

Hebel und Randbedingungen der EMV in der Leistungselektronik

Dr. Jan Hansen, Robert Bosch GmbH, AE/EMC3, Reutlingen, BRD

1 EMV Simulation in der Leistungselektronik

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten und Vorgehensweisen der Simulation in der Leistungselektronik, speziell für Hochvoltssysteme. Der Beitrag richtet sich nicht an Spezialisten der EMV Simulation sondern vielmehr an diejenigen, die wissen wollen, welche Hebel die Leistungselektroniksimulation entfalten kann. Diskutiert werden dabei die Partitionierung eines komplexen Aufbaus, die zu verwendenden geeigneten Lösungsverfahren, mögliche Ziele der Modellierung sowie der Einfluss des Produktdesignprozesses auf die Möglichkeiten der Simulation. Als Beispiel wird am Ende des Beitrages ein 48V System per Simulation untersucht. Ziel ist, eine Abschätzung zu geben, unter welchen Bedingungen die Leistungselektroniksimulation sinnvoller Bestandteil der Produktentwicklung ist.

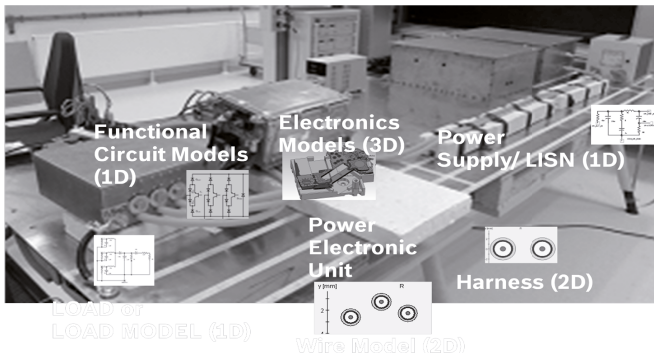


Abbildung 1: Aufbau eines HV Leistungselektroniksystems zur leitungsgebundenen Störaussendung

2 Partitionierung des Aufbaus

Ein typischer Aufbau einer HV Leistungselektronik für die Messung leitungsgeführter Emission ist in Abbildung 1 gezeigt. Der Aufbau ist etwa 3m lang und enthält neben der eigentlichen Elektronik, die auf einem mehrlagigen PCB realisiert ist, geschirmte und ungeschirmte Kabel sowie Lastboxen und den Messtisch. Ingenieuren, die nicht in der Simulation tätig sind, stellt sich zuallererst die Frage, welche Hardware und welche Software nötig sind, um für das EMV Design wichtige Problemstellungen simulieren zu können. Es lässt sich schnell abschätzen, dass die Simulation gesamten Aufbaus in einem Modell nicht zielführend ist.

Schätzt man die kleinste Abmessung auf dem PCB konservativ mit 1mm ab, so erhält man ein Verhältnis von 1:3000 zwischen kleinster und größter Abmessung des Messaufbaus. Da eine rein funktionale Schaltungssimulation oberhalb von 1 MHz ihre

Gültigkeit verliert, ist die Simulation von Parasiten zwingend notwendig. Für eine dafür notwendige Simulation im 3D Simulator kann man nun leicht abschätzen, dass ein Kantenlängenverhältnis von 1:3000 pro Dimension auf etwa 10^{12} Gitterzellen führt. Auf herkömmlichen Rechnern ist eine solche Zahl auch in naher Zukunft nicht zu bewältigen, so dass die Partitionierung des Aufbaus zwingend ist. Eine typische Partitionierung ist in Abbildung 1 angedeutet. Der funktionale Teil der Elektronik, z.B. die schaltende B6 Brücke, wird in einer Schaltungssimulation abgebildet. Teile der umgebenden Geometrie können in einem 3D Simulator separat berechnet werden. Kabel wiederum sind durch ihren Querschnitt und ihren Verlauf eindeutig charakterisierbar; daher ist hier die Verwendung von 2D Lösungsmethoden auf Basis der Leitungstheorie zielführend. Die Rechenzeiten für ein partitioniertes, mit passenden Lösungsmethoden berechnetes Modell liegen auf herkömmlichen, leistungsstarken Desktoprechnern bei wenigen Tagen und stellen daher nicht mehr den Flaschenhals der EMV Simulation dar. Möglichkeiten zur Kopplung der verschiedenen Lösungsverfahren bieten mittlerweile alle gängigen Simulatoren der EMV Simulation [1,2,3,4].

