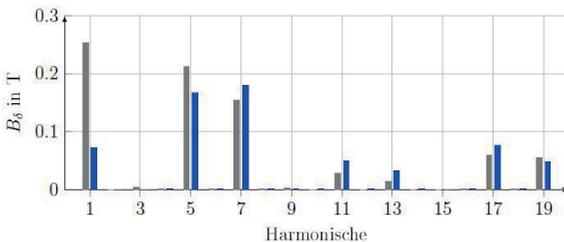
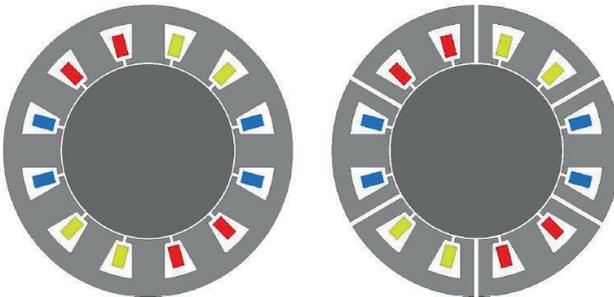


Forschungsberichte
Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Johannes Gerold

Elektrische Maschinen mit
Flussbarrieren im Stator



Elektrische Maschinen mit Flussbarrieren im Stator

Johannes Walter Gerold

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter/Gutachterin: 1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Die Dissertation wurde am 25.05.2021 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 08.11.2021 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 20.01.2022 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 47

Johannes Gerold

Elektrische Maschinen mit Flussbarrieren im Stator

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8518-1

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Aktorik an der Universität der Bundeswehr München.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling meinen besonderen Dank für die Förderung und Unterstützung bei meiner Arbeit aussprechen. Den wissenschaftlichen Freiraum und das Vertrauen, das er aufbrachte, wusste ich stets zu schätzen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern und Kollegen des Lehrstuhls danke ich für die gute Zusammenarbeit, den Austausch und die fachlichen Diskussionen zur Doktorarbeit. Hier möchte ich Herrn Harald Graul, für die Unterstützung am Prüfstand, hervorheben.

Herzlich bedanken möchte ich mich außerdem bei meiner Familie und meiner Partnerin für den Rückhalt und die Unterstützung während meiner Doktorarbeit. Meinem Vater danke ich zudem für die Durchsicht der Endform der Arbeit sowie für Anregungen in deren Verlauf.

München, im Mai 2021

Johannes Walter Gerold

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Flussbarrieren im Stator und ihr Einfluss auf das Maschinenverhalten untersucht.

Flussbarrieren im Stator können in elektrischen Maschinen verwendet werden, um die Luftspaltflussdichte zu verändern. Sie können zu einer Steigerung der Arbeitsharmonischen und gleichzeitig zu einer Reduzierung von ungewollten parasitären Luftspaltharmonischen führen. Der Vergleich von elektrischen Maschinen, die sich, abgesehen von den Flussbarrieren im Stator, nicht unterscheiden, zeigt eine Verbesserung des Maschinenverhaltens durch Flussbarrieren. Das äußert sich dadurch, dass die Maschinen mit Flussbarrieren bei gleichem Strombelag ein höheres Drehmoment, bei gleichzeitig geringeren frequenzabhängigen Verlusten, aufweisen.

Für die Beschreibung eines Stators mit Flussbarrieren muss ein äquivalenter Wicklungsfaktor eingeführt werden, um den Einfluss auf die Luftspaltflussdichte beschreiben zu können. Hierbei können sich Werte für den äquivalenten Wicklungsfaktor größer 1 ergeben, was bei der konventionellen Berechnung des Wicklungsfaktors nicht möglich ist. Somit können mit Flussbarrieren im Stator Maschinen entworfen werden, die hinsichtlich ohmscher Verluste effizienter operieren können als Maschinen, die auf einen Wicklungsfaktor von 1 beschränkt sind.

Die Arbeit beschäftigt sich zudem mit möglichen Anpassungen der Statorgeometrie, um das Maschinenverhalten in Kombination mit Flussbarrieren im Stator zu verbessern. Außerdem kann der, durch die Flussbarrieren bedingte, freie Bauraum, für eine zusätzliche Kühlung oder für zusätzliche kurzgeschlossene Leiter verwendet werden. Die Untersuchungen beider Möglichkeiten zeigen, dass so eine Steigerung der Ausnutzung des aktiven Maschinenvolumens realisierbar ist.

