



Konzentration des Permanentmagnetflusses durch Segmentierung des Stators am Beispiel einer Axialflussmaschine in TORUS-Bauart

Jakob Jung

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Promotionskommission:

Vorsitzender: Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Marschner (TU-Dresden)

Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. Hofmann (TU-Dresden)

Herr Prof. Dr.-Ing. Hahn (Friedrich-Alexander-
Universität Erlangen-Nürnberg)

Herr Dr. Dr.-Ing. Jacobs (TU-Dresden)

Tag der Einreichung: 05.07.2016

Tag der Verteidigung: 22.02.2017

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und
Antrieben

Band 9

Jakob Jung

**Konzentration des Permanentmagnetflusses durch
Segmentierung des Stators am Beispiel einer
Axialflussmaschine in TORUS-Bauart**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5153-7

ISSN 1869-8190

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

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter entstand. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche gekennzeichnet. Bei der Korrektur des Manuskripts erhielt ich Unterstützung durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann.

Dresden, den 05.07.2016

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner mehr als fünfjährigen Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe an der Technischen Universität Dresden. Zum überwiegenden Teil stand meine Tätigkeit im Zusammenhang mit einem Industrieprojekt, dessen Ziel die Entwicklung eines elektrisch angetriebenen Zweirades (genannt Pedelec) war. Das Vorhaben deckte die Bereiche Motorentwicklung, hard- und softwareseitiger Entwurf der Steuerung sowie Nebenaspekte zu Sensorik und Systemintegration ab.

Besonderheiten in der Vorgehensweise ergaben sich aus der Tatsache, dass auf einem Pedelec Mensch und elektrische Maschine gemeinsam einen Hybridantrieb bilden. Zahlreiche Details, wie Geräusche, Vibrationen und Regelverhalten, mussten daher nicht nur fachlich korrekt, sondern auch im Einklang mit der subjektiven Wahrnehmung des Fahrers behandelt werden. Insgesamt gewährte mir das Projekt wertvolle Einblicke in die noch relativ junge Branche der elektrifizierten Leichtfahrzeuge.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann für den fachlichen und persönlichen Betreuungsaufwand sowie die Schaffung der Rahmenbedingungen, die mir stets eine Konzentration auf die jeweilige Aufgabenstellung ermöglichten. Darüber hinaus bin ich dankbar, Teil eines engagierten und dynamischen Kollegiums gewesen zu sein, mit dem die Zusammenarbeit zugleich erfolgreich und angenehm verlief.

Weiterhin möchte ich Frau Söhner-Bilo und Herrn Söhner für ihr außerordentliches Engagement im Bereich der Elektromobilität danken. Ihre Investitionen legten den Grundstein für mein Promotionsvorhaben. Ohne ihren Glauben an den sich letztlich einstellenden Erfolg während schwieriger Projektphasen wäre diese Arbeit nie entstanden.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, meinen Schwestern sowie meiner lieben Frau Livia bedanken, die sich in den vergangenen Monaten überproportional um unseren kleinen Sohn gekümmert hat.

Dresden, im Herbst 2015

Jakob Jung

Kurzfassung

Im Gegensatz zur stockenden Elektrifizierung bei Personenkraftwagen schreitet die Verbreitung leichter Elektrofahrzeuge, insbesondere Pedelecs, stetig voran. Besondere Bauraumsituationen sowie geringe Budgets für die E-Maschine verlangen neue Ansätze für eine kosteneffiziente Motorfertigung. Durch Modularisierung des Statoraufbaus gelingt es, die Fertigung von Teilkomponenten zu dezentralisieren. Bis zum Zeitpunkt des Zusammenfügens liegen die Bestandteile als leicht handhabbare Kleinteile vor, wodurch sich Transport, Lagerung sowie Fertigungsprozesse vereinfachen. Der Einsatz des Kunststoffspritzgießens ermöglicht es, einzelne Weicheisensegmente aus SMC mechanisch belastbar miteinander zu verbinden. Die Segmente müssen sich dabei nicht berühren, sondern können durch kleine Spalte voneinander getrennt sein. Ein modularer Aufbau mit voneinander getrennten Statorsegmenten führt zu elektromagnetischen Besonderheiten, die sich vorteilhaft auf das Betriebsverhalten auswirken können. Am Beispiel der TORUS-N-N-Maschine mit H-Segmenten wird gezeigt, dass zwischen den H-Segmenten eingefügte Spalte eine Konzentration des PM-Flusses durch die Spulen bewirken. Mit steigender Ausprägung dieses Effektes sinkt die erforderliche Strangwindungszahl, da sich der pro Windung umfasste PM-Fluss vergrößert. Bei gleichbleibendem Abgabedrehmoment verringern sich folglich der Strangwiderstand und damit die Stromwärmeverluste.

