Annika Schurtz

Verfahren zur Zustandsschätzung und ihr Beitrag zum Engpassmanagement in Mittelspannungsnetzen

Band 19

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft

Verfahren zur Zustandsschätzung und ihr Beitrag zum Engpassmanagement in Mittelspannungsnetzen

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund
vorgelegte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Annika Schurtz
(geb. Brüggemann)

Dortmund, 2020

Referent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
Tag der mündlichen Prüfung:	01. Juli 2020

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

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

Band 19

Annika Schurtz

Verfahren zur Zustandsschätzung und ihr Beitrag zum Engpassmanagement in Mittelspannungsnetzen

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7638-7
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

Der steigende Anteil dezentraler Energieumwandlungsanlagen und die damit verbundene veränderte Netznutzung der Mittelspannungsnetze führen im Netzbetrieb zu neuen Herausforderungen. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur praktischen Umsetzbarkeit der Zustandsschätzung bei einer geringen messtechnischen Durchdringung von Mittelspannungsnetzen. Im Fokus der Untersuchung steht hierbei die adäquate Modellierung von Fehlern in den Eingangsgrößen, die durch den Einbezug sogenannter Pseudomesswerte entstehen. Eine akkurate Bestimmung von betrieblichen Netzzuständen bildet das Fundament für nachgelagerte Maßnahmen, die in der Regel eine zuverlässige Informations- und Entscheidungsgrundlage benötigen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein exemplarischer Anwendungsfall in Form des kurativen Engpassmanagements in Mittelspannungsnetzen konzipiert und entwickelt. An diesem werden beispielhaft die Mindestanforderungen an die Schätzgüte für die Zustandsschätzung in dieser Spannungsebene ermittelt.

Abstract

The increasing share of distributed generation and the associated changes in grid usage raise new challenges in grid operation of medium-voltage grids. This work contributes to the practical applicability of state estimation with a limited measurement penetration of medium-voltage grids. The investigation focuses on the adequate modelling of errors in the input variables, which are caused by the inclusion of so-called pseudo measurements. An accurate identification of the operational system state provides the foundation for follow-up measures, which usually require a reliable basis for decision-making. Therefore, an exemplary use case for real-time congestion management in medium-voltage grids is designed and developed in the context of this thesis. For this use case, the minimum requirements for the estimation quality are determined exemplarily.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie^3) an der Technischen Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz für die Betreuung und die durchgehende Unterstützung während der Entstehung meiner Doktorarbeit. Außerdem danke ich ihm für die Möglichkeit an seinem Institut vielfältige und spannende Forschungsthemen bearbeiten zu können.

Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker von der Technischen Universität Hamburg für die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin danke ich meinen derzeitigen und auch ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am ie^3. Die Zusammenarbeit war stets durch eine angenehme Atmosphäre, offene Diskussionen und Hilfsbereitschaft geprägt. Ebenso danke ich allen aus dem Kollegium und meinem Freundeskreis, die sich Zeit für konstruktive Gespräche und Anregungen genommen haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinem Ehemann Gunther, die mich unentwegt unterstützt und mir Rückhalt gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Neue Herausforderungen in der Betriebsführung von Verteilnetzen . . . 2

