

Elektronisch kommutiertes Einzelspindelantriebssystem

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

vorgelegt von
Volker Bosch
aus Riedlingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Januar 2001

Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe
der Universität Stuttgart

2001

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 7

Volker Bosch

**Elektronisch kommutiertes
Einzelspindelantriebssystem**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bosch, Volker:

Elektronisch kommutiertes Einzelspindeltriebssystem/

Volker Bosch. Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe ; Bd. 7)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-8587-9

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8587-9

ISSN 1431-9888

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

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

für
SILKE

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe (IEMA) der Universität Stuttgart.

An dieser Stelle möchte ich mich bei dem Direktor des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt, für die Förderung und Unterstützung dieser Arbeit, sowie für die Übernahme des Hauptberichts bedanken. Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn für sein umwerfendes Interesse an dieser Arbeit, sowie die außergewöhnlich gewissenhafte Anfertigung des Mitberichts.

Danken möchte ich auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), der Siemens AG, sowie der Stiftung Industrieforschung für die finanzielle Unterstützung der einzelnen Projekte, die diese Arbeit ermöglicht haben. Auch den Firmen W. Schlafhorst AG & Co., Zinser Textilmaschinen GmbH, Barmag AG, Volkmann GmbH & Co., Saurer-Allma GmbH und Groschopp & Co. GmbH möchte ich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung danken.

Besonderer Dank gilt den wissenschaftlichen Mitarbeitern und Studenten des Instituts für die Unterstützung und das sehr gute Arbeitsklima. Stellvertretend für die Kollegen möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr. Kurt Reutlinger danken, der bereits im Rahmen meiner Diplomarbeit am IEMA das Interesse an elektrischen Maschinen weckte und der mich im Laufe der späteren, gemeinsam bearbeiteten Forschungsprojekte mit seiner Begeisterung für die Maschinen ansteckte und in sehr geduldiger Art und Weise Teile seines umfangreichen Fachwissens an mich weiter gab.

Großer Dank gilt auch Herrn Csiszmarek vom mechanischen Versuchslabor für die vielen „mechanischen“ Tipps und Anregungen, sowie die sorgfältige Umsetzung zahlreicher Ideen und Skizzen in geniale Konstruktionen bzw. Zeichnungen, nach denen die Mitarbeiter der Zentralwerkstatt Funktionsmuster in hervorragender Qualität gefertigt haben – auch ihnen sei hiermit herzlich gedankt!

Herrn Dick möchte ich für seine Unterstützung bei der Beschaffung von „exotischen“ Bauteilen und dem Einsatz von Messgeräten danken.

Zu guter Letzt danke ich auch Frau Fischer und Herrn Lebsanft für die Unterstützung und Aufmunterungen im Kampf gegen bürokratische Windmühlen.

Stuttgart, den 2. Februar 2001

VOLKER BOSCH

Was passiert in diesen Atommaschinen, diesen megatronischen Positronen oder wie die heißen?

UMBERTO ECO, Das Foucaultsche Pendel (6 TIFEREETH 64)

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	1
Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
1.1 Problem- und Aufgabenstellung	7
1.2 Konzeption des Antriebssystems	7
2 Maschinenmodell für den stationären Betrieb	11
2.1 Modell der elektronisch kommutierten Maschine	11
2.2 Zeigerdiagramm	12
2.2.1 Zeigerdiagramm der Vollpolmaschine	12
2.2.2 Zeigerdiagramm der Schenkelpolmaschine	15
2.3 Ersatzschaltbilder	17
2.3.1 Gesättigte Drehstrommaschine mit beliebigem Rotor	17
2.3.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild	17
2.3.3 Ersatzschaltbild für den unsymmetrischen Betrieb	18
3 Bemessung der permanentenerregten Drehstrommaschine	21
3.1 Stator	21
3.1.1 Blechpaket	21
3.1.2 Wicklung	22
3.2 Rotor	23

