

Technische Universität Dresden

**Direkte Leistungsregelung von  
doppeltgespeisten Asynchrongeneratoren  
mit optimaler Gleichtaktspannungsführung  
zur Minimierung von Lagerströmen**

**Bastian Rückert**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Petzoldt  
Einreichung: 18. Januar 2013  
Verteidigung: 13. November 2013



Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und  
Antrieben

Band 4

**Bastian Rückert**

**Direkte Leistungsregelung von  
doppeltgespeisten Asynchrongeneratoren  
mit optimaler Gleichtaktspannungsführung  
zur Minimierung von Lagerströmen**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

### **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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2655-9

ISSN 1869-8190

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universität Dresden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann.

Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen wäre diese Arbeit nicht durchführbar gewesen. Ganz besonders möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann danken – zum einen, weil durch seine Initiative das Forschungsvorhaben überhaupt möglich wurde und ich mich dadurch mit einem praxisbezogenen aber gleichzeitig auch theoretisch anspruchsvollen Thema beschäftigen durfte und zum anderen, weil er mir während meiner Tätigkeit immer ermöglichte, meinen Horizont zu erweitern und am wissenschaftlichen Leben aktiv teilzunehmen. Das dadurch erlangte Wissen ist von unschätzbarem Wert.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Petzoldt von der Technischen Universität Ilmenau für die Übernahme des zweiten Gutachtens und das Interesse an der Arbeit.

Des Weiteren möchte ich meinen Kollegen am Lehrstuhl für Anregungen, den vielen Diskussionen zu den Kernproblemen meiner Arbeit und das exzellente Arbeitsklima danken. Aber auch die auf den ersten Blick unscheinbaren und nebensächlichen Probleme, die beim Anfertigen einer solchen Arbeit auftreten, konnten durch zahlreiche Gespräche gelöst werden.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei allen Studenten, die im Rahmen ihrer Studienarbeit oder Diplomarbeit bzw. als studentische Hilfskraft einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Nicht unerwähnt bleiben dürfen die Mitarbeiter der Werkstatt des Elektrotechnischen Instituts für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung beim Bau des Versuchsstandes. Auch den Damen des Lehrstuhls, die mir jederzeit in organisatorischen Fragen und Aufgaben tatkräftig zu Seite standen, möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich danken.

Ebenfalls gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft, durch deren finanzielle Unterstützung und Förderung diese Arbeit überhaupt erst möglich wurde.

Schlussendlich bedanke ich mich auch bei Freunden und Familie für die Unterstützung und das Verständnis, wenn ich mal wieder die ein oder andere Stunde abwesend war.

Dresden, im Februar 2014

*Bastian Rückert*

# Kurzfassung

Das Problem von Lagerschäden in umrichter gespeisten Antriebssystemen ist schon lange bekannt. Die durch die gepulste Ausgangsspannung der Umrichter entstehende Gleichtaktspannung wird durch das kapazitive Koppelnetzwerk innerhalb der Maschine auf das Lager übertragen. Aus dieser Spannungsbeanspruchung der Lager resultieren unterschiedliche Arten von Lagerströmen, die im schlimmsten Fall zu einer mechanischen Schädigung der Laufflächen und Wälzkörper führen. Insbesondere bei doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren für den Einsatz in Windenergieanlagen fällt das Übertragungsverhältnis des kapazitiven Koppelnetzwerks zu Ungunsten der Lagerspannung aus. Dies bedeutet eine deutlich erhöhte Beanspruchung der Lager, wodurch sich erhöhte Kosten für die Wartung und eine geringe Standlaufzeit der Anlagen ergeben.

Entgegen der heutigen Praxis, die durch zusätzliche Hardware die Auswirkungen der Gleichtaktspannung zu minimieren versucht, wird in dieser Arbeit eine alternative Variante vorgestellt. Da sich Modulationsverfahren nur bedingt für die Generierung von optimalen Gleichtaktspannungsverläufen eignen, werden die Pulsmuster auf Basis direkter Regelalgorithmen entworfen. Unter optimaler Gleichtaktspannungsführung versteht sich eine minimale Amplitude sowie eine minimale Anzahl an Schaltflanken der Gleichtaktspannung.

