Einsatz schmelztexturierter Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) in elektrischen Maschinen

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

vorgelegt von

Volker Schlechter
aus Berlin

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feser
Tag der mündlichen Prüfung:	09. Mai 2000

Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe
der Universität Stuttgart
2000

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 6

Volker Schlechter

Einsatz schmelztexturierter Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) in elektrischen Maschinen

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Schlechter, Volker:
Einsatz schmelztexturierter Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)
in elektrischen Maschinen / Volker Schlechter.
Aachen : Shaker, 2000
(Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe ; Bd. 6)
Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2000
ISBN 3-8265-7643-8

Copyright Shaker Verlag 2000
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7643-8
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

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

Mein besonderer 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 Hauptberichtes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feser danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Anfertigung des Mitberichtes.

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF, Bonn) finanziell gefördert und am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe (IEMA) der Universität Stuttgart bearbeitet wurde. Die enge Zusammenarbeit und der Gedankenaustausch mit dem Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT) in Jena und der Firma Oswald Elektromotoren GmbH in Miltenberg förderten die wissenschaftlichen Untersuchungen am HTSL-Motor.

Allen Kollegen, die mich im Laufe der Jahre unterstützt haben, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Grüner, der mich mit viel Rat und anregenden Fachgesprächen begleitet hat, danke ich für die freundschaftliche und kreative Zusammenarbeit. Gleiches gilt für die Mitarbeiter der Zentralwerkstatt des Instituts, die sich mit viel Engagement für meine Ideen eingesetzt haben.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei meinem Bruder und meinen Eltern für die Durchsicht des Manuskripts

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

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung **10**

2 Einleitung **12**

2.1 Problemstellung 12

2.2 Übersicht 14

3 Systematische Betrachtungen **15**

3.1 Supraleiter 15

3.2 Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) 18

3.3 Hochtemperatur-Supraleiter als Massivmaterialien 20

3.4 Hochtemperatur-Supraleiter-Massivmaterialien in elektrischen Maschinen 21

3.4.1 Anwendung von Hochtemperatur-Supraleitern in unterschiedlichen Maschinenkonzepten 22

3.4.2 Hochtemperatur-Supraleiter in magnetischen Passivlagern 25

3.5 Läufer- oder Ständerwicklungen aus HTS 27

3.5.1 HTS-Gleichstromwicklungen 27

3.5.2 HTS-Wechselstromwicklungen 28

3.6 Hysteresekurve und Bean Modell 29

3.7 Mit flüssigem Stickstoff LN_2 gekühlte elektrische Maschinen . . . 32

3.8 Überblick zur Forschung an HTS-Motoren 33

4 Elektromagnetische Felder in der HTS-Maschine **35**

4.1 Berechnungsmethoden für elektrische Maschinen 36

4.2 Maxwellsche Gleichungen und ihre Lösung 37

4.3 E-H Ersatzschaltbilder in der HTS-Maschine 38

4.3.1 Die komplexe Permeabilität des HTS-Materials 39

4.3.2 Lösung der Maxwellgleichungen im HTS-Abschnitt für den Asynchronbetrieb 42

4.3.3 HTS Bereich bei synchroner Drehzahl 45

4.3.4 Lösung der Maxwellgleichungen im Luftspalt 47
4.3.5 Lösung der Maxwellgleichungen in den Jochabschnitten des Ständers und Läufers 50
4.3.6 Lösung der Maxwellgleichungen im Wellenabschnitt 51
4.3.7 Lösung der Maxwellgleichung im Nutbereich 53
4.4 E-H Ersatzschaltbild der HTS-Maschine für den Asynchronbetrieb 59
4.5 E-H Ersatzschaltbild der HTS Maschine für den Synchronbetrieb . 61
4.6 Leistungsfluß in der HTS Maschine 62
4.6.1 Zusammenhang zwischen elektrischem und E-H Ersatzschaltbild 66
4.7 Mechanische Leistung für den Asynchronbetrieb des HTS-Hysteresemotors 69
4.8 Mechanische Leistung für den Synchronbetrieb des HTS-Hysteresemotors 69
4.9 Zusammenfassung der Berechnung der HTS-Maschine mit Hilfe der elektromagnetischen Felder 70

