

Florian Rewald

Engpassmanagement mit Flexibilitäten in Mittel- und Niederspannungsnetzen bei unsicheren Netzzuständen

Band 21



Engpassmanagement mit Flexibilitäten in Mittel- und Niederspannungsnetzen bei unsicheren Netzzuständen

Von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Florian Rewald, M. Sc.
aus Kassel

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2021

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

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

Band 21

Florian Rewald

**Engpassmanagement mit Flexibilitäten in
Mittel- und Niederspannungsnetzen bei
unsicheren Netzzuständen**

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 978-3-8440-8256-2

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

Die Substitution von Großkraftwerken durch dezentrale Erzeugungsanlagen und lastferne Windparks führt zunehmend zu Netzengpässen in der Höchst- und Hochspannungsebene. In dieser Arbeit wird praxisnah gezeigt, wie die Flexibilität von Erzeugungsanlagen aus den Mittel- und Niederspannungsnetzen bei unsicheren Netzzuständen zur Behebung dieser Netzengpässe beitragen kann. Zunächst wird ein Engpassmanagementsystem zur Behebung von Netzengpässen in der Hochspannungsebene mit Flexibilität aus den nachgelagerten Netzebenen vorgestellt. Anschließend wird ein Verfahren zur Bestimmung dieser Flexibilität mathematisch beschrieben und deren Funktionsweise anhand von Benchmark-Netzen mit bekanntem Netzzustand demonstriert. Für eine praxisnahe Anwendung kann der Netzzustand nicht als bekannt vorausgesetzt werden, sondern wird mit einer Zustandsschätzung bestimmt. Für diese Zustandsschätzung werden zunächst die Eingangsdaten analysiert, darauf aufbauend der Netzzustand geschätzt und auf Basis dessen das Flexibilitätspotential bestimmt. Abschließend wird geprüft, inwiefern die Ergebnisse dieses Feldtests auf andere Netze übertragbar sind.

Abstract

The substitution of large power plants by distributed generation plants and offshore wind farms increasingly leads to grid congestions in the transmission and subtransmission networks. In this work, it is shown in a practical way how the flexibility of generation plants from the medium and low voltage grids can contribute to the elimination of these grid congestions considering uncertain network states. First, a congestion management system for resolving grid congestion in the high-voltage systems with flexibility from the lower grid levels is presented. Subsequently, a method for determining this flexibility is described mathematically and its operation is demonstrated using benchmark-networks with a known network state. For a practical application, the network state cannot be assumed to be known, but is determined with a state estimation. For this state estimation, first the input data are analyzed, then the network state is estimated and the flexibility potential is determined on the basis of the network state. Finally, it is examined to what extent the results of this field test can be transferred to other networks.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie3) der Technischen Universität Dortmund begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz für die fachliche Begleitung bei der Erstellung dieser Arbeit und das mir entgegen gebrachte Vertrauen. Die spannenden Forschungsthemen, die freie Arbeitsweise und den fachlichen Austausch haben wesentlich zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme des Korreferats und der Begleitung während meines Studiums an der TU Braunschweig bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen KollegInnen sowie den Studierenden, die mich im Rahmen einer Abschlussarbeit oder ein Tätigkeit als Hilfskraft unterstützt haben. Die offene und ehrliche Kommunikation innerhalb des Kollegiums und Hilfsbereitschaft habe ich sehr geschätzt. Besonders bedanke ich mich bei Oliver Pohl und Stefan Dalhues für die sehr gute Zusammenarbeit in zwei verschiedenen Forschungsprojekten und für die intensiven Diskussionen beim Erstellen dieser Arbeit. Weiterhin möchte ich an dieser Stelle die sehr gute Zusammenarbeit mit Herrn Denis Belonogov bei der Durchführung der Simulationen und des Feldtests erwähnen. Abschließend bedanke ich mich bei allen KollegInnen und FreundInnen, die diese Arbeit Korrektur gelesen haben.

Ganz besonders danke ich meiner Familie für ihre immerwährende Unterstützung, die sie mir bei meiner Ausbildung und darüber hinaus gegeben haben. Meinen FreundInnen und vor allem meiner Freundin Barbara danke ich für den ständigen Zuspruch und Rückhalt, aber auch für viele schöne Erlebnisse neben der Arbeit.

