

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 417

Dipl.-Ing. Florian Fein,
Bremen

Netzanbindung von Hochsee-Windparks durch kombinierte HGÜ mit selbst- und netz- geführten Stromrichtern im Parallelbetrieb



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Netzanbindung von Hochsee-Windparks durch kombinierte HGÜ mit selbst- und netzgeführten Stromrichtern im Parallelbetrieb

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades
„Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)“

genehmigte Dissertation.

Verfasser:

Dipl.-Ing. Florian Fein
geboren am 25.05.1982
in Münchberg

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Orlik
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Wenske

Eingereicht am: 28.10.2016
Tag des Promotionskolloquiums: 21.06.2017

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Florian Fein,
Bremen

Nr. 417

Netzanbindung von
Hochsee-Windparks
durch kombinierte HGÜ
mit selbst- und netz-
geführten Stromrichtern
im Parallelbetrieb



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Fein, Florian

Netzanbindung von Hochsee-Windparks durch kombinierte HGÜ mit selbst- und netzgeführten Stromrichtern im Parallelbetrieb

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 417. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

154 Seiten, 111 Bilder, 7 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341721-6, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Energieübertragung, Leistungselektronik, Offshore-Windpark, HGÜ, Gleichstrom, Netzanbindung, Netzfehler, Regelung, Umrichter, Konverter

HGÜ-Konverterstationen werden derzeit entweder in Thyristor- oder in IGBT-Technik ausgeführt, mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen. Mit dem Ziel die Effizienz der netzgeführten HGÜ mit der guten Regelbarkeit der selbstgeführten HGÜ zu vereinen, untersucht diese Arbeit erstmals die „kombinierte HGÜ“, bei der sich an beiden Enden der HGÜ-Leitung jeweils ein selbst- und ein netzgeführter Konverter in paralleler Anordnung befinden. Der Kern der Arbeit ist die Modellbildung der kombinierten HGÜ in der besonderen Anwendung zur Netzanbindung eines Hochsee-Windparks. Das entwickelte Simulationsmodell enthält sowohl das Taktverhalten der Leistungshalbleiter sowie die Echtzeit-Regelungen aller beteiligten Stromrichter. Durch Simulationen und durch Experimente an einem Labor-Prüfstand werden wertvolle Erkenntnisse zum Betriebs- und Netzfehlerverhalten der kombinierten HGÜ erlangt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Dissertation Universität Bremen

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341721-6

Vorwort

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) der Universität Bremen entstanden. Während meiner Zeit am IALB habe ich mehrere Forschungsprojekte im Bereich der Regelung von Windenergieanlagen sowie der HGÜ-Netzanbindung von Hochsee-Windparks bearbeitet. Der Kern dieser Dissertation fußt auf Forschungsergebnissen, die aus der DFG-Sachbeihilfe "Kombinierte HGÜ mit netz- und selbstgeführten Stromrichtern zur Netzanbindung von Offshore-Windparks" (OR 81/19-1) heraus entstanden sind.

Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik, der mich während der vergangenen Jahre stets unterstützte und mit seinen Ideen die Anfertigung dieser Dissertation erst möglich machte. Insbesondere danke ich ihm für das immer wieder ausgesprochene Vertrauen, was letztlich auch in der Übertragung von einigen anspruchsvolleren Aufgaben aus dem Universitätsalltag mündete. Die von Prof. Orlik zur Verfügung gestellten wissenschaftlichen Freiräume erlaubten es mir, eine selbstständige Arbeitsweise zu entwickeln.

Der Leiterin des Sekretariats, Frau Elke Krüger, danke ich herzlich für die Unterstützung bei allen möglichen Angelegenheiten im Zusammenhang mit der Universitätsverwaltung. Sie hatte den Überblick! Ebenfalls danke ich ihr für das regelmäßige Korrekturlesen von Anträgen und Veröffentlichungen. Und nicht zuletzt aufgrund des guten Arbeitsklimas und der guten Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen habe ich die Zeit am IALB in durchweg positiver Erinnerung.

Durch HiWi-Tätigkeiten sowie durch Anfertigung von Projekt-, Studien-, oder Abschlussarbeiten waren eine Vielzahl von fleißigen und motivierten Studenten am praktischen Aufbau und der Inbetriebnahme des Laborprototyps der kombinierten HGÜ beteiligt. Für ihre meist sehr guten Leistungen möchte ich meine besondere Anerkennung aussprechen.

Für das gründliche Korrekturlesen dieser Dissertation danke ich außerdem meiner Partnerin Daniela.