5 Entwurf einer HTS-Maschine 72
5.1 Aufbau des Ständers der Versuchsmotoren 72
5.2 Aufbau und Vorausberechnung eines HTS-Hysteresemotors 73
5.3 Drehmoment für Hysteresemotoren mit HTS 76
5.4 Aufbau und Entwurf eines Reluktanzmotors mit Hochtemperatur-Supraleiter 77
5.5 Aufbau und Entwurf eines permanent erregten Synchronmotors mit Hochtemperatur-Supraleiter 78

6 Betriebsverhalten des Hysteresemotors 82
6.1 Feldverlauf beim Eintritt in den Synchronismus 83
6.1.1 Asynchroner Lauf 84
6.1.2 Synchronisieren 84

7 Experimentelle Untersuchungen 86
7.1 Meßaufbau 86
7.2 HTS-Hysteresemotor 87
7.2.1 Leerlauf-, Belastungs- und Kurzschlußversuch 88
7.2.2 Trapped-Field Untersuchungen 97
7.3 Verluste durch den Aufbau des Rotors mit Hochtemperatur-Supraleitern 98
7.3.1 Radialer Feldverlauf im Motor 98

7.3.2 Axialer Feldverlauf im Motor 101
7.4 Verluste in verschiedenen Motoren mit HTS 102
7.5 Zusammenfassung der Messungen am HTS-Hysteresemotor 103

8 Weiterentwicklung des HTS-Motors und Ausblick 105

Anhang 109

A Maschinendaten 107
A.1 Motorparameter des HTS-Hysteresemotors 107

B Maschinenberechnung 108
B.1 Kurzschlußbetrieb 108
B.2 Leerlaufbetrieb 108
B.3 Gegenüberstellung der Messungen am Versuchsmotor mit den Berechnungsergebnissen 109

C Maschinenauslegung 111
C.1 Berechnungstabelle 111

Formelzeichen

a, b, c	Variablen für eine Ellipse
A_{11},A_{12},A_{21},A_{22}	Vierpolparameter
A	Strombelag $[A/m]$
A_n, B_n, C_n, D_n	Integrationskonstanten
B	magnetische Induktion $[T]$
B_{c1}, B_{c2}	spezifische magnetische Induktion $[T]$
b_3	Zahnbreite $[m]$
c_w	Wirbelstromfaktor
c_H	Hysteresefaktor
E	elektrische Feldstärke $[Vs]$
d	Eindringtiefe $[mm]$
D	Durchmesser einer Schicht $[m]$
F	Kraft $[N]$
F_p	Pinningkraft $[N]$
F_l	Lorentzkraft $[N]$
F_{vis}	Viskositätskraft $[N]$
f	Frequenz $[Hz]$
f_1	Ständerfrequenz $[Hz]$
$f(s)$	Funktion von s
g	elektrische Stromdichte $[A/m^2]$
H	magnetische Feldstärke $[A/m]$
h	Nuthöhe $[m]$
I, I_1	Strom, Ständerstrom $[A]$
I_{str}	Strangstrom
j_s, j_c, j_0	Suprastromdichte, Stromdichte $[A/m^2]$
J_p,N_p	Bessel-, Neumannfunktion
K_{u0}, K_{i0}	Spannungs-, Stromumrechnungsfaktor
K_C	Carterscher Faktor
k_d	Längsfeldfaktor
k_q	Querfeldfaktor
l_i	ideele Maschinenlänge $[m]$
l_p	Twistlänge
M	Drehmoment $[Nm]$
m	Phasenzahl
N	Nutzahl
n	Drehzahl $[rpm]$

