

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 416

Sören Schörle, M.Sc.
Backnang

Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug

Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug

vorgelegt von

M.Sc.

Sören Schörle

geb. in Backnang

von der Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Detlev Hackstein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eckart Hoene

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.12.2016

Berlin 2016

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Sören Schörle, M. Sc.
Backnang

Nr. 416

Systemorientierte
Impedanzsimulation eines
Hochvolt-Bordnetzes am
Beispiel Kraftfahrzeug

VDI verlag

Schörle, Sören

Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 416. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

156 Seiten, 143 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341621-9, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Hochvolt-Bordnetz – Impedanzmodellierung – Impedanzmessung – Simulation – Hochvolt Batterien – Elektrofahrzeuge – Hochvoltkabel – Spannungsqualität – Resonanzen – Systemsimulation

Die Bedeutung von Hochvolt-Bordnetzen hat aufgrund der steigenden Anzahl von Elektro- und Hybridfahrzeugen stark zugenommen. Um eine sichere Funktion und eine gute Spannungsqualität zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Absicherung der Bordnetze mithilfe einer Simulation notwendig. Das vorliegende Buch beschreibt einen Weg, um das Impedanzverhalten solcher Netze mit vertretbarem Aufwand zu simulieren und Resonanzen aufzuspüren. Darüber hinaus zeigt der Verfasser auf, wie es gelingt, die Wechselspannungsanteile auf dem Bordnetz zu simulieren, um sie in Hinblick auf Funktion und Spannungsqualität bewerten zu können. Mithilfe dieser Vorgehensweise gelingt es, die Auslegung der Komponenten sowie die Architektur des Gesamtnetzes vor der Realisierung zu bewerten, das Optimierungspotential darzulegen und die Herausforderungen zwischen kurzer Entwicklungszeit und robuster Auslegung des Netzes frühzeitig zu erkennen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2016

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341621-9

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand durch die Möglichkeit, parallel während meiner Entwicklertätigkeit bei der Daimler AG im Bereich Hochvolt-Bordnetze, als Gastwissenschaftler am Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration tätig zu sein. Die Herausforderung, neben der normalen Arbeitstätigkeit eine Dissertation zu erstellen, konnte ich nur durch die Hilfe vieler Kollegen und Freunde meistern. Vor allem Prof. Eckart Hoene danke ich für seine jahrelange fachliche Begleitung und die Arbeit als Gutachter. Ohne ihn und seine fachliche, aber auch administrative Unterstützung wäre diese Arbeit nie entstanden. Herrn Prof. Lang danke ich besonders für die jahrelange Unterstützung und Begleitung beim Entstehen dieser Arbeit. Ein Dank geht an Herrn Prof. Hackstein für seine Gutachtertätigkeit sowie Herrn Prof. Gühmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Vielen herzlichen Dank auch an meine IZM Kollegen Stefan Hoffman, Stefan Junk, Adam Kuczmik und Christoph Marczuk für den fachlichen Support und die vielen anregenden Diskussionen.

Ein spezielles Dankeschön an meinen Daimler Kollegen Dr. Thomas Dörsam für seine unschätzbare Unterstützung durch fachliche Diskussionen und Korrekturen. Danken möchte ich auch meinen Daimler Kollegen Dr. Tobias Aurand, Rainer Falsett, Thomas Wersal, Andreas Kruspel und Bernd Müller für ihre Unterstützung bei den vorbereitenden Arbeiten und die vielen Gespräche. Ohne das Verständnis meiner Vorgesetzten Frau Dr. Vera Lauer und Herrn Thomas Weber, die mir den persönlichen Freiraum für diese Arbeit ermöglichten, wäre das Projekt sicher gescheitert. Dafür möchte ich an dieser Stelle nochmals Danke sagen.

In besonderem Maße bedanke ich mich bei meiner lieben Frau Daniela für Ihre unzähligen orthografischen Korrekturen und die Unterstützung und Aufmunterung in den letzten fünf Jahren. Ohne die großartige Unterstützung meiner Mutter, die mich auf dem Weg vom Studenten bis zur Promotion immer unterstützt hat, wäre der ganze Weg bis hierher viel schwerer gewesen, dafür herzlichen Dank.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Zusammenfassung	X
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Stand der Technik	6
1.3 Struktur und Ziel der Arbeit	11
2 Grundlagen	16
3 Impedanzmodellierung der Einzelkomponente	18
3.1 Messung von Impedanzen	19
3.2 Vergleich aktive und passive Impedanz	28
3.3 Impedanzmodellierung von Leistungsbaugruppen	38
3.4 Automatisierte Ersatzschaltbilderzeugung	47
4 Impedanz von HV-Batterien	53
4.1 Einzelzelle	54
4.2 Messadapter	57
4.3 Gesamtbatterie	63
4.4 Vergleich von Batterien	72
5 Modellierung der geschirmten HV-Kabel	74
5.1 Notwendiger Detaillierungsgrad des Kabelmodells	93
6 Modellierung der Systemimpedanz	95