Bremen, Januar 2018.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung zur Hochspannungsgleichstromübertragung	3
2.1	Möglichkeiten zur Gleichstrom-Wechselstrom-Wandlung.....	4
2.1.1	Netzgeführte Thyristor-HGÜ mit Stromzwischenkreis.....	4
2.1.2	Selbstgeführte IGBT-HGÜ mit Spannungszwischenkreis	6
2.2	Leistungsfluss auf HGÜ-Strecken.....	7
2.3	Blindleistungs- und Oberschwingungskompensation.....	8
2.3.1	Passive Kompensation	8
2.3.2	Aktive Kompensation.....	9
2.4	Konzepte zur Netzanbindung von Hochsee-Windparks	11
2.4.1	Netzanbindung mit Hochspannungsdrehstrom (HDÜ)	12
2.4.2	Netzanbindung mit selbstgeführter HGÜ	13
2.4.3	Netzanbindung mit hybriden HGÜ-Systemen.....	13
2.4.4	Rein netzgeführte Anbindung mit weiterentwickelten Windenergieanlagen	15
2.4.5	Integration eines Windparks in netzgeführte HGÜ-Strecke	15
2.5	Netz- und Leitungsfehler.....	16
3	Stand der Forschung: Selbstgeführte HGÜ.....	19
3.1	Aufbau des Übertragungssystems	19
3.2	Umrichtertopologien.....	20
3.2.1	Zweipunktwechselrichter.....	20
3.2.2	Mehrpunktwechselrichter.....	21
3.2.3	Modulare Mehrpunkt-Konverter (MMK)	22
3.3	Verhalten bei Netzfehlern.....	23
3.4	Regelung selbstgeführter Konverterstationen	25
3.4.1	Stromregelung.....	25
3.4.2	Gleichspannungsregelung.....	30
3.4.3	Inselnetzregelung.....	32
3.5	Inselnetzregelung durch parallele Wechselrichter.....	34
4	Stand der Forschung: Netzgeführte HGÜ.....	39
4.1	Aufbau und Funktion netzgeführter HGÜ-Systeme	39
4.1.1	Stromrichtertopologien.....	39
4.1.2	Aufbau einer netzgeführten Übertragungsstrecke	41
4.1.3	Modellbildung des Übertragungssystems	42

4.2	Steuerung und Regelung netzgeführter HGÜ-Systeme	42
4.2.1	Zündwinkelsteuerung	42
4.2.2	Löschwinkelregelung	43
4.2.3	Gleichstromregelung.....	44
4.2.4	Leistungsflussregelung auf netzgeführten HGÜ-Strecken	46
4.3	Kurzschlussverhalten der netzgeführten HGÜ	48
5	Die kombinierte HGÜ	50
5.1	Topologie der kombinierten HGÜ	51
5.2	Betriebsmodi der kombinierten HGÜ	52
5.3	Kombinierte HGÜ zur Hochsee-Windparkanbindung.....	55
5.4	Auslegung einer kombinierten HGÜ zur Netzanbindung von Hochsee- Windparks.....	57
5.4.1	Auslegung der Konverterstationen	57
5.4.2	Auslegung der Stromrichtertransformatoren	58
5.4.3	Blindleistungskompensation im Windparknetz	60
5.4.4	Beteiligung der Windenergieanlagen an der Blindleistungsbereitstellung.....	61
5.5	Leitungsmodelle und Filterkomponenten.....	62
5.6	Auslegungsbeispiel einer kombinierten HGÜ	63
6	Regelung der kombinierten HGÜ im Parallelbetrieb	65
6.1	Regelung des selbstgeführten Konverters auf dem Festland.....	65
6.2	Regelung des selbstgeführten Konverters im Windpark.....	69
6.2.1	Modellbildung.....	69
6.2.2	Reglerauslegung	74
6.2.3	Simulation der Inselnetzregelung	79
6.3	Regelung der netzgeführten Konverter	82
6.4	Nachbildung der Windenergieanlagen	83
6.5	Hochlaufsimulation der kombinierten HGÜ.....	85
7	Experimenteller Parallelbetrieb von selbst- und netzgeführten Stromrichtern	89
7.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	89
7.1.1	Netzgeführte Konverter	90
7.1.2	Selbstgeführte Konverter	92
7.1.3	Äußere Beschaltung der Stromrichter	93
7.1.4	Sensorik	94
7.1.5	LC-Inselnetzfilter	95
7.2	Experimentelle Inbetriebnahme der kombinierten NGÜ	96
7.2.1	Inbetriebnahme der selbstgeführten NGÜ	96

