Lena Robitzky

Analysis of long-term voltage stability in electric power systems under consideration of active distribution networks and novel emergency control systems

Band 4

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft

Analysis of long-term voltage stability in electric power systems under consideration of active distribution networks and novel emergency control systems

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

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Lena Robitzky, M. Sc.

Dortmund, 2018

Referent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thierry Van Cutsem

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juli 2018

Dortmunder Beitäge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz und
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Band 4

Lena Robitzky

Analysis of long-term voltage stability in electric power systems under consideration of active distribution networks and novel emergency control systems

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6129-1
ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

The large-scale installation of distributed generating units and high-voltage direct current transmission systems as well as the decreasing number of synchronous generators change dynamics and stability of future electric power systems. Especially in case of unforeseen network conditions and severe contingencies the risk of regional or large-scale blackouts due to long-term voltage instability rises. In such situations, the changing dynamic behaviour of distribution networks plays an important role and needs to be further investigated. The first target of this thesis is thus to provide a modelling and evaluation approach of a combined transmission-distribution network that enables to gain qualitative insights in the behaviour of future electric power systems. Here, a particular focus is to identify how the decomposition of the load and the control of distributed energy resources influence post-fault system dynamics and long-term voltage instability. Nevertheless, even with these changes a both secure and efficient power supply needs to be guaranteed for all network conditions, which requires novel monitoring and emergency control systems against voltage collapse. Therefore, this thesis further aims at developing a distributed agent-based emergency control approach for the reliable identification of an evolving long-term voltage instability and the coordinated activation of available countermeasures.

Kurzfassung

Der massive Ausbau dezentraler Erzeugungsanlagen, die Errichtung von Hochspannungsgleichstromübertragungssystemen sowie die sinkende Anzahl Synchrongeneratoren verändern die Dynamik und Stabilität zukünftiger Energieübertragungssysteme. Insbesondere nach Betriebsmittelausfällen wird die Dynamik des Energieübertragungsnetzes zukünftig in großem Maße durch das veränderte Verhalten der unterlagerten Verteilnetze beeinflusst. Das erste Ziel dieser Arbeit ist demzufolge die Entwicklung eines kombinierten Übertragungs- und Verteilnetzmodells, welches es ermöglicht qualitative Einblicke in das Verhalten zukünftiger Energiesysteme zu gewinnen, und zu ermitteln, wie das veränderte Verhalten der Lasten sowie die Regelung der dezentralen Erzeugungsanlagen die Spannungsstabilität des Netzes verändern. Trotz der beschriebenen Systemveränderungen ist zukünftig der sichere und stabile Netzbetrieb auch bei Eintritt unvorhergesehener Situationen zu gewährleisten. Das zweite Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines verteilten agentenbasierten Nofallsystems für die zuverlässige Identifizierung drohender Spannungsinstabilität sowie die koordinierte Aktivierung geeigneter Gegenmaßnahmen.

Danksagung

Diese Doktorarbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie^3) der Technischen Universität Dortmund entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Christian Rehtanz für die hervorragende Unterstützung, die guten fachlichen Diskussionen sowie die ausgezeichneten wissenschaftlichen und persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten am ie^3, die mir u.a. die Teilnahme an zahlreichen internationalen Konferenzen sowie einen Forschungsaufenthalt im Ausland ermöglichten. Insbesondere bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen bei der Bearbeitung und Leitung von Forschungsprojekten und der Leitung der Arbeitsgruppe *Netzdynamik und Stabilität* am ie^3.

Further, I want to thank Professor Thierry Van Cutsem, who served as co-referee for this thesis and who offered me the opportunity to conduct a research exchange at the University of Liege. I am grateful for the fruitful discussions we had at conferences, during my time in Liege and while carrying out our joint research.

Des Weiteren gilt mein Dank meinen Kollegen am ie^3 und insbesondere der Arbeitsgruppe Netzdynamik und Stabilität für die sehr gute Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Anfertigung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die konstruktiven fachlichen Diskussionen, die einzigartige Reise nach Indien und die schöne gemeinsame Zeit in Dortmund. Zusätzlich danke ich den Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als studentische Hilfskräfte an den mir anvertrauten Forschungsprojekten mitgewirkt haben.

Für die Durchsicht des Manuskripts und die konstruktive Kritik möchte ich mich bei Dr.-Ing. Sven Christian Müller, Dr.-Ing. Ulf Häger und Zita Hagemann sowie den von mir betreuten Studenten Stefan Dalhues, Marvin Albrecht, Chris Kittl, Jannik Zwartscholten, Christoph Struck und Sebastian Liemann bedanken.

Ein besonderer Dank gilt darüber hinaus meinem Freund Sven und meinen Freunden für den persönlichen Rückhalt.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Oma und meinem Bruder Thomas für die immerwährende Unterstützung.

