

Martin Wolfram

**Netzbetriebsverfahren zur
Koordinierung von
Phasenschiebertransformatoren und
HGÜ-Verbindungen im Verbundnetz**



Universitätsverlag Ilmenau

2019

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 06. April 2018
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Krzysztof Rudion
(Universität Stuttgart)
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Haubrock
(Fachhochschule Bielefeld)
Tag der Verteidigung: 11. Oktober 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net/>

ISSN 2194-2838 (Druckausgabe)
ISBN 978-3-86360-192-8 (Druckausgabe)
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000382

Titelfotos:

© iStockphoto.com : JLGutierre ; timmy ; 3alexnd ; Elxeneize ; tap10
yuyang/Bigstock.com
M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Trends im Bereich der elektrischen Energieversorgung.....	1
1.2	Forschungsfragen	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Stand der Wissenschaft und Technik	6
2.1	Netzbetrieb.....	7
2.1.1	Netzebenen und Netzbetreiber	7
2.1.2	Netzsicherheitskooperationen	8
2.1.3	Netzbetriebsplanung und -führung	10
2.1.4	Netzbetriebszustände	13
2.1.5	Maßnahmen zur Wahrung der Netzsicherheit.....	14
2.2	Betriebsmittel mit wirkleistungsflussbeeinflussender Wirkung.....	14
2.2.1	Phasenschiebertransformatoren	17
2.2.2	Hochspannungsgleichstromübertragung.....	18
2.3	Leistungsflussarten und Einfluss der PFCDs auf den Wirkleistungsfluss	19
2.4	Aktuelle Betriebsweisen von PSTs und HGÜs.....	21
2.5	Analyse bestehender Ansätze	23
2.6	Zusammenfassung.....	27
3	Netzbetriebsverfahren mit PSTs und HGÜ-VSCs	29
3.1	Anforderungsanalyse	29
3.1.1	Anforderungen bzgl. der verschiedenen Netzbetriebszeitbereiche ...	30
3.1.2	Anforderungen bzgl. der Zielfunktionen, Nebenbedingungen und Optimierungsverfahren.....	32
3.1.3	Anforderungen bzgl. der Koordinierung der Betriebsmittel- Sollwerte	34
3.1.4	Anforderungen bzgl. der Netzleittechnik.....	36
3.2	Aufbau des Netzbetriebsverfahrens.....	37
3.3	Netzbetriebsplanung: Day-Ahead- und Intraday-Optimierung.....	39
3.3.1	Methode zur Vorausberechnung von Betriebsmittelsollwerten	39
3.3.2	Optimierungsproblem.....	41
3.3.3	Optimal Power Flow – Auswahl des Optimierungsverfahrens	47
3.3.4	Optimierung mittels Differential Evolution.....	51
3.4	Netzbetriebsführung: Anpassungen im Onlinebetrieb.....	53
3.4.1	Ursachen für ungeplante Leistungsflussänderungen.....	55
3.4.2	Methode zur Erfassung und Identifikation von Wirkleistungsflussänderungen	56

3.4.3	Methode zur korrektiven Anpassung von PST und HGÜ-VSC bei klar identifizierbaren Leistungsflussänderungen.....	60
3.4.4	Methode zur lokalen Anpassung von PSTs im Onlinebetrieb	62
3.4.5	Methode zur lokalen Anpassung von HGÜ-VSCs im Onlinebetrieb.	68
3.5	Synthese aller Methoden zu einem Netzbetriebsansatz	70
3.6	Zusammenfassung.....	71
4	Fallbeispiele.....	73
4.1	Modellsystem	73
4.1.1	Anforderungen an das Simulations-Testnetz.....	73
4.1.2	Modellbildung AC-DC Netz	75
4.1.3	Simulationsszenarien	78
4.2	Ergebnisse und Bewertung.....	80
4.2.1	Einflussbereich der PFCDs	80
4.2.2	Validierung der Methode zur Day-Ahead- und Intraday-Optimierung von PSTs und HGÜ-VSCs	85
4.2.3	Validierung der Methode zur korrektiven Anpassung von PST und HGÜ-VSC bei klar identifizierbaren Leistungsflussänderungen.....	92
4.2.4	Validierung der Methode zur lokalen Anpassung von PSTs im Onlinebetrieb.....	95
4.2.5	Validierung der Methode zur lokalen Anpassung von HGÜ-VSCs im Onlinebetrieb	102
4.2.6	Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den lokalen Anpassungen von PST und HGÜ-VSC	105
4.3	Analyse zum Erfüllungsgrad der Anforderungen.....	109
4.4	Zusammenfassung.....	110
5	Zusammenfassung und Ausblick	113
5.1	Zusammenfassung.....	113
5.2	Ausblick.....	116
6	Literaturverzeichnis.....	118
A.	Anhang	130
A.1	Netzdaten des Testnetzes	130
A.2	Einflussbereich der PFCDs im Testnetz	137
B.	Abkürzungsverzeichnis	141
C.	Formelverzeichnis.....	144
D.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	147