Abschließend wird eine Flussbarrierenmaschine mit einer Maschine ohne Flussbarrieren durch Simulationen und durch Messungen am Prüfstand verglichen. Die Vergleichsmaschine wird entsprechend dem definierten Anforderungsprofil in dieser Arbeit als bisherige Standardlösung festgelegt. Die beiden Maschinen unterscheiden sich lediglich im Stator- und Wicklungsaufbau. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flussbarrierenmaschine, trotz kürzerer aktiver Statorlänge, im niedrigen Drehzahlbereich effizienter betrieben werden kann als die Vergleichsmaschine. In den Bereichen mit höheren Frequenzen verschiebt sich die Wirkungsgraddifferenz zu Gunsten der Vergleichsmaschine.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass Flussbarrieren im Stator eine Innovation darstellen, durch die Maschinen hergestellt werden können, die für bestimmte Anwendungsfälle effizienter und kostengünstiger sind als bisherige Standardlösungen.

Abstract

This dissertation investigates flux-barriers in the stator and their influence on the machine performance.

Flux-barriers in the stator can be used in electrical machines to change the air-gap flux density. Flux-barriers in the stator can lead to an increase of the working harmonic and at the same time to a reduction of unwanted parasitic harmonics in the air-gap. Comparisons of electrical machines, which do not differ apart from the flux-barriers in the stator, show an improvement of the machine performance due to flux barriers, as the machines with flux barriers reach for the same linear current density a higher torque with lower frequency-dependent losses.

For the description of stators with flux-barriers, an equivalent winding factor must be introduced in order to be able to describe the influence on the air-gap flux density. This results in values for the equivalent winding factor greater than 1, which is not possible in the conventional calculation of the winding factor. Therefore, machines designed with flux-barriers in the stator can operate more efficiently with regard to ohmic losses than conventional machines that are limited to a winding factor of 1.

The thesis also deals with possible adjustments to the stator geometry in order to improve the performance of machines with flux-barriers in the stator. In addition, the free installation space which arises through implementation of the flux-barriers can be used for an additional cooling or for an additional short-circuited winding. The investigations of both options show that they both enable an improvement of the utilization of the active machine volume.

Further, a flux-barrier machine is compared with another reference machine using simulations and measurements on the test bench. The reference machine is defined as the standard solution according to the defined requirement profile in this thesis. The only difference between the two machines is the stator and winding structure. The results show that the flux-barrier machine, despite of the shorter active stator length, can operate more efficiently in the low speed range than the reference machine. In the areas with higher frequencies, the difference in efficiency shifts in favor of the reference machine.

Overall, it can be said that flux barriers in the stator represent an innovation which, in certain applications, can lead to more efficient and cost-effective machines than previous standard solutions allow.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Die Maxwell-Gleichungen	5
2.2 Elektromagnetische Kraftwirkung	7
2.3 Elektrische Maschinen	10
2.3.1 Asynchronmaschine	13
2.3.2 Synchronreluktanzmaschine	15
2.3.3 Permanent magnet erregte Synchronmaschine	16
2.3.4 Gegenüberstellung einzelner Maschinentopologien	17
2.4 Wicklungen in elektrischen Maschinen	18
2.4.1 Fourieranalyse	19
2.4.2 Wicklungsbezeichnungen	20
2.4.3 Wicklungsgesetze	22
2.4.4 Wicklungsfaktor	24
2.4.5 Vergleich von verteilten zu konzentrierten Wicklungen	27
3 Flussbarrieren im Stator	31
3.1 Einfluss der Flussbarrieren im Stator auf den Wicklungsfaktor	34
3.2 Einfluss der Flussbarrieren auf das Rotorfeld	47
3.3 Vergleich von elektrischen Maschinen mit und ohne Flussbarrieren	51
3.4 Ausnutzung von elektrischen Maschinen mit Flussbarrieren im Stator	59
3.5 Hinweise für den Wicklungsentwurf in Kombination mit Flussbarrieren	65
3.5.1 Geeignete bekannte Wicklungen für Flussbarrieren	67
3.5.2 Wicklungsauslegungen für Statoren mit Flussbarrieren	70

