

Kompaktumrichter mit kapazitätsarmem Zwischenkreis zur baulichen Integration in ein Elektrowerkzeug

von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Tobias Kolb
aus Nürtingen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feser
Tag der mündlichen Prüfung:	23. Juli 2003

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Abteilung für Elektrische Maschinen und Antriebe
der Universität Stuttgart
2003

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 11

Tobias Kolb

**Kompaktumrichter mit kapazitätsarmem
Zwischenkreis zur baulichen Integration
in ein Elektrowerkzeug**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2898-5

ISSN 1431-9888

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

für
Gudrun und Philipp

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe (IEMA) der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt dem Direktor des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt, für die stete Förderung und Unterstützung dieser Arbeit, sowie für die Übernahme des Hauptberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feser danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse sowie für die Anfertigung des Mitberichts.

Allen Kollegen und ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts möchte ich für die anregenden Fachgespräche, die gute Zusammenarbeit und die schöne Zeit am Institut danken. Besonders erwähnen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Volker Bosch, Herrn Dr.-Ing. Christoph Haug, Herrn Dr.-Ing. Kurt Reutlinger und Herrn Dipl.-Ing. Enzo Cardillo. Auch den Mitarbeitern der Zentralwerkstatt, im besonderen Herrn Csiszmarek und Herrn Dick, sei hiermit mein Dank ausgesprochen.

Danken möchte ich weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Grüner und Herrn Dipl.-Ing. J. Lebsanft für ihren Rat und anregende Fachgespräche.

Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Alfred Schreiber von der Firma C. & E. Fein in Stuttgart für die freundliche Überlassung von Versuchsmaterial.

Ganz besonderer Dank gebührt schließlich meiner Frau für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der gesamten Zeit des Entstehens dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	4
1 Einleitung	12
1.1 Entwicklung der Hochfrequenz-Elektrowerkzeuge	12
1.2 Aufgabenstellung	15
2 Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen	17
2.1 Drehfeldmaschinen	17
2.2 Gleichstrommaschine	18
2.3 Universalmaschine	19
3 Stand der Technik bei HF-Elektrowerkzeugen	22
4 Speisemöglichkeiten für HF-Elektrowerkzeuge	24
4.1 Rotierender Frequenzumformer	24
4.2 Externer Kompaktumrichter	25
4.3 Integrierter Kompaktumrichter	26
4.4 Alternative Antriebsmaschinen für Elektrowerkzeuge	29
5 Umrichterkonzept	30
5.1 Prinzip des Frequenzumrichters	30
5.2 Umrichterkomponenten bei Einbau in ein Elektrowerkzeug	31
5.2.1 Netzseitiger Stromrichter	31
5.2.2 Zwischenkreis	37
5.2.3 Lastseitiger Stromrichter	40
5.2.4 Eigenversorgung	42
5.2.5 Mikrocontroller und Ansteuerung	42
5.2.6 Bremsen	43
5.2.7 Versuchsmaschine	45
5.2.8 Funktionsmuster	47
6 Steuerverfahren	49
6.1 Unterschwingungsverfahren	49
6.1.1 Schaltzeitpunkte beim Unterschwingungsverfahren	49

6.1.2	Schaltzeitpunkte bei digital realisiertem Unterschwingungsverfahren	51
6.2	Auswirkung der ungeglätteten Zwischenkreisspannung	53
6.2.1	Amplitudenmodulation eines cosinusförmigen Sollwertverlaufs durch die ungeglättete Zwischenkreisspannung	54
6.3	Messungen	57
6.3.1	Speisung über rotierenden Umformersatz	57
6.3.2	Umrichterspeisung mit geglätteter Zwischenkreisspannung . .	58
6.3.3	Umrichterspeisung mit ungeglätteter Zwischenkreisspannung	58
7	Korrektursteuerverfahren	60
7.1	Grundprinzip	60
7.2	Auswirkung des Korrekturverfahrens im Frequenzbereich	65
7.3	Praktische Realisierung	66
7.4	Nulldurchgangsdetektor	66
7.5	Erzielte Verbesserungen	68
8	Betriebsverhalten	70
8.1	Drehmomentverlauf bei ungeglätteter Zwischenkreisspannung	70
8.2	Asynchronmaschine	71
8.3	Superposition von Asynchronmaschinen	72
8.3.1	Ersatzschaltbilder	73
8.3.2	Schlupfbetrachtung	74
8.3.3	Drehmomentberechnung	77
8.4	Drehfelder	78
8.4.1	Drehfelder in Dreiphasenmaschinen	78
8.4.2	Wechselfeld	79
8.4.3	Drehfeldüberlagerung	81
8.5	Stromverdrängung	83
8.6	Reduzierung des überlagerten Drehmoments	86
8.7	Gleichförmigkeitsbetrachtung	86
8.8	Fazit	88
9	Ausblick	90

