

Elektromagnetische Auslegung einer Synchronmaschine für den Einsatz in Direktantrieben und im Bereich der Sicherheitskleinspannung für Elektrofahrzeuge

Von der Fakultät für
Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Kassem Roumani
aus Deir Al Zahrani

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Soter

Tag der mündlichen Prüfung: 11. November 2022

Wuppertaler Schriftenreihe zu Elektromobilität und
Energiespeichersystemen

Band 4

Kassem Roumani

**Elektromagnetische Auslegung einer
Synchronmaschine für den Einsatz in Direktantrieben
und im Bereich der Sicherheitskleinspannung
für Elektrofahrzeuge**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9009-3

ISSN 2628-2003

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

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektromobilität und Energiespeichersysteme der Bergischen Universität Wuppertal und Stipendiat des Avicenna-Studienwerkes entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich beim Avicenna-Studienwerk für die ideelle und finanzielle Förderung während meiner Promotion ganz herzlich bedanken.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling spreche ich für die exzellente Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die wissenschaftlichen Freiheiten, die mir während meiner Tätigkeiten gegeben wurden, meinen herzlichen Dank aus.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Stefan Soter, Leiter des Lehrstuhls für elektrische Maschinen und Antriebe, für die Übernahme des Korreferates. Durch seine konstruktive Kritik und Fachwissen hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ich möchte mich außerdem bei allen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Elektromobilität und Energiespeichersysteme bedanken. Insbesondere bei Dr.-Ing. Heiko Fechtner für die vielen fachlichen Diskussionen und für die Unterstützung bei der Finalisierung der Dissertation, bei Dipl.-Ing. Daniel Vierling für die Unterstützung bei allen IT-Fragen und bei Dr.-Ing. Sarp Güney Cimen für den informativen Austausch und die interessanten Gespräche.

Kurzfassung

Der Fokus der Arbeit liegt auf die Entwicklung einer Synchronmaschine für den Einsatz in Direktantrieben und im Bereich der Sicherheitskleinspannung von max. 60 V für Elektrofahrzeuge. Dabei soll das betrachtete Fahrzeug mit vier Motoren angetrieben werden. Durch den begrenzten Bauraum in der Felge wird die Technologie des Außenläufermotors mit Permanentenerregung und Zahnspulenwicklung verwendet. Die Bewertung der Wicklungen erfolgt auf Basis von charakteristischen Kenngrößen, wie z. B. der Wicklungsfaktor und die Oberfeldstreuiziffer, die in dieser Arbeit abgeleitet und zusammengefasst werden. Für eine fahrzyklusgerechte Auslegung des Antriebs wird der standardisierte *WLTC*-Zyklus betrachtet. Daraus ergibt sich eine maximale Leistung von 20 kW für jeden der vier Motoren. Durch die geringe Spannung resultiert sich eine geringe Windungszahl und eine kleine Induktivität. Der daraus resultierende Kurzschlussstrom kann den Speisestrom um das Vielfache übersteigen. Diese Belastung kann die Permanentmagnete teilweise oder vollständig entmagnetisieren. Ein Maschinendesign mit geringem Kurzschlussstrom und hoher Entmagnetisierungsfestigkeit soll entworfen werden. Unterschiedliche Maschinentopologien werden mit der finiten Elemente Methode berechnet und bewertet. Die ausgelegten Maschinen werden anhand des Energieverbrauches, des Zykluswirkungsgrades und der Entmagnetisierungsfestigkeit der Magnete bewertet und miteinander verglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anwendungsbeispiele	1
1.2	Motivation	6
1.3	Stand der Technik	7
1.3.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschine	9
1.3.2	Gleichstrommaschine mit Luftspaltwicklung	12
1.3.3	Geschaltete Reluktanzmaschine	12
1.4	Aufgabenstellung	13
1.5	Methodisches Vorgehen	14
2	Anforderungen	15
2.1	Fahrzyklus	15
2.2	Bedarfskraft	16
2.2.1	Luftwiderstand	17
2.2.2	Rollwiderstand	18
2.2.3	Beschleunigungswiderstand	18
2.2.4	Steigungswiderstand	19
2.3	Fahrzeug	20
2.4	Bedarfsdrehmoment	20
2.5	Berechnung des Energieverbrauches	22
3	Modellbildung der Synchronmaschine mit Permanentmagneten	27
3.1	Funktionsweise	27
3.2	Luftspaltinduktion	32
3.3	Induzierte Spannung	35
3.4	Phasenwiderstand	36

