

DISS. ETH NO. 20607

**PEEC-BASED VIRTUAL DESIGN OF  
EMI INPUT FILTERS**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
IVANA F. KOVAČEVIĆ  
M.Sc., ETH Zurich  
born 5. November 1982  
citizen of Belgrade, Serbia

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. J.W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. P. Pejović, co-examiner

2012

# Abstract

The design of power electronic systems in compliance with the Electro-Magnetic Compatibility (EMC) standards represents a difficult task with increasing requirements for high power density and high efficiency. In practice, a systematic EMC analysis of power converter systems that evaluates the possible high frequency disturbance is usually not performed due to complexity and limited time. The EMC aspects are typically considered in the end phase of the design process that leads to higher design costs and prolongs the time to market. Therefore, the virtual prototyping is increasing in importance as it enables engineers to obtain a detailed insight into the electromagnetic performance of power electronic systems before any hardware prototypes are constructed.

ElectroMagnetic Interference (EMI) filter circuits with passive components are typically used to attenuate the EMI noise inserted at power lines to the required levels specified by EMC standards and hence prevent the interference with other line-connected equipment. As a necessary part, an EMI filter introduces additional cost and volume, which is about 30% of the total volume, and thus it should be properly built and placed within the power converter system. Moreover, as the space constraints become more pronounced with the trend for higher power density, the PCB (Printed Circuit Board) design and the placement of EMI filter components have to be carried out carefully. So far, EMI filter design has been mostly based on engineer's practical experiences, which commonly results in non-optimal EMI filter solutions. The EMC analysis based on numerical techniques such as the Finite Element Method (FEM) represents another approach used to obtain practical guidelines for good EMC design and iterative development. However, the FEM-based commercial tools also require an engineer's expertise and the FEM simulations are often time consuming and computationally expensive for the 3D structures used in power electronics applications. Thus, so far a fast and accurate EMC tool for comprehensive EMC modeling of power converter systems has been missing in the engineering practice.

This doctoral dissertation presents research conducted on the EMC analysis of EMI input filters using 3D electromagnetic modeling based on the Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) method. Coupling between two numerical techniques, the PEEC method and the Bound-

---

ary Integral Method (BIM), i.e. PEEC-BIM method, is proposed for the detailed electromagnetic modeling of EMI filter inductors. This enables the 3D PEEC-based modeling to become a useful EMC tool for the prediction of the High Frequency (HF) performance of EMI input filters and power converter systems, which is affected by PCB component placement, and self- and mutual-parasitic effects. It is shown that the developed PEEC-BIM method enables detailed EMC analysis taking into account different electromagnetic effects of the PCB layout, e.g. self-parasitics, mutual coupling, and electrostatic shielding. Since the calculation of these effects is quite cumbersome employing analytic equations or measurements, the extraction of the parasitics via the 3D PEEC-BIM modeling is a useful approach for the assessment of dominant parasitic effects that determine the HF response of the EMI filters. In comparison to other numerical techniques implemented in 3D field solvers, such as the well-known FEM, it is shown that the PEEC-BIM method is more suitable for EMC modeling of power electronics application with respect to accuracy and computational efficiency.

The developed PEEC-BIM modeling approach is used to evaluate the applicability of the parasitic cancellation techniques proposed in literature regarding the efficient cancellation of the self-parasitic and mutual-coupling effects in complete EMI filter circuits. The accuracy and modeling features are verified by the transfer function and impedance measurements of single-phase single-/two-stage EMI filter circuits. Good agreement of less than 5 dB difference between the PEEC-BIM modeling results and the measurements is achieved in a wide frequency range from DC up to 30 MHz. Special care is paid to the construction of the measurement setup in order to achieve transfer function measurements with minimal external disturbance. The PEEC-BIM modeling capabilities are finally demonstrated on the modeling example of a practical EMI filter for a single-phase PFC boost rectifier input stage. It is shown that the PEEC-BIM method implemented in an EMC modeling environment enables a step-by-step EMC analysis distinguishing the impact of various electromagnetic effects on the EMI filter performance and allowing an optimal EMI filter design. Accordingly, the research presented in this thesis provides a good basis for building an EMC modeling environment for virtual prototyping of EMI input filters and power converter systems.

# Kurzfassung

Die steigende Nachfrage an leistungselektronischen Systemen mit hoher Leistungsdichte und hoher Effizienz stellt für die Entwicklung der Systeme, konform mit Normen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), eine besondere Herausforderung dar. In der Praxis werden meist keine systematischen EMV-Analysen von Leistungsumrichtern durchgeführt, welche die möglichen hochfrequenten Störungen untersuchen. Die EMV-Gesichtspunkte werden typischerweise erst in der Endphase des Entwicklungsprozesses berücksichtigt, was zu höheren Entwicklungskosten und längeren Produkteinführungszeiten führt. Deshalb wird die virtuelle Prototypenentwicklung immer wichtiger, da diese den Ingenieuren einen detaillierten Einblick in die elektromagnetischen Eigenschaften der leistungselektronischen Systeme ermöglicht, bevor ein Hardware-Prototyp aufgebaut wird.

