

Schwung-Energiespeicher-System mit supraleitenden Magnetlagern

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

Vorgelegt von

Ralf Koch
aus Lauterbach/Hessen

Hauptberichter:	Prof. Dr. H.-J. Gutt
Mitberichter:	Prof. Dr. P. Komarek
Mitberichter:	Prof. Dr. E. Kasper
Tag der mündlichen Prüfung:	16.10.2001

Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Stuttgart
2002

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 8

Ralf Koch

**Schwung-Energiespeicher-System
mit supraleitenden Magnetlagern**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Koch, Ralf:

Schwung-Energiespeicher-System mit supraleitenden Magnetlagern/
Ralf Koch.

Aachen : Shaker, 2002

(Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe ; Bd. 8)

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

ISBN 3-8322-0167-X

Copyright Shaker Verlag 2002

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0167-X

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	12
2	Einleitung	15
2.1	Problemstellung	15
2.2	Übersicht	17
3	Schwungradtechnologie	18
3.1	Stand der Technik	18
3.2	Vergleich verschiedener Speichertechnologien	20
3.3	Prinzip	23
4	Supraleitende Magnetlager	28
4.1	Allgemeine Grundlagen der Magnetlager	28
4.1.1	Earnshaw Theorem	29
4.1.2	Permanentmagnetlager	31
4.1.3	Aktive Magnetlager	32
4.2	Eigenschaften supraleitender Magnetlager	34
4.2.1	Supraleitung	34
4.2.1.1	Supraleiter vom Typ I und II	34
4.2.1.2	Harte Typ-II-Supraleiter	35
4.2.1.3	Levitation	37

4.2.2	Herstellung und Charakterisierung von massivem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	39
4.2.2.1	Herstellung	39
4.2.2.2	Charakterisierung der Proben	40
4.2.3	Statische Untersuchungen	52
4.2.3.1	Grundlagenuntersuchungen zur Wechselwirkung verschiedener PM-HTS-Anordnungen	53
4.2.3.2	Vertikale supraleitende Magnetlager	64
4.2.3.3	Doppel-Dipol-Anordnung bei Anwendung unterschiedlicher HTS-Ringe	69
4.2.4	Dynamik supraleitender Magnetlager	75
4.2.4.1	Versuchsaufbau	75
4.2.4.2	Dynamische Eigenschaften	77
4.2.5	Zusammenfassung	84
5	Das 300Wh/10kW-Schwung-Energiespeicher-System	86
5.1	Supraleitende Magnetlagermodule	87
5.1.1	Systembedingte Anforderungen	87
5.1.2	Aufbau	89
5.2	Elektrischer Antrieb	90
5.2.1	Elektrische Maschine	90
5.2.1.1	Aufbau und Funktion der Homopolar-Synchronmaschine	91
5.2.1.2	Vergleich zu anderen Maschinentypen	91
5.2.2	Umrichtertechnik	92
5.2.2.1	Aufbau	93
5.2.2.2	Regelung des Umrichters	93
5.3	Schwungradrotor	96
5.3.1	Schwungradscheiben	97

5.3.2	Rotordynamik	97
5.4	Vakuum- und Kryotechnik	106
5.4.1	Vakuumtechnik	106
5.4.2	Kryotechnik	108
6	Experimentelle Systemuntersuchungen	117
6.1	Auslaufversuche	117
6.2	Belastungsversuche	121
7	Ausblick	125
8	Anhang	130
8.1	Berechnung der kritischen Stromdichte aus Flux-Mapping-Profilen . . .	130
8.2	Messtechnische Bestimmung der Komponenten des Trägheitstensors . .	131
8.2.1	Polares Trägheitsmoment	131
8.2.2	Äquatoriales Trägheitsmoment	132
8.3	Bildteil	133
	Literaturverzeichnis	138

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

Formelzeichen

A	Fläche [m^2]
A	Amplitude [mm]
b	Breite [m]
B	Magnetische Flussdichte [T]
c	Steifigkeit, Federkonstante [N/m]
c_p, c_v	Spezifische Wärme [$J/K kg$]
C	Konstante
C_{12}	Strahlungsaustauschzahl
d	Abstand [m]
D	Durchmesser der Zylinderprobe [m]
e	Elementarladung [As]
E, W	Energie, Arbeit [Ws]
E^*	Energiedichte [Ws/kg]
f	Frequenz [Hz]
F	Kraft [N]
h	Höhe [m]
h	Planck'sches Wirkungsquantum [Js]
H	Magnetische Feldstärke [A/m]
H	Höhe der Zylinderprobe [m]
I	Strom [A]
I	Flächenträgheitsmoment [m^4]
J	Stromdichte [A/m^2]
k_F	Formfaktor
k_C	Carter'scher Faktor
k_{WS}	Werkstofffaktor [m^2/s^2]
k	Boltzmann-Konstante [J/K]
K	Konstante
K_n	Knudsenzahl
l	Länge [m]
l_m	Mittlere freie Weglänge [m]

