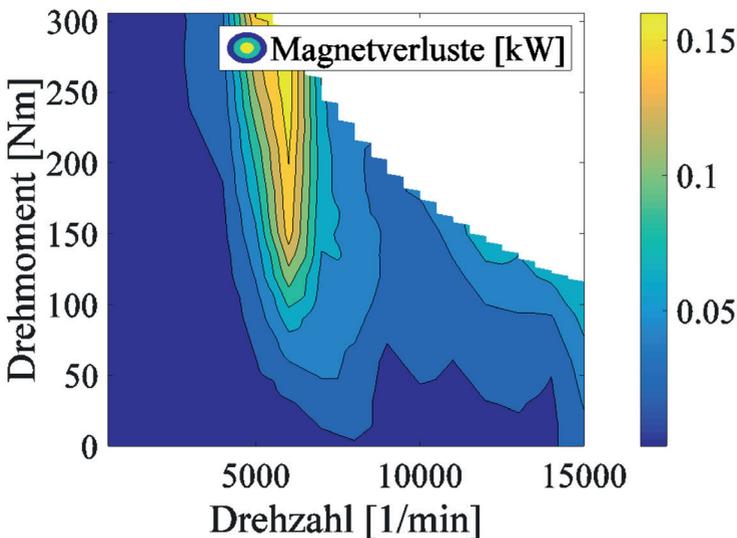


Forschungsberichte**Elektrische Antriebstechnik und Aktorik**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Sven Luthardt**Berücksichtigung der Pulswechsel-
richtereinflüsse bei der Berechnung
hochperformanter elektrischer Maschinen**

Berücksichtigung der Pulswechselrichtereinflüsse bei der Berechnung hochperformanter elektrischer Maschinen

Sven Luthardt

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. Ralph Kennel

Die Dissertation wurde am 26.10.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 15.11.2017 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 05.11.2018 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 36

Sven Luthardt

**Berücksichtigung der Pulswechselrichtereinflüsse
bei der Berechnung hochperformanter
elektrischer Maschinen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6350-9

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Vorentwicklung Triebstrang und Elektrifizierung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG am Standort Weissach. Den Kollegen am Standort gilt mein Dank. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle den Leiter der Vorentwicklung Triebstrang und Elektrifizierung Herrn Dr.-Ing. Axel Heitmann, der es mir ermöglichte diese Arbeit zu schreiben und mir den nötigen Freiraum im täglichen Geschäft einräumte. Ein sehr großer Dank geht an meinen Betreuer Herrn Dr.-Ing. Stefan Schmitz, der durch sein großes Engagement, seine Diskussionsbereitschaft und das Einbringen neuer Gedankenansätze entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Den übrigen Kollegen des Teams möchte ich für die schöne Zeit danken.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Gerling möchte ich für die Übernahme des Referats und das Interesse an der vorliegenden Arbeit danken. Danke sagen möchte ich auch für die freundlichen und unkomplizierten Treffen und die engagierte Lösung diverser Angelegenheiten.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ralph Kennel danke ich ebenfalls für das Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Koreferats. Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Marquardt danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern für das stetige Vertrauen und die Schaffung eines hervorragenden Umfeldes, das den eingeschlagenen Weg erst ermöglichte. Ein großer Dank gebührt außerdem meiner Frau Diana für ihre Unterstützung in der Zeit vieler Entbehrungen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer Verbesserung der Methodik zur Berechnung elektrischer Traktionsantriebe für hochperformante Anwendungen unter Berücksichtigung des Pulswechselrichtereinflusses. Hierzu werden simulative Untersuchungen an einem Traktionsantrieb durchgeführt und mit Messungen am Prüfstand validiert.

Die strikten Anforderungen an Bauraum und Fahrleistungen führen zu einer Leistungsdichte, die in aktuellen elektrischen Antrieben nicht erreicht wird. Dies ist notwendig, um das Gewicht der Batterie, das aktuell zu einem Mehrgewicht eines BEVs im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug führt, zu kompensieren. Elektrisch angetriebene Sportwagen benötigen eine sehr hohe Dauerleistung des Antriebs, damit ein reproduzierbares Fahrgefühl gewährleistet werden kann. Die hohe Spitzenleistungsdichte des Antriebs und eine große Dauerleistung verstärken Einflüsse, die in der heutigen Auslegung typischerweise nicht berücksichtigt werden¹. Einer dieser Effekte ist der steigende Einfluss der Stromoberschwingungen auf die Rotorverluste. Die Stromoberschwingungen entstehen durch das Schalten des Umrichters und der Regelung des elektrischen Antriebs.

