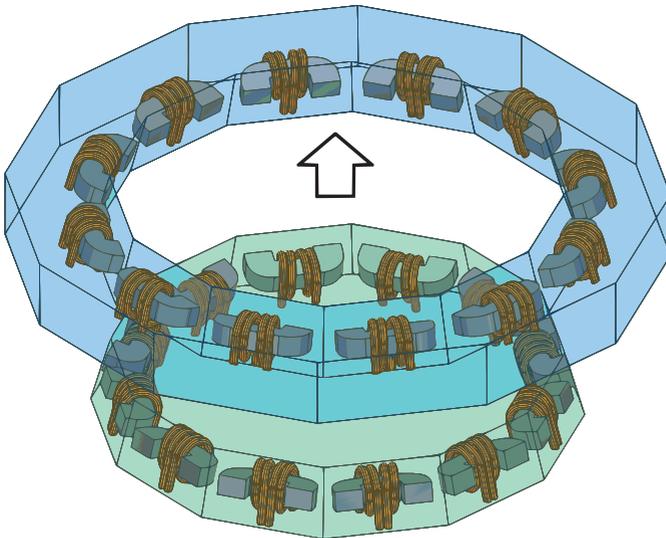


Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Christian Roth

Modellierung hoch ausgenutzter induktiver Ladesysteme mit starker magnetischer Kopplung



Modellierung hoch ausgenutzter induktiver Ladesysteme mit starker magnetischer Kopplung

Christian Roth

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS (DR.-ING.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter GERLING
2. Prof. Dr.-Ing. Bernard BÄKER

Die Dissertation wurde am 25.05.2021 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 26.08.2021 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 05.11.2021 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 45

Christian Roth

**Modellierung hoch ausgenutzter induktiver
Ladesysteme mit starker magnetischer Kopplung**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8414-6

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerling, der mir das Promotionsstudium sowohl mit fachlicher als auch persönlicher Unterstützung überhaupt erst ermöglicht hat.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bäker für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Insgesamt möchte ich besonders den großen Rückhalt durch den gesamten Lehrstuhl hervorheben. Allen voran gilt dieses Lob Herrn Dr.-Ing. Mayer, der mir bei fachlichen Fragen stets eine Hilfestellung liefern konnte. Außerdem möchte ich Herrn Birnkammer für seine kreativen Ideen danken, die zum Teil wesentliche Grundlage für meine Veröffentlichungen waren. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Mitstreitern Herrn Bachinski Pinhal, Herrn Pohl und Herrn Gerold bedanken, mit denen ich nicht nur auf Konferenzen, sondern auch in zahlreichen Kaffeepausen mit (außer)fachlich höchst interessanten Gesprächen gerne Zeit verbrachte.