3.6	Reduzierung der Drehmomentschwankungen	77
3.6.1	Nutöffnungsverschiebungen	77
3.6.2	Unterschiedliche Nutöffnungsbreiten	81
3.7	Einfluss der Flussbarrieregeometrie auf das Drehmoment	85
4	Ergänzende Nutzungsmöglichkeiten des Flussbarrierenbauraums	89
4.1	Ausnutzung der Flussbarrieren für eine verbesserte Kühlung	89
4.1.1	Forcierte Luftströmung in den Flussbarrieren	91
4.1.2	Wasserkühlmantel für Statoren mit Flussbarrieren	94
4.1.3	Ölkühlung für Statoren mit Flussbarrieren	96
4.2	Kurzgeschlossene Leiter in den Flussbarrieren	99
4.2.1	Durchflutungsverteilung der Durchmesserspulen	102
4.2.2	Überlagerung der Luftspaltfelder beider Wicklungssysteme	106
4.2.3	Auswirkung auf das Drehmoment und die Verluste	117
4.2.4	Kurzgeschlossener Käfig in den Flussbarrieren	121
5	Bewertung einer elektrischen Maschine mit Flussbarrieren am Prüfstand	125
5.1	Synchron-Servomaschine MN03-350	128
5.1.1	Vermessung der Synchron-Servomaschine MN03-350	129
5.1.2	Nachkonstruktion und FEM-Modell der Synchron-Servomaschine MN03-350	133
5.2	Flussbarrierenmaschine	140
5.2.1	FEM-Modell Flussbarriere	142
5.2.2	Prototypbau	146
5.2.3	Vermessung der Flussbarrierenmaschine am Prüfstand und Vergleich zur Synchron-Servomaschine MN03-350	148
5.3	Bewertung der Flussbarrierenmaschine	154
6	Zusammenfassung und Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	159
A	Weitere geeignete Wicklungen für Flussbarrieren im Stator	163
B	Prüfstandsgeräte	167
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	179

Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bezeichnung</i>
ABC	Wicklungssystem der Phasen A,B und C
FB	Flussbarriere
FEM	Finite Elemente Methode
GGT	Größter gemeinsamer Teiler
KK	Kurzschlusskäfig
Konv.	Konventionell
KS	Kurzschlussspulen
PMSM	Permanenterregte Synchronmaschine
pk2pk	Differenz Maximal- zu Minimalwert (peak to peak)
THD	Harmonische Verzerrung (total harmonic distortion)
UVW	Wicklungssystem der Phasen U,V und W

Symbolverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
α	Umlaufwinkel
α_k	Wärmeübertragungskoeffizient
α_1	Wärmeleitfähigkeit
β	Winkel
γ	Nutöffnungsverschiebung
$\gamma_1, \gamma_2, \dots$	Winkel
δ	Luftspalt
δ_{FB}	Breite einer Flussbarriere
δ_{ij}	Kronecker δ
ϵ_0	Permittivität des Vakuums
η	Wirkungsgrad
Θ	Elektrische Durchflutung
Θ_ν	Größe zur Berechnung des Wicklungsfaktors
Θ_a	Summe der Beträge der betrachteten Durchflutungen
Θ_{Nut}	Durchflutung an der Nutöffnung
Θ_{PM}	Durchflutung eines Magneten
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_φ	Leistungsfaktor
λ_{rel}	relative Permeabilität
μ	Magnetische Permeabilität
μ_0	Magnetische Permeabilität von Vakuum
μ_{Fe}	Magnetische Permeabilität von Eisen

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
μ_{PM}	Magnetische Permeabilität eines Magneten
ν	Ordnungszahl einer Harmonischen
ν_p	Arbeitswelle
ξ	Wicklungsfaktor
ρ	Ladung pro Volumen, spezifischer elektrischer Widerstand
τ_p	Polteilung
$\tau_{\nu=1,p}$	Polteilung der Grundwelle
τ_{FB}	Winkel Flussbarrierenöffnung
τ_{ij}	Stresstensor
τ_N	Winkel Nutöffnung
τ_z	Winkel Nutteilung
ϕ	Magnetischer Fluss
ϕ_0, ϕ_1, \dots	Magnetischer Fluss im Luftspalt
$\phi_{0,k}, \phi_{1,k}, \dots$	Magnetischer Fluss im Luftspalt für die Kurzschlusswicklung
$\phi_{1,FB}$	Magnetischer Ersatzfluss
$\phi_{FB,k}$	Magnetischer Fluss der Kurzschlusswicklung in der Flussbarriere
$\phi_{FB,k}^{ind}$	Für die Induktivität relevanter magnetischer Fluss in der Flussbarriere
$\phi_{o,FB}$	Magnetischer Fluss in einer Flussbarriere oberhalb eines Kurzschlussleiters
$\phi_{FB,ou}$	Effektiver magnetischer Fluss in einer Flussbarriere
$\phi_{FB,ou}^{ind}$	Für die Induktivität relevanter magnetischer Fluss in einer Flussbarriere
$\phi_{u,FB}$	Magnetischer Fluss in einer Flussbarriere unterhalb eines Kurzschlussleiters
ϕ_k	Winkel für die Parktransformation
$\phi_{Luft,1}, \phi_{Luft,2}$	Magnetischer Fluss außerhalb der Maschine
φ	Phasenversatz

