

Robert Brandalik

Ein Beitrag zur Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter Messwertauf- nahme

Band 9

Ein Beitrag zur Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter Messwertaufnahme

vom

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

M.Eng. Robert Brandalik
geb. in Sremska Mitrovica, Serbien

Tag der mündlichen Prüfung: 9. März 2020

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Prüfungskommission:

Vorsitzender:

apl. Prof. Dr.-Ing. Daniel Görges

1. Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

2. Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Markus W. Zdrallek

D386

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und
Energiemanagement

Band 9

Robert Brandalik

**Ein Beitrag zur Zustandsschätzung in
Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter
Messwertaufnahme**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

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.: Kaiserslautern, TU, 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 978-3-8440-7361-4

ISSN 2366-4967

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement an der Technischen Universität Kaiserslautern und wurde im Rahmen meiner anschließenden Beschäftigung bei der Amprion GmbH zu Ende geführt.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow, der mir meinen Kindheitstraum, als Forscher zu arbeiten, ermöglicht hat. Für seine exzellente Betreuung, sein Vertrauen und seine fachlichen und menschlichen Ratschläge werde ich Ihm für immer dankbar sein. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek danke ich für die Übernahme des Koreferats, das Interesse an meiner Arbeit und die hilfreichen Gespräche. Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Daniel Görges danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen am Lehrstuhl für die hervorragende Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich Herrn Dominik Wäresch, für seine enorme Unterstützung in der Erstellung dieser Arbeit und die zahlreichen gemeinsamen Erlebnisse, Herrn Marco Weisenstein, für seine anziehende Motivation und für das wertvolle Miteinander auf und außerhalb der Arbeit, Herrn Haiyan Ma, für seine menschliche Sorgsamkeit sowie den Herren Davood Raoofsheibani und Helge Plunkte, für das freundschaftliche Miteinander seit meinem ersten Tag am Lehrstuhl. Zusätzlich möchte ich allen Studenten danken, die mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter unterstützt haben. Namentlich möchte ich an dieser Stelle Herrn Daniel Henschel nennen, der besonders zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Grundlagen dieser Arbeit sind im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekten *SmartSCADA* und *CheapFlex* entstanden. Den beteiligten Projektpartnern *COMback*, *Fraunhofer ISE*, *IDS*, *Meteocontrol*, *Stadtwerke Ahaus*, *Stadtwerke Kaiserslautern* und *Swistec* danke ich für die erfolgreiche Zusammenarbeit. Frau Stefanie Dinges, Frau Anja Görgens und meinen Kollegen vom Lehrstuhl danke ich für die Korrekturlesungen der Arbeit.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben und mir stets Mut gemacht haben. Meiner Schwester Anita danke ich, dass Sie immer ein Vorbild und meine bedeutsamste Lehrerin ist.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Frau Viktoria, die mich auf dem Weg stets begleitet hat. Die so vieles für mich aufgeopfert hat und trotzdem immer Verständnis gefunden hat und mich bis zum Ende ermutigt hat. In den schwierigen Zeiten hat Sie immer die richtigen Worte gefunden. Meinen Sohn Noah danke ich, dass er mich jeden Tag an die schönste Rolle in meinem Leben erinnert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Klimaschutz und neue Herausforderungen für die Energiewirtschaft	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Netzplanung und Netzführung von Niederspannungsnetzen	5
2.1	Anforderungen und grundsätzliche Vorgehensweise	5
2.2	Konventioneller Ansatz der Netzplanung von Niederspannungsnetzen	6
2.3	Durch die Energiewende geprägte Änderungen	9
2.3.1	Integration von Erzeugungsanlagen	9
2.3.2	Integration von unkonventionellen Verbraucheranlagen	10
2.3.2.1	Integration von Wärmepumpen	10
2.3.2.2	Integration von Elektromobilität	11
2.3.3	Integration von Batteriespeichern	11
2.3.4	Datenerfassung mit intelligenten Messsystemen	12
2.4	Neue Netzführungskonzepte	16
2.5	Notwendigkeit der Zustandsschätzung und der Ersatzwertgenerierung	20
3	Grundlagen der Zustandsschätzung	21
3.1	Historische Entwicklung	21
3.2	Stand der Technik	22
3.2.1	Mathematischer Hintergrund	22
3.2.2	Allgemeiner Lösungsansatz	24
3.2.3	Alternativer Lösungsansatz mit dem Augmented-Matrix-Verfahren	25
3.2.4	Lösungsansatz bei ausschließlich linearen Messgleichungen	27
3.2.5	Anwendung in symmetrischen Energiesystemen	27
3.3	Stand der Forschung in Niederspannungsnetzen	31
3.3.1	Erwünschte Eigenschaften der Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen	31
3.3.2	Ansätze und Untersuchungen verschiedener Autoren	32
3.3.2.1	Zu berücksichtigende Aspekte	32
3.3.2.2	Aufteilung verschiedener Ansätze	33
3.3.2.3	Klassische Ansätze mit symmetrischer Betrachtung	33
3.3.2.4	Klassische Ansätze mit unsymmetrischer Betrachtung	34

