

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 418

Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile,
Hannover

Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

l i l
t o l
1004
Leibniz
Universität
Hannover

IL Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(abgekürzt: Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile

geboren am 25. Juni 1988
in Hannover

2018

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Markus Henke
Vorsitz Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Tag der Promotion: 30.01.2018

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile,
Hannover

Nr. 418

Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge



Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Müller-Deile, Felix

Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 418. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

160 Seiten, 105 Bilder, 41 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341821-3, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Elektromobilität – modulare Antriebssysteme – mehrsträngige Wicklungen – Oberschwingungsströme – Oberschwingungsverluste – thermische Modelle – Fahrzyklussimulation, Energieeffizienz – Herstellungskosten

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der elektrischen Antriebssysteme und Elektromobilität. Es werden modulare, skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorgestellt, welche für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingesetzt werden können. Ziel ist es, eine Leistungsskalierung zu ermöglichen, bei der der Strangstrom annähernd konstant bleibt, um eine Verwendung identischer Halbleitermodule für die unterschiedlichen Antriebssysteme zu ermöglichen. Dies wird durch eine Längen- und Strangzahlskalierung der E-Maschine erreicht. Zusätzlich werden die Vor- und Nachteile mehrsträngiger E-Maschinen analysiert, um die für das Konzept geeigneten Strangzahlen zu ermitteln. Hierbei wird speziell die Entstehung von Stromüberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen untersucht und ein Verfahren erarbeitet, welches eine Kompensation der Oberschwingungsströme ermöglicht. Abschließend werden Fahrzyklussimulationen durchgeführt und die Effizienz der Antriebsstränge in unterschiedlichen Fahrzyklen analysiert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341821-3

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Leibniz Universität Hannover.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, der mir die Möglichkeit gab, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAL zu arbeiten. Die mit ihm geführten zahlreichen fachlichen Diskussionen trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke vom Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der Technischen Universität Braunschweig danke ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Koreferats.

Bei Herrn Johannes Heseding bedanke ich mich für die intensive wissenschaftliche Zusammenarbeit.

Ohne Unterstützung der Firma Robert Bosch GmbH, bei der die E-Maschinen-Prototypen gefertigt wurden, wäre eine messtechnische Validierung der Modelle nicht möglich gewesen.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die stets freundliche Atmosphäre und die hilfreichen fachlichen Gespräche bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenkonvention	VII
Formelzeichenverzeichnis	VIII
Kurzfassung	XVII
Abstract	XVIII
1 Einleitung	1
2 Baukastensysteme für Antriebsstrangkomponenten	4
2.1 Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren	4
2.2 Skalierungskonzept für die E-Maschine und die zugehörige Leistungselektronik	9
2.3 Bewertungskriterien des Skalierungskonzepts	12
2.3.1 Bauraum der E-Maschine	12
2.3.2 Kosten der E-Maschine	13
2.3.3 Bauraum der Leistungselektronik	14
2.3.4 Kosten der Leistungselektronik	16
2.3.5 Untersuchte Fahrzyklen	16
3 Stromüberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen	18
3.1 Oberschwingungsströme aufgrund von Sättigung	18
3.2 dq-Ersatzschaltbilder	23
3.2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine	23
3.2.2 Induktionsmaschine	28
3.3 Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung	31
4 Komponentenmodelle des Antriebsstrangs	38
4.1 Fahrzeugmodell	39
4.2 E-Maschine	42
4.2.1 Elektromagnetische Modelle	42
4.2.2 Thermische Modelle	44
4.3 Wechselrichter	65
4.4 Batterie	70
5 Baukastensystem für elektrische Fahrzeugantriebe	72
5.1 Anforderungen an die E-Maschinen-Baureihe	72

5.2	Dimensionierung der E-Maschinen- und der Leistungselektronik-Baureihe . . .	76
5.2.1	Dimensionierung der E-Maschinen-Baureihe	76
5.2.2	Dimensionierung der Leistungselektronik-Baureihe	83
6	Experimentelle Validierung	89
6.1	Prüfstandsaufbau	90
6.2	Leerlaufmessungen	92
6.3	Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung	94
6.3.1	Messverfahren zur Bestimmung der frequenzabhängigen Impedanz . . .	94
6.3.2	Messung und Berechnung der Oberschwingungsverluste durch Wechselrichterspeisung	99
6.4	Stromüberschwingungen im sechssträngigen Betrieb	106
6.4.1	Stromüberschwingungen in permanentmagneterregten Synchronmaschinen	106
6.4.2	Stromüberschwingungen in Induktionsmaschinen	109
6.5	Lastmessungen	111
6.5.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschine	111
6.5.2	Induktionsmaschine	117
7	Simulationen im Fahrzyklus und Bewertung der Baureihen	122
7.1	Simulationen im Fahrzyklus	122
7.2	Bewertung der Baureihenkonzepte	127
7.2.1	Kosten	127
7.2.2	Bauraumbedarf	129
7.2.3	Energieeffizienz im Fahrzyklus	130
7.2.4	Gesamtbewertung	132
8	Zusammenfassung	133
	Literaturverzeichnis	136