3 Ziele der Modellierung

Als Ziel der EMV Simulation wird meist die Vorhersage des Verhaltens genannt. In der Praxis ebenso wichtig ist allerdings die EMV Analyse.

3.1 EMV Vorhersage

Kritik an der EMV Simulation entsteht in der Regel dann, wenn Projekte mit hohem Aufwand und langer Laufzeit Ergebnisse liefern, die für das EMV Design in der Praxis nicht ausreichend sind. Die Grundlage einer solchen Einschätzung ist in der Regel eine nur ungenau geklärte Problemstellung bzw. zu hohe Erwartungen an die Simulation des Gesamtsystems.

In Abbildung 2 sind zwei verschiedene Möglichkeiten einer EMV Vorhersage dargestellt. In Abbildung 2 oben wird ein Filter simuliert, in der Regel mit 50 Ohm Abschlüssen. Im Bereich bis 100 MHz ist eine solche Aufgabe inklusive Modellierung und 3D Simulation innerhalb von Stunden oder wenigen Tagen ausreichend genau durchzuführen. Bei bekanntem Grundstörpegel kann auf diese Art und Weise sehr schnell das EMV Design unterstützt werden. In Abbildung 2 unten wird eine komplette Systemsimulation in einem Schaltungssimulator (unten rechts) dargestellt, in dem zur Verbesserung der Genauigkeit Blöcke aus 3D Simulationen eingebunden sind. Die Erstellung eines solchen Modelles kann mehrere Monate oder Jahre dauern, was zunächst als untragbarer Aufwand erscheint. Ist ein solches Modell aber validiert, kann es bei der Entwicklung von Varianten eine Unzahl von Untersuchungen und Messungen ersparen und damit den Aufwand zur Modellerstellung rechtfertigen.

Nicht nur die Betrachtung der Entwicklungskosten eines Produktes ist daher notwendig bei der Planung eines Produktes, auch die Entwicklung der Produktpalette in der Zukunft ist ein wichtiger Einflussfaktor.

Voraussetzung für die Erstellung von EMV Vorhersagemodellen sind leistungsfähige Computer sowie geeignete CAD Daten der vorliegenden Mechanik.

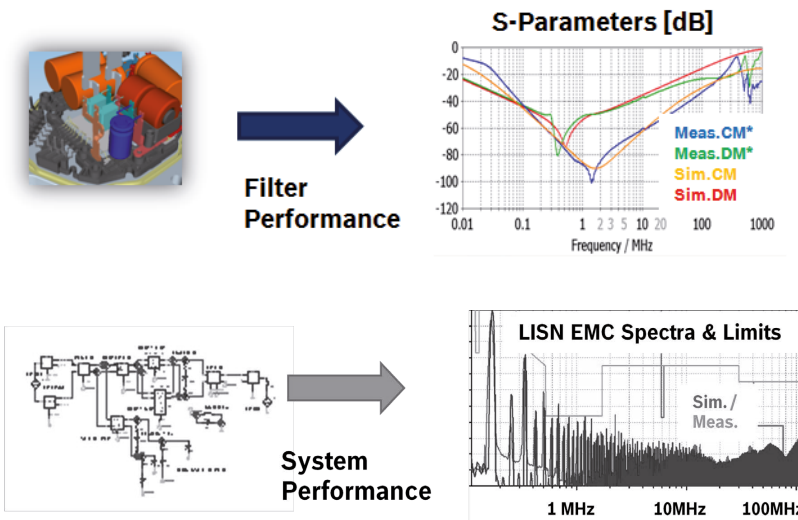


Abbildung 2: Die Simulation eines EMV Filters dauert wenige Stunden oder Tage. Die Modellerstellung zur EMV Vorhersage eines komplexen Systems mit mehreren leistungselektronischen Komponenten kann mehrere Monate in Anspruch nehmen.

3.2 EMV Analyse

Mindestens ebenso wichtig wie Modelle zur EMV Vorhersage sind Modelle zur Analyse der EMV Eigenschaften eines Produktes. Diese Modelle müssen nicht quantitativ vorhersagen, auch eine qualitative Aussage reicht häufig aus, um die Ursache einer Resonanz zu erklären und daraufhin Gegenmaßnahmen zu erarbeiten. Bei nur qualitativen Modellen ist das Risiko einer Fehlinterpretation entsprechend höher, kann aber durch die einfachere Modellerstellung im Gegensatz zu einem quantitativ aussagefähigen Modell trotzdem lohnenswert sein.