3.2.1	Magnetisierung der Versuchsmaschine	25
3.3	Vergleich von Vorausberechnung und Messung	29
3.4	Optimierung der Maschine	31
3.4.1	Magnetmaterial	31
3.4.2	Statorgeometrie	32
4	Erfassung der Läuferlage	33
4.1	Sensoren zur Erfassung der Läuferlage	33
4.2	Sensorlose Erfassung der Läuferlage	33
4.2.1	Auswertung der läuferlageabhängigen Stranginduktivität	34
4.2.2	Auswertung der Klemmenspannungen	34
4.2.3	Auswertung der dritten Harmonischen der Polradspannung	35
4.3	Schaltung zur Erfassung der Oberschwingungen	36
4.3.1	Störsignale der Pulsweitenmodulation	38
4.3.2	Signalaufbereitung für die Kommutierungslogik	39
5	Pulsweitenmodulation	43
5.1	Einfachstes PWM-Verfahren	43
5.2	PWM-Verfahren für Vierquadrantenbetrieb	45
5.3	Generatorbetrieb	48
5.4	Ersatzschaltbild des PWM-Umrichters	49
6	Anlaufvorgang	52
6.1	Anlaufstrategie	52
6.2	Positionierung des Läufers	52
6.3	Der synchrone Anlaufvorgang	55
6.3.1	Vorausberechnung der Kommutierungszeitpunkte	55
6.3.2	Praktische Vorausberechnung des Anlaufvorgangs	58
6.4	Überwachung des Anlaufvorgangs	59
6.5	Selbstparametrierung	60

7	Kommutierungsvorgang	61
7.1	Analytische Berechnung des Stromverlaufs	61
7.1.1	Ersatzschaltbild von Maschine und Umrichter	61
7.1.2	Differenzialgleichungen	64
7.1.3	Lösungen der Differenzialgleichungen	66
7.1.4	Dauer des Kommutierungsvorgangs	67
7.1.5	Fourieranalyse des Strangstroms	69
7.2	Klemmenspannung der Maschine	70
7.2.1	Berechnung der Sternpunktspannung	70
7.2.2	Berechnung der Klemmenspannung eines Strangs	72
7.3	Numerische Berechnung des Stromverlaufs	74
7.3.1	Potenzielle Fehlerquellen der numerischen Rechnung	76
7.3.2	Programmstruktur	76
7.3.3	Vergleich von numerischer und analytischer Rechnung	78
7.4	Variation des Kommutierungswinkels	79
7.4.1	Verzögerte Kommutierung	79
7.4.2	Vorzeitige Kommutierung	80
7.4.3	Messungen	82
7.4.4	Frequenzgeführter Betrieb der Maschine	82
8	Lastdetektierung	84
8.1	Zusammenhang zwischen Strangstrom und Belastung	84
8.2	Strommessung im Zwischenkreis	84
8.2.1	Stromerfassung über einen Shuntwiderstand	86
8.2.2	Strommessung an den Brückentransistoren	86
8.3	Lastdetektierung mittels des Polradwinkels	88
8.3.1	Schaltung zur Erfassung des Polradwinkels	89
8.3.2	Leistungsberechnung mit Hilfe des Polradwinkels	91
8.3.3	Berechnung auf dem Mikroprozessor	92

8.3.4	Messung an der Versuchsmaschine	93
9	Beeinflussung des Betriebsverhaltens	95
9.1	Ausnutzung des Reluktanzmoments	95
9.1.1	Verminderte magnetische Leitfähigkeit in der d-Achse	95
9.1.2	Verminderte magnetische Leitfähigkeit in der q-Achse	96
9.2	Beeinflussung der sensorlosen Läuferlageerfassung	96
9.2.1	Einfluss der Polbreite	96
9.2.2	Einfluss der magnetischen Einachsigkeit	97
9.3	Konstruktion eines Rotors	100
9.3.1	Aufbau einer Versuchsmaschine	100
9.3.2	Rotor mit Flusssperren	104
	Literaturverzeichnis	105
	Anhang	111
A	Messungen	111
A.1	Beschreibung des Prüfstands	111
A.2	Messaufbau	111
A.3	Messungen	112
A.3.1	Eigenbedarf der Elektronik	112
A.3.2	Leerlaufverluste	113
A.3.3	Gesamtwirkungsgrad	114
A.3.4	Maschinenwirkungsgrad	117
B	Berechnung der Synchronmaschine	118
B.1	Gültigkeit der Formeln – Voraussetzungen für ihre Anwendung	118
B.2	Leerlauf	119
B.2.1	Permanentmagnet und Luftspaltfluss	119
B.2.2	Wicklung	121