Selbstverständlich darf in meiner Danksagung auch mein aktueller Arbeitgeber, die FEAAM GmbH, nicht fehlen. Insbesondere möchte ich den beiden Geschäftsführern Herrn Dr.-Ing. Dajaku und Herrn Dr.-Ing. Greifelt für die sehr abwechslungsreiche Arbeit und den wissenschaftlichen Freiraum für eigene Forschungsansätze danken.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin, Pawena, für die herzliche Unterstützung und Ermutigung über mein gesamtes Leben hinweg meinen tiefsten Dank aussprechen.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Modellierung hoch ausgenutzter induktiver Ladesysteme behandelt, bei denen eine starke magnetische Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite besteht. Zur Optimierung des Übertragungsverhalten wird die resonante induktive Kopplung verwendet. Dazu werden zwei Kompensationskapazitäten benötigt, um den stationären Primärteil des Ladesystems unabhängig vom Spannungsniveau des Sekundärteils gestalten zu können. Anders als bei konventionellen induktiven Ladesystemen werden mit diesen Kapazitäten nur die Streuinduktivitäten kompensiert um Verluste und Sättigung im Ferritkern zu vermeiden. Insbesondere die hohen Anforderungen bezüglich Leistungsdichte erfordern möglichst detaillierte Berechnungsmodelle für den Entwurf. Einerseits ist zur Maximierung der Leistungsdichte eine hohe elektrische Betriebsfrequenz erforderlich, um die Abmessungen des Magnetkreises zu reduzieren. Andererseits steigen mit zunehmender Frequenz die Verluste in Wicklung und Eisenkern, was wiederum den Kühlaufwand erhöht. Um einen optimalen Kompromiss zu finden, werden adäquate Modellierungsmethoden vorgestellt, die gleichzeitig effizient bezüglich Rechenzeit sind. Diese gliedern sich insgesamt in drei Teilbereiche. Im ersten dieser Teilbereiche wird die Modellierung von Wicklungen thematisiert. Ein Fokus liegt dabei auf der mathematischen Beschreibung von HF-Litzen. Der zweite Teilbereich handelt von der Modellierung des Eisenkerns zur magnetischen Flussführung. Dabei kommt ein nichtlineares Reluktanznetzwerk zum Einsatz, welches mithilfe einer Kombination aus analytischen und numerischen Berechnungen parametrisiert wird. Die thermische Modellierung wird im dritten Teilbereich behandelt. Inhaltlich wird ein thermisches Kompaktmodell eingeführt, die thermische Leitfähigkeit von HF-Litzen untersucht und ein Kühlkonzept mit Kühlkörpern aus Graphit vorgestellt. Die aufgestellten Modelle für die verschiedenen physikalischen Domänen werden vollständig miteinander gekoppelt und im Rahmen einer numerischen Optimierung ein konkreter Entwurf für ein Modul des betrachteten Ladesystems ermittelt. Insgesamt wurde mit dem finalen Entwurf des Übertragers eine Leistungsdichte von etwa 60 kW/L bei einem Wirkungsgrad von $98,4\%$ in den Simulationen erreicht. Eine Abschätzung des Bauraums des Gesamtsystems ergab, dass eine Reduktion der Batteriekapazität von etwa 11% bis 30% bei einer Mittelklasse-Limousine (Referenzfahrzeug: *Tesla M3 LR*) notwendig ist, um genügend Platz für das konzipierte Ladesystem bei einer Gesamtladeleistung von 240 kW bis 480 kW zu schaffen.

Abstract

This work deals with the modeling of highly utilized inductive charging systems with strong magnetic coupling between the primary and secondary sides. Resonant inductive coupling is advantageous for efficient operation. For this purpose, two compensation capacitors are required to enable the stationary primary part of the charging system to be designed independently of the voltage level of the secondary part. Unlike conventional inductive charging systems, only the leakage inductances are compensated with these capacitors in order to avoid losses and saturation in the ferrite core. In particular, the high power density requirements necessitate detailed calculation models for the design. On the one hand, maximizing the power density requires a high electrical operating frequency to reduce the dimensions of the magnetic circuit. On the other hand, losses in the winding and iron core increase with increasing frequency, which in turn increases the cooling effort. In order to find an optimal compromise, adequate modeling methods are presented, which are at the same time efficient with respect to computation time. These are divided into three main parts. In the first part, the modeling of windings is discussed. One focus is on the mathematical description of HF litz wires. The second part deals with the modeling of the iron core. A nonlinear reluctance network is used, which is parameterized using a combination of analytical and numerical calculations. The thermal modeling is treated in the third part, where a thermal compact model is introduced, the thermal conductivity of HF litz wires is investigated and a cooling concept with graphite heat sinks is presented. The models of the different physical domains are fully coupled with each other and a concrete design for a module of the charging system is determined within the framework of a numerical optimization. Overall, the final design of the transformer achieved a power density of about 60 kW/L with an efficiency of 98,4% in the simulations. An estimation of the installation space of the overall system showed that a reduction of the battery capacity of about 11% to 30% in a mid-size sedan is necessary to provide enough space for the designed charging system at a total charging power of 240 kW to 480 kW.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung und Motivation	1
1.1. Neuartigkeit des Ansatzes und Stand der Technik	3
1.2. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2. Grundlagen induktiver Energieübertragung	9
2.1. Elektromagnetische Induktion	9
2.2. Analogie zum Transformator	14
2.3. Resonante induktive Kopplung	16
3. Modellierung von Wicklungen	25
3.1. Rundleiter	26
3.1.1. Skin-Effekt	26
3.1.2. Proximity-Effekt	27
3.2. Parallele Rundleiter	29
3.2.1. Analytische Berechnung von Zirkelströmen	29
3.2.2. Validierung des Berechnungsmodells anhand 2D-FEA	34
3.2.3. Anwendung am Beispiel einer elektrischen Maschine	36
3.3. Ideale HF-Litzen	44
3.4. Reale HF-Litzen	46
3.4.1. Berechnung von Zirkelströmen in HF-Litzen	48
3.4.2. Validierung des Berechnungsmodells anhand PEEC-Methode	57
3.4.3. Validierung des Berechnungsmodells anhand Messungen	61
4. Magnetkreismodellierung	69
4.1. Approximation des Eisenkerns durch nichtlineare Reluktanzen	71
4.2. Berechnung der Streu- und Luftspaltreluktanzen	73
4.2.1. Analytische Berechnung	73
4.2.2. 2D-FEA in Kombination mit analytischer Berechnung	75
4.2.3. 3D-FEM	79
4.3. Aufstellen des nichtlinearen Gleichungssystems	80
4.3.1. Berechnung der linearisierten Induktivitätsmatrix	82
4.3.2. Berechnung der differentiellen Induktivitätsmatrix	82
4.4. Berechnung der Eisenverluste	84
4.4.1. Klassische Steinmetz-Gleichung (<i>CSE</i>)	84
4.4.2. Verallgemeinerte Steinmetz-Gleichung (<i>GSE</i>)	85
4.4.3. Natürliche Steinmetz-Gleichung (<i>iGSE</i> bzw. <i>NSE</i>)	85