In der Regel werden EMV-Filter mit passiven Komponenten zur Reduktion der elektromagnetischen Beeinflussung des Netzes auf das erforderliche Niveau eingesetzt, um so eine Störung der mit dem Netz verbundenen Geräte auszuschliessen. Die notwendigen EMV-Filter erzeugen zusätzliche Kosten und ein erhöhtes Bauvolumen, welches typ. 30 % des Gesamtvolumens beansprucht. Daher sollten die EMV-Filter den Performanceanforderungen entsprechend ausgelegt und in das Design der Leistungsumrichter integriert werden. Darüber hinaus müssen die Platzierung der Filterkomponenten und das PCB-Layout in Hinblick auf die Performance sehr durchdacht sein, da aufgrund des andauernden Trends der Leistungsdichtesteigerung die Volumenbeschränkung verschärft wird. Das EMV-Filterdesign basiert meistens auf den Erfahrungen der Entwicklungsingenieure, was gewöhnlich nicht zu einer optimalen EMV-Filterauslegung führt. Die EMV-Analyse basierend auf numerischen Berechnungstechniken, wie der Finite-Elemente-Methode (FEM), ist eine Möglichkeit für eine praktische Überprüfung der EMV-Filterstruktur. Allerdings erfordern die FEM-basierten kommerziellen EMV-Berechnungstools ebenso Ingenieur-Fachwissen und die FEM-Simulationen für die drei-dimensionalen (3D) Strukturen sind oft zeitaufwendig und rechenintensiv. Ein neuartiges, schnelles und genaues EMV-Berechnungstool für eine umfassende EMV-Modellierung von leistungselektronischen Systemen fehlt bislang in der Ingenieurspraxis.

Die vorliegende Dissertation beinhaltet die Analyse von EMV-

---

Eingangfilter mit Hilfe elektromagnetischer 3D Modellierung basierend auf der PEEC-Methode (“Partial Element Equivalent Circuit”). Die Kopplung von zwei numerischen Techniken - der PEEC-Methode und der Grenzintegral-Methode (BIM, “Boundary Integral Method”), die sogenannte PEEC-BIM-Methode wird vorgestellt, welche eine detaillierte elektromagnetische Modellierung von EMV-Filterinduktivitäten gestattet. Das ermöglicht den Einsatz der 3D PEEC-basierenden Modellierung als mächtiges EMV-Berechnungstool zur Bestimmung des Hochfrequenzverhaltens von EMV-Eingangfiltern und Leistungsstromrichtern, welche von der Platzierung der PCB-Komponenten sowie von eigen- und durch Kopplung bedingten parasitären Effekten beeinflusst werden. Es wird gezeigt, dass die entwickelte PEEC-BIM- Methode eine detaillierte EMV-Analyse ermöglicht, die verschiedene elektromagnetische Effekte des PCB-Layouts berücksichtigt, wie eigenparasitäre Effekte, wechselseitige Kopplungen und elektrostatische Schirmung. Da die Berechnung dieser Effekte unter Anwendung von analytischen Gleichungen oder Messungen kaum möglich bzw. sehr zeitaufwendig ist, ist die Bestimmung der Störeffekte mithilfe der 3D PEEC-BIM-Modellierung eine geeignete Herangehensweise zur Beurteilung der dominanten parasitären Effekte, welche das Hochfrequenzverhalten der EMV-Filter bestimmen. Im Vergleich zu anderen numerischen Methoden, welche für 3D-Feldberechnungen implementiert werden, wie beispielsweise die FEM, wird gezeigt, dass die PEEC-BIM- Methode in Hinblick auf die Genauigkeit und Berechnungseffizienz besser für die EMV-Modellierung leistungselektronischer Applikationen geeignet ist.

Der entwickelte PEEC-BIM-Modellierungsansatz wird darüber hinaus zur Evaluation der praktischen Anwendbarkeit von, in wissenschaftlichen Publikationen vorgeschlagenen Methoden zur Auslöschung von eigenparasitären und Kopplungseffekten der EMV Filterkomponenten bzw. von gesamten EMV-Filterschaltungen verwendet. Die Genauigkeit und Modellierungsmöglichkeiten werden durch Messungen der Übertragungsfunktion und Impedanz an einphasigen ein-/zweistufigen EMV-Filterschaltungen verifiziert. Eine gute Übereinstimmung von weniger als 5 dB Abweichung resultiert bei dem Vergleich zwischen der PEEC-BIM-Modellierung und den Messungen innerhalb eines weiten Frequenzbereichs von DC bis zu 30 MHz. Ein besonderes Augenmerk wird auf den Messaufbau gelegt, um Übertragungsfunktionen mit minimalen externen Störungen messen zu können. Die Leistungsfähigkeiten der PEEC-BIM-Modellierung werden ab-

---

schliessend für ein EMV-Eingangsfiler eines einphasigen Gleichrichters mit Leistungsfaktorkorrektur (PFC) demonstriert. Es wird gezeigt, dass die in einer EMV-Entwicklungsumgebung implementierte PEEC-BIM-Methode eine Schritt-für-Schritt EMV-Analyse ermöglicht, welche den Einfluss verschiedener elektromagnetischer Effekte auf die EMV-Filterperformance verdeutlicht und somit ein optimales EMV-Filterdesign ermöglicht. Dementsprechend bieten die in dieser Doktorarbeit präsentierten Forschungsergebnisse eine gute Basis zum Aufbau einer EMV-Entwicklungsumgebung für die virtuelle Prototypenentwicklung von EMV-Eingangsfilern und leistungselektronischen Systemen.