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
φ_ν	Phasenverschiebung
φ_m	Phasenlage Ströme
$\varphi_{m,gem}$	Geometrischer Winkel
φ_{mech}	Mechanischer Winkel
φ_{PM}	Phasenverschiebung Magnetfeld
φ_{Stator}	Phasenverschiebung Statorfeld
Ψ_1^{abc}	Flussverkettungsvektor der Phasen A,B und C im abc-Koordinatensystem
Ψ_2^{uvw}	Flussverkettungsvektor der Phasen U,V und W im abc-Koordinatensystem
Ψ_1^{s0}	Flussverkettungsvektor der Phasen A,B und C im s0-Koordinatensystem
Ψ_2^{s0}	Flussverkettungsvektor der Phasen U,V und W im s0-Koordinatensystem
Ψ_1^k	Flussverkettungsvektor der Phasen A,B und C im k-Koordinatensystem
Ψ_2^k	Flussverkettungsvektor der Phasen U,V und W im k-Koordinatensystem
Ψ_x	Flussverkettung der Phase x
ω	Elektrische Winkelgeschwindigkeit
ω_ν	Winkelgeschwindigkeiten der Harmonischen
$\omega_{\nu,rel}$	Relative Winkelgeschwindigkeit
ω_k	Winkelgeschwindigkeit des k-Koordinatensystems
ω_r	Winkelgeschwindigkeit Rotor
ω_s	Winkelgeschwindigkeit Drehfeld
A	Fläche
A_{FB}	Fläche zur Berechnung des magnetischen Widerstands einer Flussbarriere
A_s	Strombelag
a_0	Fourierkoeffizient
a_ν	Fourierkoeffizient

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
B	Flussdichte
B_{δ}	Normalkomponente der Luftspaltflussdichte einer Harmonischen
$B_{\delta,\text{eff},\nu}$	Effektivwert der Luftspaltflussdichte einer Harmonischen
$B_{\delta,\text{eff},p}$	Effektivwert der Luftspaltflussdichte der Arbeitswelle
$B_{\delta,\nu}$	Luftspaltflussdichte einer Harmonischen
$B_{p,\text{eff}}$	Effektivwert der Luftspaltflussdichte der Arbeitswelle
B_r	Remanenzflussdichte
b_{ν}	Fourierkoeffizient
b_{Nut}	Nutbreite
B_p	Flussdichteamplitude der Arbeitswelle
B_{PM}	Flussdichte eines Magneten
$B_{\text{PM},p}$	Flussdichteamplitude der Arbeitswelle resultierend von den Permanentmagneten
$B_{\text{stator},\nu}$	Flussdichte einer Harmonischen des Statorfelds
$B_{\text{stator},p}$	Flussdichte der Arbeitswelle des Statorfelds
C	Ausnutzungsziffer, Randkurve
c_0	Fourierkoeffizient
c_{ν}	Fourierkoeffizient
D	Elektrische Flussdichte
d_{δ}	Mittlerer Luftspaltdurchmesser
d_{Fe}	Wegabschnitt im Eisen
d_{PM}	Magnetdicke
E	Elektrische Feldstärke
F	Lorentzkraft, Kraft
f	Frequenz
$f_{\nu,\text{rel}}$	Relative Frequenz einer Harmonischen
g_{ν}	Ganze Zahl für eine bestimmte Harmonische
g_p	Ganze Zahl für die Arbeitswelle

