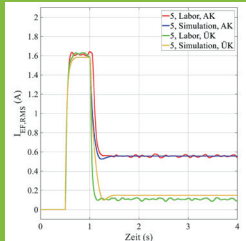
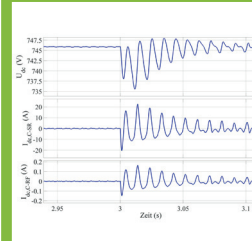
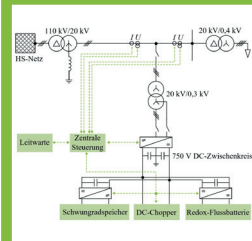


Michael Steglich

Regelung eines multifunktionalen Umrichters und hybriden Speichersystems zur Erbringung neuartiger Systemdienstleistungen

Band 23



**Regelung eines multifunktionalen Umrichters und hybriden Speichersystems
zur Erbringung neuartiger Systemdienstleistungen**

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

M.Sc. Michael Steglich

Dortmund, 2021

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Schulz

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2021

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Band 23

Michael Steglich

**Regelung eines multifunktionalen Umrichters
und hybriden Speichersystems zur Erbringung
neuartiger Systemdienstleistungen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8364-4

ISSN 2567-2908

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

Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende kommt es zu weitreichenden und substanziellen Veränderungen in den Bereichen der elektrischen Energieerzeugung, Versorgungssicherheit und des Leistungsflusses. Im Zentrum dieser Transformation steht zum einen der dezidierte Ausbau und die Integration dezentraler Erzeugungsanlagen und Speichersysteme im Stromnetz und zum anderen die sukzessive Reduktion konventioneller Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke. Sowohl dezentrale Erzeugungsanlagen als auch Energiespeicher sind häufig mittels Umrichter an das Netz angeschlossen. Daher muss sichergestellt sein, dass Umrichter im symmetrischen, unsymmetrischen und fehlerhaften Netzbetrieb leistungsfähig und zuverlässig weiterbetrieben werden können, damit die Netzstabilität nicht gefährdet wird und die Spannungsqualität gewährleistet werden kann. Motiviert durch diese zahlreichen Veränderungen und Anforderungen an zukünftige Stromnetze wird in dieser Arbeit ein hybrides Kompensationssystem, bestehend aus einem multifunktionalen Umrichter, einer Redox-Flussbatterie und einem Schwungradspeicher, simulativ abgebildet und evaluiert. Dabei wird eine erweiterte Regelstruktur in der Steuerung eines netzgekoppelten Umrichters implementiert und das Verhalten bei verschiedenen Netzbetriebszuständen analysiert und bewertet. Unter Verwendung der Regelstruktur kann das System selbst bei tiefen Spannungseinbrüchen Wirk- und Blindleistung bereitstellen sowie Strom- und Spannungsspitzen auf am Gleichstromzwischenkreis angeschlossene elektrische Bauelemente maßgeblich reduzieren und die Energiespeicher vor Überlastung oder Beschädigung schützen.

Weiterführend werden zwei Konzepte für ein Speicher- und Leistungsmanagement präsentiert. Das erste Konzept zum Speichermanagement berücksichtigt die aktuellen Ladezustände und Wirkungsgrade der Energiespeicher und steigert auf dieser Grundlage den Gesamtwirkungsgrad des Systems. Das zweite Konzept zum Leistungsmanagement beschreibt eine gewichtete Scheinleistungsaufteilung des Umrichters auf einzelne Systemdienstleistungen in Abhängigkeit von im Netz gemessenen Spannungsqualitätsparametern und verbessert dadurch die Einhaltung normativer Grenzwerte.

Abschließend werden zwei neuartige Systemdienstleistungen des Umrichters eruiert und sowohl simulativ als auch experimentell in Laborversuchen verifiziert. Zum einen wird ein Verfahren zur Kompensation harmonischer Ströme im einpoligen Erdfehlerstrom entwickelt. Ein wesentliches Merkmal dieses Verfahrens ist die Unterstützung zur Einhaltung der Löschgrenze am Fehlerort. Zum anderen wird ein Verfahren entworfen, welches es mit Hilfe vom Umrichter eingespeister Ströme ermöglicht, die Entfernung zu einpoligen Erdfehlern auf dem Strang zu bestimmen. Dadurch kann der Leitwarte die korrekte Fehlerentfernung übermittelt und folglich die Netzbetriebsfähigkeit verbessert werden, da eine aufwendige Lokalisierung des Fehlers durch den Netzbetreiber entfällt.

