

Technische Universität Dresden

Verbesserung der Betriebseigenschaften elektrischer Maschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen

Henning Kasten

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität
Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. Krauthäuser

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Annette Mütze

Tag der Einreichung: 21.10.2014

Tag der Verteidigung: 30.04.2015

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und
Antrieben

Band 5

Henning Kasten

**Verbesserung der Betriebseigenschaften elektrischer
Maschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3698-5

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zum großen Teil im Rahmen der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU-Dresden. Komplette fertig gestellt wurde diese Arbeit während der Beschäftigung als Entwicklungsingenieur bei der Firma Levitec in Lahnau.

Als erstes danke ich Gott dafür, dass er mich mit ausreichendem Verstand ausgerüstet hat und ich die Arbeit bei voller Gesundheit und in friedlichen Zeiten durchführen konnte.

Weiterhin möchte ich im Besonderen meinem Erstgutachter Herrn Prof. Hofmann dafür danken, dass er die Arbeit unterstützt und begutachtet hat. Seine offene Art sich mit Problemen auseinander zu setzen und diese zu analysieren, hat meine Arbeitsweise positiv gefördert.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau Prof. Mütze für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Firma VEM Wernigerode und der Firma Levitec bedanken. Sie haben mir es ermöglicht Versuchsmaschinen mit kombinierten Wicklungen auszurüsten und diese anschließend zu vermessen. An dieser Stelle möchte ich für ihren außergewöhnlichen Einsatz Herrn Seehase, Herrn Köhler, Herrn Kroll und Herrn Dr. Redemann erwähnen.

Erwähnen möchte ich auch meine ehemaligen Kollegen an der TU-Dresden. Prof. Eberhardt war für mich ein besonderer Ratgeber und Ermutiger.

Schließlich möchte ich mich auch bei meiner Familie und bei meinen Freunden für alle Unterstützung bedanken.

Lahnau, im Sommer 2014

Inhalt

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung.....	1
2 Strategien zur Steigerung des Wirkungsgrads	3
2.1 Widerspruch zwischen Wirkungsgrad und Ausnutzung	3
2.2 Vergrößerung der Kupfermasse	3
2.3 Vergrößerung der Blechpaketmasse	4
2.4 Einsatz von verlustarmen Elektroblech	5
2.5 Kupferdruckgussläufer	5
2.6 Einsatz einer kombinierten Wicklung	6
2.6.1 Grundwellenwicklungsfaktor	6
2.6.2 Oberwellengehalt	7
3 Beschreibung der kombinierten Drehfeldwicklungen	9
3.1 Schaltungsvarianten.....	9
3.2 Verteilung der Stränge in Zonen.....	9
3.3 Luftspaltfeld einer kombinierten Ganzlochwicklung	11
3.3.1 Ungesehnte Wicklungen	11
3.3.2 Kombinierte Wicklungen mit gleichen Teildurchflutungen	16
3.3.3 Kombinierte Wicklungen mit näherungsweise gleichen Teildurchflutungen	17
3.3.4 Gesehnte Wicklungen	19
3.4 Doppeltverkettete Streuung.....	26
3.4.1 Auswirkung und Berechnung	26
3.4.2 Berechnung mit Hilfe des Görge-Polygons.....	26
3.4.3 Oberflächenverluste in permanenterregten Läufern	29
3.5 Besonderheiten bei Maschinen mit kurzer aktiver Länge	31
4 Ausführungsvarianten von kombinierten Wicklungen.....	33
4.1 Wickelschemen mit gleichbreiten Wicklungszonen	33
4.1.1 Einschichtwicklungen	33
4.1.2 Einschichtwicklungen mit geteilten Wicklungsköpfen	35
4.1.3 Zweisechichtwicklungen	37
4.2 Wicklungen mit gleichen Spulen	38

4.2.1	Schaltschema	38
4.2.2	Oberwellengehalt	41
4.2.3	Erwärmung der Wicklung.....	41
4.3	Wicklungen mit unterschiedlich breiten Wicklungszonen	43
4.3.1	Kombinierte Wicklungen für Standardwicklungen mit ungeraden Lochzahlen	43
4.3.2	Kombinierte Wicklungen für gewöhnliche Bruchlochwicklungen	50
4.4	Zahnpulenwicklungen.....	57
4.4.1	Übersicht.....	57
4.4.2	Grundwellenwicklungsfaktoren im Vergleich	59
4.4.3	Oberwellengehalt von Zahnpulenwicklungen.....	60
5	Kombinierte Wicklungen mit noch höheren Strangzahlen	63
5.1	Geschwenkte Wicklungen.....	63
5.2	Stromrichter mit höheren Phasenzahlen	66
5.3	Wicklungen mit 3-phasigem Anschluss	66
6	Isolationskoordination bei Mittelspannungsmaschinen	68
6.1	Überblick.....	68
6.2	Leiterquerschnitte	68
6.3	Bestimmung der Isolationsdicke.....	69
6.4	Prüfung von Wicklungen mit unterschiedlicher Hauptisolierung	70
6.5	Niederspannungsmaschinen mit Umrichterbetrieb	71
7	Kreisströme in der Dreieckschaltung	75
7.1	Allgemeines	75
7.2	Asynchronmaschinen	75
7.2.1	Entstehung und Folgen von Sättigungsharmonischen.....	75
7.2.2	Orte hoher Eisensättigung in Asynchronmaschinen.....	76
7.2.3	Maßnahmen zur Reduktion der dritten Harmonischen	77
7.2.4	Berechnung der zusätzlichen Wicklungsverluste in der Dreieckschaltung.....	79
7.2.5	Abschätzung der Eisenverluste durch die dritte Harmonische im Luftspaltfeld.....	84
7.2.6	Gemessene zusätzliche Wicklungsverluste.....	86
7.2.7	Besonderheiten beim Einsatz von kombinierten Wicklungen	89
7.3	Synchronmaschinen.....	91
7.3.1	Läufervarianten	91