Aus diesem Grund untersucht die vorliegende Arbeit den Einfluss des Pulswechselrichters auf die Verluste eines hochperformanten elektrischen Antriebs. Zuerst wird die Modellierung der elektrischen Maschine und eine Erweiterung der Berechnung der Luftspaltflussdichte um Stromoberschwingungen vorgestellt. Anschließend erfolgen Erläuterungen zur Modellierung des Pulswechselrichters und der zugehörigen Regelung. Es werden Untersuchungen zu den Verlustarten und deren Berechnung durchgeführt und es wird auf die Berechnung der Eisenverluste näher eingegangen. Die Einführung der neuen Methodik und deren Umsetzung erweitern die Berechnung der elektrischen Maschinen auf die neuen Anforderungen.

Die erarbeiteten Methoden werden an einem Beispielantrieb der 400V-Klasse simulativ in 2D-Berechnungen untersucht und anschließend messtechnisch validiert. Es zeigt sich, dass eine Validierung anhand einer Ermittlung der Verlustleistungsaufteilung sehr komplex ist. Eine zuverlässige Validierungsmethode ist ein Vergleich der Dauerleistungskennlinien aus Simulation und Messung, da der Rotor beim untersuchten Maschinentyp in einem weiten Bereich das limitierende Bauteil darstellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen eine Verbesserung bei der Bestimmung der Dauerleistungskennlinien eines elektrischen Antriebs gegenüber der herkömmlichen Methode ohne Berücksichtigung von Umrichtereinflüssen. Es kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss des Pulswechselrichters bei hochperformanten Antrieben in die Berechnung einbezogen werden muss. Im Dauerdrehmoment ergibt sich eine für diese hochausgenutzten Antriebe typische Badewannenkurve. Die Methode, die die Magnetverluste mit Ansys Maxwell und die Eisenverluste mit FEMAG berechnet, zeigt die besten Ergebnisse im Vergleich zur Messung. Der Einfluss des Wechselrichters auf das Spitzendrehmoment ist vorhanden, aber vernachlässigbar und wird nicht weiter untersucht. Ein Ausblick auf Erweiterungen der Themenstellungen rundet die Arbeit ab.

¹Spitzenleistungsdichte bedeutet einen Kurzzeitwert von 10-60s

Abstract

The following work deals with the improvement of the calculation methodology of an electric motor for high performance traction electric drives concerning influence of the inverter on the e-machine. To reach this goal, a traction motor is simulated and validated by measurements.

The hard requirements concerning package and driving performance lead to a power density which has not yet been reached in conventional electric motors. This is necessary to compensate for the high weight of the battery, which leads to a heavier BEV compared to a conventional vehicle. Electric driven sport vehicles need a great deal of continuous power to guarantee a reproducible driving experience. The strong requirements concerning power density and continuous power intensify influences which have not been considered in the machine calculation yet. One of these effects is the increasing impact of current harmonics on the machine iron losses, especially the rotor losses. The current harmonics are caused by inverter switching and non-ideal effects of the control².

For that reason, the following work investigates the influence of the inverter on the losses of a high performance electric drive. First, the modelling of an electric motor and the extension of the airgap flux density regarding current harmonics are presented. Afterwards, the modelling of the inverter and the control are shown. Investigations concerning the losses of electric motors and especially the iron losses are followed. The introduction of the new methodology and the exact implementation enlarge the calculation of the electric motor to the new requirements.

The suggested approach is analyzed for a 400V-machine in 2D calculations and test bench measurements. It is shown that the loss separation of the machine components is very complex. The possibility which reaches good reliability is the validation by continuous power curve measurements of the e-machine due to the limitation by rotor temperature in a wide operation range.

The results show an improvement in the calculation of continuous power curves using the new method compared to the old one neglecting the inverter effects. It can be summarized that the inverter effect has to be considered in the computation of high performance electric motors. The continuous torque shows a bathtub curve, which can be seen as characteristic for such highly utilized machines. The method which calculates the permanent magnet losses with ANSYS Maxwell and the iron losses with FEMAG shows the best results concerning the measurements. The influence on the peak performance is seen, but is negligible and therefore not in the focus of the work. An outlook of further improvements of the methodology is at the end of the presented work.