B.2.3	Induzierte Spannung	122
B.2.4	Widerstände und Induktivitäten	124
B.3	Belastung	127
B.3.1	Ankerrückwirkung und Entmagnetisierung	127
B.3.2	Betriebsverhalten	127
C	Numerische Magnetkreisberechnung	130
C.1	Netzwerk konzentrierter Ersatzelemente	130
C.1.1	Netzwerkelemente	131
C.1.2	Analyseverfahren	132
C.2	Spulen und Wicklungen	136
C.2.1	Bestimmung der Wicklungsinduktivitäten	136

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Erklärung	Einheit
A	(Anker-)Strombelag	A/m
a	Anzahl paralleler Leiter	
a, b	allgemeine Variablen	
a_ν, b_ν	Fourier-Koeffizienten	
B	magnetische Flussdichte	T
B_R	Remanenzflussdichte	T
b	tangentiale Breite	m
C	Kapazität	F
c, C	Konstanten	
D	Statordurchmesser	m
d	Rotordurchmesser	m
f	Frequenz	Hz
$f(t), g(t)$	allgemeine (Zeit-)Funktionen	
H	magnetische Feldstärke	A/m
${}_J H_c, {}_B H_c$	Koerzitivfeldstärke von Polarisation bzw. Flussdichte	A/m
h	radiale Höhe	m
I	elektrische Stromstärke	A
I_{mag}	magnetische (Ersatz-)Stromstärke	Vs
J	magnetische Polarisation	T
J	Massenträgheitsmoment	kg m ²
j	imaginäre Einheit ($\sqrt{-1}$)	
k_C	Carterscher Nutungsfaktor	
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor	
k_{CP}	Carterscher Polverlängerungsfaktor	
k_{Fe}	Eisenfüllfaktor	
L	Induktivität	H
l	axiale Länge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Strangzahl	
m	Masse	kg
N	Nutzahl	

Zeichen	Erklärung (Fortsetzung)	Einheit
N_y	Flusskonzentration	
n	Drehzahl	$1/\text{min}$
P	Leistung	W
p	Polpaarzahl	
Q	Fläche	m^2
q	Lochzahl	
R	elektrischer Widerstand	Ω
s	Laplace-Variable	
T	Periodendauer	s
T_K	Kommutierungsdauer	s
t	Zeit	s
U	elektrische Spannung	V
V	Volumen	m^3
V_{mag}	magnetische (Ersatz-)Spannung	A
v_T	Tastverhältnis	
w	Windungszahl (pro Strang)	
X	Reaktanz	Ω
z	(Anker-)Stabzahl	
α	Verzögerungswinkel der Kommutierung	
α_p	Polbedeckungsfaktor	
γ	allgemeiner Winkel	
δ	Luftspalthöhe	m
η	Wirkungsgrad	
Θ	Durchflutung	A
ϑ	Polradwinkel	
κ	spezifische Leitfähigkeit	$\text{m}/\Omega\text{m}^2$
Λ	magnetischer Leitwert	Vs/A
λ	relativer magnetischer Leitwert	
μ_0	magnetische Feldkonstante des Vakuums	$4\pi 10^{-7} \text{Vs}/\text{Am}$
μ_r	relative magnetische Permeabilität	
ξ	Wicklungsfaktor	
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	mechanische Spannung	N/m^2
σ_{Ow}	Oberwellenstrefaktor	
τ	Zeitkonstante	s
τ_p	Polteilung	m
Φ	magnetischer Fluss	Vs
φ	Phasenwinkel	
Ψ	Flussverkettung, Spulenfluss	Vs
ψ	Durchflutungswinkel	
Ω	mechanische Winkelgeschwindigkeit	$1/\text{s}$
ω	elektrische Kreisfrequenz	$1/\text{s}$

