

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  
Baulemente 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](http://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](http://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

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Stand der Forschung zur Hochspannungsgleichstromübertragung .....</b>       | <b>3</b>  |
| 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<br>Windenergieanlagen ..... | 15        |
| 2.4.5    | Integration eines Windparks in netzgeführte HGÜ-Strecke .....                  | 15        |
| 2.5      | Netz- und Leitungsfehler.....  | 16        |
| <b>3</b> | <b>Stand der Forschung: Selbstgeführte HGÜ.....</b>                            | <b>19</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Stand der Forschung: Netzgeführte HGÜ.....</b>                              | <b>39</b> |
| 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        |
| <b>5</b> | <b>Die kombinierte HGÜ .....</b>   | <b>50</b> |
| 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-<br>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<br>Blindleistungsbereitstellung.....           | 61        |
| 5.5      | Leitungsmodelle und Filterkomponenten.....   | 62        |
| 5.6      | Auslegungsbeispiel einer kombinierten HGÜ .....  | 63        |
| <b>6</b> | <b>Regelung der kombinierten HGÜ im Parallelbetrieb .....</b>                            | <b>65</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Experimenteller Parallelbetrieb von selbst- und netzgeführten Stromrichtern .....</b> | <b>89</b> |
| 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        |
| <b>8</b>  | <b>Behandlung von Netzfehlern im Parallelbetrieb.....</b>  | <b>107</b> |
| 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        |
| <b>9</b>  | <b>Fazit und Ausblick .....</b>  | <b>126</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang .....</b>  | <b>128</b> |
| 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        |
| <b>11</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>136</b> |

---

## 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

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\alpha_{\text{NGK}}$ | Zündwinkel (NGK)   |
| $\gamma$              | Löschwinkel (Kommutierung)   |
| $\Theta$              | Stromflusswinkel   |
| $\kappa$              | Spezifische Leitfähigkeit  |
| $\mu$                 | Überlappungswinkel (Kommutierung)                                  |
| $\mu_{\text{WP}}$     | Inselnetz-Transformationswinkel                                    |
| $\rho_n$              | Netz-Transformationswinkel   |
| $\pi$                 | Kreiszahl  |
| $\varphi$             | Phasenverschiebung zw. Spannung und Strom                          |
| $\varphi_0$           | Referenzwinkel   |
| $\varphi_R$           | Phasenreserve  |
| $\varphi_T$           | Phasendrehung eines Totzeitglieds                                  |
| $\omega_0$            | Netz-Grundfrequenz   |
| $\omega_d$            | Durchtrittsfrequenz  |
| $\omega_N$            | Netzfrequenz   |
| $\omega_{\text{WP}}$  | Frequenz des Windparknetzes  |
| $C_{\text{dc}}$       | 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                            |
| $f_{\text{res}}$      | Resonanzfrequenz   |
| $f_S$                 | Schaltfrequenz   |
| $f_{\text{WP}}$       | Frequenz des Windparknetzes  |
| $F_o(s)$              | Übertragungsfunktion eines offenen Regelkreises im Frequenzbereich |
| $F_w(s)$              | Führungsübertragungsfunktion im Frequenzbereich                    |
| $G(s)$                | Übertragungsfunktion im Frequenzbereich (allgemein)                |
| $i_{\text{dc}}$       | Gleichstrom (allgemein)  |
| $i_{\text{KS}}$       | Kurzschlussstrom   |
| $i_N$                 | Gesamtstrom am Netzanschlusspunkt                                  |
| $i_L$                 | Laststrom  |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\dot{i}_{L,dc}$    | Strom auf der GS-Leitung                                      |
| $\dot{i}_{NGK,ac}$  | Wechselstrom an den DS-Klemmen eines NGK                      |
| $\dot{i}_{NGK,dc}$  | Gleichstrom an den GS-Klemmen eines NGK                       |
| $\dot{i}_{SGK,ac}$  | Wechselstrom an den Drehstromklemmen eines SGK                |
| $\dot{i}_{SGK,dc}$  | 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)                                      |
| $P_{HG\ddot{U},dc}$ | 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   |
| $T_{\text{Schon}}$ | Schonzeit (Thyristor)                                       |
| $T_{\text{tot}}$   | 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.