Formelzeichenkonvention

Allgemeine Definitionen

a	zeitabhängige Größe
A	Effektivwert
\mathbf{A}	Matrix
\hat{a}	Amplitudenwert
\bar{a}	Mittelwert
\vec{a}	Vektor
\underline{A}	komplexe Größe

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A_{Ch}	Chipfläche einer Halbbrücke
A_F	Stirnfläche des Fahrzeugs
$A_{Kühlkanal}$	Fläche eines Kühlkanals
$A_{L,ex}$	Fläche der externen Leistungsanschlüsse eines Bauelements
$A_{L,S}$	Fläche der internen Leistungs- und Steueranschlüsse eines Bauelements
$A_{LM,m3}$	Gesamtfläche eines dreiphasigen Leistungsmoduls
$A_{LM,m6}$	Gesamtfläche eines sechsphasigen Leistungsmoduls
$A_{\mu p}$	Magnetisierungshauptstrombelag
a	Anzahl der parallelen Zweige
a_F	Fahrzeugbeschleunigung
$B_{1,\mu}$	Flussdichte des Strangwechselfelds mit einer Frequenz der Ordnungszahl μ
B_{μ}	resultierende Luftspaltinduktion mit einer Frequenz der Ordnungszahl μ
$\hat{B}_{wv',\mu}$	Amplitude des Stangwechselfelds der Ordnungszahl v' und einer Frequenz der Ordnungszahl μ
b	Breite
C	Kapazität
C_{th}	thermische Kapazität
C_Z	Kapazität einer Batteriezelle
c	spezifische Wärmekapazität
c_r	Rollwiderstandskoeffizient
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
$\cos \varphi_{\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor
$\cos \varphi_{1d\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor in der d-Achse
$\cos \varphi_{1q\mu}$	frequenzabhängiger Leistungsfaktor in der q-Achse
d_A	Außendurchmesser des Stators

$d_{\text{Kühlkanal}}$	Durchmesser eines Kühlkanals
E_{Bat}	Energieinhalt der Traktionsbatterie
$E_{\text{D,off}}$	Schaltverlustenergie beim Ausschalten der Diode
$E_{\text{T,off}}$	Schaltverlustenergie beim Ausschalten des IGBT
$E_{\text{T,on}}$	Schaltverlustenergie beim Einschalten des IGBT
f_1	Grundfrequenz der Statorspannung und des Statorstroms
f_{μ}	Frequenz einer Oberschwingung des Ausgangsspannungsspektrums eines Wechselrichters der Ordnungszahl μ
f_s	Schaltfrequenz des Wechselrichters
\mathbf{G}_{th}	thermische Leitwertmatrix
g	Erdbeschleunigungskonstante
h	Höhe
I_1	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz
$I_{1\mu}$	Effektivwert des Oberschwingungsstroms mit einer Frequenz der Ordnungszahl μ
I_{B}	Batteriestrom
I_{C}	Kollektorstrom
$I_{\text{m}3}$	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz der dreisträngigen E-Maschine
$I_{\text{m}6}$	Effektivwert des Strangstroms mit Grundfrequenz der sechssträngigen E-Maschine
I_{μ}	Effektivwert des Magnetisierungsstroms
I_{Z}	Zellenstrom
i_1	Strangstrom in der Statorwicklung
i_{d}	Statorstrom in der d-Achse
i'_{dr}	auf den Stator bezogener Rotorstrom in der d-Achse
i_{q}	Statorstrom in der q-Achse
i'_{qr}	auf den Stator bezogener Rotorstrom in der q-Achse
J	Massenträgheitsmoment
\mathbf{J}	Drehmatrix für einen Winkel von 90°
J_1	Stromdichte der Statorwicklung
J_{EM}	Massenträgheitsmoment der E-Maschine
J_{F}	Massenträgheitsmoment des Fahrzeugs bezogen auf die Antriebsachse
J_{Rad}	Massenträgheitsmoment der vier rotierenden Räder
K_{C}	Kosten eines Kondensators
K_{Ch}	Kosten der gesamten Chipfläche eines Leistungsmoduls

