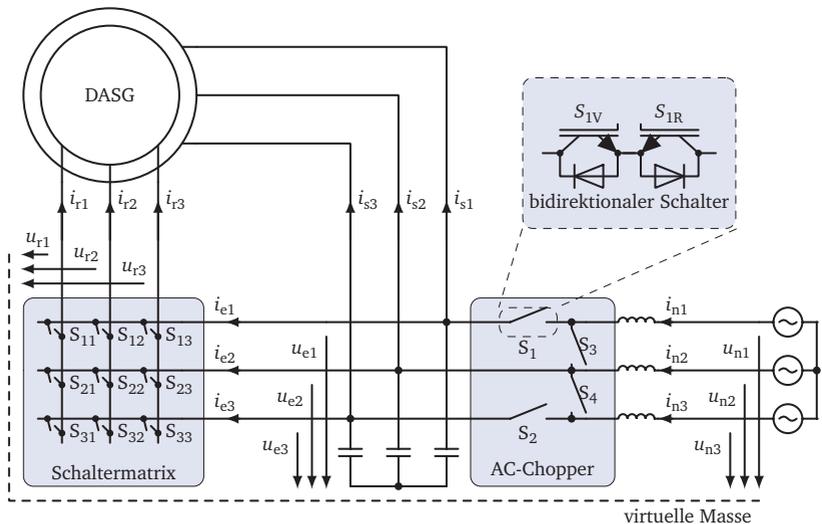


Nico Remus

## Netzfehlerrobuste hochsetzende Stromrichteranlage mit dem Matrixumrichter für Windkraftanlagen



**Technische Universität Dresden**

**Netzfehlerrobuste hochsetzende  
Stromrichteranordnung mit dem  
Matrixumrichter für Windkraftanlagen**

Dipl.-Ing. Nico Remus

An der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

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

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Meyer  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel  
Einreichung: 18. Januar 2024  
Verteidigung: 4. Juli 2024



Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und  
Antrieben

Band 26

**Nico Remus**

**Netzfehlerrobuste hochsetzende  
Stromrichteranordnung mit dem  
Matrixumrichter für Windkraftanlagen**

Shaker Verlag  
Düren 2024

### **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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9715-3  
PDF-ISBN 978-3-8440-9815-0  
ISSN 1869-8190  
eISSN 2944-5779  
<https://doi.org/10.2370/9783844098150>

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

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universität Dresden. Ohne die Unterstützung vieler Personen wäre sie nicht möglich gewesen. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei ihnen bedanken.

Besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann. Durch seine Unterstützung wurde das Forschungsvorhaben erst möglich und er schuf eine Arbeitsumgebung, welche immer neue Anregungen in der wissenschaftlichen Ausarbeitung und die Voraussetzungen für komplexe experimentelle Versuche bot.

Danken möchte ich außerdem Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel des Lehrstuhls Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Rostock für die Annahme der Rolle des zweiten Gutachters und für das Interesse an dieser Arbeit.

Desweiteren danke ich meinen ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls für elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universität Dresden. In einem zu jeder Zeit guten Arbeitsklima haben zahlreiche, oft tiefgehende Diskussionen oder organisatorische Unterstützung zu dem Gelingen der Arbeit beigetragen. Allem Vorangestellt möchte ich meinem Büronachbarn Martin Leubner danken, der sich die Aufgabe des Aufbaus des hochsetzenden direkten Matrixumrichters mit mir teilte. Ohne seine Mitwirkung wäre die Entwicklung eines am Ende solch zuverlässigen Umrichter-Prototypen nicht möglich gewesen. An dieser Stelle ist auch den Mitarbeitern der Institutswerkstatt zu danken, welche den Aufbau des Prototypen und des Versuchsstandes realisierten.

Auch den Studenten möchte ich danken, die mit ihren Diplom- oder Studienarbeiten, aber auch als studentische Hilfskraft einen wichtigen Beitrag zu der Arbeit geliefert haben.

Schließlich möchte ich meiner Familie danken für ihre Unterstützung des Promotionsvorhabens und ihr Verständnis, wenn sie mir hin und wieder den Rücken freihalten mussten.



# Kurzfassung

Windkraftanlagen (WKA) tragen mit 49 % den größten Anteil der erneuerbaren Energien im deutschen Strom-Mix. Anlagen mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator (DASG) sind neben Anlagen mit fremderregter Synchronmaschine wegen ihrer Wirtschaftlichkeit weit verbreitet. Die mangelnde Fähigkeit, Netzfehler zu durchfahren und gleichzeitig das Netz in seiner Stabilität zu unterstützen, führt jedoch zum Rückgang des Aufbaus neuer WKA mit dem DASG. Diese Arbeit schlägt eine Generatoranordnung des DASG vor, bei welcher der hochsetzende direkte Matrixumrichter (HDMU) zum Einsatz kommt. Die neue Generatoranordnung erlaubt es, den Generator auch bei tiefen Netzspannungseinbrüchen vollständig kontrollierbar zu betreiben und das Netz durch Einspeisen von Blindleistung zu unterstützen.