Der theoretische Teil der Arbeit beinhaltet die analytische Modellierung der Drehmomentbildung sowie der Statorverluste, die sich aus Eisen- und Stromwärmeverlusten zusammensetzen. Da es sich bei der betrachteten TORUS-N-N-Bauart um eine Vollpolmaschine handelt, sind die Stromwärmeverluste proportional zum Quadrat des abgegebenen Drehmoments und dem Kupferverlustkoeffizienten. Eine Segmentierung mit voneinander getrennten Statorsegmenten beeinflusst den Kupferverlustkoeffizienten in zweierlei Hinsicht. Erstens führt das Einfügen der Spalte sowie die Verstärkung des Statorjochs zu einer verringerten Nutfläche, wodurch sich der Strangwiderstand zunächst vergrößert. Zweitens bewirkt die PM-Flusskonzentration eine Vergrößerung des Spulenfaktors und die damit verbundene Reduktion der Strangwindungszahl. Am Beispiel der Lochzahlen $q = 1/5$ und $q = 1/7$ wird analytisch nachgewiesen, dass ein optimales Spaltmaß größer Null existiert. Die Arbeit endet mit der Vorstellung eines Prototypen, der mit der Lochzahl $q = 3/16$ aufweist. Im Verlauf der Untersuchungen zeigen sich fertigungstechnische und konstruktive Einflüsse, welche wichtige Erkenntnisse zur praktischen Realisierbarkeit derartiger Maschinen liefern. In Bezug auf die PM-Flussverkettung, welche den Grad der Flusskonzentration zum Ausdruck bringt, ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung.

Abstract

In contrary to the stagnating electrification of passenger cars, the market development of light electrical vehicles and especially Pedelecs is steadily increasing. Special space situations and low budgets for the E-machine require new approaches for a cost-efficient engine production. By modularization of the stator structure, it is possible to decentralize the production of subcomponents. Up to the time of assembling the components appear as small parts, which allow an easy handling. This reduces the cost of transport, storage and production processes. The use of plastic injection moulding allows to combine individual soft iron segments made of SMC. Nowadays construction plastics have reached a considerable mechanical resilience. Therefore the plastic itself is capable of holding the SMC parts together. In other words, the SMC segments do have to be in contact with each other. By introducing small air gaps between the soft iron parts special electromagnetic effects occur. Those might have an advantageous effect on the operating behaviour. Using the example of the TORUS-NN-machine with H-segments, it is shown that the insertion of small air gaps between the H-segments causes a concentration of the PM-flux through the coils. As a consequence, a smaller number of turns per phase is needed. Therefore the machine produces less copper losses, while the output torque is maintained.