K_{ES}	Entwicklungskosten
K_{FS}	Fertigungskosten
K_{MR}	Materialkosten des Rotors
K_{MS}	Materialkosten des Stators
$K_{R,IM}$	Kosten des Rotors der Induktionsmaschine
$K_{R,PMSM}$	Kosten des Rotors der permanentmagneterregten Synchronmaschine
K_S	Kosten des Stators
K_{WR}	Kosten eines Wechselrichters
k_{Cu}	Nutfüllfaktor
k_{Fe}	Eisenfüllfaktor
k_h	frequenzabhängiger Faktor zur Berechnung der Oberschwingungsverluste durch ein Hauptfeld
k_s	frequenzabhängiger Faktor zur Berechnung der Oberschwingungsverluste durch ein Streufeld
L	Induktivität
L_{lhd}	Hauptinduktivität in der d-Achse
L_{lhq}	Hauptinduktivität in der q-Achse
L_{lhw}	Wechselfeldhauptinduktivität
$L_{l\sigma}$	Statorstreuinduktivität
$L_{l\sigma d}$	Streuinduktivität in der d-Achse
$L_{l\sigma q}$	Streuinduktivität in der q-Achse
L_d	Induktivität in der d-Achse
\mathbf{L}_{dq}	Induktivitätsmatrix im dq-System
$L'_{\sigma dr}$	auf den Ständer bezogene Rotorstreuinduktivität in der d-Achse
L_q	Induktivität in der q-Achse
$L'_{\sigma qr}$	auf den Ständer bezogene Rotorstreuinduktivität in der q-Achse
L_{xx}	Selbstinduktivität
L_{xy}	Gegeninduktivität
L_{hxy}	Gegeninduktivität über die Hauptwelle
l_{Fe}	Blechkpaketlänge
$l_{Gehäuse}$	axiale Gehäuselänge
$l_{Kühlkanal}$	Länge des Kühlkanals in Fließrichtung des Mediums
l_{Lager}	Lagerabstand
$l_{WK,ax}$	axiale Wicklungskopfausladung
M	Modulationsgrad
M	Drehmoment

M_{Besch}	Beschleunigungsmoment
M_{EM}	Drehmoment der E-Maschine
M_{Luft}	Luftwiderstandsmoment
M_{Rad}	Fahrwiderstandsmoment am Rad
M_{Roll}	Rollwiderstandsmoment
M_{S}	Fahrbahnsteigungswiderstandsmoment
m_1	Strangzahl der Statorwicklung
m_{F}	Fahrzeugmasse
m_{Rad}	Masse eines Rads
N_1	Statornutzzahl
N_2	Rotornutzzahl
Nu	Nusselt-Zahl
n_{B}	Anzahl der einzelnen Traktionsbatteriezellen
n_{C}	Stückzahl der Kondensatoren
$n_{\text{C,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Kondensatoren
n_{Ch}	Stückzahl der Leistungsmodule
$n_{\text{Ch,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Leistungsmodule
n_{EM}	Drehzahl der E-Maschine
n_{eck}	Eckdrehzahl der E-Maschine
$n_{\text{Kühlkanal}}$	Anzahl der Kühlkanäle
n_{Mag}	Anzahl der Magnete
n_{BP}	Anzahl der parallel geschalteten Traktionsbatteriezellen
n_{BR}	Anzahl der in Reihe geschalteten Traktionsbatteriezellen
n_{R}	Stückzahl der Rotoren
$n_{\text{R,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Rotoren
n_{S}	Stückzahl der Statoren
$n_{\text{S,Bez}}$	Bezugsstückzahl der Statoren
P	Leistung
Pr	Prandtl-Zahl
P_{v}	Verlustleistung
P_{vd}	Durchlassverluste
P_{vs}	Schaltverluste
$P_{\text{v},\mu}$	hochfrequente Oberschwingungsverluste
P_{vw1}	Stromwärmeverluste in der Statorwicklung
p	Polpaarzahl
q	Anzahl der Nuten pro Pol und Stang (Lochzahl)

