

Elektrischer Traktionsmotor am Stromzwischenkreis- Wechselrichter

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieurin
Sicong von Malottki (geb. Liu)
aus Henan (V. R. China)

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Soter

Tag der mündlichen Prüfung: 21. April 2015

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 19

Sicong von Malottki

**Elektrischer Traktionsmotor am
Stromzwischenkreis-Wechselrichter**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen
RWTH Aachen
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3839-2

ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Rückblickend auf die vergangenen vier Jahre möchte ich mich bei einer Vielzahl von Menschen bedanken, die mich während der Promotionszeit begleitet und geprägt haben.

Mein besonderer Dank gilt Professor Kay Hameyer, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Institut zu promovieren. Ohne seine Zustimmung wäre diese Arbeit nicht entstanden. Darum möchte ich ihm für seine Betreuung ganz herzlich danken. Professor Stefan Soter hat freundlicherweise das Korreferat meiner Arbeit übernommen. Dafür danke ich ihm ebenfalls sehr.

Meinem Betreuer bei der Daimler AG, Dr. Robert B. Inderka, möchte ich für die Arbeitsfreiheit danken, die er mir während der Promotion ermöglicht hat. Die zahlreichen und interessanten Diskussionen mit ihm haben mich sowohl fachlich als auch persönlich weiterentwickelt. Die gute Zusammenarbeit weiß ich sehr zu schätzen und dafür danke ich ihm.

Ein spezieller Dank gilt Thomas Götze, der mich in den letzten Jahren stets auf fachlicher Ebene unterstützt hat. Insbesondere möchte ich mich für seine Hinweise und Hilfe bei den praktischen Untersuchungen bedanken, die für die Ergebnisse meiner Arbeit sehr wertvoll waren.

Des Weiteren möchte ich mich bei einigen Kollegen und Studenten bedanken, die mich in der Entstehung dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben: Daniel Scharfenstein, Matthias Gregor, Andreas Wanke, Markus Hofmann, Jochen Haag, Nils Donath, Steffen Hahlbeck, Jian Tang, Ju Park. Allen Kollegen der Abteilung RD/RPT gilt mein Dank für das hervorragende Arbeitsklima.

Nicht zuletzt möchte ich drei besondere Menschen in meinem Leben dankend erwähnen. Meinen Eltern Liu, Jiahe und Ma, Li danke ich für ihren Rat und Rückhalt, der mich im Leben stets begleitet. Ein liebevoller Dank gilt meinem Ehemann, Jonas von Malottki, der mich überall unterstützt und so vieles macht, damit ich mich an all den Tagen einfach glücklich fühle.

Nun mit einem positiven und freudvollen Gedanken an die Zukunft möchte ich meine Danksagung mit einem Zitat beenden, das mich immer wieder angetrieben hat und auch zukünftig antreiben wird, „*Wer kämpft, kann verlieren. Wer nicht kämpft, hat schon verloren.*“

Ostfildern, Juli 2015

Abstract

A Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) fed by a Current-Source-Inverter (CSI) for automotive application is investigated in this work. In all Battery Electric Vehicles (BEVs) existing on the market so far, a Voltage-Source-Inverter (VSI) is used as DC/AC converter. In contrast to a VSI, a CSI operates as a boost converter. Therefore, the output voltage is higher than the input voltage. Considering this voltage boost capability, advantages for the powertrain using a CSI to operate a PMSM are analyzed.

The investigated powertrain for BEV application consists of an interior PMSM, a CSI with a DC link inductance and a DC/DC buck-converter. The buck-converter is necessary because of the recuperating operation and the control of DC link current. Three conductors are each connected to the output of the CSI. Due to the effect of AC filter capacitors sinusoidal output voltage is provided to the electric machine.

A control strategy for the topology of CSI and buck-converter is developed and tested on a Hardware-in-the-Loop (HiL) test bench. Simulation models of powertrain, consisting of a battery, an interior PMSM and each with a VSI and a CSI are built. The interaction of the electric machine and the converter topologies is analyzed regarding the aspects: control, system efficiency, performance and operating in event of malfunction. The powertrain with CSI is compared to the state of the art using VSI. Dis- and advantages are concluded as results.

CSI is especially appropriate for automotive applications, in which the power requirement is limited by the voltage level of the energy source, such as for fuel cell application. Due to the voltage boost functionality, the operation regions with constant power of the electric machine can be extended. Based on the analysis of the operating strategy in event of malfunction, a reduction of rare earth magnet materials of about 9% can be achieved by using CSI in comparison to VSI. Concerning power density the components dc link inductance and AC filter capacitors have negative impact. Hence a detailed system consideration must be conducted for the design of the components. Another disadvantage is the system efficiency. Due to the facts of currently limited samples of reverse recovery power electronics and the additionally needed buck-converter, the system efficiency of the investigated topology with CSI is about 10% lower in cycle than with VSI.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einsatz einer permanenterregten Synchronmaschine (PSM), die mit einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter für automobiler Traktionsanwendungen gespeist wird. Im Gegensatz zu einem heute typischerweise im Elektrofahrzeug eingesetzten Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis arbeitet ein Stromzwischenkreis-Wechselrichter nach dem Prinzip eines Hochsetzstellers. Die dadurch ermöglichte Erhöhung der Spannungsausnutzung für die elektrische Maschine bietet Vorteile für Anwendungen in Bereichen der Elektro-, Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Hochdrehzahlantriebe an.