1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . 6

1.3 Struktur der Arbeit . . . 8

2 Bestimmung von Zustandsgrößen in Verteilnetzen **13**

2.1 Anwendungsfälle in der zustandsbasierten Betriebsführung von Verteilnetzen . . . 14

2.1.1 Engpassmanagement . . . 15

2.1.2 Ampelkonzepte . . . 18

2.2 Aufbau und Modellierung von Mittelspannungsnetzen . . . 20

2.3 Verfahren zur Zustandsschätzung . . . 26

2.3.1 Einordnung der Verfahren . . . 26

2.3.2 Weighted-Least-Squares-Verfahren . . . 29

2.3.3 Augmented-Matrix-Verfahren . . . 33

2.3.4 Extended-Kalman-Filter-Verfahren . . . 35

2.4 Herausforderungen bei der Anwendung von Verfahren zur Zustandsschätzung in Verteilnetzen . . . 37

2.4.1 Topologie und Netzstruktur . . . 37

2.4.2 Verfügbarkeit von Messdaten . . . 38

2.4.3 Skalierbarkeit und Komplexität . . . 38

2.4.4 Unsymmetrische Netzauslastung . . . 39

2.5 Beobachtbarkeit . . . 41

2.5.1 Verfahren zur Beobachtbarkeitsanalyse . . . 41

2.5.2 Bestimmung kritischer Eingangsgrößen . . . 44

2.6 Messstellenpositionierung . . . 45

3 Analyse und Modellierung der Unsicherheit von Eingangsgrößen **47**

3.1 Definition und Beschreibung von Unsicherheit . . . 47

3.2 Messtechnik 50
3.2.1 Messdaten des Netzbetreibers 51
3.2.2 Intelligente Messsysteme 53
3.2.3 μPMU-Messdaten 55
3.3 Pseudomesswerte 57
3.3.1 Standardlastprofile 57
3.3.2 Stochastische Last- und Einspeisemodellierung 58
3.3.3 Wetterdaten und Prognosen zur Modellierung dezentraler Einspeisung 60
3.3.4 Modellierung mit gemessenen Referenzwerten 64
3.3.5 Verzögerte Smart-Meter-Daten 65
3.3.6 Künstliche Neuronale Netze 65
3.4 Datenanalyse 66
3.4.1 Beschreibung der Datenbasis 66
3.4.2 Gemessene MS- und NS-Zeitreihen 66
3.4.3 Solareinstrahlungs- und PVA-Messzeitreihen 75
3.5 Modellierung von Unsicherheit zur realitätsnahen Generierung von Eingangsgrößen 87
3.5.1 Normalverteilte Fehler 88
3.5.2 Nicht-normalverteilte und korrelierte Fehler 89
3.5.3 Fehler durch Mittelwertbildung 94
3.5.4 Monte-Carlo-Simulation und Sampling-Verfahren 94
3.6 Zusammenfassung der Modellierung von Eingangsgrößen 98

4 Methodik und Simulationsumgebung 101
4.1 Methodischer Ablauf und Übersicht der Simulationsumgebung . 101
4.2 Beschreibung der Komponenten der Simulationsumgebung . . . 105
4.2.1 Netzsimulation 105
4.2.2 Fehlersimulation 106
4.2.3 Zustandsschätzung 107
4.2.4 Zustandsbewertung 108
4.2.5 Engpassmanagement 110
4.3 Auswahl der Untersuchungsszenarien 116
4.3.1 Exemplarisches Verteilnetz 117

4.3.2 Simulierte Last- und Einspeisezeitreihen 117
4.3.3 Validierung des Engpassmanagements 121
4.3.4 Definition der Untersuchungsszenarien 123
4.4 Gütekriterien und Kennzahlen 126
4.4.1 Bewertung der Verfahren zur Zustandsschätzung 126
4.4.2 Bewertung des Engpassmanagements 128

5 Bewertung der Zuverlässigkeit und Wirksamkeit von Zustandsschätzung und Engpassmanagement 131
5.1 Schätzgüte unter unsicheren Eingangsgrößen 131
5.1.1 Vergleich von Verfahren zur Zustandsschätzung 132
5.1.2 Verschiedene Konfigurationen von Eingangsgrößen . . . 136
5.2 Engpasserkennung unter unsicheren Eingangsgrößen 141
5.2.1 Verschiedene Konfigurationen von Eingangsgrößen . . . 141
5.2.2 Beobachtbare Inseln 148
5.3 Engpassmanagement auf Basis unsicherer Schätzergebnissen . . 152
5.3.1 Verschiedene Konfigurationen von Eingangsgrößen . . . 152
5.3.2 Vergleich von kurativem und präventivem Engpassmanagement 155
5.4 Zusammenfassung 157

6 Diskussion und Handlungsempfehlungen 161
6.1 Diskussion der gewählten Methodik 161
6.2 Einordnung in den Forschungs- und Anwendungskontext 165
6.3 Handlungsempfehlungen 170

7 Zusammenfassung und Ausblick 173
7.1 Zusammenfassung 173
7.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen 177

A Mathematische Verfahren i
A.1 Sensitivitäten i
A.2 Peters-Wilkinson-Zerlegung i

B Weitere Daten und Analysen **iii**
B.1 Datenanalyse iii
B.2 Simulationsergebnisse v

C Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis **xi**

Literaturverzeichnis **xiii**