6.1	Kombination von Kabel- und Baugruppenmodell	95
6.2	Auswirkung der Massefläche	100
6.3	Kombination von Baugruppen	101
6.4	Impedanz des Gesamtsystems	106
6.5	Interpretation der Messergebnisse	112
6.6	Einflussfaktoren und Vereinfachungen	115
7	Störquellenmodellierung	117
7.1	Einführung	117
7.2	Versuchsaufbau und Einflussfaktoren	119
7.3	Messergebnisse	124
7.4	Hinweis zu Common Mode	132
8	Ausblick	132
A	Anhang	134
A.1	Zusammenfassung der Schaltbilder	134
A.2	Induktivität eines Koaxialkabels	137
	Literaturverzeichnis	139

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_m	---	Polstellen
C_{AA}	F	Koppelkapazität Ader-Ader
C_{AS}	F	Koppelkapazität Ader-Schirm
c_m	---	Residuen
C_{ZG}	F	Kapazität Zelle-Gehäuse
C_{ZZ}	F	Kapazität Zelle-Zelle
d_z	m	Abstand Zellenmitte-Zellenmitte
f	Hz	Frequenz
f_{res}	Hz	Resonanzfrequenz
h	m	Höhe über Masse
h_z	m	Abstand Zellmitte-Gehäuse
I_{CM}	A	Common Mode Strom
I_{DM}	A	Differential Mode Strom
k_0	---	Bedeckungsfaktor Schirm
l	m	Länge
L	H	Luftinduktivität
L_A	H	Induktivität Ader
L_a	H	Induktivität Außenleiter/Mantel
L_{braid}	H	Fehlinduktivität durch Schirm
L_h	H	Induktivität Hülle
L_i	H	Innere Induktivität eines Leiters
L_n	H	Induktivität durch Nähewirkung
L_s	H	Induktivität Schirm
l_z	M	Länge Zelle
M	H	Gegeninduktivität
M_{AA}	H	Gegeninduktivität Ader-Ader
M_{AS}	H	Gegeninduktivität Ader-Schirm
n	---	Anzahl Messpunkte
N	---	Anzahl Polstellen
N	---	Windungszahl

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
r	m	Radius
r_A	m	Radius Ader
R_A	Ω	Widerstand Ader
R_{AA}	Ω	Verlustwiderstand Ader-Ader
R_{AS}	Ω	Verlustwiderstand Ader-Schirm
r_i	m	Abstand Adern
R_s	Ω	Widerstand Schirm
r_{si}	m	Radius Schirm innen
r_{so}	m	Radius Schirm außen
r_z	m	Radius Zelle
U	V	Spannung
U_{HV-}	V	HV- Spannung
U_{HV+}	V	HV+ Spannung
Z_{DUT}^*	Ω	konjugiert komplexe Impedanz
Z_C	Ω	Impedanz Kondensator
Z_L	Ω	Impedanz Induktivität
Z_{Quelle}	Ω	Impedanz Quelle
Z_x	Ω	Impedanz gesucht
δ	m	äquivalente Leitschichtdicke
ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	spezifischer Widerstand
φ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel
χ	S/m	spezifische Leitfähigkeit

Abkürzungsverzeichnis

BALUN	Balanced-unbalanced
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques
CM	Common Mode
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DM	Differential Mode
DUT	Device Under Test
EKMV	Elektrischer Kältemittel Verdichter
ESL	Equivalent Series Inductivity
ESR	Equivalent Series Resistance
FEMM	Finite Element Methode Magnetics
FFT	Fast Fourier Transformation
HV	Hochvolt (U>60V)
HV-Bordnetz	Hochvolt-Bordnetz
IGBT	Insulated Gate Bipolare Transistor
IMSI	Impedance Measurement Based On Harmonic Signal Injection
LV-Bordnetz	12V Bordnetz des Kraftfahrzeugs
LISN	Line-Impedance-Stabilization-Network
NNB	Netznachbildung
NV	Niedervolt
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDU	Power Distribution Unit
RMS	Root Mean Square
SNR	Signal Noise Ratio

