

Jiawei He

Hochtourige Antriebskonzepte für Strömungsmaschinen in PM-Synchrontechnik

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 19

**SHAKER
VERLAG**



Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

Hochtourige Antriebskonzepte für Strömungsmaschinen in PM-Synchrontechnik

Vom Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der
Technische Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

M. Sc. Jiawei He
geboren in Fujian

Datum der mündlichen Prüfung: 29.06.2020

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
 2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Götz
- Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Daniel Görges

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 19

Jiawei He

**Hochtourige Antriebskonzepte für
Strömungsmaschinen in PM-Synchrontechnik**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7642-4

ISSN 1866-5357

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

Inhaltsverzeichnis

0.1	Schreibweise der Formelzeichen	vii
0.2	Symbolverzeichnis	vii
1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	2
2	Mögliche Konzepte für hochtourige Antriebe	5
2.1	Geeigneter Motortyp	5
2.2	Feldorientiert betriebene PMSM	8
2.3	Sinusstrombetrieb	9
2.4	Möglichkeiten der Motorausführung	11
2.5	Kriterien für die Bewertung der Konzepte	15
2.6	Bewertung der Motorkonzepte	17
2.6.1	Festlegung auf vier Motorkonzepte	17
2.6.2	Einsatz von SMC-Materialien für Motorkonzepte mit Luftspaltwicklung	20
2.6.3	Weitere Festlegung auf das Grundmotorkonzept	26
3	Detaillausführung des gewählten Motorkonzeptes	28
3.1	Ständeraufbau	28
3.1.1	Geblechtes Ständerpaket	28
3.1.2	Neuartiges Ständeraktivteil aus SMC-Materialien	29
3.1.3	Wicklungssystem	31
3.2	Läuferaufbau	37
3.2.1	Hartmetallhohlwelle	37
3.2.2	Permanentmagnet	38

4	Analytische Modellierung und Simulation	41
4.1	Modellansatz und Algorithmus	41
4.2	Bestimmung der Luftspaltinduktion	43
4.2.1	Bestimmung des permanentmagnetenerregten Luftspaltfeldes	44
4.2.2	Bestimmung des durch den Ständerstrom erzeugten Luftspaltfeldes	57
4.3	Thermische Modellierung	60
4.4	Umrichterspeisung	65
4.5	Stationäres Betriebsverhalten	69
4.5.1	Ersatzschaltbild und Leistungsbilanz	69
4.5.2	Berechnung von Strangwiderstand und Drehfeldinduktivität	70
4.5.3	Berechnung von EMK und PM-Flussverkettung	72
4.5.4	Berechnung des Drehmoments	73
4.5.5	Wirkungsgrad- und Verlustberechnung	74
4.6	Simulationstool	84
5	Vergleich der analytischen Simulation mit der FEM-Berechnung	88
5.1	Grundlagen der FEM-Berechnung	88
5.2	Modellbildung in ANSYS Maxwell 2D	90
5.2.1	Motorgeometrie	90
5.2.2	Materialdaten	91
5.2.3	Randbedingungen und Erregung	93
5.2.4	Vernetzung	95
5.2.5	Setup und Post-Processing	97
5.3	Vergleich zwischen FEM-Simulationen und analytischer Berechnung	98
5.3.1	Luftspaltinduktion	98
5.3.2	Inneres Drehmoment und Verluste im Lastfall	99
6	Funktionsmusterentwurf und Musterbau	102
6.1	Entwurf von Funktionsmuster <i>FM-A</i>	103
6.1.1	Ständer	103
6.1.2	Läufer	103

6.2	Optimierte Auslegung von Funktionsmuster <i>FM-A</i>	104
6.3	Funktionsmusterbau	106
6.3.1	Gewählter Ständeraufbau des 6-nutigen Motorkonzeptes	106
6.3.2	Gewählter Läuferaufbau des 6-nutigen Motorkonzeptes	108
6.3.3	Zusätzlicher Ständeraufbau	110
6.4	Musterträger	112
7	Versuchsaufbau für die technische Erprobung	117
7.1	Aufbau des Prüfstands	117
7.2	Frequenzumrichter	118
7.3	Lastmaschine	119
7.4	Berechnungsblatt	120
8	Experimentelle Erprobung im direkten Vergleich zur Berechnung	121
8.1	Messprogramm	121
8.2	Messung der Luftspaltinduktion	121
8.3	Widerstands- und Induktivitätsmessung	123
8.4	Leistungsmessung	124
8.5	Auslaufmessung	125
8.5.1	Bestimmung der Reibungsverluste	125
8.5.2	Bestimmung der Ummagnetisierungsverluste im Leerlauf	126
8.6	Leerlaufmessung zur Bestimmung der EMK	128
8.7	Vermessung der Funktionsmuster im stationären Betrieb	133
8.7.1	Messung der Motortemperaturen	133
8.7.2	Ummagnetisierungsverluste im Lastfall	135
8.7.3	Ermittlung des Drehmoments	135
8.7.4	Vermessung der S1-Kennlinien	137
8.7.5	Bestimmung des Wirkungsgrades	140
9	Zusammenfassung	144
A		147
A.1	Hauptabmessungen des Basismotors	147
A.2	Die erste Konzeptbewertung	148
A.3	Die endgültige Konzeptbewertung	151

A.4 Elektrische Leitfähigkeit des Hartmetalls	154
A.5 Motorette	156
A.6 Relative magnetische Permeabilität des verwendeten SMC-Materials	159

0.1 Schreibweise der Formelzeichen

Augenblickswerte und Konstante haben keine besondere Kennzeichnung.