R	Bohrungsradius
R_1	Strangwiderstand der Statorwicklung
$R_{1\mu}$	frequenzabhängiger Strangwiderstand für die Oberschwingungsordnung μ
R_{20}	Widerstand bei 20°C
$R_{d,Fe}$	Eisenverlustwiderstand in der d-Achse
Re	Reynolds-Zahl
$R_{Fe,\mu}$	frequenzabhängiger Eisenverlustwiderstand für die Oberschwingungsordnung μ
R_i	temperaturabhängiger Innenwiderstand der Traktionsbatterie
R_{LM}	Widerstand eines Leistungsmoduls
R_{m3}	Strangwiderstand der dreisträngigen Statorwicklung
R_{m6}	Strangwiderstand der sechssträngigen Statorwicklung
$R_{q,Fe}$	Eisenverlustwiderstand in der q-Achse
R'_r	auf den Ständer bezogener Rotorwiderstand
R_{th}	thermischer Widerstand
R_Z	Innenwiderstand einer Zelle der Traktionsbatterie
$r_{A,1}$	Außenradius des Statorblechpakets
$r_{A,2}$	Außenradius des Rotorblechpakets
r_D	differentieller Widerstand der Diode
r_{dyn}	dynamischer Radradius
$r_{l,1}$	Innenradius des Stators
$r_{l,2}$	Innenradius des Rotorblechpakets (Wellenradius)
r_T	differentieller Widerstand des IGBT
s	Schlupf
\mathbf{T}_{dq}	dq-Transformationsmatrix
t	Zeit
U_1	Effektivwert der Strangspannung mit Grundfrequenz
$U_{1\mu}$	Effektivwert der Strangspannung mit einer Frequenz der Ordnungszahl μ
U_B	Batteriespannung
U_{CE}	Kollektor- Emitter-Spannung
U_{DC}	Zwischenkreisspannung
U_Z	Zellenspannung
U_{Z0}	Leerlaufspannung einer Zelle
u_1	Strangspannung
u_{D0}	Diffusionsspannung der Diode
u_d	Spannung in der d-Achse

u_q	Spannung in der q-Achse
u_{T0}	Schleusenspannung des IGBT
\hat{u}_μ	Amplitude der Spannungsüberschwingung der Ordnungszahl μ
ii	Getriebeübersetzung
V	Volumen
V_C	Kondensatorvolumen
V_{EM}	Bauvolumen der E-Maschine
$V_{LM,m3}$	Gesamtvolumen eines dreiphasigen Leistungsmoduls
$V_{WR,m3}$	Gesamtvolumen eines dreiphasigen Wechselrichters
v	Durchflussgeschwindigkeit
v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit
w	spannungshaltende Windungszahl
w_{sp}	Windungszahl einer Spule
$X_{l\mu}$	frequenzabhängige Impedanz für die Oberschwingungsordnung μ
$x_{\text{äq1}}$	äquivalente Breite der Isolationsschicht der Ständerwicklung
$x_{\text{Gehäuse}}$	Gehäusewandstärke
x_{Kont}	Spalthöhe zwischen zwei Kontaktflächen
$Z_{l\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz
$Z_{ld\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz in der d-Achse für die Oberschwingungsordnung μ
$Z_{lq\mu}$	frequenzabhängige Strangimpedanz in der q-Achse für die Oberschwingungsordnung μ
Z_d	Impedanz in der d-Achse (Längsimpedanz)
Z_q	Impedanz in der q-Achse (Querimpedanz)

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient
α_{20}	Temperaturkoeffizienten bei 20°C
α_{free}	Wärmeübergangskoeffizient für freie Konvektion
$\alpha_{\text{Kühlkanal}}$	Wärmeübergangskoeffizient im Kühlkanal
α_s	Fahrbahnsteigungswinkel
γ	elektrischer Winkel zwischen dem statorfesten α - β -Koordinatensystem und dem rotorfesten dq-Koordinatensystem
γ'	Winkelkoordinate
$\Delta\varphi_{d1,d2}$	Phasendifferenz zwischen den beiden d-Systemen des sechssträngigen dq-Ersatzschaltbilds

