

Analyse und Behandlung von unsymmetrischen Zuständen in fehlertoleranten PM-Synchronmaschinen

Johann Sebastian Mayer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- 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. Hans-Georg Herzog

Die Dissertation wurde am 23.03.2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 17.08.2015 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 23.09.2015 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 18

Johann Sebastian Mayer

**Analyse und Behandlung von unsymmetrischen
Zuständen in fehlertoleranten PM-Synchronmaschinen**

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4074-6

ISSN 1863-0707

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

Meiner Frau Petra gewidmet.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Kooperation mit der Abteilung für Funktions- und Systemsicherheit im Bereich Fahrwerk der AUDI AG in Ingolstadt und wurde durch die Hochschulkooperation *INI.UniBw* zwischen der AUDI AG und der Universität der Bundeswehr München ins Leben gerufen. Die akademische Betreuung erfolgte durch den Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik (EAA).

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, der durch sein stets engagiertes Verhalten, seine offene Art, seinem uneingeschränkten Vertrauen, seine schier unendlichen Geduld und nicht zuletzt durch sein freundliches und hilfsbereites Wesen sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Bedanken möchte ich mich in diesem Zusammenhang auch bei Herrn Nico Schobess (AUDI AG), der durch sein Interesse und seine Einsatzbereitschaft bereits sehr früh eine Brücke zwischen o.g. genannter Abteilung und dem EAA geschlagen hat. Darüber hinaus richtet sich mein Dank insbesondere an Herrn Dr. Stefan Greiner und Herrn Wolfgang Brandstätter, die meine Arbeit innerhalb der AUDI AG betreutet haben und mir großen Freiraum zu ihrer inhaltlichen Gestaltung ließen. Durch ihr stetiges Vertrauen und ihr Interesse an den z.T. auch sehr abstrakten Themenstellungen konnte die Arbeit in ihrer jetzigen Form erst ermöglicht werden.

Bei den Mitarbeitern des EAA und der FEAAM GmbH möchte ich mich ebenfalls herzlich bedanken für die gute Zusammenarbeit, die Hilfsbereitschaft und die vielen schönen Stunden außerhalb der Arbeitszeit. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Harald Hofmann und Herrn Dr.-Ing. Benno Lange für die IT- und laborseitige Unterstützung, Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Köbler für seine ständige Hilfsbereitschaft in organisatorischen Angelegenheiten und Herrn Dr.-Ing. Gurakuu Dajaku für die vielen fruchtbaren Fachdiskussionen.

Meinen ehemaligen Studenten Daniel Huger (EAA), Thorsten Groh (AUDI AG) und Sebastian Hallermeier (AUDI AG) danke ich für die Unterstützung im Rahmen ihrer Master-, Bachelor- bzw. Praktikumsarbeit.

Zu guter Letzt geht mein ganz großer Dank an meine liebe Frau Petra, die in all den Jahren viel Entbehrung hinnehmen musste und mir dennoch stets den Rücken stärkte. Ohne ihre rücksichtsvolle Art, ihre andauernde Unterstützung und ihr beharrliches Vertrauen in mich wäre die Entstehung dieser Arbeit nicht möglich gewesen!

München, im März 2015

Johann Sebastian Mayer

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit aktuellen Forschungsaktivitäten im Bereich der elektrischen Antriebstechnik für die Automobilindustrie. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Betrachtung von sicherheitsrelevanten E-Antrieben im Fahrwerk, allen voran der Lenkung. Es wird zunächst eine fehlertolerante Antriebsarchitektur für den genannten Anwendungsfall vorgeschlagen, die insbesondere auf die speziellen Bedürfnisse der Automobilindustrie zugeschnitten ist.

Basierend auf dieser Antriebsarchitektur erfolgt eine ausführliche Untersuchung von unsymmetrischen Zuständen in der fehlertoleranten E-Maschine, die nicht nur durch Fehlerereignisse vor und während des Betriebs, sondern auch durch konstruktionsbedingte Einflüsse in der E-Maschine bereits inhärent vorhanden sein können. Zur detaillierten Untersuchung dieser Unsymmetrien wird ein leistungsfähiges E-Maschinenmodell entwickelt, welches per se widersprüchliche Modellierungsziele wie Präzision, Schnelligkeit, Flexibilität und Allgemeingültigkeit auf bestmögliche Weise vereinigen kann. Aufgrund der natürlichen Verkopplung und gegenseitigen Einflussnahme erfolgt die Modellierung in allen relevanten physikalischen Bereichen, nämlich der elektrischen, magnetischen, thermischen und mechanischen Domäne. Eine ausführliche Simulation von gängigen elektrischen Fehlerszenarien (z.B. Kurzschluss- und Unterbrechungsfehler), aber auch magnetischen Unsymmetrien (z.B. defekte Magnete und exzentrische Rotoren) rundet die Theorien zur allgemeinen unsymmetrischen Modellierung ab. In diesem Zuge wird die vorgeschlagene fehlertolerante E-Maschine einer konventionellen Standardvariante gegenübergestellt und dabei ihre Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall untermauert.