Vektoren und Matrizen sind fett geschrieben, wie $\mathbf{u}_1$.

Komplexe Größe werden unterstrichen, wie $\underline{i}_{1m}$.

Amplituden von Sinusgrößen erhalten $\hat{}$, wie $\hat{B}_p$.

Mittelwert erhalten $\bar{}$, wie $\bar{B}$.

0.2 Symbolverzeichnis

Formelzeichen

a	Parallelzweig der Ständerwicklung
b	Induktionsverteilung
b_S	Nut Schlitzbreite
B	magnetische Induktion
B_r	magnetische Remanenz
$B \cdot H$	Energieprodukt
d	Wandstärke
D	Durchmesser
H	magnetische Feldstärke, Härte
H_{cB}	magnetische Koerzitivfeldstärke
$\underline{I}_1$	Strangstrom des einphasigen Ersatzschaltbildes
k_E	Spannungskonstante
k_T	Drehmomentkonstante
K_R	Stromverdrängungskoeffizient des Widerstands
L	Länge, Induktivität
m_1	Strangzahl des Ständers
M_{mech}	Wellendrehmoment
M_i	inneres Drehmoment
n	Motordrehzahl
N_1	Nutzahl des Ständers
p	Polpaarzahl

P	Wirkleistung
q	Lochzahl
Q	Blindleistung
r	Radius
R	Radius, Widerstand
S	Scheinleistung
T_{max}	max. Einsatztemperatur
T_C	Curie-Temperatur
T_G	Glasübergangstemperatur
T_S	Schmelztemperatur
u_U	Strangspannung der Phase U
u_{UV}	verkettete Spannung zwischen Phase U und Phase V
U_{Nul}	Nutumfangslänge
U_{ZW}	Zwischenkreisspannung
$\underline{U}_1$	Strangspannung des einphasigen Ersatzschaltbildes
$\underline{U}_p$	Polradspannung des einphasigen Ersatzschaltbildes
V_m	magnetisches Spannungspotential
W	Spulenweite
W_1	Windungszahl pro Ständerstrang
Z_S	Strangwindungszahl
α	Strombelag, Wärmeübergangskoeffizient, Temperaturkoeffizient
γ	mechanischer Drehwinkel zwischen Ständerstrang und Läuferstrang
δ	Eindringtiefe
δ_{geo}	geometrischer Luftspalt
θ	Phasenversatz
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	Luftspaltleitwert, Wärmeleitwert
μ_0	Vakuumpermeabilität
μ_r	relative Permeabilität
ν	Drehfeldpolpaarzahl
ξ	Wicklungsfaktor der Ständerwicklung
ξ_N	Nutslitzfaktor der Ständerwicklung
ξ_S	Sehnungsfaktor der Ständerwicklung

ξ_Z	Zonungsfaktor der Ständerwicklung
ρ	Dichte, elektrischer Widerstand
σ	Streuung, Streuziffer
σ_B	Bruchspannung
τ_p	Polteilung
Ψ_{PM}	PM-Flussverkettung
$\underline{\psi}_1$	Flussverkettung des Ständers
φ	Phasenwinkel
Ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

0	Leerlauf
<i>ab</i>	abgegeben
<i>AP</i>	Arbeitspunkt
<i>ASM</i>	Asynchronmotor
<i>B</i>	Bandage, Bohrung
<i>Cu</i>	Kupfer
<i>dv</i>	doppelt verkettet
<i>DZSP</i>	Doppel-Zahnsulenwicklung
<i>EMK</i>	Elektromotorische Kraft
<i>Fe</i>	Eisen
<i>geo</i>	Geometrie
<i>GSM</i>	Gleichstrommotor
<i>H</i>	Hysteresis
<i>h</i>	Haupt
<i>HW</i>	Hohlwelle
<i>L</i>	Last
<i>Lager</i>	Lager
<i>LPTM</i>	Lumped Parameter Thermal Modelling
<i>m</i>	mittel
<i>mag</i>	magnetisch
<i>mech</i>	mechanisch
<i>Mot</i>	Motor

<i>N</i>	Bemessung, Nut
<i>p</i>	Grundfeld-Polpaarzahl
<i>PAM</i>	Puls-Amplituden-Modulation
<i>PM</i>	Permanentmagnet
<i>PMSM</i>	permanent magnet erregter Synchronmotor
<i>PWM</i>	Puls-Weiten-Modulation
<i>r</i>	radial, relativ
<i>res</i>	resultierend
<i>S</i>	Spule
<i>SMC</i>	weichmagnetische Pulververbundwerkstoffe
<i>St</i>	Stirn
<i>SYM</i>	Synchronmotor
<i>W</i>	Wicklung
<i>WK</i>	Wickelkopf
<i>ZSP</i>	Zahnspulenwicklung
<i>ZW</i>	Zwischenkreis