4.5. Validierung anhand 3D-FEM Simulation	85
4.5.1. Validierung des Reluktanzmodells anhand magnetostatischer 3D-FEM Simulation	86
4.5.2. Validierung der Verlustberechnung anhand transienter 3D-FEM Simulation	89
5. Thermische Modellierung	91
5.1. Grundlagen der Wärmeleitung	92
5.2. Thermisches Kompaktmodell	93
5.2.1. Stationäres Kompaktmodell	94
5.2.2. Erweiterung zu transientem Kompaktmodell	99
5.3. Äquivalente thermische Leitfähigkeit von HF-Litzen	100
5.3.1. Homogenisierung ohne Berücksichtigung der Verdrillung	101
5.3.2. Homogenisierung mit Berücksichtigung der Verdrillung	104
5.4. Konzeptionierung des Kühlsystems	117
6. Kopplung der physikalischen Domänen des induktiven Ladesystems	123
6.1. Modellierung der Materialeigenschaften	124
6.2. Vereinfachtes Wicklungsmodell	128
6.3. Nichtlinearer Magnetkreis	130
6.4. Elektromagnetisches Netzwerk	131
6.5. Kopplung des elektromagnetischen Netzwerks mit thermischen Kompaktmodell	132
6.6. Stationäre Simulationen mit Kompensation	134
7. Entwurf und Optimierung des induktiven Ladesystems	139
7.1. Grobentwurf des induktiven Übertragers	139
7.1.1. Eingrenzung des geometrischen Parameterraums	140
7.1.2. Vorabentwurf der Wicklung	141
7.1.3. Abschätzung der thermischen Leitfähigkeit der Wicklung	143
7.2. Optimierung bezüglich Volumen	145
7.2.1. Erstellung der Antwortflächen	145
7.2.2. Optimierungsprozess	148
7.2.3. Ergebnis der Optimierung	151
7.3. Finaler Entwurf	154
7.4. Abschätzung des Bauraums im Fahrzeug	160
8. Zusammenfassung und Ausblick	161
Appendices	165
A. Zusätzliche Berechnungen für die Grundlagen induktiver Energieübertragung	167
A.1. Spannungsübersetzung eines einphasigen Transformators	167
A.2. Zwischenergebnisse zu den Berechnungen der Serie-Serie-Kompensation	168

A.3. Spannungsübersetzung eines Resonanzwandlers mit Serie-Serie-Kompensation	169
B. Zusätzliche Berechnungen für die Modellierung von Wicklungen	171
B.1. Distanz zwischen zwei Adern	171
B.2. Anzahl einzigartiger Zeiger in einer hexagonalen Anordnung	172
C. Grenzwertbetrachtung des Verdrillungsfaktors	175
D. Analytische Beschreibung der BH-Kennlinie	177
Verzeichnis der verwendeten Symbole	183
Literatur	193
Abbildungsverzeichnis	201
Tabellenverzeichnis	207