Es erfolgt die mathematische Herleitung der direkten Leistungsregelung für einen doppelt gespeisten Asynchrongenerator. Anschließend werden wichtige Kenngrößen der direkten Leistungsregelung definiert, mit denen eine Bewertung der erzeugten Pulsmuster erfolgen kann. Ebenfalls werden Merkmale zur Bewertung des Gleichtaktspannungsverlaufs eingeführt. Das Ziel ist eine statische Minimierung der Gleichtaktspannung durch eine gezielte Wahl der korrekten Schaltzustände auf Grundlage des idealen Schaltverhaltens der Leistungsbaulemente abgeleitet.

Anschließend wird das reale Schaltverhalten der Leistungshalbleiter in die Betrachtung zur Gleichtaktspannungsminimierung mit einbezogen.

## *Kurzfassung*

Das Stromvorzeichen gibt den Verlauf der Gleichtaktspannung während der Totzeit an und verhindert so eine optimale Minimierung. Eine neue Kommutierungsstrategie wird auf Grundlage der zuvor gewonnen Kenntnisse entworfen. Abschließend wird eine praktische Ermittlung des Stromvorzeichens aufgezeigt und mit gängigen Verfahren aus der Literatur verglichen und diskutiert.

Untermauert werden alle theoretischen Ausführungen durch praktische Messergebnisse, worin gezeigt werden konnte, dass die Gleichtaktspannung nahezu eliminiert werden konnte.

# Abstract

Bearing damages in drive systems with converters are well-known. Due to the fact that the windings of any machine are coupled capacitively to ground, the common mode voltage generated by the pulsed output voltage of the converter is transmitted to the bearings. Different kinds of bearing currents occurs due to the voltage stress of the bearings. This can lead to mechanical damages of the roller parts. Especially in doubly fed induction generators for the use in wind energy conversion systems the transfer ratio of the capacitance network is to the disadvantage of the bearing voltage. In consequence the lifetime of bearings is reduced and the maintenance costs of the system are higher.

Instead of using additional hardware to suppress the influence of the common mode voltage this thesis proposes an alternative solution. Modulation strategies like PWM are not suitable to generate an optimal run of the common mode voltage. Instead the pulse pattern are derived from direct control strategies. The optimal run of the common mode voltage provides a minimum amplitude as well as a minimum count of switching events of the common mode voltage.

The mathematical derivation of the direct power control of the doubly fed induction generator is shown. Afterwards the major parameters of the direct power control and the common mode voltage are defined. These parameters are used to compare different pulse patterns as well as the resulting shape of the common mode voltage. Finally a static method to minimize the common mode voltage is proposed. This is done by selecting switching vectors based on the ideal switching behaviour of the power electronic devices.

The real switching behaviour of the power devices has to be considered to improve the previous method. The need of knowing the current sign is very important, because the common mode voltage depends on the current sign during the dead-time. A new commutation strategy is designed on the base of the current sign knowledge. Concluding a circuit to measure

## *Abstract*

the current sign is presented and compared and discussed with solution from the literature.

All theoretical statement are confirmed by measurements, which shows, that the common mode voltage could be almost eliminated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Formelzeichen und Symbole</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Windenergieanlagen . . . . .	1
1.2 Systembeschreibung . . . . .	4
1.3 Motivation und Zielstellung . . . . .	7
1.4 Struktur der Arbeit . . . . .	9
<b>2 Lagerstromproblematik bei umrichter-     gespeisten Maschinen</b>	<b>11</b>
2.1 Arten und Ursachen von Lagerströmen . . . . .	12
2.1.1 Klassische Wellenspannung . . . . .	12
2.1.2 Stromrichterbedingte Phänomene . . . . .	13
2.2 Gleichtaktkreis . . . . .	16
2.2.1 Gleichtaktspannung . . . . .	16
2.2.2 Parasitäre Kapazitäten . . . . .	19
2.2.3 Elektrisches Modell von Wälzlagern . . . . .	21
2.3 Reduzierung von Lagerströmen bei Umrichterspeisung . . . . .	21
2.3.1 Passive Verfahren . . . . .	22
2.3.2 Aktive Verfahren . . . . .	24
2.3.3 Vergleichende Bewertung . . . . .	26
<b>3 Gleichtaktminimale Pulsmuster auf Basis direkter Regel-     verfahren</b>	<b>29</b>
3.1 Direkte versus indirekte Regelverfahren . . . . .	29
3.2 Chronologie direkter Regelverfahren . . . . .	31