7.3.2	Elektrisch erregter Vollpolläufer	92
7.3.3	Elektrisch erregter Schenkelpolläufer	95
7.3.4	Permanenterregter Läufer mit Oberflächenmagneten	97
7.3.5	Permanenterregter Läufer mit vergrabenen Magneten.....	101
8	Einfluss des Umrichterbetriebs.....	102
8.1	Auswirkung gezielt eingepprägter Oberschwingungen	102
8.2	Gemessene Oberschwingungsverluste.....	102
9	Käfigwicklungen bei kombinierten Wicklungen	104
9.1	Überblick.....	104
9.2	Kopplung zwischen Läuferwicklung und Luftspaltfeld	105
9.3	Oberwellenmomente.....	109
9.3.1	Asynchrone Momente	109
9.3.2	Synchrone Momente	113
9.4	Rüttelkräfte	119
9.4.1	Entstehungsweise von Rüttelkräften	119
9.4.2	Rüttelkräfte durch zwei Läuferwellen.....	121
9.4.3	Rüttelkräfte durch eine Läuferwelle und eine Ständerwelle	123
9.5	Zusatzverluste	123
9.6	Favorisierte Läufernutzahlen	126
10	Geräusche.....	128
10.1	Allgemeines	128
10.2	Lüftergeräusche	128
10.3	Magnetische Geräusche.....	130
10.3.1	Oberwellengehalt der Wicklung.....	131
10.3.2	Magnetische Geräusche durch den Umrichterbetrieb	133
10.3.3	Magnetische Geräusche durch parametrische Luftspaltfelder	133
11	Messergebnisse.....	135
11.1	Technologische Umsetzung der kombinierten Wicklung.....	136
11.2	Wirkungsgradbestimmung	137
11.2.1	Einzelverlustverfahren	137
11.2.2	Kalorimetrische Bestimmung der Zusatzverluste.....	143
11.2.3	Wirkungsgradbestimmung.....	144

Inhalt

11.3 Schallmessung	144
12 Zusammenfassung	147
Literaturverzeichnis	149

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen

a	Anzahl paralleler Ankerzweige (für Gleichstrommaschinen nicht gültig)
A	Strombelag, Fläche
b	Breite
B	magnetische Induktion
d	(Draht-) Durchmesser
D	Bohrungsdurchmesser, Verschiebungsflussdichte
f	Frequenz
F	relativer Fehler
g	ganze Zahl
h	Höhe
i, I	elektrische Stromstärke
k	Faktor, Ordnungszahl, Stromverdrängungsfaktor
l	Länge, Blechpaketlänge
L_w	Schalleistungspegel
m	Strangzahl
M	Drehmoment
n	Nenner im Bruch
n	Drehzahl, Ordnungszahl, Laufindex
N	Nutzahl
P	Wirkleistung
p	Polpaarzahl
q	Lochzahl
R	ohmscher Widerstand, Radius
s	Schlupf
t	Zeit
U	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit
V	magnetischer Spannungsabfall

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

w	Windungszahl
W	Energie
x	Koordinate
X	Reaktanz
y	Wickelschritt
z	Zähler im Bruch
Z	ganze Zahl
α	Wärmeübergangskoeffizient, Winkel, bezogene Nutteilung
α_p	Abplattungsfaktor
γ	Winkelbogen, bezogen
γ'	Winkelbogen
δ	Luftspaltweite
ε	Dielektrizitätskonstante
η	Wirkungsgrad
ϑ	Temperatur
Θ	magnetische Durchflutung
κ	elektrische Leitfähigkeit, Schrägungsmaß
μ	Permeabilität, Ordnungszahl
μ_0	Vakuumpermeabilität
ν	Ordnungszahl
ν'	unbezogene Ordnungszahl
ξ	Wicklungsfaktor
ϱ	Dichte
σ	mechanische Spannung, Streukoeffizient
τ	Teilung
φ	Phasenwinkel, Nutfüllfaktor
Φ	magnetischer Fluss
ω	Kreisfrequenz

Indizes

a	A-bewertet
ac	Wechselstrom
C	Koerzitiv-
Cu	Kupfer
dc	Gleichstrom
Fe	Eisen
g	Görges-
ges	Gesamt
h	Hauptfeld
i	ideell
L	Läufer
m	magnetisch
M	Magnet
n	Nut
N	Bemessungswert
o	Oberfläche, Oberwellen...
os	Oberschwingungen
p	Pol
r	Rücken, relativ, Remanenz-
rel	relativ
s	Stirnverbindung, Schalt-
sat	Sättigung
S	Ständer
schr	Schrägung
sp	Spule
stab	Läuferstab
str	Strang
ü	Über-
v	Verlust
w	Wicklung, Windung, Wicklungskopf
z	Zahn, Zusatz
Z	Zusatzverluste

δ	Luftspalt
μ	Magnetisierung
1	Grundwelle, Grundschiwingung, Ständer
2	Läufer
3	dritte Harmonische
3~	3-strängig
6~	6-strängig
=	parallel
Δ	Dreieck
Y	Stern
\emptyset	Durchmesser

Phasenbezeichnungen

U, V, W	Strangbezeichnung bei gewöhnlichen Wicklungen; Bei kombinierten Wicklungen werden nur die Stränge in der Sternschaltung so bezeichnet.
U', V', W'	Strangbezeichnung der Dreieckwicklung bei kombinierten Wicklungen

Abkürzungen

ASM	Asynchronmaschine
rel	relativ