7.2.2	Experimenteller Parallelbetrieb von selbst- und netzgeführten Konvertern auf der Windparkseite.....	101
7.2.3	Experimenteller Parallelbetrieb von selbst- und netzgeführten Konvertern auf der Festlandseite	103
7.3	Fazit der experimentellen Ergebnisse.....	106
8	Behandlung von Netzfehlern im Parallelbetrieb.....	107
8.1	Kurzschluss des Drehstromsystems auf dem Festland	107
8.1.1	Regelung der kombinierten HGÜ zum Durchfahren von Netzfehlern auf dem Festland.....	108
8.1.2	Simulationsergebnisse	114
8.2	Drehspannungseinbruch im Windparknetz.....	119
8.3	Interpretation der Ergebnisse der Netzfehlersimulation	123
9	Fazit und Ausblick	126
10	Anhang	128
10.1	Anhang A: Grundlagen der Regelung selbstgeführter Konverterstationen	128
10.1.1	Darstellung von symmetrischen Dreiphasensystemen als Raumzeiger.....	128
10.1.2	Synchronisierung mit der Netzspannung	131
10.1.3	Vorfaktor und Leistungsberechnung	131
10.1.4	Interpretation der Gleichgrößen im dq-Koordinatensystem	132
10.2	Anhang B: Herleitung der Gleichung (3-24)	133
10.3	Anhang C: Gleichspannung einer 24-pulsigen Drehstrombrückenschaltung.....	134
10.4	Anhang D: Übersetzungsverhältnisse der Stromrichtertransformatoren im Windpark.....	135
10.4.1	Transformator für den WS-NGK	135
10.4.2	Transformator für WS-SGK	135
11	Literaturverzeichnis	136

Abkürzungsverzeichnis

DS	Drehstrom
DSP	Digitaler Signalprozessor
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESR	Äquivalenter Serienwiderstand
FI	Fehlerstromschutzschalter
FS-NGK	Netzgeführter Konverter auf dem Festland
FS-SGK	Selbstgeführter Konverter auf dem Festland
Gl.	Gleichung
GS	Gleichstrom
HDÜ	Hochspannungsdrehstromübertragung
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HP	Hochpass
IALB	Institut für Elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
KOS	Koordinatensystem
MMK	Modularer Mehrpunkt-Konverter
NG-HGÜ	Netzgeführtes HGÜ-System
NGK	Netzgeführter Konverter mit Stromzwischenkreis
NGÜ	Niederspannungsgleichstromübertragung
PLL	Phasenregelschleife (Phase Locked Loop)
PWM	Pulsweitenmodulation
SG-HGÜ	Selbstgeführtes HGÜ-System
SGK	Selbstgeführter Konverter mit Spannungszwischenkreis
TP	Tiefpass
VPE	Vernetztes Polyethylen
WEA	Windenergieanlage
WS	Wechselstrom
WS-NGK	Netzgeführter Konverter im Windparknetz
WS-SGK	Selbstgeführter Konverter im Windparknetz
ZM	Zellenmodul

Formelzeichen

α_{NGK}	Zündwinkel (NGK)
γ	Löschwinkel (Kommutierung)
Θ	Stromflusswinkel
κ	Spezifische Leitfähigkeit
μ	Überlappungswinkel (Kommutierung)
μ_{wp}	Inselnetz-Transformationswinkel
ρ_n	Netz-Transformationswinkel
π	Kreiszahl
φ	Phasenverschiebung zw. Spannung und Strom
φ_0	Referenzwinkel
φ_R	Phasenreserve
φ_T	Phasendrehung eines Totzeitglieds
ω_0	Netz-Grundfrequenz
ω_d	Durchtrittsfrequenz
ω_N	Netzfrequenz
ω_{wp}	Frequenz des Windparknetzes
C_{dc}	Zwischenkreiskapazität eines SGK
C_f	WS-Filterkapazität eines SGK
C_L	Leitungs-Querkapazität
D_r	Ohmscher Gleichspannungsabfall am NGK
D_x	Induktiver Gleichspannungsabfall am NGK
E_C	In einer Kapazität gespeicherte Energie
f_{res}	Resonanzfrequenz
f_S	Schaltfrequenz
f_{wp}	Frequenz des Windparknetzes
$F_o(s)$	Übertragungsfunktion eines offenen Regelkreises im Frequenzbereich
$F_w(s)$	Führungsübertragungsfunktion im Frequenzbereich
$G(s)$	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich (allgemein)
i_{dc}	Gleichstrom (allgemein)
i_{KS}	Kurzschlussstrom
i_N	Gesamtstrom am Netzanschlusspunkt
i_L	Laststrom