In Abbildung 3 ist ein Modell zur EMV Analyse eines Hochvoltinverters abgebildet (oben links), das sogar quantitative Aussagen erlaubt [5]. Das Modell beschreibt die Gleichtaktspannung an der HV Bordnetz nachbildung. Auffällig ist, dass es nur aus sehr wenigen parasitären Elementen besteht (oben rechts), obwohl das Ergebnis der Simulation im Vergleich zur Messung im Frequenzbereich von 100kHz bis 100MHz breitbandig weniger als 10dB Abweichung zeigt (unten rechts). Durch die Einfachheit des Modells können die physikalischen Ursachen der im Spektrum auftretenden Resonanzen und Nullstellen sehr schnell identifiziert und z.B. durch Änderungen im Design verschoben oder vermieden werden.

Die Erstellung von Modellen zur EMV Analyse wird in der Regel durch messtechnische Untersuchungen motiviert und begleitet.

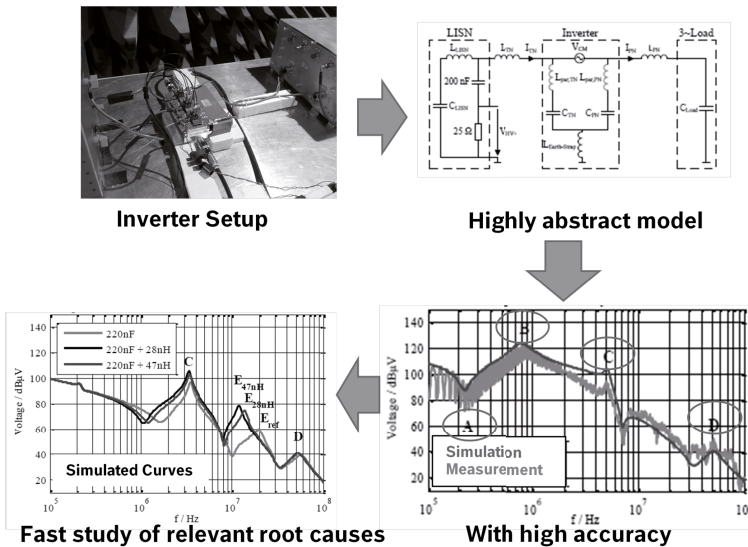


Abbildung 3: Sind die physikalischen Verhältnisse eines Produktes verstanden, so lassen sich häufig extrem einfache Modelle zu seiner Beschreibung generieren.

4 EMV Simulation im Produktdesignprozess

Die Auswahl der geeigneten Fragestellung, auf deren Grundlage ein Simulationsmodell erstellt wird, wird stark von Produktdesignprozess (PDP) geprägt (Abbildung 4). Im PDP steigt die für die Modellierung wichtige Informationsmenge kontinuierlich an. Häufig wird argumentiert, dass Aussagen zur EMV Geometrieinformationen benötigt werden, die erst spät im PDP zur Verfügung stehen. Tatsächlich benötigt aber gerade der Aufbau eines komplexen EMV Modells mit Geometriedaten ein Grundverständnis über das Produkt, das idealerweise in der Designphase oder noch früher gewonnen werden kann. Produktdesign, EMV Produktverständnis und Modell wachsen daher parallel. In frühen Zeitpunkten des PDP können einfache Schaltungs- oder sogar analytische Modelle die EMV beschreiben, während spätestens in der Integrationsphase die Hinzunahme von 3D Informationen nötig ist (Tabelle 1). Ob ein Simulationsmodell bis hin zum Abnahmetest erweitert wird, ist dann im Wesentlichen abhängig von der Frage, ob das Modell für Varianten oder folgende Generationen wiederverwendet wird und daher das Budget für die Modellierung ausreichend groß gehalten wird, z.B. bei Plattformprojekten. Modelle für komplette EMV Abnahmeverfahren sind verfügbar [7], ihre Anwendung scheitert aber in der Regel daran, dass das Testobjekt selbst nicht ausreichend genau beschrieben wird.