3.3.2.5	Lineare Ansätze mit symmetrischer oder unsymmetrischer Betrachtung	37
3.3.2.6	Auf Metaheuristiken und neuronalen Netzen basierende Ansätze mit symmetrischer oder unsymmetrischer Betrachtung	37
3.3.2.7	Probabilistische Ansätze mit symmetrischer oder unsymmetrischer Betrachtung	38
3.3.2.8	Alternative Ansätze zur Zustandsschätzung	39
3.3.3	Ansätze, die im Netzbetrieb eingesetzt wurden	39
4	Ansatz zur Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen	41
4.1	Effiziente Implementierung des klassischen Ansatzes in unsymmetrischen Netzen	41
4.2	Vorgeschlagener Ansatz	46
4.3	Bewertung des vorgeschlagenen SE Ansatzes	50
4.3.1	Simulationsumgebung	50
4.3.1.1	Kurzübersicht	50
4.3.1.2	Netzmodelle	50
4.3.1.3	Definition von Szenarien und Benchmark Erstellung	50
4.3.1.4	Betrachtete Algorithmen	54
4.3.1.5	Eingangsdaten für die Zustandsschätzung	56
4.3.2	Simulationsergebnisse	56
4.3.2.1	Bewertung der Genauigkeiten	56
4.3.2.2	Abhängigkeit der Estimationsfehler von der Genauigkeit der Eingangsdaten	65
4.3.2.3	Bewertung der Rechenzeiten	65
4.3.2.4	Fazit der Bewertung	66
5	Beitrag zur Ersatzwertgenerierung in Niederspannungsnetzen	75
5.1	Forschungsansätze zur Ersatzwertgenerierung in Niederspannungsnetzen	75
5.1.1	Ersatzwerte für Leistungen ohne Echtzeit Leistungsmessungen	75
5.1.1.1	Ausgangspunkt	75
5.1.1.2	Auf Zeitreihen und Verteilungsfunktionen basierende Ersatzwerte	76
5.1.1.3	Methoden der Kategorisierung von Haushaltslasten	77
5.1.2	Ersatzwerte für Leistungen mit Echtzeit Leistungsmessungen	78
5.1.3	Forschungsbedarf	79
5.2	Ersatzwertgenerierung aus zeitpunktabhängigen Verteilungen	79

5.3 Ersatzwertgenerierung durch Betrachtung der Zustandsschätzung als Optimierungsproblem	87
5.4 Ersatzwertgenerierung auf Basis von Spannungsmessungen	88
5.5 Bewertung der vorgeschlagenen Ersatzwertgenerierungen	93
5.5.1 Simulationsumgebung	93
5.5.2 Bewertung der Genauigkeiten	94
6 Anwendung der Zustandsschätzung mit Ersatzwertgenerierung im Feldtest	103
6.1 Aufbau des Feldtests	103
6.2 Auswertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	105
7 Zusammenfassung und Ausblick	109
Literaturverzeichnis	113
Abbildungsverzeichnis	143
Tabellenverzeichnis	149
Abkürzungsverzeichnis	151
Verzeichnis der Variablen, Indizes und Symbole	153
Anhang 1 - Einliniendiagramme der Netzmodelle	157
Anhang 2 - Estimationsfehler restlicher Netzmodelle	171
Anhang 3 - Estimationsfehler für verschiedene Sigma-Werte	183
Extended Abstract	215