3.5	Wicklungsinduktivitäten	36
3.5.1	Hauptinduktivität	37
3.5.2	Streuinduktivität der Unter- und Oberwellen	38
3.5.3	Nutstreuinduktivität	38
3.5.4	Zahnkopfstreuinduktivität	39
3.5.5	Wickelkopfstreuinduktivität	40
3.6	Betriebsverhalten	40
4	Verluste	43
4.1	Kupferverluste	43
4.1.1	Wirbelstromverluste durch Skin- und Proximity-Effekt	45
4.1.2	Wirbelstromverluste durch Kreisströme	48
4.2	Ummagnetisierungsverluste im Elektroblech	51
4.3	Wirbelstromverluste in den Magneten	54
5	Auswahlkriterien von Nutenzahl und Polzahl für Zahnspulenwicklungen	57
5.1	Eigenschaften von Zahnspulenwicklungen	57
5.1.1	Entwurf von Zahnspulenwicklungen	59
5.1.2	Luftspaltfelderanalyse	62
5.1.3	Berechnung des Wicklungsfaktors	64
5.1.4	Berechnung der Oberfeldstreuzyiffer	65
5.2	Kriterien für die Wahl der Nuten- und Polzahl	66
5.2.1	Wicklungsfaktor	67
5.2.2	Oberfeldstreuzyiffer	68
5.2.3	Radialkräfte und Biegeverformung	69
5.2.4	Einfluss auf die relativen Frequenzen	72
5.2.5	Einfluss auf das Rastmoment	73
5.2.6	Einfluss auf den modularen Aufbau	74
5.3	Vorauswahl der Nuten- und Polzahl für den Direktantrieb	75

6	Numerisch basierte Auslegung	81
6.1	Numerische Methode	81
6.2	Auslegung im Bemessungspunkt	82
6.2.1	Auslegung der Wicklungen	82
6.2.2	Windungszahl	85
6.2.3	Verschaltung der Wicklungen	86
6.2.4	Aufbau von reduzierten Maschinenschnitten	89
6.2.5	Nutfüllfaktor	91
6.2.6	Dimensionierung der Nuten	92
6.2.7	Bemessungsstrom	93
6.2.8	Nutschlitzbreite	94
6.2.9	Polbedeckungsfaktor und Magnethöhe	98
6.2.10	Luftspaltbreite	99
6.2.11	Bohrungsdurchmesser	100
6.2.12	Bewertung der Nuten- / Polzahlkombinationen	102
6.2.13	Parallelfankige Nuten	108
6.3	Berechnung des Kurzschlussstroms	111
6.4	Feldschwächung	113
6.4.1	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	114
6.4.2	Erhöhung der Drehzahlspitzung	115
6.5	Ergebnisse	123
6.5.1	Finale Geometrien der ausgelegten Maschinen	123
6.5.2	Dreiphasiger Stoßkurzschluss	126
6.5.3	Wirkungsgradkennfelder	126
6.5.4	Energieverbrauch	128
6.5.5	Überprüfung der Entmagnetisierungsfestigkeit	134
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1	Zusammenfassung	137
7.2	Ausblick	140

A Anhang	141
A.1 Fahrzyklen	141
A.2 Maschinengeometrien	142
A.3 Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder	147
A.4 Verwendetes Magnetmaterial	152
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellensverzeichnis	158
Abkürzungen und Formelzeichen	160
Literaturverzeichnis	169