Element Equivalent Circuit Method Using Taylor Series Expansion of the Retarded Green’s Function”, in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 68, no. 8, pp. 3242-3254, Aug. 2020.

[9] L. Di Angelo, D. Romano, G. Antonini, I. Kovacevic-Badstubner and U. Grossner, “Efficient computation of partial elements for non-orthogonal PEEC meshes”, in *Proceedings of 2021 EMC+SIPI International Symposium*, August 2021.

[10] I. Kovacevic, D. Romano, L. Lombardi, U. Grossner, J. Ekman, G. Antonini, “Accurate Calculation of Partial Inductances for the Orthogonal PEEC Formulation”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 63, no. 1, pp. 82-92, Feb. 2021.

[11] F. Di Murro, D. Romano, M. De Lauretis, I. Kovacevic-Badstubner, L. Lombardi, U. Grossner, J. Ekman, F. Frezza, G. Antonini, “Efficient Computation of Partial Elements in the Full-Wave Surface-PEEC Method”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 4, pp. 1189-1201, Aug. 2021.

[12] I. Kovacevic-Badstubner, D. Romano, G. Antonini, J. Ekman, U. Grossner, “Circuit-Oriented Electromagnetic Modeling for Power Electronics: 3-D PEEC Solver vs. RLCG-Solver”, *Energies*, vol. 14, no. 10, May 2021.

[13] M. De Lauretis, E. Haller, F. Di Murro, D. Romano, G. Antonini, J. Ekman, I. Kovacevic-Badstubner, U. Grossner, “On the rectangular mesh and the decomposition of a Green’s-function-based quadruple integral into elementary integrals”, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 134, no. 4, pp. 419-434, Jan. 2022.

[14] D. Romano, L. D. Angelo, I. Kovacevic-Badstubner, U. Grossner, M. Parise and G. Antonini, “Efficient Partial Elements Computation for the Non-Orthogonal PEEC Method Including Conductive, Dielectrics, and Magnetic Materials”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-11, Aug. 2022.

[15] M. De Lauretis, E. Haller, D. Romano, G. Antonini, J. Ekman, I. Ivana Kovacevic-Badstubner, U. Grossner, “Surface-PEEC with elementary decomposition of quadruple integrals vs Volume-PEEC”, in *Proceedings of EMC Europe 2022*, Goteborg (Sweden), September 2022.

- [16] D. Romano, F. Loreto, G. Antonini, I. Ivana Kovacevic-Badstubner, U. Grossner, "Accelerated Partial Inductance Evaluation via Cubic Spline Interpolation for the PEEC method", in *Proceedings of EuMW 2022*, Milan (Italy), September 2022.
- [17] D. Romano, I. Kovacevic-Badstuebner, G. Antonini and U. Grossner, "Efficient PEEC Iterative Solver for Power Electronic Applications," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 2, pp. 546-554, April 2023.
- [18] D. Romano, I. Kovacevic-Badstubner, G. Antonini, U. Grossner, "Anisotropic and Optimized FFT-Based Iterative Solver for the PEEC Method", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 72, no. 5, 2024.
- [19] D. Romano, I. Kovacevic-Badstubner, G. Antonini, U. Grossner, "Accelerated Evaluation of Interaction Integrals Via Cubic Spline Interpolation in the Framework of the PEEC Method", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 66, No.3, June 2024.