Anschließend wird unter Verwendung des Modells eine Methode entwickelt, wie die Unsymmetrie in der Maschine durch Anwendung einer unsymmetrischen Spannungspeisung in allen Zuleitungen bestmöglich kompensiert werden kann. Die Speisung erfolgt derart, dass die Maschine in allen Betriebspunkten stets die geringstmögliche thermische Verlustleistung erzeugt und so einer Überhitzung bzw. Notabschaltung im Fehlerfall vorgebeugt werden kann. Ergänzend wird eine kurze Betrachtung darüber angestellt, wie die Maschine durch restriktive, lokale Designänderungen bereits im Vorfeld robuster gegenüber einer Erhitzung im Fehlerfall gemacht werden kann.

Schließlich wird ein praktischer Prüfstands Aufbau präsentiert, der dazu dient, beliebige elektrische Fehler in eine speziell angefertigte Prüfmaschine zu injizieren und alle relevanten Reaktionen der Maschine, wie Temperaturanstiege im Inneren und Äußeren, Ströme und mechanische Schwingungen (hervorgerufen durch Drehmomentpulsationen) zu analysieren. Die Prüfmaschine ist in eine Test- und Messumgebung eingebettet, die das spätere Einsatzszenario so gut wie möglich nachbilden soll. Erste Messungen am noch im Aufbau befindlichen Prüfstand dienen zur Validierung der Simulationen und schließen die vorliegende Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Kurzfassung	7
Inhaltsverzeichnis	9
1 Einleitung und Motivation	13
2 Zielsetzung und Randbedingungen	15
2.1 Eingrenzung und Fokus der Untersuchungen	15
2.1.1 Wahl der Antriebs-Grundstruktur	15
2.1.2 Paradigma der minimalen Systemänderung	16
2.2 Stand der Technik und Abgrenzung	18
2.2.1 KFZ-taugliche fehlertolerante E-Antriebe	18
2.2.2 Analyse von Fehlern und Unsymmetrien	18
2.2.3 Behandlung von Fehlern und Unsymmetrien	22
2.3 Wissenschaftliches Ziel	24
2.3.1 Analyse von unsymmetrischen Zuständen	24
2.3.2 Behandlung von unsymmetrischen Zuständen	25
2.4 Aufbau der Arbeit	25
2.5 Rahmen der Arbeit	26
3 Grundlagen	27
3.1 Beschreibung des grundlegenden Antriebssystems	27
3.2 Beschreibung des erweiterten Antriebssystems	29
3.3 Fehlertolerantes Antriebssystem	31
3.3.1 Fehlertoleranz durch alternatives Maschinendesign	32
3.3.2 Fehlertoleranz durch alternative Ansteuerungsverfahren	33
3.3.3 Weitere Ansätze zur Fehlertoleranz	34
3.3.4 Gewählte fehlertolerante Antriebsarchitektur	37
4 Allgemeine unsymmetrische Modellierung	43
4.1 Magnetisches Modell	43
4.1.1 Unterteilung des Magnetkreises in Sektoren	43
4.1.2 Erzeugung eines modularen numerischen Rechengitters	46
4.1.3 Berechnung der magnetischen Feldgrößen	52
4.1.4 Linearisierung und Leitwertmatrix	57
4.1.5 Kraft- und Drehmomenterzeugung	64
4.1.6 Modellierung der Wickelköpfe	68
4.1.7 Interpolation bei verschiedenen Rotorwinkeln	70
4.2 Elektrisches Modell	73

4.2.1	Arten von elektrischen Fehlern	74
4.2.2	Charakterisierung von elektrischen Fehlern.....	75
4.2.3	Verallgemeinerung des Widerstandsnetzwerks in drei Dimensionen	78
4.2.4	Mathematische Beschreibung des elektrischen Modells	84
4.2.5	Integration von Eisenverlusten	87
4.2.6	Grundlegende Wicklungs- und Schaltkonfigurationen.....	99
4.2.7	Weitere externe Beschaltungsmöglichkeiten	108
4.3	Wicklungsmatrix	109
4.3.1	Untersuchung der Nutstreuflüsse	110
4.3.2	Verschiedene Wicklungstypen.....	112
4.3.3	Erstellung der Wicklungsmatrix	116
4.4	Transientes thermisches Modell	120
4.4.1	Anforderungen und Vorgehensweise.....	121
4.4.2	Verwendete Modellbausteine	121
4.4.3	Parametrierbare Submodelle.....	123
4.4.4	Transientes thermisches Gesamtmodell.....	127
4.4.5	Einschränkungen und Näherungen	131
4.4.6	Sensitivitätsanalyse	131
4.5	Gesamtmodell	133
4.5.1	Zusammenfassung aller Gleichungen	133
4.5.2	Kopplung der untersuchten Domänen	135
4.5.3	Weitere Modellierungsdomänen	137
4.5.4	Berechnung der Zeitverläufe	139
4.6	Modellreduktion und Performance-Betrachtungen.....	145
4.6.1	Singulärwertzerlegung (SVD)	146
4.6.2	Reduzierte Beschreibung des Gesamtmodells	148
4.6.3	Diskussion der Ergebnisse	149
5	Simulation unsymmetrischer Betriebszustände	151
5.1	Gesunder Betriebszustand	151
5.1.1	Dreiphasige Maschine	151
5.1.2	Sechspannige Maschinen.....	152
5.1.3	Unsymmetrische Eigenschaften im gesunden Betriebsfall	153
5.1.4	Simulation der Gegen-EMK.....	156
5.1.5	Temperaturverläufe	156
5.2	Elektrische Fehler.....	157
5.2.1	Unterbrechungsfehler	157
5.2.2	Partieller Kurzschlussfehler	160
5.2.3	Fehler im Kabelbaum	163
5.2.4	Fehler im Umrichter	164
5.3	Magnetische Unsymmetrien	165
5.3.1	Defekter Magnet.....	165
5.3.2	Gestauchter Stator	167
5.3.3	Exzentrischer Rotor	168