$i_{L,dc}$	Strom auf der GS-Leitung
$i_{NGK,ac}$	Wechselstrom an den DS-Klemmen eines NGK
$i_{NGK,dc}$	Gleichstrom an den GS-Klemmen eines NGK
$i_{SGK,ac}$	Wechselstrom an den Drehstromsklemmen eines SGK
$i_{SGK,dc}$	Gleichstrom an den GS-Klemmen eines SGK
i_{wp}	Vom SGK in die Windparknetz-Sammelschiene eingespeister Strom
k	Vorfaktor der Raumzeigertransformation
k_Q	Verhältnis zwischen Blindleistung und Wirkleistung an WEA
$k_{Tr,WS-NGK}$	Bezogene Gleichspannungsreserve am WS-NGK
$k_{Tr,WS-SGK}$	Bezogene Gleichspannungsreserve am WS-SGK
K_I	Kreisverstärkung eines Integrators
K_{PI}	Kreisverstärkung eines PI-Reglers
K_S	Streckenverstärkung
L_c	Induktivität der Kommutierungsdrossel eines NGK
L_{dc}	Induktivität der Zwischenkreisdrossel eines NGK
L_f	Induktivität der WS-Filterdrossel eines SGK
L_L	Leitungs-Längsinduktivität
p	Pulszahl
P	Wirkleistung (allgemein)
$P_{HGÜ,dc}$	Wirkleistung auf der HGÜ-Leitung
P_N	Wirkleistung am Netzanschlusspunkt
P_{NGK}	Über einen NGK fließende Wirkleistung
P_{SGK}	Über einen SGK fließende Wirkleistung
P_{WEA}	Von den WEA abgegebene Wirkleistung
Q	Blindleistung (allgemein)
Q_f	Von einer Filterkapazität aufgenommene Blindleistung
Q_{NGK}	Von einem NGK aufgenommene Blindleistung
Q_{SGK}	Von einem SGK ins Drehstromnetz gespeiste Blindleistung
Q_{WEA}	Von den WEA abgegebene Blindleistung
R_B	Bremswiderstand
R_{dc}	Widerstand der Zwischenkreisdrossel eines NGK
R_f	Widerstand der WS-Filterdrossel eines SGK
R_c	Widerstand der Kommutierungsdrossel eines NGK
R_L	Leitungswiderstand

R_V	Last-/Verbraucherwiderstand
R_v	Vorladewiderstand
S	Scheinleistung (allgemein)
T_f	Filterzeitkonstante
T_i	Ersatzzeitkonstante eines inneren Stromregelkreis
T_n	Nachstellzeit eines PI-Reglers
T_S	Schaltperiodendauer
T_{Schon}	Schonzeit (Thyristor)
T_{tot}	Totzeit
U_{ac}	Wechselspannung (allgemein)
U_{dc}	Gleichspannung (allgemein)
U_k	bezogener Kurzschlussspannungsabfall
U_N	Spannung am Netzanschlusspunkt
$U_{L,dc}$	Spannung auf der GS-Leitung
$U_{FS-NGK,ac}$	Wechselspannung am festlandseitigen NGK
$U_{FS-NGK,dc}$	Gleichspannung am festlandseitigen NGK
$U_{FS-SGK,ac}$	Wechselspannung am festlandseitigen SGK
$U_{FS-SGK,dc}$	Gleichspannung am festlandseitigen SGK
$U_{WS-NGK,ac}$	Wechselspannung am windparkseitigen NGK
$U_{WS-NGK,dc}$	Gleichspannung am windparkseitigen NGK
$U_{WS-SGK,ac}$	Wechselspannung am windparkseitigen SGK
$U_{WS-SGK,dc}$	Gleichspannung am windparkseitigen SGK
U_{vak}	Ventilspannung (Anode-Kathode)
U_{vd}	Gleichspannung einer netzgeführten Brückenschaltung
U_{vdi}	Ideelle Gleichspannung einer netzgeführten Brückenschaltung
U_{vdk}	Gleichspannung an der Kippgrenze
U_W	An einem SGK anliegende Wechselspannung (kurz)
U_{wp}	Spannung im Windparknetz

Kurzfassung

Sowohl die netzgeführte Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) als auch die selbstgeführte HGÜ waren bereits Gegenstand einer Vielzahl von wissenschaftlichen Fachartikeln und sind auch schon in der Praxis erprobt. Mit dem Ziel der Vereinigung der Vorteile der beiden Systeme untersucht nun die vorliegende Dissertation erstmals eine neuartige kombinierte HGÜ-Topologie zur Netzanbindung von Hochsee-Windparks, bei der sich an beiden Enden der Gleichspannungsleitung jeweils ein selbstgeführter und ein netzgeführter HGÜ-Stromrichter im Parallelbetrieb befindet.