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
H	Magnetische Feldstärke, Feldstärke im Luftspalt
H_δ	Feldstärke im Luftspalt
H_c	Koerzitivfeldstärke
$H_{\text{FB},1}, H_{\text{FB},2}, \dots$	Feldstärke in einer Flussbarriere
H_{Fe}	Feldstärke im Eisen
H_n	Radiale Feldstärke
H_{tan}	Tangentiale Feldstärke
h_o	Abmessung zur Bestimmung des magnetischen Widerstands einer Flussbarriere im Bereich oberhalb eines Kurzschlussleiters
h_u	Abmessung zur Bestimmung des magnetischen Widerstands einer Flussbarriere im Bereich unterhalb eines Kurzschlussleiters
$\mathbf{I}_1^{\text{abc}}$	Stromvektor der Phasen A,B und C im abc-Koordinatensystem
$\mathbf{I}_2^{\text{uvw}}$	Stromvektor der Phasen U,V und W im abc-Koordinatensystem
\mathbf{I}_1^{s0}	Stromvektor der Phasen A,B und C im s0-Koordinatensystem
\mathbf{I}_2^{s0}	Stromvektor der Phasen U,V und W im s0-Koordinatensystem
\mathbf{I}_1^{k}	Stromvektor der Phasen A,B und C im k-Koordinatensystem
\mathbf{I}_2^{k}	Stromvektor der Phasen U,V und W im k-Koordinatensystem
I	Strom
I_1^{d}	d-Strom gespeiste Wicklung
I_1^{q}	q-Strom gespeiste Wicklung
I_2^{d}	d-Strom kurzgeschlossene Wicklung
I_2^{q}	q-Strom kurzgeschlossene Wicklung
I_{eff}	Effektiver Strom
I_k	Kurzschlussstrom

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
I_{\max}	Spitzenstrom
I_m	Phasenstrom
I_x	Strom der Phase x
J	Stromdichte
J_P	Magnetische Polarisierung
\mathbf{K}	Stromkopplungstensor
k_c	Materialkonstante für Wirbelstromverluste
k_e	Materialkonstante für Zusatzverluste
k_h	Materialkonstante für Hystereseverluste
$k_{\text{THD,B}}$	Faktor zur Beurteilung der Sättigung
$\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \mathbf{L}_{12}, \mathbf{L}_{21}$	Induktivitätsmatrix im abc-Koordinatensystem
$\mathbf{L}_1^{s0}, \mathbf{L}_2^{s0}, \mathbf{L}_{12}^{s0}, \mathbf{L}_{21}^{s0}$	Induktivitätsmatrix im s0-Koordinatensystem
$\mathbf{L}_1^s, \mathbf{L}_2^s, \mathbf{L}_{12}^s, \mathbf{L}_{21}^s$	Induktivitätsmatrix im s-Koordinatensystem
L_1^s	Induktivität gespeiste Wicklung
L_2^s	Induktivität Kurzschlusswicklung
L_{12}^s, L_{21}^s	Koppelinduktivität
$L_{h,1}$	Eigeninduktivität gespeiste Wicklung
$L_{h,2}$	Eigeninduktivität kurzgeschlossene Wicklung
$L_{x,x}$	Eigeninduktivität der Phase x
$L_{x,y}$	Induktivität zwischen den Phasen x und y
l	Länge
l_e	Aktive Maschinenlänge
M	Drehmoment
$M_{N_R, \nu}$	Amplitude Rastmoment jeder $N_R \cdot \nu$ Harmonischen
M_R	Rastmoment einer Nutöffnung
$M_{R, \text{ges}}$	Resultierendes Rastmoment
$M_{R, \text{FB}}$	Rastmoment einer Flussbarriere
$M_{R, N1}, M_{R, N2}$	Rastmoment einer Nutöffnung

