

**Strategische Netzausbauplanung
in vermaschten Drehstromnetzen
unter besonderer Berücksichtigung
der Hochspannungsgleichstromübertragung**

Strategic Network Expansion Planning of Meshed HVAC Power Grids
in Particular Consideration of HVDC Transmission Systems

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

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Ing. Sven Rüberg
aus Hamm

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann
Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2017

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

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

Band 1

Sven Rüberg

**Strategische Netzausbauplanung in vermaschten
Drehstromnetzen unter besonderer Berücksichtigung
der Hochspannungsgleichstromübertragung**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5473-6

ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meinen Eltern gewidmet

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) der Technischen Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz, Leiter des obengenannten Instituts und Inhaber des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Dortmund, für die vielen Anregungen, stete Unterstützung und regelmäßige Motivation während der Entstehung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich ihm für die Schaffung einer Arbeitsatmosphäre, die durch viele wissenschaftliche Freiheiten geprägt war.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann, Direktor des Instituts für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik der Technischen Universität Ilmenau und Inhaber des dortigen Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung, danke ich für die Übernahme des Korreferats und dem damit gezeigten Interesse an meiner Arbeit.

Zudem danke ich recht herzlich meinen Kolleginnen und Kollegen am ie³ und in der Helmholtz-Energie-Allianz für die konstruktive Zusammenarbeit, die ein wichtiger Grundstein für die vorliegende Arbeit war. Namentlich erwähnen möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Weck vom Fachgebiet für Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (E5) der Technischen Universität Darmstadt, der die Programmierschnittstelle zwischen PowerFactory und MATLAB bereitstellte, sowie Frau Lena Robitzky, M. Sc., vom ie³ für die im Rahmen ihrer Masterarbeit geleistete Vorarbeit auf dem Gebiet der dynamischen Sicherheitsbewertung und der TikZ-Zeichnungen.

Bayreuth, im Juli 2017
Sven Rüberg

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die strategische Netzausbauplanung in vermaschten Drehstromnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Vorgestellt wird eine Methodik, anhand derer wirkleistungsbedingter Netzausbaubedarf in einem Energieversorgungssystem effizient mittels vorwiegender Verwendung der HGÜ behoben werden kann.

Aufbauend auf einer Sensitivitätsanalyse werden alle Knoten eines Netzes hinsichtlich ihrer wirk- und blindleistungsbezogenen Eignung zum Anschluss eines HGÜ-Umrichters untersucht. Hierbei werden auch Stabilitätsinformationen aus nicht-konvergenten Netznutzungs- und (N-1)-Fällen ausgewertet, die mittels Modalanalyse der Jacobi-Matrix der Leistungsflussgleichungen gewonnen werden. Die Berücksichtigung der an den Netzknoten maximal möglichen Leistungsänderungen führt abschließend zu einer vereinheitlichten, komplexwertigen Knotengüte, die die Klassifizierung der ermittelten HGÜ-Anschlussknoten in Gleich- und Wechselrichter-knoten ermöglicht.

Die vorgenannte Ableitung einer vereinheitlichten Knotengüte wird ergänzt durch eine Methodik zur Ermittlung der optimalen Wirk- und Blindleistungsbedriebspunkte der HGÜ-Umrichter mittels eines Optimierungsalgorithmus. Die entwickelte Zielfunktion stellt sicher, dass dem HGÜ-Netz nur soviel Wirkleistung entnommen wird, wie zur Behebung des Netzausbaubedarfes notwendig ist. Hierdurch wird eine Überdimensionierung der projektierten HGÜ-Netzebene vermieden. Zusätzlich wird eine heuristische Methode zur Vernetzung der HGÜ-Knoten und zur Optimierung des dynamischen Systemverhaltens präsentiert.

Die vorgeschlagene Methodik wird auf ein wissenschaftliches Benchmark-Netz angewendet. Die so erzielten Ergebnisse werden mittels stationärer und dynamischer Sicherheitsbewertung dem konventionellen Netzausbau gegenübergestellt. Es kann gezeigt werden, dass die vorgeschlagene Methodik geeignet ist, wirkleistungsbedingten Netzausbaubedarf in Energieversorgungssystemen effektiv zu beheben und zudem das dynamische Systemverhalten positiv zu beeinflussen.

Abstract

The present work deals with the strategic network expansion planning of meshed high-voltage alternating-current (HVAC) power grids in particular consideration of high-voltage direct-current (HVDC) transmission systems. The derived method is capable of resolving the need for grid expansion in an electrical power grid by primary use of HVDC transmission.

Starting point of the proposed method is a sensitivity analysis of all nodes in the network with regard to their active-power and reactive-power adequacy for the connection of an HVDC converter. In addition, stability information of non-convergent use cases and (N-1) contingencies, which is derived from a modal analysis of the Jacobian matrix of the load flow equations, is considered. The combination of these results with the maximum permissible power injections at the nodes leads to a unified and complex-valued node adequacy factor that helps to classify the identified HVDC connection nodes into rectifier and inverter nodes.