Für ein solches kombiniertes HGÜ-System wird ein Betriebs- und Regelungskonzept vorgestellt, das zum einen die besonderen Anforderungen zur Netzanbindung eines Hochsee-Windparks berücksichtigt und zum anderen in der Lage ist, den Parallelbetrieb von netz- und selbstgeführten Stromrichtern zu beherrschen. Die Realisierung dieses Parallelbetriebs ist die wesentliche wissenschaftliche Herausforderung für die praktische Umsetzung der kombinierten HGÜ. Gemäß der grundsätzlichen Idee der kombinierten HGÜ ist zur Versorgung des Windparks während der Installation, bei Flaute sowie bei niedrigen Windstärken, wenn die Übertragungsleistung unterhalb der Mindestleistung der netzgeführten HGÜ liegt, nur die selbstgeführte HGÜ im Eingriff. Bei mittleren und hohen Windstärken überträgt hauptsächlich die netzgeführte HGÜ die von den Windenergieanlagen ins Windparknetz eingespeiste Wirkleistung, während die selbstgeführten Konverter zur Blindleistungs- und Oberschwingungskompensation beitragen.

Zur Durchführung von Lastfluss- und Kurzschlussimulationen wurde ein detailliertes Modell der kombinierten HGÜ in MATLAB/Simulink und der PLECS-Toolbox implementiert. Simulationsergebnisse zeigen, dass der Parallelbetrieb unter Vereinigung der Effizienz der netzgeführten HGÜ mit der guten Regelbarkeit der selbstgeführten HGÜ grundsätzlich gut möglich ist. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Unzulänglichkeiten der netzgeführten Konverter im Bereich von drehspannungsseitigen Netzkurzschlüssen nicht ohne weiteres durch die parallelen selbstgeführten Konverter eliminiert werden können. Diese Arbeit zeigt, dass zum erfolgreichen Durchfahren von Netzkurzschlüssen mit der kombinierten HGÜ, neben der Errichtung der parallelen Konvertersysteme, zusätzlicher Aufwand betrieben werden muss.

Zur experimentellen Verifikation des angedachten kombinierten HGÜ-Betriebs wurde ein Laborprüfstand auf Niederspannungsebene entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen.

Abstract

Both line- and self-commutated high-voltage direct-current (HVDC) transmission systems are well known in scientific literature and are also successfully proven in practical operation. Aiming on the unification of the technology-specific advantages of both systems for the grid integration of offshore wind farms this dissertation examines a novel combined HVDC system. In this combined HVDC one line-commutated and one self-commutated converter are operated in parallel at the grid-side terminal and at the wind farm-side terminal of a common HVDC cable.

An operation- and control concept for the combined HVDC is presented that, on the one hand, considers the specific requirements for an offshore wind farm uplink and, on the other hand, is capable to manage the parallel operation of self- and line-commutated converters. The stable parallel operation is one of the main scientific challenges for the practical realization of the combined HVDC system. The basic idea of the combined HVDC is described as follows: For auxiliary power supply of the wind farm and also during low wind speed conditions when the net power transmission is below the minimum power of the line-commutated system only the well controllable self-commutated HVDC is in operation. At medium or high wind power generation the power transmission is mainly performed with the efficient and robust line-commutated converters while the self-commutated converters compensate for reactive power and harmonics.

For validation of the proposed system a transient model of the combined HVDC system has been implemented in Matlab/Simulink with PLECS-toolbox. Simulations at load case show that the parallel operation of the well controllable VSC-HVDC and the efficient and robust LCC-HVDC should basically be possible. But it also got clear that the difficulties of line-commutated converters to withstand grid-side short circuits cannot just be mitigated by a parallel self-commutated converter. For a successful fault-ride through with the combined HVDC system, additional investments and engineering tasks will come on top to the installation of the two individual HVDC systems.

For the experimental verification of the parallel operation a scaled low-voltage laboratory test set-up of the desired combined HVDC system has been established und successfully brought into service.