Zusammenfassung

Hochvolt-Bordnetze finden heutzutage mehr und mehr Einzug im Kraftfahrzeug, sei es zur Energieversorgung eines zusätzlichen Antriebes in Hybridfahrzeugen oder als Hauptantrieb in Elektrofahrzeugen. Neben dem Antrieb werden weitere Zusatzaggregate wie Klimakompressor oder DC/DC-Wandler verbaut, um die Systemeffizienz zu erhöhen. Diese Technologie bringt einerseits neue Möglichkeiten, andererseits auch unbekannte Systemreaktionen in den Entwicklungsprozess ein. Das elektrische Verhalten der unabhängig voneinander entwickelten Bordnetzkomponenten ist dem Systemarchitekten nur teilweise bekannt. Speziell das Impedanzverhalten der Eingangsfilter wird im Systemdesign bisher kaum berücksichtigt. Begünstigt durch den Umstand, dass die Komponenten durch Kabel mit niedrigen Verlusten vernetzt sind, können so hoch schwingfähige Systeme entstehen, die sich erst in einem Gesamtaufbau bemerkbar machen. In dieser Arbeit wird ein Weg aufgezeigt, wie sich das Impedanzverhalten von verteilten Netzen sowie mögliche Systemresonanzen durch Modellierung und Simulation im Frequenzbereich 1kHz-10MHz ermitteln lassen, ohne dass ein realer Systemaufbau existiert. Die Modelle werden unter der Maßgabe erstellt, dass keine Detailinformationen über das Schaltungsdesign verfügbar sind. Um zum Systemmodell zu gelangen, werden zuerst die leistungselektronischen Wandler anhand von Messungen identifiziert. Die Ergebnisse werden in ein Modell aus konzentrierten Elementen überführt, bei denen jedes Element einem realen physikalischen Effekt zugeordnet werden kann. Damit lassen sich Änderungen am realen Umrichter leicht ins Modell übertragen. Des Weiteren kann bei einer unerwünschten Resonanz das zu ändernde Bauteil leichter identifiziert werden. In einem weiteren Schritt werden Messverfahren zur Ermittlung der Batterieimpedanz vorgestellt. Um die Messergebnisse zu verifizieren, wird die Impedanz einer Batterie anhand ihrer geometrischen Strukturen und den physikalischen Effekten berechnet und modelliert. In einem dritten Schritt werden dann die geschirmten Kabel modelliert, wobei verschiedene Detaillierungsgrade verwendet werden und ein Vergleich der verschiedenen Varianten gezogen wird.

Aufbauend auf die Modellierung der Einzelkomponenten werden Kombinationen von Kabeln und Umrichtern simuliert und die Ergebnisse mit Messungen verglichen. Anschließend werden diese Subsysteme zu einem kompletten Gesamtnetz zusammengeführt und eine Simulation der Systemimpedanz durchgeführt. Diese Ergebnisse werden mit Messungen verglichen und anhand von Abweichungen werden die relevanten Einflussfaktoren diskutiert. Diese Systemsimulation ermöglicht zum einen die Identifikation von Systemresonanzen, zum anderen kann für jede Frequenz der Pfad mit der niedrigsten Impedanz ermittelt werden. Diese Kenntnis hilft dabei die Belastung jeder Komponente durch Oberschwingungen abzuschätzen und ggf. Maßnahmen einzuleiten, sofern diese Störungen zu Fehlfunktionen oder Schädigungen führen. Im letzten Kapitel wird ergänzend eine Methode entwickelt, die mittels standardisierter Messung eine Identifikation der Störquelle im Umrichter ermöglicht. Die daraus erstellte Ersatzstörquelle jedes Umrichters im leistungselektronischen Netz ermöglicht die Ergänzung der zuvor erstellten Impedanzmodelle um eine interne Urstörquelle, um so die auftretende Störspannung in einem System zu ermitteln und die Anregung möglicher Resonanzen zu identifizieren.

Abstract

High-voltage powernets are being increasingly implemented in present-day cars, either as an additional propulsion system in hybrid vehicles or as the main drivetrain in electric cars. Besides the propulsion system, additional sets such as electrical air conditioning or DC/DC-converters are implemented to increase the overall system efficiency. On one hand this technology introduces new possibilities like efficient driving cycles, but on the other hand unknown system reactions are introduced into the development cycle. The electrical behaviour of all independently developed components is only partially known to the system designer. Especially the input filter impedance behaviour is barely considered at the moment. Due to the fact that all components are connected with each other using shielded cables with low losses, oscillatory build-ups are created which are not recognized until the first real system build-up is done. This thesis shows a way to identify the impedance behaviour and possible resonances by modelling and simulating the system in a frequency range

between 1kHz and 10MHz, without having a complete build-up system available. The models are created by using as little detailed information about the input filter as possible. To gain an overall system model, at first the power electronic converters are identified by measurement. The results are transformed into models using concentrated circuit elements, each of them representing a real physical effect. This ensures that changes of the real component can be easily transferred into the model. Furthermore, it is possible to identify the according part creating an unwanted resonance. Secondly, measurement methods are presented to identify the impedance of high-voltage batteries. For verification, one battery impedance is calculated and simulated using geometrical data and the corresponding physical effects. In a third step, the shielded cables are simulated using models with different levels of details. After that, a comparison between the various models is performed and a conclusion drawn. Using the single component models, combinations of converters and cables are modelled comparing them with measurements. Finally, these subsystems are used to build up a complete power grid of a real vehicle and a simulation of the system impedance is performed. These results are then compared with measurements. The deviations are used to identify the relevant simulation parameters. This system simulation offers on one hand the identification of system resonances and on the other hand the possibility to identify the path with the lowest impedance for every single frequency. This knowledge can be used to identify the noise load of each component created by noise frequencies. Having these information, countermeasures can be taken in case the noise ratio causes malfunctions or even damage. The last chapter introduces a method to identify the noise source of each converter. The resulting equivalent noise source offers the possibility to expand the impedance models with a noise source model. This model can then be used to simulate the noise level within the system and to identify the stimulation of possible resonances.