δ	Luftpaltlänge
ε'	Ordnungszahl einer Leitwertdrehwelle
$\bar{\eta}$	mittlerer Wirkungsgrad im Fahrzyklus
ϑ	Temperatur
ϑ_B	Temperatur der Batterie
ϑ_F	mittlere Kühlmitteltemperatur der Wassermantelkühlung
$\vartheta_{Öl}$	Öltemperatur der Rotorkühlung
$\vartheta_{\text{Umgebung}}$	Umgebungstemperatur
λ	thermische Leitfähigkeit
λ_{BL}	Wärmeleitfähigkeit des Elektroblechs
$\lambda_{\delta 0}$	mittlerer Luftpaltleitwert
$\lambda_{\delta s}$	Luftpaltleitwert aufgrund von Eisensättigung
μ	Ordnungszahl einer Oberschwingung
ν	Viskosität
ν'	Ordnungszahl einer Oberwelle
$\xi_{gr, \nu'}$	Zonenwicklungsfaktor der Ordnungszahl ν'
$\xi_{\nu'}$	Wicklungsfaktor der Ordnungszahl ν'
ρ	Dichte
ρ_{Luft}	Luftdichte
τ_{Nut1}	Statornutteilung
τ_{Nut2}	Rotornutteilung bei der Induktionsmaschine
φ_I	Phasenwinkel des Carriersignals
φ_i	Phasenwinkel des Strangstroms
$\varphi_{s, \varepsilon'}$	Phasenwinkel der Leitwertdrehwelle
Ψ	magnetischer Verkettungsfluss
Ψ_d	resultierender Verkettungsfluss in der d-Achse
Ψ'_{dr}	auf den Stator bezogener Rotorverkettungsfluss in der d-Achse
Ψ_{ges}	Gesamtverkettungsfluss
Ψ_L	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss
$\Psi_{L,d}$	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss in der d-Achse
$\Psi_{L,q}$	durch den Statorstrom hervorgerufener Verkettungsfluss in der q-Achse
Ψ_{PM}	resultierender Verkettungsfluss des Permanentmagnetfelds
Ψ_q	resultierender Verkettungsfluss in der q-Achse
Ψ'_{qr}	auf den Ständer bezogener Rotorverkettungsfluss in der q-Achse
Ω	Winkelgeschwindigkeit
ω	Kreisfrequenz

Indizes

1	Stator
2	Rotor
A	außen
ax	axial
äq	äquivalent
B1	Rotorbereich 1
B2	Rotorbereich 2
B3	Rotorbereich 3
Cu	Kupfer
Ch	Chip des Leistungsmoduls
D	Diode
d1	d-Achse des ersten Systems
d2	d-Achse des zweiten Systems
F	Fluid
Fe	Eisen
ges	gesamt
I	innen
Joch1	Statorjoch
Joch2	Rotorjoch
Kont	Kontakt
Konv	konvektiv
LM	Leistungsmodul
M	Mitte
Mag	Magnet
m3	dreisträngige Wicklung
m6	sechssträngige Wicklung
max	Maximum
min	Minimum
Nut1	Statornut
Nut2	Rotornut
Ob	Oberschwingungen
PU	Vergussmaterial
q1	q-Achse des ersten Systems

q2	q-Achse des zweiten Systems
r	Rotorgröße im dq-System
rad	radiale Richtung
Ring	Kurzschlussring des Käfigläufers der Induktionsmaschine
Stab	Stab des Käfigläufers der Induktionsmaschine
Sys	Antriebssystem (E-Maschine und Leistungselektronik)
T	Transistor
th	thermisch
Welle	Rotorwelle
Wk	Wicklungskopf
WL	Wärmeleitung
WR	Wechselrichter
Z	Zylinder
Zahn1	Statorzahn
Zahn2	Rotorzahn

Abkürzungen

BP	Betriebspunkt
BDL	Temperaturmessgerät
DMW	Drehmomentmesswelle
E-Maschine	elektrische Maschine
IAL	Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IM	Induktionsmaschine
LMG	Leistungsmessgerät
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PMSM	permanentmagneterregte Synchronmaschine
PWM	Pulsdauermodulation
SMZ	Strommesszangen
SoC	State of Charge (Ladezustand der Batterie)
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
BS-Zyklus	kundennaher Fahrzyklus der TU Braunschweig

Kurzfassung

Die Herstellungskosten von batterieelektrischen Fahrzeugen sind bis heute im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sehr hoch. Konventionelle Fahrzeuge basieren auf Baukastensystemen, die zu einer Stückzahlerhöhung auf Komponentenbasis und damit zu einer Kostenreduktion führen. Für batterieelektrische Fahrzeuge ist zurzeit kein vergleichbares Konzept verfügbar.