Zuerst wird die Regelung des HDMU als Vollumrichter entwickelt, der einen Käfigläufer-Asynchrongenerator (ASG) speist. Während darauf Wert gelegt wird, dass die etablierte feldorientierte Regelung elektrischer Maschinen möglichst unverändert eingesetzt werden kann, wird die Regelstruktur für den HDMU vorgestellt, welche die freie Einstellung des Netzblindstromes innerhalb der Grenzen des HDMU erlaubt. Zusätzlich sorgt die aktive Dämpfung des Netzfilters für das Wegfallen von passiven Dämpfungsmaßnahmen und den damit verbundenen Nachteilen. Auf dieser Struktur baut die Regelung der neuen Generatoranordnung mit dem DASG auf, wobei die Aufschaltung der Stator клемmen auf die Kondensatoren des Netzfilters abweichende und zusätzliche Maßnahmen der Regelung nach sich zieht.

Nach dem experimentellen Nachweis der Funktionsfähigkeit der Generatoranordnungen des ASG und des DASG wird der Blindleistungsstellbereich analytisch bestimmt und durch Messungen validiert. Ein Vergleich zu den in Deutschland geltenden Netzanschlussbedingungen erlaubt eine Bewertung bezüglich der Fähigkeit, zur Netzstabilität beitragen zu können.



# Abstract

At 49%, wind power plants account for the largest share of renewable energy within the German electricity mix. Because of the economic viability, wind power plants with the doubly fed induction generator (DFIG) are widely used besides the ones with externally excited synchronous generators. The lack of ability to drive through grid errors and support the grid stability at the same time leads to a decline of new plants with doubly fed induction generators. A new generator topology of the DFIG is proposed with the boost-up direct matrix converter (BDMC). This new generator topology allows the fully controllable operation of the generator and the support of the grid by injecting reactive power even at deep voltage dips.

First, the control of the BDMC as fully rated converter feeding a induction generator is developed. While emphasis is placed on the fact that the established field-oriented control of electrical machines can be used as unchanged as possible, the control structure for the HDMU is presented, which allows the free adjustment of the mains reactive current within the limits of the HDMU. In addition, the active damping of the line filter ensures that passive damping measures and the associated disadvantages are no longer present. The control of the new generator arrangement with the DASG is based on this structure, whereby the connection of the stator terminals to the capacitors of the line filter entails deviating and additional control measures.

After experimental verification of the functionality of the generator arrangements of the ASG and DASG, the reactive power control range is determined analytically and validated by measurements. A comparison to the grid connection conditions applicable in Germany allows an evaluation regarding the ability to contribute to grid stability.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einordnung der Arbeit</b>	<b>1</b>
1.1	Zielstellung der Arbeit . . . . .	3
1.2	Der direkte Matrixumrichter . . . . .	4
1.3	Der hochsetzende direkte Matrixumrichter – Stand der Forschung	7
1.4	Doppelt gespeister Asynchrongenerator mit Matrixumrichter bei Netzfehlern . . . . .	9
1.5	Gliederung der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Modellbildung</b>	<b>13</b>
2.1	Unterteilung in Teilsysteme . . . . .	13
2.2	Raumzeigertransformation der elektrischen Größen . . . . .	15
2.3	Schaltzustände des direkten Matrixumrichters . . . . .	17
2.4	AC-Chopper als Hochsetzsteller . . . . .	26
2.4.1	Schaltzustände des AC-Choppers . . . . .	27
2.4.2	Dynamisches Modell des Netzfilters mit dem AC-Chopper	29
2.4.3	Stationäres Modell . . . . .	32
2.5	Modellgleichungen Generatoren . . . . .	34
2.6	Netzanschlussbedingungen für Stromerzeugungsanlagen . . . . .	36
2.6.1	Spannungshaltung im stationären Betrieb . . . . .	36
2.6.2	Dynamische Spannungshaltung . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Modulationsverfahren des HDMU</b>	<b>39</b>
3.1	Tastverhältnisse des direkten Matrixumrichters . . . . .	40
3.1.1	Tastverhältnis des Wechselrichters . . . . .	42
3.1.2	Tastverhältnisse des Gleichrichters . . . . .	45
3.1.3	Zusammenführen der Tastverhältnisse von Wechselrichter und Gleichrichter . . . . .	46
3.1.4	Berechnung des Eingangsverschiebungswinkels . . . . .	49
3.2	Modulationsgrad des ACC . . . . .	50
3.3	Synchrone Schaltsequenzen des DMU und des ACC . . . . .	50
3.4	Ausgangsspannungsstellbereich des DMU und HDMU . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Regelung des ASG mit dem HDMU als Vollumrichter</b>	<b>57</b>
4.1	Messgrößen, Modellgrößen und Stellgrößen . . . . .	58
4.2	Regelungsstruktur und Betriebsmodus . . . . .	60
4.3	Regelung des Käfigläufer-Asynchrongenerators . . . . .	62
4.3.1	Statorstromregelung . . . . .	62