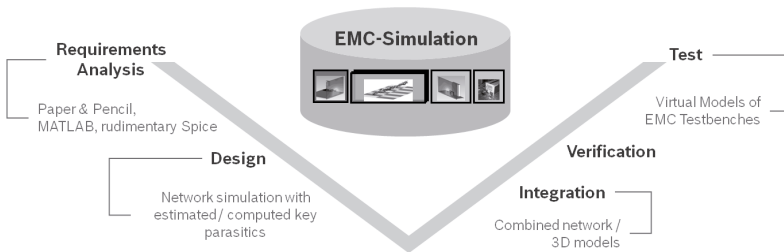


Abbildung 4: Im Produktdesignprozess liegen zu den unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Informationen vor, die sukzessive zur Erstellung von Modellen steigender Präzision genutzt werden können.

Zeitpunkt im PDP	Modelltyp	Modellgültigkeit
Requirements Analysis	Papier & Bleistift, MATLAB, einfache Netzwerke	Muss stets durch Hardware validiert werden.
Design	Netzwerksimulation mit parasitären Elementen	Gültig bis etwa 10 MHz (Bereich großer Filterbauelemente)
Integration & Verification	3D Simulation oder gekoppelte Netzwerk/3D Simulation	Gültig bis 100 MHz
EMC Test	Modelle kompletter Testaufbauten	CE bis 100 MHz RE bis 1 GHz [7]

Tabelle 1: Modelltypen und ihre Genauigkeiten

5 Anwendung auf das 48V Boost Recuperation System

In den Kapiteln 2 und 3 wurden Anforderungen und Rahmenbedingungen diskutiert, zielgerichtet ein Simulationsmodell zu erarbeiten, das im Zielkonflikt zwischen Aussagekraft und Aufwand gut abschneidet. Als Beispiel wird hier die Ableitung eines Simulationsmodells für das Boost Recuperation System (BRS) gezeigt [6]. Das BRS arbeitet bei 48V; sein Generator kann einerseits wie die Lichtmaschine zum Aufladen der Batterie verwendet werden, andererseits als Motor zusätzlich zum Verbrennungsmotor (Abbildung 5). Das Designziel, das die Simulation unterstützen soll, ist der Entwurf eines Pi Filters auf der HV Seite des Pulswechselrichters (PWR), der den Generator treibt und direkt an diesem montiert ist.

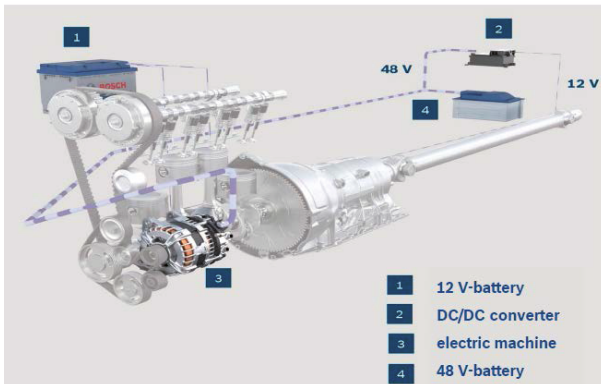
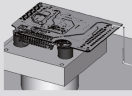




Abbildung 5: Das BRS besteht je einer 12V und einer 48V Batterie, der E-Maschine und einem Wandler.

5.1 Anforderungen an die Simulation

Im Vergleich mit einem 12V und einem HV System fällt ins Gewicht, dass das 48V System mit nur einer HV LISN geprüft wird und ungeschirmte Kabel verwendet. Ebenso sind Steuergerät und elektronische Ansteuerung räumlich direkt verbunden, so dass topologisch das 48V System dem 12V System ähnlich ist. Die wichtige Konsequenz dieser Erkenntnis ist, dass die für 12V Systeme reichlich vorhandene Simulationskenntnis auch für das BRS verwendet werden kann und Aussagen mit ähnlicher Genauigkeit wie bei 12V Systemen erwartet werden können (Abbildung 6).

12 V System	48 V System	HV System
<ul style="list-style-type: none"> → Single voltage system → LV LISN → Motor attached to ECU → Unshielded wires 	<ul style="list-style-type: none"> → Double voltage system 12 V / 48 V batteries → LV / HV LISN → ECU attached to motor → Unshielded wires 	<ul style="list-style-type: none"> → Double voltage system 12 V / 400 V batteries → LV / 2xHV LISN → wide separation between ECU and motor → Shielded HV wires
 <p>e.g. ESP</p>	 <p>BRS</p>	 <p>Hybrid Vehicle</p>

BRS system simulation is of similar complexity as common 12V power electronics

Abbildung 6: Der Vergleich der EMV Anforderungen an das 48V BRS System zeigt, dass es nach dem Muster von 12V Systemen mit einer LISN simuliert werden kann und nicht die Komplexität eines HV Systems erreicht.