The quantitative analysis includes the analytical modelling of the torque production and the stator losses, which are composed of iron and copper losses. Since the regarded TORUS-NN-type is non-salient, the Joule losses are proportional to the square of the output torque and the copper loss coefficient. A stator segmentation including small air gaps between the soft iron parts affects the copper loss coefficient in two ways. Firstly, the gaps reduce the slot area and therefore cause an increase of the phase resistance. Secondly, the winding factor becomes greater than one. Using the example of $q = 1/5$ and $q = 1/7$ slots per phase and pole, it is analytically shown that there is an optimum gap width greater than zero. The work ends with the presentation of a prototype, which has $q = 3/16$ slots per pole and phase. During the course of the investigations, several influences arising from manufacturing and construction occur. Those observations reveal important insights into the practical feasibility of that machine type. Regarding the PM flux linkage, which expresses the grade of flux concentration, there is a good agreement between calculation and measurement.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	IV
1. Einleitung	1
1.1 Kontext der Aufgabenstellung.....	1
1.2 Zielstellung.....	3
1.3 Struktur der Arbeit.....	4
2. Anforderungen an einen Pedelec-Mittelantrieb	6
2.1 Vorstellung des Antriebssystems.....	6
2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen	8
2.3 Modellierung der mechanischen Strecke	9
2.3.1 Formulierung der Bewegungsgleichung.....	9
2.3.2 Stationärer Leistungsbedarf.....	10
2.3.3 Drehmomentanforderung im dynamischen Betrieb.....	11
2.4 Zusammenstellung der Anforderungen.....	14
3. Grundschwingungsmodell der permanenterregten Synchronmaschine	15
3.1 Spannungsgleichungen und elektromagnetisches Drehmoment.....	15
3.2 Einfaches Auslegungskriterium für langsam drehende Motoren	17
3.3 Festlegung einer Drehmoment-Drehzahl-Grenzkennlinie.....	17
4. Motivation und grundlegende Ansätze für eine Statorsegmentierung	22
4.1 Kennzeichen der Modularen Permanentmagnet-Synchronmaschine.....	22
4.2 Radialflussmaschinen mit voneinander getrennten Statorsegmenten	25
4.2.1 U-förmige Statorsegmente mit Zahn- oder Jochspulen.....	25
4.2.2 E-förmige Statorsegmente mit Zahnpulen.....	26
4.3 Anwendung des Modularisierungsansatzes auf Axialflussmaschinen.....	28
4.4 Axialflussmaschinen mit voneinander getrennten Statorsegmenten	30
4.5 Idee für ein neuartiges Segmentierungskonzept.....	30
5. Charakterisierung der Materialien und des Fertigungsverfahrens	34
5.1 Eigenschaften weichmagnetischer Pulververbundwerkstoffe	34
5.1.1 Benennung wesentlicher Unterschiede zu Elektroblech.....	34
5.1.2 Herstellung von SMC-Formteilen.....	36
5.2 Permanentmagnete aus Seltenen Erden.....	36
5.2.1 Grundlegende Materialeigenschaften.....	36
5.2.2 Magnetkreise mit Permanentmagneten	38
5.3 Mechanische Fixierung der Statorelemente	40
5.3.1 Formulierung der Anforderungen.....	40
5.3.2 Einsatz von Kunststoff als Konstruktions- und Füllmaterial	41
5.3.3 Erläuterung des Fertigungsverfahrens	42
6. Modellierung der permanenterregten Axialflussmaschine	44
6.1 Aufbau, Besonderheiten und Einsatzgebiete	44
6.2 Betrachtung der radialen Statorgeometrie	45
6.3 Berechnung des elektromagnetischen Drehmoments.....	48
6.3.1 Drehmoment als Funktion der Feldgrößen im Luftspalt.....	48
6.3.2 Spezifizierung der Berechnungsvorschrift durch Einführung des Strombelags	50
6.3.3 Drehmoment als Funktion der PM-Flussverkettung.....	53
6.4 Topologien auf Basis mehrerer Hauptelemente	53
6.5 Eigenschaften der TORUS-Bauart	54