Dortmund, Juli 2018

Lena Robitzky

Contents

1 Introduction **1**
1.1 Research questions . . . 3
1.2 Structure and research design . . . 4
1.3 Context in recent research . . . 6

2 State of the art in research and practice **9**
2.1 Fundamentals on power system voltage stability . . . 9
2.1.1 Definition of power system voltage stability . . . 10
2.1.2 Mathematical equations for analysing voltage stability . . . 12
2.1.3 Time-domain simulation of power system voltage stability . . . 15
2.2 State of practice . . . 16
2.2.1 Overview of regulatory requirements . . . 18
2.2.2 Voltage stability assessment and emergency control systems . . . 20
2.2.3 Steady-state and dynamic network support by distributed energy resources . . . 22
2.3 State of research . . . 25
2.3.1 Modelling and control of active distribution networks . . . 26
2.3.2 Identification and control of voltage instability . . . 30
2.4 Summary and conclusion . . . 34

3 Modelling and simulation of a combined transmission-distribution test system for the assessment of long-term voltage stability **37**
3.1 The IEEE Nordic Test System . . . 38
3.2 Extending the Nordic Test System by an embedded HVDC link . . . 42
3.3 Extending the Nordic Test System by detailed models of distribution networks . . . 43
3.3.1 Modelling of voltage sensitive loads . . . 45
3.3.2 Modelling of induction motors . . . 50
3.3.3 Modelling of distributed energy resources . . . 53
3.4 Scenario setup . . . 55
3.5 Simulation results . . . 58
3.5.1 Impact of the distribution network topology . . . 59
3.5.2 Impact of modelling of voltage sensitive loads . . . 61
3.5.3 Impact of induction motors and their parametrization . . . 66

3.5.4 Impact of active power feed-in by distributed energy resources 68
3.5.5 Impact of HVDC voltage control 71
3.6 Summary and conclusion 72

4 Impact of the reactive power control strategy of distributed energy resources on voltage stability 75
4.1 Definition of flexibility for reactive power control 76
4.2 Overview of the considered reactive power control strategies 77
4.3 Modelling of the control framework of distributed energy resources . 81
4.4 Scenario setup and parametrization 85
4.5 Simulation results 86
4.5.1 Performance of reactive power control strategies in (quasi-) steady-state network conditions 87
4.5.2 Performance of Q(V)-characteristics under variation of the available flexibility 89
4.5.3 Performance of local voltage control under variation of the available flexibility 91
4.5.4 Performance of different voltage control strategies 94
4.5.5 Performance of local voltage control under variation of the controller speed 96
4.6 Summary and conclusion 99

5 Performance evaluation of emergency control actions against long-term voltage instability 103
5.1 Overview countermeasures for voltage instability 104
5.1.1 Acting on load tap changers of transformers 104
5.1.2 Active power increase on HVDC lines at transmission level . 105
5.1.3 Under-voltage load shedding 106
5.1.4 Active and reactive power support by distributed energy resources at distribution level 107
5.2 Methodology and setup for the evaluation of emergency controls . . 109
5.3 Simulation results 113
5.3.1 Acting on load tap changers of transformers 113
5.3.2 Increase the active power on the HVDC transmission link . . 118
5.3.3 Load curtailment and network support by distributed energy resources 122
5.4 Summary and conclusion 127

6 Agent-based identification and control of voltage instability 129
6.1 Overview of the developed multi-agent system 130
6.2 Identification and control of voltage instability 132
6.2.1 Recursive least square fitting of voltage measurements 133
6.2.2 Rules for raising a local warning 134
6.2.3 Rules for raising an alarm 135
6.2.4 Modification of the load shedding algorithm 136
6.3 Simulation environment and scenario setup 138
6.3.1 Co-simulation framework 138
6.3.2 Scenario setup 139
6.4 Simulation results 140
6.4.1 Assessment of voltages in the stable scenario 141
6.4.2 Assessment of voltages in the unstable scenario 141
6.4.3 Assessment of voltages under variation of the size of the observability area 143
6.4.4 Application of emergency controls under variation of the load shedding flexibility 144
6.4.5 Robustness to communication failures 146
6.4.6 Assessment of voltages and application of emergency controls under variation of the distribution network modelling 149
6.4.7 Assessment of voltages and application of emergency controls under consideration of reactive power control by distributed generating units 150
6.5 Summary and conclusion 153

7 Summary, conclusion and outlook 157
7.1 Summary 157
7.2 Conclusion 159
7.3 Outlook 162

Bibliography 165

List of acronyms 179

List of symbols and indices 181

Evidence of scientific activity 185

Curriculum vitae 189