In dieser Arbeit werden modulare, skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorgestellt, welche für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingesetzt werden können. Für das modulare Konzept werden Induktionsmaschinen (IM) und permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) verwendet. Ziel ist es, eine Leistungsskalierung zu ermöglichen, bei der der Strangstrom annähernd konstant bleibt, um eine Verwendung identischer Halbleitermodule für die unterschiedlichen Antriebssysteme zu ermöglichen. Dies wird durch eine Längen- und Strangzahlskalierung der E-Maschine erreicht. Dazu werden die Vor- und Nachteile mehrsträngiger E-Maschinen analysiert, um die für das Konzept geeigneten Strangzahlen zu ermitteln. Hierbei wird speziell die Entstehung von Stromoberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen untersucht und ein Verfahren erarbeitet, welches eine Kompensation der Oberschwingungsströme ermöglicht. Dabei stellt sich heraus, dass für das Konzept drei- und sechssträngige Antriebssysteme am besten geeignet sind. Aus diesem Grund werden die Verluste bei Wechselrichterspeisung in diesen Maschinentypen detailliert untersucht. Die Grundschwingungsverluste der sechssträngigen E-Maschinen sind aufgrund des höheren Hauptwellenwicklungsfaktors geringer als die der dreisträngigen Varianten. Die durch die Wechselrichterspeisung entstehenden Oberschwingungsverluste sind dagegen in den sechssträngigen E-Maschinen höher als in den dreisträngigen Varianten. Es werden die Wirkungsgradunterschiede der beiden Maschinentypen (IM und PMSM) in drei- und in sechssträngiger Ausführung analysiert. Mithilfe der erarbeiteten Teilmodelle für Fahrzeug, E-Maschine, Wechselrichter und Batterie wird eine Fahrzeugsimulation durchgeführt und der Energiebedarf des Antriebssystems bestimmt. Zusätzlich werden thermische Modelle der E-Maschinen erarbeitet, mit denen das thermische Verhalten im Fahrzyklus berechnet werden kann. Durch zahlreiche Messungen an zwei Prototypen (IM und PMSM) konnten die Komponentenmodelle validiert werden.

Anhand der erarbeiteten Kostenmodelle und der Fahrzeugsimulationen wird gezeigt, dass das modulare, skalierbare mehrsträngige Konzept Kostenvorteile gegenüber nicht modularen Bauweisen hat. Das Bauvolumen der modularen Antriebssysteme ist minimal größer als das der nicht modularen Systeme. Die Energieeffizienz beider Systeme ist annähernd gleich.

Schlagworte:

Elektromobilität, modulare Antriebssysteme, mehrsträngige Wicklungen, Oberschwingungsströme, Oberschwingungsverluste, thermische Modelle, Fahrzyklussimulation, Energieeffizienz, Herstellungskosten

Abstract

The production cost of battery-electric vehicles is still very high compared to conventional vehicles with internal combustion engines. Conventional vehicles are based on modular systems that lead to unit increase of their components and to cost reduction. A similar concept for battery-powered vehicles is currently not available.

In this thesis, modular scalable multiphase drive systems for electric vehicles are developed which can be used for different vehicle classes. For this modular concept, induction machines (IM) and permanent magnet synchronous machines (PMSM) are used. The aim is to enable a power scaling in which the phase current remains approximately constant in order to use identical semiconductor modules for different drive systems and power ratings. This is achieved by scaling the length and the number of phases of the electric machine. Thus, the advantages and disadvantages of multiphase electric machines are analyzed in order to determine the appropriate phase numbers for this concept. In particular, current harmonics in multiphase windings are investigated and a method to compensate these current harmonics is developed. Three-phase and six-phase drive systems proved to be best suited for this concept. Therefore, the power losses of inverter fed multiphase IM and PMSM are examined in detail. The fundamental losses of six-phase machines are lower than those of three-phase machines due to the higher winding factor. On the other hand, harmonic losses of six-phase machines due to the inverter supply are higher than those of three-phase machines. The efficiency values of the machines (IM and PMSM) are analyzed for three-phase and six-phase windings.

Component models of the car, the electric machine, the inverter and the battery are developed in this thesis and are used to simulate the energy efficiency of the drive system. In addition, thermal models of the electric machines are developed and the thermal behavior in driving cycles is examined. Measurements on two prototypes (IM and PMSM) were made in order to validate the component models. Based on cost models and vehicle simulations, the modular scalable multiphase concept has cost advantages over non-modular concepts. The dimensions of modular drive systems are minimally larger compared to non-modular systems. However, the energy efficiency of both systems is almost the same.

Key words:

electric mobility, modular drive systems, multiphase windings, current harmonics, harmonic losses, thermal models, driving cycle simulations, energy efficiency, manufacturing cost