6.5.1	Auswirkung der reduzierten Kühlfläche.....	55
6.5.2	Bewicklungsmöglichkeiten	56
6.5.3	Anpassung der analytischen Berechnungsgrundlagen.....	58
6.6	Volumetrische Drehmomentdichte der TORUS-Maschine.....	60
7.	Vergleich der segmentierten TORUS-Bauarten bezüglich der Statorverluste	64
7.1	Berechnung des Drehmoments bei Maschinen mit voneinander getrennten Statorsegmenten	64
7.1.1	TORUS-N-S-Typ ohne Statorjoch.....	64
7.1.2	TORUS-N-N-Typ mit H-Segmenten	67
7.2	Analytische Berechnung des Strangwiderstands.....	68
7.3	Kupferverluste als Funktion von Stromdichte und -belag	70
7.4	Allgemeine Berechnungsvorschrift für den Kupferverlustkoeffizienten	70
7.5	Spezifizierung des Kupferverlustkoeffizienten für die segmentierte TORUS-N-S-Maschine	71
7.6	Spezifizierung des Kupferverlustkoeffizienten für die TORUS-N-N-Maschine mit H-Segmenten	72
7.6.1	Bestimmung von Nutfläche und mittlerer Windungslänge	72
7.6.2	Ermittlung des optimalen Verhältnisses von Innen- zu Außenradius	74
7.6.3	Ermittlung optimaler Außenabmessungen bei konstantem Volumen	75
7.7	Gegenüberstellung der Kupferverlustkoeffizienten	76
7.8	Analytische Annäherung der Eisenverluste	78
7.8.1	Berechnungsgrundlagen	78
7.8.2	Eisenverluste der segmentierten TORUS-N-S-Maschine.....	80
7.8.3	Eisenverluste der TORUS-N-N-Maschine mit H-Segmenten	81
7.8.4	Gegenüberstellung der Eisenverluste	83
7.9	Gegenüberstellung der Statorverluste	84
8.	Quantifizierung des Segmentierungseinflusses mit Hilfe zweidimensionaler Modellierung	86
8.1	Grundsätzliches Vorgehen und Zielstellungen	86
8.2	Einschränkung der zweidimensionalen Modellgeometrie	87
8.3	Darstellung von Anker- und Polradfeld als Fourier-Reihen	89
8.4	Erläuterung des Wicklungsfaktors und dessen Bedeutung für das Betriebsverhalten	92
8.4.1	Ermittlung des Wicklungsfaktors bei vorgegebener Feldwelle und unbestromter Wicklung	92
8.4.2	Ermittlung des Wicklungsfaktors bei vorgegebener Nutdurchflutung und ausgeblendetem Polradfeld.....	94
8.4.3	Quantifizierung des Segmentierungseinflusses anhand des Spulenfaktors	96
8.4.4	Einfluss des Wicklungsfaktors auf das Betriebsverhalten	96
8.5	Ermittlung des Spulenfaktors im unsegmentierten Fall und bei idealer Segmentierung.....	98
8.5.1	Spulenfaktor bei unsegmentiertem Statoreisen	98
8.5.2	Spulenfaktor bei idealer H-Segmentierung	99
8.5.3	Auswirkung auf das Durchflutungsspektrum	101
8.6	Berechnung des Spulenfaktors als Funktion des Spaltmaßes mit Hilfe von Reluktanznetzwerken ..	104
8.7	Ermittlung eines optimalen Spaltmaßes in Bezug auf den Kupferverlustkoeffizienten	108
9.	Vorstellung des Prototypen	112
9.1	Erläuterung des Prüfstandes	113
9.2	Fremdantriebsmessung	114
9.2.1	Aufzeichnung der Polradspannungen.....	115
9.2.2	Schleppverluste	116
9.2.3	Rastmomente	119
9.3	Lastversuche	123
9.3.1	M-n-Grenzkennlinie und Drehmomentcharakteristik.....	123
9.3.2	Bestimmung der PM-Flussverketzung	125
9.3.3	Bestimmung der Querinduktivität.....	126

9.3.4	<i>Wirkungsgradkennfeld</i>	127
9.4	Abschließende Bewertung der realisierten PM-Flusskonzentration	131
9.4.1	<i>Auswertung der analytischen Berechnungsvorschrift</i>	131
9.4.2	<i>Analytische Berechnung der PM-Flussverkettung auf Basis von 2D-Betrachtungen auf mehreren Bezugsebenen</i>	132
9.4.3	<i>Berechnung der PM-Flussverkettung mit Hilfe eines zweidimensionalen FE-Modells auf mehreren Bezugsebenen</i>	134
9.4.4	<i>Vergleich von Rechnung und Messung</i>	135
10.	Zusammenfassung	139
	Literaturverzeichnis	142
A1	Transformation der Spannungsbeziehungen auf rotorfestes Koordinatensystem	148
A2	Transformation des Maxwell'schen Spannungstensors auf Zylinderkoordinaten	151
A3	Parametrisierung der N-N-Torus-Maschine mit H-Segmenten	152
A4	MATLAB-Skript zur Bestimmung des Zonenfaktors einer dreisträngigen symmetrischen Drehstromwicklung	155
A5	Lochzahlen und Wicklungsfaktoren für die N-N-Maschine mit H-Segmenten	157
A6	Angaben zu Versuchsmaschine und Prüfstand	161
	Abbildungsverzeichnis	163
	Tabellenverzeichnis	167
	Lebenslauf Jakob Jung	169