L	Drehimpuls [$kg\ m/s$]
m	Masse [kg]
m	Dipolmoment [$D = C\ m$]
M	Magnetisierung pro Volumen [T/m^3]
M	Drehmoment [Nm]
M	Molmasse [g/mol]
n	Drehzahl [min^{-1}]
n	Teilchenzahl
N	Windungszahl, Anzahl
N_A	Avogadro-Konstante [$1/mol$]
p	Druck [Pa, bar]
p	Polpaarzahl
P	Leistung [W]
P^*	Leistungsdichte [W/kg]
R	Radius [m]
R_G	Gaskonstante [$J/(mol\ K)$]
s	Strecke [m]
S	Spaltweite [m]
t	Zeit [s]
T	Temperatur [K]
v	Geschwindigkeit [m/s]
V	Volumen [m^3]
V	Magnetische Spannung [A]
\dot{Q}	Verlustwärmestrom [W]
\bar{c}^2	Mittleres Geschwindigkeits- quadrat [m^2/s^2]
α	Akkomodationskoeffizient
β	Gewichtungsfaktor
γ	Dämpfungsfaktor [kg/s]
δ	Luftspalt [mm]
Δ	Differenz
ϵ	Emissionsverhältnis
ϵ_r	Relative Dielektrizitätskonstante
η	Wirkungsgrad

η	Viskosität [kg/s]
Θ	Drehträgheitsmoment [$kg\,m^2$]
Θ	Durchflutung [A]
κ	Verhältnis der spez. Wärme
κ	Ginzburg-Landau-Parameter
λ	Wärmeleitfähigkeit [$W/(K\,m)$]
λ	Dämpfungskoeffizient [kg^2/s]
λ	Eindringtiefe [m]
Λ	Magnetischer Leitwert [Vs/A]
μ_0	Permeabilität [Vs/Am]
μ_r	Relative Permeabilität
ξ	Kohärenzlänge [m]
ρ	Dichte [kg/m^3]
σ	Zugspannung [N/m^2]
σ	Strahlungskonstante [$W/m^2\,K^4$]
ϕ	Magnetischer Fluss [Vs]
ϕ_0	Flussquant [Vs]
χ	Magnetische Suszeptibilität [1]
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

Abkürzungen

<i>AD</i>	Analog-digital
<i>ASM</i>	Asynchromaschine
<i>CFK</i>	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
<i>D</i>	Dämpfungsmatrix
<i>DMS</i>	Dehnungsmekstreifen
<i>EE</i>	Elektrisch erregte Maschine
<i>FC</i>	Field-Cooling
<i>FM</i>	Fasermaterialien
<i>G</i>	Gyroskopische Matrix
<i>GFK</i>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<i>GM</i>	Gifford-Mc Mahon
<i>HPM</i>	Homopolarmaschine

<i>HM</i>	Homogene Materialien
<i>HTS</i>	Hochtemperatursupraleiter
<i>K</i>	Steifigkeitsmatrix
<i>LF</i>	Lastfall
<i>LN₂</i>	Flüssiger Stickstoff
<i>M</i>	Massenmatrix
<i>NEG</i>	$Nd_xEu_yGd_z$
<i>PM</i>	Permanentmagnet
<i>RM</i>	Reluktanzmaschine
<i>SES</i>	Schwung-Energiespeicher-System
<i>SM</i>	Synchronmaschine
<i>SML</i>	Supraleitende Magnetlager
<i>SMES</i>	Supraleitende magnetische Energiespeicher
<i>ST37</i>	Stahl ST37
<i>SQUID</i>	Superconducting Quantum Interference Device
<i>USV</i>	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
<i>ZFC</i>	Zero-Field-Cooling
<i>Y123</i>	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$
<i>Nd123</i>	$NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$
<i>Sm123</i>	$SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

Indizes

<i>a</i>	Außen
<i>ax</i>	axial
<i>c</i>	Charakteristische (kritische) Werte für Supraleiter
<i>D</i>	Dämpfung
<i>e</i>	Exzentrizität
<i>f</i>	Erreger-
<i>F</i>	Feder
<i>F</i>	Fließ-
<i>F</i>	Form-
<i>Gas</i>	Gas-
<i>GR</i>	Gasreibung

<i>ges</i>	Gesamt
<i>i</i>	Innen
<i>i</i>	Eigen-
<i>kr</i>	kritisch
<i>K</i>	Knoten
<i>K</i>	Kalt
<i>K</i>	Festkörperkontakt-
<i>L</i>	Luftspalt, Lorentz
<i>m</i>	magnetisch
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>M</i>	Mittelwert
<i>N</i>	Nenn-
<i>P</i>	Pinning
<i>r</i>	radial
<i>R</i>	Rückstellkraft
<i>RES</i>	Resonanz
<i>St</i>	Strahlung
<i>V</i>	Verlust-
<i>WL</i>	Wärmeleitung
<i>W</i>	Warm
<i>W</i>	Wirbel
<i>Ws</i>	Werkstoff-
<i>x, y, z</i>	Koordinaten: x=horizontal, z=vertikal(=axial)
<i>Zyl</i>	Zylinder
<i>0</i>	Vakuum

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. H.-J. Gutt, für die stete Förderung und Unterstützung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptberichtes.