5.2 Vorgehen

Die Modellierung fokussiert auf die HV Seite des Systems, d.h. ein Modell des Motors sowie des PWR sind zwingend. Ebenso müssen die Massepfade richtig beschrieben sein, um den Gleichtaktstrom abzubilden. Motormodelle und Modelle zur transienten Simulation von B6 Brücken waren zum Zeitpunkt des vorliegenden Projektes bereits vorhanden. Daher wurde entschieden, nicht nur eine reine Filtersimulation durchzuführen (Abbildung 2 oben), sondern das gesamte System PWR – Motor – Masse im Simulator nachzubilden. Auf das Hinzufügen des Modells des DC DC Wandlers wurde hingegen verzichtet, weil die Komplexität eines solchen gekoppelten Modells die Mittel und den Zeitrahmen des vorliegenden Projektes überfordert hätte. Ein möglicher Gleichtakt über den 12V Pfad wird dadurch nicht abgebildet. Auf den Einsatz komplexer 3D Modelle wurde ebenfalls verzichtet, die wichtigsten Parasiten wurden abgeschätzt. Die Zeitersparnis bei der Modellierung ist dabei hoch, die Genauigkeit des Modells oberhalb von 30MHz allerdings nicht mehr gegeben. Der Wert eines solchen Modells ist trotzdem sehr hoch, denn die großen, teuren Filterbauelemente wirken unterhalb dieses Bereiches. Der kosten- und volumenintensive Teil des Filters kann daher mittels des Simulationsmodells ausgelegt werden, und die Erstellung des Modells erfordert nur sehr moderaten Aufwand.

5.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 7 gezeigt, wobei die grüne Kurve das Ergebnis der Simulation mit dem Filter, und die blaue Kurve das der Simulation ohne Filter zeigt. Der Filter zeigt breitbandig eine Dämpfung von 20 – 40 dB bis 10 MHz. Auch oberhalb dieser Frequenz ist der Einfluss des Filters zu erkennen, aber wegen fehlender 3D Daten ist das Modell hier nur qualitativ zu bewerten. Der Vorteil des transienten Systemmodells gegenüber der reinen Filtersimulation ist dabei, dass die realen Impedanzverhältnisse im System richtig modelliert sind und damit die Wirkung des Filters deutlich realistischer (und in der Regel geringer) ausfällt als bei einer Simulation, in der nur der Filter betrachtet wird.

Without PI-Filter With PI-Filter

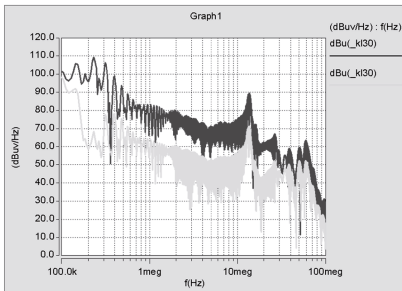


Abbildung 7: Ergebnisse einer transienten Analyse des BRS Modells mit und ohne Filter.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag beleuchtet am Beispiel einer Filtersimulation des Boost Recuperation System die Vorgehensweise bei der Simulation von Leistungselektroniken. Zeit- und Kostendruck limitieren die Modellerstellung immer. Aber auch nur in seltenen Fällen ist es möglich und auch nötig, ein Modell des Gesamtsystems zu erstellen, das in der Lage ist quantitative Ergebnisse zu erzielen. Modelle zur Analyse oder Modelle von Subsystemen können bei einem Bruchteil des benötigten Aufwand ebenfalls sehr nützliche Hinweise für das zielgerichtete EMV Design liefern.

Referenzen

- [1] CST – Computer Simulation Technology, www.cst.com
- [2] EMCoS – EM Consulting & Software, www.emcos.com
- [3] Ansys Software, www.ansys.com/de_de
- [4] Altair Hyperworks, <http://www.altairhyperworks.com/Product,73,FEKO.aspx>
- [5] Ph. Hillenbrand, Ch. Keller, S. Tenbohlen, Understanding Conducted Emissions from an Automotive Inverter Using Common-Mode Model, EMC2015, Dresden, Germany.
- [6] Bosch Boost Recuperation System, <http://www.bosch-mobility-solutions.com/en/de/index.html>
- [7] Markus Gonser, EMV-Systemsimulation mit realen Kabelbäumen von Mess- und Prüfverfahren für Kfz-Komponenten, Dissertation Universität Erlangen, 2011