5.3.4	Verminderte Leitfähigkeit in einem Statorzahn	168
5.3.5	Verminderte Leitfähigkeit in einem Abschnitt des Statorjochs.....	169
5.3.6	Vergleich von dreiphasiger und sechsphasiger Maschine	170
5.4	Weitere Simulationen	171
5.4.1	PWM-Speisung	171
5.4.2	Unsymmetrische Speisung	174
5.4.3	Kombinatorische Fehlersimulation.....	175
5.5	Zusammenfassung.....	176
6	Behandlung von unsymmetrischen Zuständen	177
6.1	Mathematische Grundbegriffe	177
6.2	Transformation der Maschinengleichungen in den Frequenzbereich	180
6.2.1	Bildung der Ableitung im Frequenzbereich	183
6.2.2	Varianten der Drehmomentberechnung im Frequenzbereich.....	184
6.2.3	Umformen der spektralen Spannungsgleichung	186
6.2.4	Auflösen nach dem spektralen Stromvektor	187
6.3	Untersuchung von Stromspektren	188
6.4	Untersuchung von Drehmomentspektren	196
6.4.1	Drehmomentspektrum in Abhängigkeit der Spannungsspektren	196
6.4.2	Ausgewählte Drehmomentspektren bei fester Spannungsspeisung	197
6.5	Optimaler Betrieb der Maschine im Fehlerfall	199
6.5.1	Feldorientierte Regelung (FOC)	200
6.5.2	Behandlung der unsymmetrischen Maschine durch dynamische Raumzeiger-Rekonfiguration (DRR).....	202
6.5.3	Berechnung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen	203
6.5.4	Durchführung der Optimierung	211
6.5.5	Erstellung von Kennfeldern für den spannungsgesteuerten Betrieb.....	215
6.5.6	Antriebsregelung mit integrierter DRR	217
6.5.7	Partielle Sicherheitsabschaltung.....	222
6.5.8	Ausblick: Erweitertes Antriebssystem mit Diagnosemöglichkeiten	223
6.6	Ergebnisse	226
6.6.1	Optimale unsymmetrische Spannungsspeisung	226
6.6.2	Vergleich des Regelkreisverhaltens mit DRR und FOC	233
6.6.3	Kennfeld-Untersuchungen.....	238
6.7	Zusammenfassung.....	246
6.8	Steigerung der temporären Fehlertragfähigkeit durch lokale Designänderung	247
6.8.1	Grundlegender Ansatz.....	247
6.8.2	Definition des Optimierungsproblems	250
6.8.3	Durchführung der transienten thermischen Optimierung.....	250
6.8.4	Ergebnisse der Optimierung	253
7	Prüfstandsaufbau und Messungen	257
7.1	Spezialmaschine zur Injektion und Erfassung von Fehlerzuständen.....	257

7.2	Weitere Spezialhardware.....	263
7.2.1	Zubehör zur Fehlerinjektion und Ansteuerung der E-Maschine	263
7.2.2	Zubehör zur Verarbeitung der Sensorsignale	266
7.3	Vollautomatisierte Test- und Messumgebung	267
7.3.1	Implementierung der Antriebsregelung	267
7.3.2	Darstellung von Umwelteinflüssen	268
7.3.3	Gesamter Prüfstands Aufbau.....	269
7.4	Definition von Missionsprofilen und Testprozeduren.....	272
7.5	Messungen.....	275
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	277
8.1	Zusammenfassung der bisherigen Arbeiten	277
8.2	Zukünftige Arbeiten	279
Anhang.....	281
A.1	Separationsansatz für partielle Differentialgleichungen	281
A.2	Berechnungsvorschriften für thermische Elemente.....	281
A.2.1	Längen	281
A.2.2	Kontaktflächen.....	282
A.2.3	Volumina	282
A.3	Verluste	283
A.4	Thermische Widerstände.....	283
A.5	Kompensationselemente	286
A.6	Thermische Kapazitäten	288
A.7	Sonstige thermische Berechnungen	288
A.8	Tabellen zum thermischen Modell	288
A.9	Validierung des thermischen Modells mit FEM-Berechnung	290
A.10	Tabellen zur E-Maschine	293
Abbildungsverzeichnis	297
Tabellenverzeichnis	303
Literaturverzeichnis	305