The aforementioned derivation of a unified node adequacy factor is complemented by a method for the determination of the optimal active-power and reactive-power setpoints of the HVDC converters through the use of an optimization algorithm. The developed objective function ensures that only as much active-power is withdrawn from the HVAC grid as necessary in order to resolve the need for grid extension. Thus, oversizing of the planned HVDC network is prevented. In addition, a heuristic method for the meshing of the HVDC nodes and for the optimization of the dynamic system response is presented.

The proposed method is applied to a scientific benchmark grid. The derived results are compared against a conventional grid expansion method by use of static and dynamic security assessment. It can be demonstrated that the proposed method is capable of effectively resolving the need for grid expansion and of improving the dynamic system response.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xix
Symbolverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in die Fragestellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
2 Grundlagen zur Netzausbauplanung von Drehstromnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Hochspannungsgleichstromübertragung	5
2.1 Analysemethoden der Linearen Algebra	5
2.1.1 Eigenwerte, Eigenvektoren und Modalmatrizen	5
2.1.2 Partizipationsfaktoren, Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit	8
2.2 Stationäre Netzanalyse	10
2.2.1 Netz- und Leistungsflussgleichungen	10
2.2.2 Jacobi-Matrix und Newton-Raphson-Verfahren	11
2.2.3 Wirkleistungstransfer- und Spannungs-/Blindleistungssensitivitäten	14
2.3 Stabilität von elektrischen Energieversorgungssystemen	16
2.3.1 Rotorwinkelstabilität	18
2.3.2 Spannungsstabilität	24
2.4 Zustandsbewertung von Energieversorgungssystemen	34
2.4.1 Beurteilung des dynamischen (Fehler-)Verhaltens	35
2.4.2 Beurteilung des stationären Systemzustandes	43
2.5 Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)	45
2.5.1 Netzgeführte HGÜ	49
2.5.2 Selbstgeführte HGÜ	52
2.5.3 Gegenüberstellung von netz- und selbstgeführter HGÜ	53
2.5.4 Modellbildung eines selbstgeführten HGÜ-Systems	55
2.6 Optimierung mittels SLSQP-Algorithmus	62

3	Netzausbauplanung von Drehstromnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Hochspannungsgleichstromübertragung	65
3.1	Identifikation geeigneter HGÜ-Anschlussknoten unter Berücksichtigung stationärer Kriterien	66
3.1.1	Erfassung der Ausgangssituation	66
3.1.2	Einfluss von Leistungsänderungen an einem Knoten . . .	70
3.1.3	Grenzen der an einem Knoten möglichen Leistungsänderungen	73
3.1.4	Berücksichtigung stabilitätsgefährdender Netzknoten und Übertragungsleitungen	76
3.1.5	Ableitung einer vereinheitlichten Knoteneignung	78
3.2	Wahl der stationären Betriebspunkte des HGÜ-Systems	80
3.2.1	Wahl des Wirkleistungsbetriebspunktes	81
3.2.2	Wahl des Blindleistungsbetriebspunktes	84
3.3	Umrichterauslegung an der Schnittstelle zwischen HDÜ- und HGÜ-Netz	85
3.4	Verbindung der identifizierten HGÜ-Anschlussknoten	86
3.5	Wahl der dynamischen Betriebsparameter des HGÜ-Systems . .	87
4	Fallstudie: das vermaschte New-England/New-York-Testnetz	93
4.1	Modellbildung	94
4.2	Erfassung der Ausgangssituation	95
4.2.1	Kennwerte der stationären Ausgangssituation	95
4.2.2	Kennwerte der dynamischen Ausgangssituation	97
4.3	Netzausbau unter Anwendung konventioneller Maßnahmen . . .	102
4.4	Netzausbau unter besonderer Berücksichtigung der HGÜ	104
4.4.1	Identifikation geeigneter HGÜ-Anschlussknoten	104
4.4.2	Wahl der Wirkleistungsbetriebspunkte	105
4.4.3	Ergänzende Einzelausbaumaßnahmen in konventioneller Drehstromtechnik	107
4.4.4	Wahl der Blindleistungsbetriebspunkte	108
4.4.5	Verbindung der identifizierten HGÜ-Anschlussknoten . . .	108
4.4.6	Wahl der dynamischen Reglerparameter	110
4.5	Vergleich der Netzausbaupfade	115
4.5.1	Vergleich der stat. Netzsituationen nach Netzausbau . . .	116
4.5.2	Vergleich der dyn. Netzsituationen nach Netzausbau . . .	118
5	Diskussion	123
5.1	Diskussion der Fallstudie	123
5.2	Diskussion der vorgeschlagenen Methodik	124
6	Zusammenfassung	127

7	Ausblick	129
A	Details zur Fallstudie des NETS/NYPS-Testnetzes	131
A.1	Detailliertes Ergebnis der Identifikation geeigneter HGÜ-Anschlussknoten	131
B	Kurzstudie: Kundurs 4-Maschinen-2-Zonen-Testnetz	133
B.1	Wahl der dynamischen Reglerparameter	134
B.2	Vergleich der dynamischen Netzsituationen nach Netzausbau .	139
B.3	Fazit	141
	Literatur	143
	Stichwortverzeichnis	151