Anhang	91
A Bestimmung der Elemente des Ersatzschaltbilds	91
A.1 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine	91
A.1.1 Ersatzschaltbild für ideellen Kurzschluß	92
A.1.2 Ersatzschaltbild im Kurzschluß	93
A.1.3 Ersatzschaltbild im Leerlauf	95
A.1.4 Eisen- und Reibungsverluste	96
A.2 Ersatzschaltbildwerte	96
B Technische Daten der Versuchsmaschine	98
C Amplitudenmodulation	100
C.1 Zeitfunktion und Frequenzspektrum	100
C.2 Harmonisches Nutzsignal	101
C.3 Zeigerdarstellung	104

Formelzeichen

Griechische Formelzeichen

α	ideeller Polbedeckungsfaktor	
α_{20}	Temperaturbeiwert	1/K
α_{red}	Reduktionsfaktor zur Ermittlung der reduzierten Leiterhöhe	
δ	Luftspaltlänge	m
δ	Ungleichförmigkeitsgrad	
$\delta(\omega)$	Dirac-Stoß	
η	Wirkungsgrad	
μ_0	Permeabilität des Vakuums	Vs/Am
ω_0	Kreisfrequenz der Grundschiwingung	1/s
ω_0	Kreisfrequenz des Trägers bei der AM	1/s
Φ	Fluß	Vs
ρ	spez. Gewicht oder Dichte	g/cm ³
σ	Gesamtstreuiziffer	
τ	Zeitkonstante	s
τ_p	Polteilung	
Θ	Durchflutung	A
$\varphi'(\beta)$	Streuinduktivitätsverminderung bei Stromverdrängung	
$\varphi(\beta)$	Widerstandserhöhung bei Stromverdrängung	
ϑ	Temperatur	K
ξ	Wicklungsfaktor	

Lateinische Formelzeichen

α	Zeitwinkel	
$\ddot{u}$	Getriebeübersetzung	
$\hat{U}_L$	Spitzenwert der Leiterspannung	V
A	Strombelag	A/m
a	parallele Ankerzweigpaare	
A_0	Gleichanteil der Hüllkurve bei der AM	
B	magnetische Induktion	T=Vs/m ²
B_L	Luftspaltinduktion	T=Vs/m ²
B_m	mittlere magn. Induktion	T=Vs/m ²
C	Kapazität	F
c	Konstante	

C_P	Leistungszahl	kVAmin/m^3
D_a	Ständer-Außendurchmesser	m
d_A	Ankerdurchmesser	m
d_a	Läufer-Außendurchmesser	m
D_i	Ständer-Bohrungsdurchmesser	m
d_i	Läufer-Innendurchmesser	m
f	Frequenz	$1/s$
f_1	Frequenz im Ständer	Hz
f_2	Frequenz im Läufer	Hz
f_{PWM}	PWM-Schaltfrequenz	$1/s$
f_{soll}	Frequenz des Sollwerts	$1/s$
h_1	Läufer-Nuthöhe	cm
I	Strangstrom	A
I_A	Ankerstrom der Gleichstrommaschine	A
I_K	Kurzschlußstrom	A
I_μ	Magnetisierungsstrom	A
I_{Kred}	Kurzschlußstrom bei reduzierter Klemmenspannung	A
J	Trägheitsmoment	kg m^2
k	Konstante	
k_H	Verlustziffer für Ummagnetisierungsverluste bei f_0 und $\hat{B}_0$	W/kg
k_W	Verlustziffer für Wirbelstromverluste bei f_0 und $\hat{B}_0$	W/kg
l	Baulänge	m
l	Länge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
m	Modulationsgrad beim Unterschwingungsverfahren	
m	Modulationsgrad der AM	
m	Strangzahl	
M_i	inneres Drehmoment	Nm
M_K	Kippmoment	Nm
$M_{\ddot{u}}$	überlagertes Drehmoment	Nm
N	Windungszahl	
n	Drehzahl	$1/s$
$n_d + n_{0_0}$	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine „1“	
$n_d - n_{0_0}$	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine „2“	
n_{0_0}	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine „0“	