Herrn Prof. Dr. P. Komarek danke ich für das ständige Interesse am Fortgang meiner Arbeit sowie für die Anfertigung des Mitberichtes.

Herrn Prof. Dr. E. Kasper danke ich für die Anfertigung des Mitberichtes.

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis eines gemeinsamen Forschungsprojektes des Instituts für Festkörperphysik am Forschungszentrum Karlsruhe und dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Stuttgart, welches erst durch das großartige Engagement von Herrn Prof. Rietschel ermöglicht wurde. Ein besonderer Dank gilt ihm.

Danke sage ich

- meinen Kollegen Fr. Dr. Kläser und Hr. Dr. Sander für die stetige Unterstützung und Diskussionsbereitschaft, welche zur Lösung wichtiger Probleme beitrug.

- Hr. Beck, ohne dessen großartige Arbeit der Aufbau der gesamten Elektronik nicht möglich gewesen wäre. Hr. Weber, Hr. Ludwig und Hr. Sobing, stellvertretend für alle Mitarbeiter der Werkstätten, danke ich für die Konstruktion und Fertigung bzw. den Aufbau der verschiedenen Schwungradkomponenten.

- meinen Kollegen Hr. Sutter und Hr. Wagner, die in ihren Diplomarbeiten wichtige Teilaspekte der hier vorliegenden Arbeit untersuchten. Hr. Reichert für die Unterstützung beim Aufbau des Messsystems und Hr. Rusli für die Durchführung wichtiger Messungen zur Charakterisierung der Materialien.

- meinen ehemaligen Kollegen Hr. Dr. Bornemann und Hr. Dr. Kaiser für ihre Unterstützung, welche mir die Einarbeitung in das komplexe Thema Supraleitung erleichterte. Desweiteren danke ich Hr. Dr. Kaiser für die Herstellung der Proben, die erst die Realisierung der supraleitenden Magnetlagermodule ermöglichte.

- meinem Studienkollegen Hr. Menz für die Durchsicht des Manuskripts.

Mein großer Dank gilt schließlich meiner Frau und meiner Tochter für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der Zeit des Entstehens dieser Arbeit.

Abstract

This dissertation describes an integrated high speed flywheel system, which is especially designed for long-term stationary energy storage. The developments in the past show that a particularly critical component in this respect is the bearing. An alternative against conventional and active, i.e. electronically controlled magnetic bearings, are completely passive magnetic bearings employing High Temperature Superconductor (HTS). The discovery of the HTS by Bednorz and Müller in 1986 brought about great excitement in this field of superconductivity. The use of melt-textured HTS and permanent magnet configurations leads to absolutely passive devices, which can provide stable levitation of a flywheel rotor in horizontal and vertical direction and additional safety margins in comparison to active controlled magnetic bearings. The special characteristics, contactfree operation with nearly no friction and the possibility to use this type of bearing at ultra-high vacuum, favour it for applications in flywheel systems.

The main objective of the presented development is to reduce the losses in the standby mode improving the overall performance particularly for long-term storage. Based on the experiences with the development and test of a homopolar synchronous machine, which transform the electrical energy to mechanical energy and back, the characterization and the development of different superconducting magnetic bearings and the complete flywheel system are described in this thesis.

Superconducting magnetic bearings have a reduced stiffness in comparison to conventional bearings, so that a deeper optimization of the static and dynamic characteristics are carried out. Result is a patented superconducting magnetic bearing modul, which is able to stabilize the complete rotor of the flywheel ($m=10.3$ kg) in horizontal and vertical direction without any passive or active support. The tests demonstrate, that the use of superconducting materials with average quality leads to sufficient stability, but today the rotational losses, which are mainly hysterical, are not neglectible.

From the actual point of view, the application of flywheel systems with superconducting magnetic bearings for long term storage ($t>1$ day) is not convenient, but the use of this systems with high power deliver advantages (lower volume and costs) compared to batteries.

The characterization of different permanent magnet configurations demonstrates the importance of using multipole configurations with or without ferromagnetic materials for flux concentration. The main goal for increasing the stiffness in vertical and horizontal direction is to reduce the gap between the superconductor and the permanent magnet configuration. On the other hand a reduction of the gap leads to higher rota-

tional and thermal losses, so that an optimized distance is important for increasing the efficiency of the superconducting magnetic bearing moduls.

A lot of tests with different cryocoolers demonstrate the principal operation of these devices, but also, nowadays the maintenance intervals and lifetime of the whole system are essentially defined by the cryocooler.