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
m	Phasenzahl
n	Anzahl Nuten, Anzahl Nuten einer Phase, Drehzahl
n_n	Nenn Drehzahl
\vec{n}	Normalenvektor
N_{FB}	Anzahl Flussbarrieren
N_{R}	Kleinster gemeinsamer Teiler der Polzahl und identischer Segmente
n_{Rast}	Kennzahl zur Verwendung unterschiedlicher Nutöffnungsbreiten
N_{s}	Anzahl Zähne
N_{w}	Anzahl Windungen
$N_{\text{w,k}}$	Anzahl Windungen der Kurzschlusswicklung
P	Makroskopische Polarisation
$P_{\delta, \text{Schein}}$	Innere Scheinleistung
P_{Blind}	Blindleistung
P_{c}	Wirbelstromverluste
$P_{\text{c,PM},\nu}$	Magnetverluste
P_{e}	Zusatzverluste
P_{h}	Hystereseverluste
P_{mech}	Mechanische Leistung
P_{V}	Verlustleistung
$P_{\text{V,Eisen}}$	Verluste im Eisen
P_{Wirk}	Wirkleistung
P_{s}	Spezifischer Ummagnetisierungsverlust
P_{Schein}	Scheinleistung
p	Polpaarzahl
q	Anzahl Spulen
\dot{q}	Wärmestrom
R_1, R_2, \dots	Magnetischer Widerstand im Luftspalt

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
$R_{1,k}, R_{2,k}$	Magnetischer Widerstand im Luftspalt für die Kurzschlusswicklung
$R_a, R_b, R_c, R_{L,FB}$	Magnetischer Ersatzwiderstand
R_{abc}, R_{uvw}	Elektrischer Widerstand der Phasen A, B und C bzw. U, V, und W
R_{el}	Elektrischer Widerstand
R_{FB}	Magnetischer Widerstand einer Flussbarriere
$R_{FB,o}$	Magnetischer Widerstand oberhalb eines Kurzschlussleiters
$R_{FB,u}$	Magnetischer Widerstand unterhalb eines Kurzschlussleiters
$R_{ges,k}$	Magnetischer Gesamtwiderstand für die Kurzschlusswicklung
$R_{Luft,1}, R_{Luft,2}$	Magnetischer Widerstand außerhalb des Jochs
$R_{MIN03-350}$	Gemessener elektrischer Phasenwiderstand der Synchron-Servomaschine MN03-350
R_{th}	Thermischer Widerstand
R_{ref}	Phasenwiderstand berechnet aus mitgeliefertem Datenblatt
R_x	Widerstand der Phase x
r_s	Innerer Statorradius
s	Schlupf
S_s	spezifische Scheinleistung
T	Periodendauer, Temperatur
T_C	Clarktransformationsmatrix
T_{Fluid}	Temperatur des Fluids
$T_{Maschine}$	Maschinentemperatur
T_P	Parktransformationsmatrix
t	Zeit
THD_B	Harmonische Verzerrung
U_1^{abc}	Spannungsvektor der Phasen A, B und C im abc-Koordinatensystem
U_2^{uvw}	Spannungsvektor der Phasen U, V und W im abc-Koordinatensystem

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>
\mathbf{U}_1^{s0}	Spannungsvektor der Phasen A,B und C im s0-Koordinatensystem
\mathbf{U}_2^{s0}	Spannungsvektor der Phasen U,V und W im s0-Koordinatensystem
\mathbf{U}_1^k	Spannungsvektor der Phasen A,B und C im k-Koordinatensystem
\mathbf{U}_2^k	Spannungsvektor der Phasen U,V und W im k-Koordinatensystem
U_1^d	d-Spannung gespeiste Wicklung
U_1^q	q-Spannung gespeiste Wicklung
U_2^d	d-Spannung kurzgeschlossene Wicklung
U_2^q	q-Spannung kurzgeschlossene Wicklung
U_{eff}	Effektive Spannung
U_{ind}	Induzierte Spannung
U_n	Nennspannung
$U_{\text{sim},0}$	Simulierte effektive Spannung
$U_{\text{sim},R}$	Simulierte effektive Spannung und Spannungsabfall am Widerstand
U_x	Spannung der Phase x
V	Magnetische Spannung, Volumen
V_0, V_1, \dots	Magnetische Spannung (im Luftspalt)
V_ν^{FB}	Größe zur Berechnung des äquivalenten Wicklungsfaktors
$V_{\text{FB},1}, V_{\text{FB},2}, \dots$	Magnetische Spannung in einer Flussbarriere
$V_{i\text{FB}}^\delta$	Magnetische Spannungssprünge im Luftspalt an einer Flussbarriere
w_{mag}	Magnetische Energiedichte
W_{mag}	Magnetische Energie
W_{mech}	Mechanische Energie
w_{PM}	Magnetbreite
w_{Sp}	Spulenweite
x_1, x_2, \dots	Magnetische Flussverhältnisse