Danke!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Dissertation	2
1.3	Struktur der Dissertation	8
2	Engpassmanagement in der Betriebsplanung und Betriebsführung	11
2.1	Flexibilität für die Betriebsplanung und die Betriebsführung .	11
2.1.1	Flexibilitätsoptionen in den Verteilnetzen	12
2.1.2	Regelbarkeit der Flexibilitätsoptionen	13
2.2	Betriebsplanung und Betriebsführung	16
2.2.1	Betriebsplanung und Betriebsführung des Übertragungsnetzes	16
2.2.2	Betriebsplanung und Betriebsführung des Verteilnetzes	18
2.3	Präventives Engpassmanagement	19
2.3.1	Maßnahmen des präventiven Engpassmanagements .	19
2.3.2	Redispatch 2.0	20
2.4	Kuratives Engpassmanagement	21
3	Engpassmanagementsystem mit Flexibilitäten in MS- und NS-Netzen	23
3.1	Maßnahmen zur Behebung von Netzengpässen	24
3.2	Zentraler und dezentraler Regelungsalgorithmus	26
3.3	Funktionsweise des kurativen Engpassmanagementsystems .	27
3.3.1	Engpassmanagement aus Sicht des Netzbetreibers des Hochspannungsnetzes	28
3.3.2	Verbindung zur Systemführung des Hoch- und Mittelspannungsnetzes	31
3.3.3	Engpassmanagement aus Sicht des Netzbetreibers des Mittelspannungsnetzes	32
3.3.4	Einordnung des Engpassmanagementsystems in die Regelkaskade	33
3.3.5	Anwendungsfälle aus Sicht des Mittelspannungsnetzes	35

4	Methodik zur Bestimmung von Flexibilitätspotentialen	37
4.1	Grundlagen des Optimal Power Flows	37
4.1.1	Aufstellung des Optimal Power Flows	38
4.1.2	Lösung des Optimal Power Flows	40
4.2	Modellierung flexibler Erzeugungsanlagen	42
4.2.1	Betriebsbereiche flexibler Erzeugungsanlage der MS- Netze	43
4.2.2	Betriebsbereiche flexibler Erzeugungsanlagen der NS- Netze	45
4.3	Linearisierung des Optimal Power Flows	46
4.3.1	Linearisierung der Zielfunktion und der Variablenbe- schränkungen	47
4.3.2	Linearisierung der Leistungsbilanzgleichungen	47
4.3.3	Linearisierung der Leistungsflussbeschränkungen	49
4.4	Anwendung des OPFs zur Bestimmung des Flexibilitätspotentials	50
4.4.1	Bestimmung der Basispunkte	51
4.4.2	Bestimmung weiterer Basispunkte	53
4.4.3	Weitere Ansätze zur Bestimmung des Flexibilitätspoten- tials	56
4.5	Bestimmung von Flexibilitätspotentialen aus mehreren Span- nungsebenen	57
4.5.1	Analyse der Rechenzeit	57
4.5.2	Analyse des Spannungsbands	58
4.6	Disaggregation des Flexibilitätspotentials	60
5	Bestimmung und Beschreibung von Flexibilitätspotentialen	63
5.1	Netztopologie und Zeitreihen	63
5.2	Darstellung des absoluten und relativen Flexibilitätspotentials	65
5.3	Flexibilitätspotential mit linearisiertem Optimierungsproblem	69
5.4	Flexibilitätspotential mit Flexibilitätsoptionen aus der NS-Ebene	71
5.5	Darstellung des Flexibilitätspotentials eines Tages	72
5.6	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	74

6	Analyse von Messwerten als Eingangsdaten für eine State Estimation	75
6.1	Bestimmung des Netzzustands	76
6.2	Netzmodell des Mittelspannungsnetzes	80
6.3	Messgeräte und Messwerte	82
6.4	Merkmale der Versorgungsspannung und Spannungsänderungen	83
6.4.1	Änderungen der Versorgungsspannung	83
6.4.2	Schnelle Spannungsänderungen	84
6.5	Analyse von Messwerten	85
6.5.1	Messwertanalyse eines Tages mit geringer Fluktuation der Einspeisung der PV-Anlage	85
6.5.2	Messwertanalyse eines Tages mit hoher Fluktuation der Einspeisung der PV-Freiflächenanlage	91
6.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	94
7	Feldtest der Bestimmung von Flexibilitätspotentialen	97
7.1	Einordnung und Ziele des Feldtests	97
7.2	Hardware-Ausführung der Algorithmen	98
7.3	Berechnung von Pseudomesswerten	99
7.4	Feldtest der Zustandsschätzung	103
7.4.1	Ergebnisse der Zustandsschätzung	105
7.4.2	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	109
7.5	Feldtest der Berechnung des Flexibilitätspotentials	111
7.5.1	Flexibilitätspotentiale mit hoher Einspeisung der PV- Anlagen	112
7.5.2	Flexibilitätspotentiale mit geringer Einspeisung der PV- Anlagen	116
7.5.3	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	118
7.6	Schlussfolgerungen für ein kuratives Engpassmanagementsystem	120
8	Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1	Zusammenfassung	123
8.2	Weiterer Forschungsbedarf	126