Indizes

Index	Erklärung	Index	Erklärung (Fortsetzung)
0	Gleichanteil, Startwert	M	Mitte, gemittelt
1	primär, statorseitig	m	moduliert, pulsweitenmod.
2	sekundär, rotorseitig	mag	magnetisch
I	Grundschwingung	max	maximal
III, V, ...	Oberschwingung: 3., 5., ...	$mech$	mechanisch
$A \dots G$	Bestromungsintervall $A \dots G$	min	minimal
a	außen, Anlauf, Ausgang	N	Sternpunkt
a, b, c	Umrichterhalbbrücke a, b oder c	$nenn$	Nenn-, Bemessungswert
abs	absolut	P	Polrad, Pol
aus	Ausschalt-	Pm	Permanentmagnet
B	magnetische Flussdichte	pwm	Pulsweitenmodulation
Cu	Kupfer-, elektrischer Leiter	q	Querachse (quadrature axis)
D	Durchlass-	ref	Referenz
d	Längsachse (direct axis)	$reib$	Reibung
dem	Entmagnetisierung	rel	relativ
e	Eingang	s	Nuttschlitz
eff	Effektivwert	str	Strang-
ein	Einschalt-	t	tangential
el	elektrisch	U, V	verkettete Größe
F	Zahnfuß, Spannungsteilerfuß	U, V, W	Strang- U, V oder W
Fe	Eisen-, magnetischer Leiter	V	Verlust
G	Grund, Nutgrund	Wk	Wicklungskopf
ges	gesamt	Z	Zahn-, Zwischenkreis-
h	Haupt(-feld)	δ	Luftspalt-
i	induziert, innen, ideell	μ	Magnetisierung-
J	magnetische Polarisation	ν	Ordnungszahl der Ober-
K	Kurzschluss, Zahnkopf		schwingungen
k	kritisch	μ, ν	Zählvariable
...		σ	Streuung

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
Cu	Kupfer
C	Kondensator
D	Diode
EC	Elektronisch kommutiert
el	elektrisch
Fe	Eisen
FFT	Fast Fourier Transformation
IC	Integrated Circuit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
int	Integriert
L	Drosselspule
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
mag	magnetisch
mech	mechanisch
npt IGBT	non punch through IGBT
Ow	Oberwellen
PC	Personal Computer
PLD	Programmable Logic Device
PM	Permanentmagnet
PWM	Pulsweitenmodulation
R	Widerstand
SM	Synchronmaschine
T	Transistor
Wk	Wicklungskopf
Δ	Differenz, Änderung

Schreibweise von Formelzeichen

Darstellung	Erklärung
X	Großbuchstaben: Effektivwert
x	Kleinbuchstaben: Augenblickswert
\underline{X}	komplexe Größe (Zeitzeiger)
\hat{X}	Scheitelwert einer Wechselgröße
ΔX	Änderung einer Größe
sign X	Vorzeichen einer Größe

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Einzelspindeltriebssystem für eine Textilmaschine mit einer Abgabeleistung von 1000 W vorgestellt. Dieses soll die bisher gebräuchlichen Einzelspindeltriebe ersetzen, welche aus Asynchronmaschinen bestehen, die an einem *gemeinsamen* Zentralumrichter betrieben werden. Das Antriebssystem besteht im Wesentlichen aus einer permanentmagnetisch erregten Drehstrommaschine, die im Aufbau einer dreiphasigen Synchronmaschine ohne Dämpferkäfig entspricht, kombiniert mit einem pulsweitenmodulierten Umrichter. Dieser Gleichspannungszwischenkreis-Umrichter kommutiert die Maschine in Abhängigkeit von ihrer Läuferlage. Da der Durchflutungswinkel durch die Umrichtersteuerung bestimmt wird, zeigt der Antrieb das Verhalten einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine.