Abstract

In the course of the energy transition, there will be far-reaching and substantial changes in the electrical power generation, security of supply and power flow. At the center of this transformation is, on the one hand, the decided expansion and integration of decentralized generation plants and storages in the power grid and, on the other hand, the successive reduction of conventional coal, gas and nuclear power plants. Both the energy storages and the decentralized generation plants are often coupled with the electrical grid using converters. Therefore, it must always be ensured that the converters can continue to operate with high performance and reliably in symmetrical, asymmetrical and faulty grid operation so that the grid stability is not jeopardized and the voltage quality can still be ensured. Motivated by this, a hybrid compensation system consisting of a multifunctional converter, a redox flow battery and flywheel storage is evaluated in this work using simulations. An advanced control structure is implemented in the control system of the grid-connected converter, and the behavior under different grid operating conditions is analyzed and evaluated. The hybrid compensation system can provide active and reactive power even during deep voltage dips using this control structure. At the same time, this significantly reduces the current and voltage peaks on electrical components connected to the DC bus. This also protects the storage devices from unwanted overloading or damage.

Furthermore, two concepts are presented. One describes a management concept for the implemented storage systems. The charging states and the efficiencies at the current storage unit operation point are taken into account when providing active power, thus improving overall system efficiency. The second concept describes a weighted power allocation of the converter to the individual system services depending on the voltage quality parameters measured in the grid, thus improving the compliance with the normative limits.

Finally, two novel system services of the converter are investigated and evaluated. One is the method of harmonic current compensation in the single-phase ground-fault current. This procedure has been investigated and verified simulatively and experimentally using laboratory tests and supports compliance with the extinction limit at the fault location. Furthermore, a method has been developed and evaluated using various simulations and laboratory tests. This method uses the currents injected by the converter, allowing the single-phase ground faults to be located. This allows the correct fault distance to be communicated to the control room. As a result, the grid operability is improved by eliminating the grid operator's need for time-consuming fault location.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) an der Technischen Universität Dortmund.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz für die Betreuung dieser Doktorarbeit. Ich bedanke mich insbesondere für fachliche Beratung, das entgegengebrachte Vertrauen sowie der Möglichkeit die Promotion am ie³ erfolgreich abzuschließen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Schulz bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin möchte ich mich für die erfolgreiche und angenehme Zusammenarbeit mit meinen Kolleginnen und Kollegen am ie³ und bei allen Forschungspartnern des Projektes HYBKomp bedanken. Insbesondere möchte ich den fachlichen Austausch und die stets außerordentliche Hilfsbereitschaft meiner Bürokollegen Herrn Dr.-Ing. Matthias Meißner, Herrn Diego Hidalgo und Herrn Rajkumar Palaniappan hervorheben. Ebenso gilt mein Dank Herrn Jan Elvermann für die Unterstützung bei der Umsetzung der Laborversuche sowie allen kritischen Lesern dieser Arbeit wie Herrn Dr.-Ing. Marvin Albrecht und Herrn Björn Bauernschmitt für ihre Kommentare und Anregungen. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen wissenschaftlichen Hilfskräften und insbesondere bei Frau Svenja Joseph für die mehrjährige und tatkräftige Unterstützung bedanken.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Großvater, die mir das Studium ermöglicht, mich fortwährend unterstützt und motiviert haben. Abschließend möchte ich mich auch bei meiner Partnerin Simone für ihre Unterstützung und den persönlichen Rückhalt bedanken.