²Peak performance means a short-term-value of 10-60s

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Motivation und Stand der Technik	3
3 Modellierung der elektrischen Maschine	7
3.1 Aufbau und Funktionsweise	7
3.2 Mathematische Beschreibung und Ersatzschaltbild	8
3.2.1 Induktivitätsbasiertes Modell	8
3.2.2 Flussbasiertes Modell	11
3.3 Modellierung der Luftspaltflussdichte	11
4 Werkstoffe	21
4.1 Elektrolech	21
4.2 Vermessung der Elektroleche	22
4.2.1 Einzelblatttester	23
4.2.2 Epsteinrahmen	23
4.2.3 Ringkernproben	24
4.2.4 Vergleich für NO20	25
4.3 Magnetmaterial	26
5 Verlustarten	29
5.1 Kupferverluste	29
5.2 Magnetverluste	35
5.3 Eisenverluste	37
5.3.1 Hystereseverluste	37
5.3.2 Wirbelstromverluste	40
5.3.3 Anomale (Excess-) Verluste	41
5.4 Reibungsverluste	42
6 Beschreibung verschiedener Eisenverlustmodelle	43
6.1 Frequenzbasierte Modelle	43
6.1.1 Steinmetz	43
6.1.2 Jordan	45
6.1.3 Bertotti	45
6.1.4 IEM-Formel	48
6.1.5 Vergleich der Eisenverlustformeln	49
6.2 Zeitbasierte Modelle	51

6.2.1	Zeitbasierte Steinmetzmodelle	51
6.2.2	Zeitbasierte Bertottimodelle	52
6.3	Bearbeitungseinfluss	56
7	Modellierung des Frequenzumrichters und der Regelung	61
7.1	Topologien	61
7.2	Modulationsverfahren	63
7.2.1	Unterschwingungsverfahren	63
7.2.2	Kontinuierliche Modulationsverfahren mit zusätzlicher Nullkomponente	65
7.3	Verlustmodellierung	66
7.4	Analytische Berechnung der Stromverzerrungen	68
7.5	Modellierung der Regelung	69
7.5.1	Allgemeine Struktur	69
7.5.2	Reglerauslegung	71
8	Realisierung des elektrischen Antriebssystems	75
8.1	Möglichkeiten der Kopplung von E-Maschine und Wechselrichter	75
8.2	Parasitäre Effekte durch Berücksichtigung des Wechselrichters bei der Auslegung	77
8.2.1	Oberschwingungen durch Umrichterschalten	77
8.2.2	Modulationseinfluss	79
8.2.3	Ableitströme durch parasitäre Kapazitäten der Maschine	79
8.3	Auslegung des elektrischen Antriebssystems	81
9	Umsetzung der Kopplung	83
9.1	Anforderungen und Annahmen	83
9.2	Aufbau	83
9.2.1	Zwei-Ebenen-Simulationsmodell	83
9.2.2	Analytisches Maschinenmodell	85
9.2.3	Identifikation der Maschinenparameter	86
9.2.4	Thermische Modelle	87
9.3	Programmablauf der Betriebspunktberechnung	88
9.3.1	Ermittlung der Betriebspunkte in der d-q-Ebene	88
9.3.2	Ermittlung der Betriebspunkte in der Drehmoment-Drehzahl-Ebene	96
9.4	Möglichkeiten der Validierung der Methodik	98
9.4.1	Ermittlung der Verlustleistungsaufteilung am Prüfstand	98
9.4.2	Dauerdrehmoment- und Dauerleistungsermittlung	99
10	Berechnungsergebnisse des 400V-Antriebs	101
10.1	Sinusförmige Bestromung	101
10.1.1	Maschinen- und Umrichterdaten	101
10.1.2	Vergleich der Kennfelder für unterschiedliche Blechmessungen	103
10.1.3	Maschinenparameter	106
10.1.4	Vergleich der Kennfelder mit Stromverdrängungseffekten	109
10.1.5	Einfluss des Skineffektes auf die Eisenverluste	112
10.1.6	Berechnung der Kennfelder und Vergleich mit ANSYS Maxwell	114
10.1.7	Vergleich der Verlustmodelle	122
10.2	Umrichterbetrieb	124
10.2.1	Differentielle und absolute Induktivitäten	124

10.2.2 Betrachtung des THD	125
10.2.3 Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder	128
10.2.4 Vergleich der Ergebnisse mit sinusförmiger Bestromung	129
10.2.5 Dauerleistungskennlinien	130
10.3 Einfluss der Spannungslage	133
10.4 Einfluss der Leistungsdichte	133
11 Validierung am Prüfstand	137
11.1 Prüfstands Aufbau	137
11.2 Parameter	138
11.3 Wirkungsgrad und Verluste der E-Maschine	140
11.4 Vergleich der Kennfelder mit den Simulationen	143
11.4.1 Sinusförmige Bestromung der Maschine	143
11.4.2 Umrichterbestromung der Maschine	146
11.5 Ermittlung der Verlustleistungen aus dem Temperaturgradienten	149
11.6 Vergleich der Dauerdrehmomentkennlinien	149
12 Zusammenfassung und Ausblick	153
Abbildungsverzeichnis	155
Tabellenverzeichnis	159
Literatur	161