## Inhaltsverzeichnis

3.3	Grundlagen zur direkten Leistungsregelung . . . . .	34
3.3.1	Definition der Momentanleistung . . . . .	34
3.3.2	Herleitung der netzseitigen Schalttabelle . . . . .	36
3.3.3	Herleitung der maschinenseitigen Schalttabelle . . . . .	39
3.3.4	Messergebnisse . . . . .	45
3.4	Charakterisierung und Kenngrößen . . . . .	48
3.4.1	Schematischer Verlauf . . . . .	48
3.4.2	Standardabweichung der Leistungskomponenten . . . . .	49
3.4.3	Oberschwingungs-Gesamtverzerrung vom Strom . . . . .	50
3.4.4	Mittlere Schaltfrequenz . . . . .	53
3.4.5	Modulationsgrad . . . . .	58
3.4.6	Gleichtaktspannung . . . . .	62
3.5	Minimierung der Gleichtaktspannung . . . . .	63
3.5.1	Algorithmus der statischen Gleichtaktspannungs- minimierung . . . . .	64
3.5.2	Messergebnisse . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Beeinflussung der Gleichtaktspannung durch das reale Schaltverhalten der Leistungsbaulemente</b>	<b>73</b>
4.1	Reales Schaltverhalten der Leistungshalbleiter . . . . .	73
4.1.1	Statisches und dynamisches Verhalten . . . . .	73
4.1.2	Spannungs- und Stromkommutierung . . . . .	74
4.1.3	Einfluss der Kommutierung auf die Gleichtaktspan- nung . . . . .	77
4.2	Maßnahmen zur Minimierung . . . . .	81
4.2.1	Kategorisierung der Schalthandlungen . . . . .	82
4.2.2	Algorithmus . . . . .	85
4.2.3	Totzeiteffekt . . . . .	89
4.3	Stromvorzeichenerkennung . . . . .	91
4.3.1	Schaltungsvarianten . . . . .	91
4.3.2	Realisierung der erweiterten $U_{CE}$ -Messung . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>101</b>
5.1	Aufbau . . . . .	102
5.2	Direkte Leistungsregelung . . . . .	104
5.3	Gleichtaktspannung . . . . .	105
5.4	Lagerstrom und -spannung . . . . .	112

<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
<b>Anhang</b>	<b>121</b>
A    Oberschwingungs-Gesamtverzerrung nach DIN 61000-3-2 .	121
A.1    Dioden-Brückengleichrichter . . . . .	121
A.2    Netzwechselelrichter mit direkter Leistungsregelung	121
B    Zeigerbilder . . . . .	123
C    Thesen . . . . .	125
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>144</b>



# Formelzeichen und Symbole

## Formelzeichen in lateinischer Notation.

$b$	Bandbreite
$C$	Kapazität
$d$	relative Einschaltdauer
$D$	Diode
$f$	Frequenz; Schaltfrequenz
$F$	Kraft
$g$	binärer Schaltzustand eines Schalters
$i$	Stromstärke; Zählvariable
$I$	Effektivwert der Stromstärke
$k$	Sektor; Skalierungsfaktor
$K$	Komparator
$L$	Induktivität
$m$	Modulationsindex
$M$	Modulationsgrad; Mittelpunkt
$n$	Anzahl an Schalthandlungen; Laufvariable, Drehzahl
$O$	Optokoppler
$p$	momentane Wirkleistungskomponente
$P$	Wirkleistung
$q$	momentane Blindleistungskomponente
$Q$	Blindleistung; Quadrant
$r$	Anzahl der unterschiedlichen Stromrichtungen
$R$	Widerstand
$s$	ternärer Schaltbefehl einer Halbbrücke; momentane Scheinleistung; Schlupf
$S$	binärer Schaltzustand einer Halbbrücke; Schalter; Scheinleistung
$t$	kontinuierliche Zeitvariable
$T$	Abtastzeit; Periodendauer; Zeitkonstante; Temperatur
$u$	Spannung