n_{0_0}	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine für die Grundschiwingung	
n_{0_1}	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine „1“	
n_{0_2}	Synchrondrehzahl der Asynchronmaschine „2“	
n_{N_0}	Nenndrehzahl der Asynchronmaschine „0“	1/s
n_{N_1}	Nenndrehzahl der Asynchronmaschine „1“	1/s
n_{N_2}	Nenndrehzahl der Asynchronmaschine „2“	1/s
p	Polpaarzahl	
P_d	Mittelwert der Zwischenkreis-Wirkleistung	W
P_i	Strompegel	dB
P_L	Wirkleistung im Lastkreis	W
P_N	Wirkleistung im Netz	W
P_S	Scheinleistung	W
P_{Fe}	Eisenverluste	W/kg
P_{mech}	abgegebene mechanische Leistung	W
R'_2	Läuferwiderstand	Ω
R_1	Ständerstrangwiderstand	Ω
R_v	Vorwiderstand	Ω
R_{Sym}	Symmetrierwiderstand	Ω
S	Schleifscheibe	
S	Vorladeschutz	
s	Schlupf	
s_{0_0}	Schlupf der Asynchronmaschine „0“ im Synchronpunkt	
s_{0_1}	Schlupf der Asynchronmaschine „1“ im Synchronpunkt	
s_{0_2}	Schlupf der Asynchronmaschine „2“ im Synchronpunkt	
s_{N_0}	Nennschlupf der Asynchronmaschine „0“	
s_{N_1}	Nennschlupf der Asynchronmaschine „1“	
s_{N_2}	Nennschlupf der Asynchronmaschine „2“	
T	Schaltperiodendauer	
t	Zeit	s
U	Spannung	V
U_d	arithmetischer Mittelwert der Zwischenkreisspannung	V
U_i	induzierte Spannung	V
U_L	Effektivwert der Leiterspannung	V
u_L	Lastspannung	V
u_L	Momentanwert der Leiterspannung	V
u_N	Netzspannung	V

$u_{1/2/3}$	Momentanwerte der Strangspannungen	V
$u_{12/23/31}$	Momentanwerte der Leiterspannungen	V
U_{dmax}	Maximalwert der Zwischenkreisspannung	V
U_{dmin}	Minimalwert der Zwischenkreisspannung	V
$U_{KStr,red}$	reduzierte Klemmenspannung im Kurzschlußversuch	V
u_{Str}	Momentanwert der Strangspannung	V
V	Volumen	m ³
V_R	Reibungsverluste	W
V_{Cu1K}	Ständerkupferverluste im Kurzschluß	W
V_{Fe}	Eisenverluste	W
w	Windungszahl	
X'_2	Gesamtreaktanz der Läuferwicklung	Ω
$X(\omega)$	Spektralfunktion	
$x(t)$	Nutzsignal bei der AM	
X_1	Gesamtreaktanz der Ständerwicklung	Ω
X_h	Hauptfeldreaktanz	Ω
X_K	Kurzschlußreaktanz	Ω
$X_{1\sigma}$	Ständerstreureaktanz	Ω
$X_{2\sigma}$	Läuferstreureaktanz	Ω
Z	Nutzenzahl	
z	Gesamtleiterzahl	
Z_K	Kurzschlußimpedanz	Ω

Indizes

0	Synchronpunkt
1	Ständer
2	Läufer
=	Gleichgröße
$\ddot{u}$	überlagert
$\sim$	Wechselgröße
A	Anker
a	außen
d	Zwischenkreisspannung
eff	Effektivwert
g	gegen
HF	Hochfrequenz

i	induziert
i	innen
$korr$	korrigiert
L	Last
L	Leiter
L	Luftspalt
m	Mittelwert
m	mit
max	Maximalwert
$mech$	mechanisch
min	Minimalwert
N	Nennpunkt
N	Netz
PWM	Pulsweitenmodulation
Sm	Schleifmittel
$soll$	Sollwert
Str	Strang
U	Strang U
Uni	Universalmaschine
V	Strang V
W	Strang W
Zk	Zwischenkreis

Abkürzungen

AM	Amplitudenmodulation
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CPLD	Complex Programmable Logic Device
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FFT	Fast Fourier Transformation
HF	Hochfrequenz
IC	Integrated Circuit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPM	Intelligent Power Module
NTC	Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizient
PWM	Pulsweitenmodulation
SiC	Siliziumkarbid