Die Erfassung der Läuferlage erfolgt sensorlos, mittels Detektierung der dritten Oberschwingung der Polradspannung. Dieses Signal kann mit sehr geringem Aufwand zwischen den Klemmen der Maschine und dem Maschinensternpunkt abgegriffen werden. Aus diesem Signal können durch Detektierung der Nulldurchgänge sechs Kommutierungszeitpunkte ermittelt werden. Der Umrichter kann somit lediglich 120° breite Blöcke konstanter Spannung an die Maschine anlegen, da die Erzeugung anderer Spannungsformen, wie Trapez oder Sinuskurve, feiner auflösende Lagegeber erfordert.

Obwohl der Antrieb das Betriebsverhalten einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine zeigt, muss für die Vorausberechnung der Maschine in jedem Fall die Theorie der Synchronmaschine herangezogen werden. Da es derzeit wenig Fachliteratur zur Berechnung permanentmagnetisch erregter Drehstrom-Synchronmaschinen gibt, ist der zur Vorausberechnung der Maschine verwendete Formelsatz im Anhang B angegeben. Anhand dieser Formeln wurde eine Versuchsausführung der Maschine konstruiert und gefertigt. Auch der zugehörige Umrichter wurde als Versuchsanlage aufgebaut.

Die Maschine wurde aus Kostengründen mit Oberflächenmagneten auf dem Rotorjoch ausgerüstet. Aufgrund des magnetisch rotationssymmetrischen Aufbaus des Rotors zeigt die Maschine an den Klemmen das Verhalten einer Vollpolsynchronmaschine. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, ist das Statoreisen der Maschine nur sehr gering ausgenutzt und somit weitgehend ungesättigt. Aufgrund der daraus resultierenden linearen Verhältnisse kann das sehr einfache polradspannungsbasierte Modell der Synchronmaschine zur Voraus-

berechnung des Betriebsverhaltens der permanentmagnetisch erregten Drehstrommaschine am pulsweitenmodulierten Umrichter benutzt werden.

Für die Untersuchung des Betriebsverhaltens wird der Kommutierungsvorgang der permanentmagnetisch erregten Drehstrommaschine am Umrichter genauer betrachtet. Es zeigt sich, dass die Maschine einen lastabhängigen Polradwinkel aufweist, der mit verhältnismäßig geringem Aufwand detektiert werden kann und für die Regelung bzw. Überwachung des Antriebs verwendbar ist. Ermöglicht wird dieses Verhalten durch den Umrichter, der lediglich 120°-Spannungsblöcke auf die Maschine schaltet. Zwischen zweien dieser Spannungsblöcke wird der Maschine keine Klemmenspannung aufgezwungen. Aufgrund der Freilaufströme des Kommutierungsvorgangs verschiebt sich die Grundschwingung der Klemmenspannung in Abhängigkeit von der Belastung des Antriebs.

Die Einstellung der Drehzahl des Antriebs erfolgt über die Pulsweitenmodulation der Umrichterbrücke. Durch Anwendung eines geeigneten Modulationsverfahrens wird ein Vierquadrantenbetrieb der Maschine ermöglicht. Im generatorischen Bremsbetrieb speist die Maschine Leistung in den Zwischenkreis zurück.

Ein magnetisch nicht rotationssymmetrischer Rotor würde die Phasenlage der dritten Oberschwingung in der induzierten Spannung der Maschine beeinflussen. Diese Phasenverschiebung wird vom Querachsenstrom I_q verursacht und ist somit lastabhängig. Da die Kommutierungszeitpunkte des Umrichters aus der dritten Oberschwingung der Klemmenspannung abgeleitet werden, kann das Betriebsverhalten des Antriebs bei entsprechender Gestaltung des Rotors beeinflusst werden.

Abschließende Messungen zeigten, dass die hier aufgebaute Versuchsmaschine des Einzelspindeltriebs sehr hohe Wirkungsgrade erzielt. Auch in Bezug auf die Herstellungskosten kann der hier entworfene elektronisch kommutierte Einzelspindeltrieb mit der heute üblichen Kombination aus einem Zentralumrichter und zahlreichen Asynchronmaschinen konkurrieren. Darüber hinaus werden mehrere Hinweise für die Kostenoptimierung der Maschine in der Serienfertigung gegeben.