## Formelzeichen und Symbole

$U$	Spannung, Effektiv- oder Mittelwert
$v$	Anzahl an möglichen Vektorkombinationen
$x$	allgemeine Variable
$X$	Impedanz
$z$	Zahl

### Formelzeichen in griechischer Notation.

$\beta$	Hilfswinkel
$\gamma$	Winkel des Stromänderungszeiger
$\sigma$	Standardabweichung, Streufaktor
$\varphi$	allgemeiner Winkel
$\Phi$	Fluss
$\Psi$	Flussverkettung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$\Omega$	mechanische Winkelgeschwindigkeit

### Indizes.

0	Anfangswert; Nullkomponente; Gleichtaktkomponente
a	Phase a
b	Phase b
B	Bemessung
c	Phase c
C	Kollektor
CE	Kollektor-Emitter
d	verzögert; d-Komponente
eff	Effektivwert
f	Fenster; fallend
F	Fluß
g	Gehäuse
GE	Gate-Emitter
h	Hauptfeld
hys	Hysterese
ist	Istwert einer Größe
IO	Ein- und Ausgang
j	Junction
k	Komparator

K	allgemeines Koordinatensystem
l	Lager
m	maschinenseitig, mechanisch
M	Messwert
max	Maximalwert einer Größe
min	Minimalwert einer Größe
n	netzseitig
o	oben
off	Ausschaltvorgang
on	Einschaltvorgang
p	Polpaar
P	Periode
q	q-Komponente
Q	Quelle
r	Rotor; Rotorwicklung; ansteigend
R	rotorfestes Koordinatensystem
s	Stator; Statorwicklung
S	statorfestes Koordinatensystem; Abtastung
soll	Sollwert
sync	Synchron
tot	Totzeit
u	unten
w	Welle; Wechselrichter
zk	Zwischenkreis
$\alpha$	$\alpha$ -Komponente
$\beta$	$\beta$ -Komponente
$\sigma$	Streuwert
*	Sollgröße

### Abkürzungen.

AD	Analog-Digital
ASM	Asynchronmaschine
BVR	Bearing Voltage Ratio
DASM	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine bzw. doppelt- gespeister Asynchrongenerator
DASG	Doppeltgespeister Asynchrongenerator

## Formelzeichen und Symbole

DPC	Direct Power Control, Direkte Leistungsregelung
DSP	Digitaler Signalprozessor
DSR	Direkte Selbstregelung
DTC	Direct Torque Control, Direkte Drehmomentregelung
EDM	Electric Discharge Machining
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
GTO	Gate Turn Off Thyristor
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulsweitenmodulation
THD	Total Harmonic Distortion

### Mathematische Ausdrücke.

const	Konstante
$dx$	Differential der Größe $x$
$\Delta x$	Änderung der Größe $x$
$\Im(x)$	Imaginärteil einer komplexen Größe $x$
$j$	imaginäre Einheit
$\Re(x)$	Realteil einer komplexen Größe $x$
$\dot{x}$	erste Ableitung von $x$ nach der Zeit
$\underline{x}^*$	konjugiert komplexe Zahl

### Schreibweise von Formelzeichen.

$x$	Skalar
$\mathbf{x}$	Vektor
$\underline{x}$	Raumzeiger; komplexe Größe
$x(t)$	Größe mit kontinuierlicher Zeitabhängigkeit
$x_k$	zeitdiskrete Größe zum Abtastschritt $k$
$\bar{x}$	Mittelwert
$\hat{x}$	Scheitelwert