4.3.2	Regelung der Rotorflussverkettung und Berechnung des Statorstromsollwertes . . . . .	65
4.4	Netzseitige Regelung des HDMU . . . . .	67
4.4.1	Regelung des d-Zweiges durch den AC-Chopper . . . . .	69
4.4.2	Regelung des q-Zweiges durch den Matrixumrichter . . . . .	73
4.4.3	Aktive Dämpfung des Netzfilters im d-Zweig . . . . .	76
4.5	Anti-Windup und Tracking der PI-Regler . . . . .	83
4.5.1	Nachführen von inaktiven Reglern . . . . .	85
4.5.2	Anti-Windup in kaskadierten Regelkreisen . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Regelung des DASG mit dem HDMU</b>	<b>91</b>
5.1	Messgrößen, Modellgrößen und Stellgrößen . . . . .	92
5.2	Regelstruktur und Betriebsmodus . . . . .	94
5.3	Regelung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators . . . . .	96
5.3.1	Rotorstromregelung . . . . .	96
5.3.2	Statorstromregelung . . . . .	99
5.3.3	Berechnung der Statorstromsollwerte . . . . .	100
5.4	Netzseitige Regelung . . . . .	102
5.4.1	Regelung des q-Zweiges durch den Matrixumrichter . . . . .	102
5.4.2	Aktive Dämpfung des Netzfilters im d-Zweig . . . . .	107
5.5	Wechselwirkung zwischen Statorflussverkettung und Rotormomentanleistung . . . . .	109
5.5.1	Analyse der Rotormomentanleistung . . . . .	109
5.5.2	Dämpfung der Statorflussverkettung im synchronen Koordinatensystem . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Versuchsstand der untersuchten Generatoranordnungen</b>	<b>119</b>
6.1	Messbetrieb des ASG mit dem HDMU als Vollumrichter . . . . .	121
6.2	Messbetrieb des DASG mit dem HDMU . . . . .	121
6.3	Eigenschaften der Generatoren . . . . .	122
6.4	Der HDMU-Prototyp . . . . .	124
6.4.1	Aufbau des Leistungsteils . . . . .	125
6.4.2	Aufbau und Funktion der Signalverarbeitung . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>131</b>
7.1	Messungen am HDMU als Vollumrichter . . . . .	131
7.1.1	Stationärer Betrieb . . . . .	132
7.1.2	Transiente Übergänge . . . . .	134
7.1.3	Netzspannungseinbruch . . . . .	136

7.2	Messungen mit der neuen Generatoranordnung . . . . .	140
7.2.1	Stationärer Betrieb . . . . .	140
7.2.2	Transiente Übergänge . . . . .	142
7.2.3	Netzspannungseinbruch . . . . .	146
<b>8</b>	<b>Netzblindleistungsverhalten der Generatoranordnungen</b>	<b>151</b>
8.1	Netzblindleistungsverhalten des ASG mit dem HDMU . . . . .	152
8.1.1	Messverfahren und Ergebnisse der Netzblindstromgrenzen	152
8.1.2	Eingangsbildstromstellbereich von DMU und HDMU . . . . .	155
8.1.3	Netzblindstromstellbereich des ASG mit HDMU . . . . .	159
8.1.4	Vergleich mit Anforderungen der stationären Spannungshaltung . . . . .	164
8.1.5	Vergleich mit Anforderungen der dynamischen Spannungshaltung . . . . .	169
8.2	Netzblindleistungsverhalten des DASG mit dem HDMU . . . . .	171
8.2.1	Stellgrenzen des DASG-Statorblindstromes . . . . .	171
8.2.2	Netzblindstromstellbereich unter Einfluss des ACC . . . . .	175
8.2.3	Vergleich mit Anforderungen der stationären Spannungshaltung . . . . .	177
8.2.4	Vergleich mit Anforderungen der dynamischen Spannungshaltung . . . . .	179
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>187</b>
A.1	Annahmen und Näherungen der Reglersynthese . . . . .	188
A.1.1	Abtastzeit für quasikontinuierliche digitale Regelkreise . . . . .	188
A.1.2	Annäherung des Totzeitgliedes . . . . .	188
A.1.3	Näherung der Übertragungsfunktion geschlossener Regelkreise . . . . .	189
A.2	Berechnung der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung . . . . .	195
A.3	Ersatzschaltbildparameter der Generatoren . . . . .	196
A.4	Gleichungen der Statorblindstromgrenzwerte . . . . .	197
<b>B</b>	<b>Thesen</b>	<b>201</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>203</b>