Symbolverzeichnis

Symbol	Definition	Einheit
--------	------------	---------

Abkürzungen

AP	Arbeitspunkt	
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug	
BP	Betriebspunkt	
EM	Elektrische Maschine	
FB	Frequenzbasiert	
FE	Finite-Elemente	
FEM	Finite-Elemente-Methode	
FOR	Feldorientierte Regelung	
HEV	Hybridelektrisches Fahrzeug	
HHS	Hauptstereseschleife	
IPM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten	
KOS	Koordinatensystem	
LE	Leistungselektronik	
MTPA	Maximum Torque per Ampere	
MTPV	Maximum Torque per Volt	
MZO	Mehrzieloptimierer	
NHS	Nebenhystereseschleife	
NO	Nicht kornorientiert	
OS	Oberschicht	
PA	Power Analyzer (Leistungsmessgerät)	
PI	Proportional-Integral	
PM	Permanentmagnet	
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine	
PWM	Pulsweitenmodulation	
SF	Sinusfilter	
SST	Single Sheet Tester	
THD	Total Harmonic Distortion	
US	Unterschicht	
ZB	Zeitbasiert	

Formelzeichen

α	Temperaturkoeffizient	1/K
ε	Statorfester Winkel	rad, °
γ	Rotorlagewinkel	rad, °

Symbol	Definition	Einheit
λ	Magnetischer Leitwert	Vs/A
μ_0	Natürliche Permeabilität	Vs/Am
μ_r	Relative Permeabilität	
ω	Elektrische Kreisfrequenz	rad/s
Ψ	Flussverkeftung	Vs
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Elektrische Leitfähigkeit	S/m
σ_{PM}	Elektrische Leitfähigkeit des Permanentmagneten	S/m
τ	Zeitkonstante	s
θ	Durchflutung	A
φ	Winkel von der d-Achse zu einem Rotorpunkt	
M_L	Lastmoment	Nm
A	Fläche	m ²
B	Magnetische Flussdichte	T
B_r	Remanenzflussdichte	T
C	Kapazität	F
c	Thermische Wärmekapazität	J/kgK
E	Elektrische Feldstärke	V/m
E	Energie	J
f	Frequenz	Hz
f_s	Schaltfrequenz	Hz
G(s)	Übertragungsfunktion	
H	Magnetische Feldstärke	A/m
H_{c_j}, H_k	Koerzitivfeldstärke	A/m
I/i	Strom	A
J	Magnetische Polarisation	T
J	Mechanisches Massenträgheitsmoment	kgm ²
L	Absolute Induktivität	H
l	Differentielle Induktivität	H
l_{fe}	Aktive Eisenlänge	m
M	Drehmoment	Nm
M	Magnetisierung	A/m
M	Modulationsgrad	
N	Windungszahl	
n	Mechanische Drehzahl	1/s
P	Leistung	W
p	Polpaarzahl	
p	Spezifische Leistung	W/kg
P_{ele}	Elektrische Leistung	W
P_{mech}	Mechanische Leistung	W
$P_{v,cu}$	Kupferverluste	W
$P_{v,fe}$	Eisenverluste	W
$p_{v,fe}$	Spezifische Eisenverluste	W/kg
$P_{v,mag}$	Magnetverluste	W

Symbol	Definition	Einheit
P_v	Verlustleistung	W
Q_S	Anzahl der Statormuten	
R	Widerstand	Ω
R_{AC}	AC-Widerstand	Ω
R_{DC}	DC-Widerstand	Ω
T_σ	Totzeit	s
T_s	Schaltzeit	s
T,t	Zeit/Temperatur	s/K
U/u	Spannung	V
V	Volumen	m^3
W	Arbeit	J

Indizes

α, β	Größen im zweisträngigen statorfesten KOS
ϕ	Winkelkomponente
1, 2, 3, ...	Harmonische der 1, 2, 3, ... Ordnung
Amp	Amplitude
avg	Average (Mittelwert)
con	Conductance (Leitungs-)
cu	Kupfer-, Wicklungs-
D	Diode
d, q	Größen im zweisträngigen rotorfesten KOS
d/q	Größen der d/q-Achse
eddy	Wirbelstrom
el	Elektrisch
exc	Excess
ha	Hauptachse
HHS	Haupthystereseschleife
hyst	Hysterese
ind	Induzierte
L	Induktivität
M	Motor
mech	Mechanisch
n	Normalkomponente
na	Nebenachse
NHS	Nebenhystereseschleife
OFF	Ausschalt-
ON	Einschalt-
ph	Phase
R	Widerstand
r	Radialkomponente
R, S	Rotor, Stator
ref	Referenzgröße
s	Strang

Symbol	Definition	Einheit
s	Sättigungs-	
sin	Sinusförmig	
soll	Sollgröße	
T	Transistor	
t	Tangentialkomponente	
u, v, w	Größen im dreisträngigen statorfesten KOS	
ZK	Zwischenkreis	