Bergkamen, 2021

Michael Steglich

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Abstract.....	IV
1 Einleitung	1
1.1 Ziele und Forschungsfragen der Arbeit.....	2
1.2 Gliederung der Arbeit.....	4
2 Transformation der Stromnetze und hybride Kompensationssysteme	9
2.1 Transformation der Stromnetze.....	10
2.2 Definition und Aspekte der Power Quality	13
2.3 Definition von Systemdienstleistungen.....	14
2.4 Aufbau und Struktur eines hybriden Kompensationssystems.....	16
2.4.1 Hybride Speichersysteme	17
2.4.2 Monitoring und zentrale Steuerung	20
2.4.3 Erfassung des Anlagen- und Netzzustandes.....	21
2.4.4 Struktur der Kompensationsanlage und des Umrichters	22
2.5 Anschlussrichtlinien von Erzeugungsanlagen im MS-Netz.....	24
2.6 Problemstellung und Stand der Forschung.....	26
3 Umrichter im symmetrischen und unsymmetrischen Netzbetrieb.....	31
3.1 Aufbau des verwendeten Netzmodells.....	32
3.1.1 Impedanzen symmetrischer Komponenten	34
3.1.2 Symmetrischer und unsymmetrischer Netzbetrieb.....	34
3.2 Aufbau der Umrichter und des DC/DC-Stellers	36
3.2.1 DC/DC-Steller der Redox-Flussbatterie	38
3.2.2 Aufbau des Schwungradumrichters.....	39
3.3 Regelverfahren der Umrichter.....	39
3.4 Dimensionierung und Stabilitätsbetrachtung	43
3.4.1 Stabilität der LCL-Filter	49
3.4.2 Stabilität der inneren und äußeren Regelungen.....	52

3.5 Umrichter im symmetrischen Netzbetrieb	55
3.6 Umrichter im unsymmetrischen Netzbetrieb	57
3.6.1 Auswirkungen oszillierender DC-Spannung auf den DC-Zwischenkreis.....	66
3.6.2 Auswirkungen oszillierender DC-Spannung auf die Speichersysteme	68
3.7 Regelverfahren von Umrichtern im unsymmetrischen Netzbetrieb.....	69
3.7.1 Theorie der momentanen Wirk- und Blindleistung	70
3.7.2 Regelverfahren und Entkopplungszelle für das Mit- und Gegensystem	71
3.7.3 Bildung und Berechnung der Referenzströme	73
3.7.4 Simulationsergebnisse der erweiterten Regelung.....	75
3.8 Vergleich und Bewertung der Regelverfahren.....	83
4 Speicher- und Leistungsmanagement des hybriden Speichersystems und Umrichters	87
4.1 Speichermanagement der Energiespeicher.....	88
4.2 Leistungsmanagement des Umrichters.....	91
5 Erdschlusskompensation harmonischer Ströme in gelöschten Netzen	97
5.1 Erdschluss und Erdschlusskompensation.....	98
5.1.1 Methoden zur Fehlerdetektion.....	99
5.1.2 Beschreibung unterschiedlicher Sternpunktbehandlungen.....	100
5.1.3 Problemstellung und entwickeltes Lösungsverfahren zur erweiterten Erdschlusskompensation	105
5.2 Aufbau und Durchführung der Laborversuche	109
5.3 Aufbau der Laborsimulation	113
5.4 Auswertung der Simulations- und Messergebnisse im 400-V-Netz	114
5.5 Erdschlusskompensation im 20-kV-MS-Netz.....	119
5.6 Bewertung und Umsetzbarkeit der Erdschlusskompensation.....	125
6 Fehlerentfernungsberechnung in gelöschten Netzen	129
6.1 Grundlegende Fehlerortungsverfahren.....	130
6.2 Verfahren zur Fehlerentfernungsberechnung.....	131
6.2.1 Herleitung des Gegensystemverfahrens	133

6.2.2 Labortechnische Untersuchung und Simulation.....	136
6.3 Fehlerentfernungsberechnung im 20-kV-MS-Netz.....	141
6.4 Bewertung und Vergleich der Verfahren	145
7 Zusammenfassung und Ausblick	149
7.1 Zusammenfassung.....	149
7.2 Ausblick.....	156
Literaturverzeichnis	159
Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis.....	171
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	175
Abbildungsverzeichnis.....	183
Tabellenverzeichnis.....	189
Anhang A: Auslegung von Netzbetriebsmitteln.....	191
Anhang B: Simulationen	195
Anhang C: DDSRF und Entkopplungszellen	199
Anhang D: Invertierung einer 4x4-Matrix.....	201
Anhang E: Laborhardware.....	205
Anhang F: Daten zur Erdschlusskompensation	211
Anhang G: Fehlerentfernungsberechnung.....	219