n_1	Ständerdrehzahl $[rpm]$
P	Wirkleistung $[W]$
P_{mw}	Wirbelstromleistung $[W]$
P_h	Hystereseleistung $[W]$
P_{d1}	Ständerdrehfeldleistung $[W]$
P_R	Reibungsverluste $[W]$
p	Polpaarzahl
Q	Blindleistung $[VA]$
R, R_1	ohmscher Widerstand, ohmscher Widerstand im Ständer $[\Omega]$
r	variabler Radius $[m]$
R_0	Wellenradius $[m]$
R_1	Rotorjochradius $[m]$
R_2	HTS-Radius $[m]$
R_3	Sänderinnenradius $[m]$
R_4	Ständerjochinnenradius $[m]$
R_5	Ständerjochaußenradius $[m]$
RH_0	Strom im E-H Ersatzschlatbild $[A]$
r, φ, z	Zylinderkoordinaten $[m]$
S	Energievektor, Poyntingvektor
s	Schlupf
t	Zeit $[s]$
U_0	Spannung $[V]$
U_i	induzierte Spannung $[V]$
U_1	Strangspannung $[V]$
V_w	Wirbelstromverluste $[W]$
V_H	Hystereseverluste $[W]$
V_{ac}	Verluste durch Wechselfelder
V	Volumen $[m^3]$
w_{st}	Wicklungszahl
X_d	Längsfeldreaktanz $[\Omega]$
X_q	Querfeldreaktanz $[\Omega]$
X_σ	Streublindwiderstand $[\Omega]$
$X_\sigma 1$	Streublindwiderstand des Ständers $[\Omega]$
$X_\sigma w$	Reaktanz des Ständerwicklungskopfes $[\Omega]$
Y	Leitwert $[1/\Omega]$
Z	komplexer Widerstand $[\Omega]$
Z_{SN}	komplexer Widerstand der Ständernut-Schicht $[\Omega]$
Z_{SJ}	komplexer Widerstand der Ständerjoch-Schicht $[\Omega]$

Z_{LJ}	komplexer Widerstand der Läuferjoch-Schicht [Ω]
Z_δ	komplexer Widerstand der Luftspaltschicht [Ω]
Z_{HTS}	komplexer Widerstand der HTS-Schicht [Ω]
Z_g	gesamter komplexer Widerstand [Ω]
z	Zahnzahl

Griechische Variablen

α	Polbedeckungsfaktor
β	Öffnungswinkel einer Nut
δ	Luftspaltdicke $[m]$
δ''	fiktiver Luftspalt $[m]$
τ_p	Polteilung $[m]$
τ	Abklingzeitkonstante $[s]$
κ	spezifische elektrische Leitfähigkeit
μ, μ_0, μ_r	Permeabilität, im Vakuum, relative
μ_s	Permeabilität des Supraleiters
μ_{HTS}	Permeabilität des HTS
ω	Kreisfrequenz
ω_0	synchrone Winkelgeschwindigkeit
θ	Polradwinkel
Θ	Durchflutung
Φ	magnetischer Fluß
Φ_0	magnetischer Flußschlauch
$cos\varphi$	Leistungsfaktor
ψ	komplexer Hysteresewinkel
ξ_1	Wicklungsfaktor

Indizes

1	Ständerwicklung
ac	Wechselspannung
a	außen
d	magnetische Längsachse
eff	Effektivwert
HTS	HTS-Schicht
i	innen

l	Variable zwischen Innen und Außen
LJ	Schicht des Läuferjoches
max	Maximum
mech	mechanisch
min	Minimum
q	magnetische Querachse
s	Supraleiter
SJ	Schicht des Ständerjoches
W	Wellenschicht
z	Komponente in z-Koordinatenrichtung
δ	Luftspaltschicht
φ	Komponente in φ-Koordinatenrichtung
ν	Index
σ	Streuung

Zusatzzeichen

$\hat{}$	Scheitelwert
$\underline{}$	komplexe Amplitude
$\vec{}$	vektorielle Größe

Abkürzungen

ASM	Asynchronmaschine
DGL	Differentialgleichung
ESB	Ersatzschaltbild
HTS	Hochtemperatur-Supraleiter
LN_2	Flüssig-Stickstoff
LHe	Flüssig-Helium
PM	Permanentmagnet
RE	seltene Erden
RM	Reluktanzmaschine
SH	Hysteresemotor mit Supraleiter
SM	Synchronmaschine
SP	supraleitende Permanenterregte Maschine mit Supraleiter
SR	Reluktanzmaschine mit Supraleiter
YBCO	Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)