Bei dem untersuchten Antriebskonzept für Elektrofahrzeuge handelt es sich um eine PSM als Energiewandler und einen selbstgeführten Wechselrichter mit einer Drossel als Zwischenkreisspeicher. Drei Filterkondensatoren befinden sich phasenweise am Ausgang des Wechselrichters. Aufgrund des Rekuperationsbetriebs ist der Einsatz eines solchen Wechselrichters stets mit einem DC/DC-Wandler zu kombinieren. Die Interaktion und gegenseitige Beeinflussung zwischen der elektrischen Maschine und der Wechselrichtertopologie werden hinsichtlich der Aspekte Regelung, Steuerung, Wirkungsgrad, Performance, Fehlerfallbeherrschung und Bauteildimensionierung analysiert. Das vorgestellte Antriebskonzept wird verglichen mit einer PSM gespeist mit einem Spannungszwischenkreis-Wechselrichter. Als Resultat der Arbeit werden die Vor- und Nachteile einer PSM bei Speisung mit einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter anhand der genannten Kriterien dargestellt.

Die Auswirkung des Stromzwischenkreis-Wechselrichters auf die PSM und der Vergleich zur Speisung mit einem Spannungszwischenkreis-Wechselrichter werden mit Hilfe von Systemsimulationen untersucht. Dabei beschränkt sich die untersuchte Anwendung auf ein elektrisches Antriebssystem, bestehend aus einer permanenterregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten, dem Wechselrichter, und einer Batterie als Energiespeicher. Die Untersuchungen fokussieren sich auf Performance, Wirkungsgrad und Fehlerfallverhalten jeweils mittels dynamischer, stationärer und transients Simulationen. Eine Testumgebung mit skaliertem Eingangsleistung wird zur Inbetriebnahme eines Antriebssystems mit beliebiger Wechselrichtertopologie aufgebaut. Die entwickelte Regelung und Steuerung werden mithilfe der Testumgebung nach dem Prinzip des Hardware-in-the-Loop-Verfahrens validiert.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen abhängig von der Anwendung Vorteile für die Speisung einer PSM mit einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter im Elektrofahrzeug. Besonders lohnenswert ist der Einsatz für Systeme, bei denen die Performance der elektrischen Maschine durch das Spannungsniveau des Energiespeichers limitiert wird. Durch den Hochsetzbetrieb ist die Spannungsgrenze bei der Speisung der elektrischen Maschine mit einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter unabhängig von der Spannungslage des Energiespeichers. Aus der Analyse des Fehlerfallverhaltens ergibt sich eine Materialreduzierung der seltenen Erden Permanentmagneten einer PSM von ca. 9% bei Speisung mit einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter. Negativ auf die Leistungsdichte wirken jedoch die Zwischenkreisdrossel und die Filterkondensatoren. Ebenfalls nachteilig ist der geringe Wirkungsgrad des Wechselrichters mit Stromzwischenkreis. Es ergibt sich ein Nachteil im Zyklus-Wirkungsgrad (PSM und Wechselrichter) von ca. 10% zu Antriebssystemen mit einem Spannungszwischenkreis-Wechselrichter.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel und Gliederung der Arbeit	4
2	Das E-Motor-System für automobiler Traktionsanwendungen	7
2.1	Das E-Motor-System	7
2.2	Automobiler Traktionsanwendungen	9
2.2.1	Anforderungen	9
2.2.2	Aktuelle Entwicklungen	11
2.3	Wechselrichterarten	20
2.3.1	Entwicklungstrend	21
2.3.2	Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis	23
2.3.3	Wechselrichter mit Stromzwischenkreis	27
3	Regelung und Steuerung von Stromzwischenkreis-Wechselrichter	31
3.1	Regelungsverfahren	31
3.1.1	Anforderung und Ansatz	31
3.1.2	Regelungsstruktur	34
3.2	Steuerungsverfahren	39
3.2.1	Pulsweitenmodulation	41
3.2.2	Modifiziertes Steuerverfahren	42
3.3	Validierung am E-Motor-System skaliert Eingangsleistung	49
3.3.1	Testumgebung mit Hardware-In-The-Loop-Verfahren	49
3.3.2	Validierte Messergebnisse	55
4	Traktionsanwendungen mit Stromzwischenkreiswechselrichter	63
4.1	CSI mit DC/DC-Wandler	63
4.1.1	Funktion des DC/DC-Wandlers	63
4.1.2	Betriebszustände	67
4.1.3	Zwischenkreisstrom-Regelung	70

4.2	Systemspezifische Dimensionierung passiver Komponenten . . .	71
4.2.1	Zwischenkreisdrossel	72
4.2.2	Filterkondensator	78
5	E-Motor-System Simulationen	81
5.1	Systemsimulation	81
5.1.1	Modellierung der elektrischen Maschine	82
5.1.2	Modellierung der Leistungselektronik	85
5.2	Umsetzung der Drehmomentvorsteuerung	87
5.3	Wirkungsgraduntersuchung	90
5.3.1	Verluste der IPSM	92
5.3.2	Verluste der Leistungselektronik	93
5.3.3	Zykluswirkungsgrad	97
5.4	Fehlerfallbeherrschung	101
5.4.1	Bekannte Abschaltstrategien	101
5.4.2	Entwickelte Abschaltstrategien	105
6	Vergleiche der Wechselrichtarten	113
6.1	Leistungsgrenze	113
6.2	Wirkungsgrad	115
6.3	Wirkung bei Fehlern	117
6.4	Zusammenfassender Vergleich	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
A	Anhang	131
A.1	Formelzeichen	131
A.2	Abkürzungen	133
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	141
	Literaturverzeichnis	143