

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

**Regelung von Offshore-Windparks mit Dioden-
Gleichrichter-HGÜ in einem synthetischen Referenzsystem**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von
M.Sc. Cord Prignitz

Rostock, 2020

Kurzfassung

Offshore-Windparks mit HGÜ-Anbindung stellen zukünftig einen signifikanten Anteil am regenerativen Energiemix der Bundesrepublik Deutschland dar. Der Einsatz von Dioden-Gleichrichtern anstelle aktuell verwendeter Modular-Multilevel-Converter (MMC), bietet einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Verkleinerung der Offshore-Inverter Plattform und damit verbundener Senkung der Projektkosten.

Da die DC-Spannung der HGÜ durch den Onshore-seitigen MMC konstant gehalten wird, definiert der leitende Dioden-Gleichrichter lediglich die Amplitude der AC-Spannung des Offshore-Netzes. Konventionelle Stromregelverfahren von Windenergieanlagen können dabei nicht angewendet werden, da sie sich stets auf die Phasenlage der Netzspannung synchronisieren und Dioden-Gleichrichter dem Spannungssystem des Offshore-Netzes weder Frequenz noch Phasenlage vorgeben. Die Windenergieanlagen müssen somit Blindleistung und Frequenz im Offshore-AC-Netz selbst regeln und gleichzeitig die im Wind verfügbare Leistung in die Dioden-Gleichrichter-HGÜ einspeisen.

Die Arbeit beschreibt ein Regelungsverfahren für Windenergieanlagen, das die konventionelle Synchronisation auf die lokale Netzspannung durch die Vorgabe eines externen Synchronisationssignals ersetzt. Alle netzseitigen Umrichter des Offshore-Inselnetzes werden somit stromgeregelt in einem gemeinsamen synthetischen Referenzsystem betrieben, dem sogenannten FixReF-System. Daraus resultiert eine dem Synchronisationssignal entsprechende feste Netzfrequenz, was einem Stabilitätsvorteil gegenüber anderen Verfahren mit variabler Frequenz in Inselnetzen mit dominierendem Anteil an Leistungselektronik entspricht. Die Lage der lokal gemessenen Ströme und Spannungen im FixReF-System wird von Windenergieanlagen genutzt, um die Blindleistung zur Kompensation des Offshore-Netzes untereinander intelligent aufzuteilen.

Die Arbeit erklärt die Implementierung der FixRef-Regelung, sowohl in netzseitigen Umrichtern von Windenergieanlagen mit Vollumrichtern, als auch in maschinenseitigen Umrichtern doppeltgespeister Asynchronmaschinen (DFIG). Elektromechanische Windparksimulationen im Zeitbereich zeigen den Betrieb FixReF-geregelter Windenergieanlagen an einer Dioden-Gleichrichter-HGÜ und erläutern die verschiedenen Möglichkeiten der Blindleistungsverteilung bei der Anwendung des Verfahrens. Zudem werden Simulationsergebnisse eines optimierten Verhaltens der Anlagen bei Offshore-Netzfehlern und einer Strategie zur Eigenbedarfsversorgung bei Windstille auf Basis der FixReF-Regelung präsentiert. Die Untersuchung eines Notbetriebs bietet zusätzlich einen Lösungsansatz für den Verlust des Synchronisationssignals einzelner Windenergieanlagen im Park.

Abschließend erfolgt eine Implementierung und Validierung des FixReF-Verfahrens auf einem Laborprüfstand, der Modellumrichter von Windenergieanlagen über ein 25 V Labornetz mit einer Dioden-Gleichrichter-HGÜ verbindet.

Abstract

Offshore wind farms with HVDC connections will represent a significant part of the future regenerative energy mix of the Federal Republic of Germany. The application of diode rectifiers instead of the currently used Modular Multilevel Converter (MMC) offers a promising solution for reducing the size of the offshore inverter platform and associated reduction in project costs.

Since the DC-link voltage of the HVDC is kept constant by the onshore MMC, the conducting diode rectifier defines only the magnitude of the AC-voltage of the offshore network. Conventional current control methods for wind turbines cannot be used, since they always synchronize with the phase position of the grid voltage and diode rectifiers will not specify the frequency or phase position of the voltage system in the offshore grid. The wind turbines must therefore regulate reactive power and frequency in the offshore AC network themselves and at the same time feed the active power available in the wind into the diode rectifier HVDC.

The thesis describes a control procedure for wind turbines, which replaces the conventional synchronization to the local grid voltage by introducing an external synchronization signal. All grid-side converters of the offshore island grid are thus operated in a current-controlled manner in a common synthetic reference system, the so-called FixReF system. This results in a grid frequency which is fixed in accordance with the synchronization signal, which leads to a stability advantage compared to conventional methods relying on variable frequency in island grids with a dominant amount of power electronics. The position of locally measured currents and voltages in the FixReF-system are used by wind turbines for an intelligent distribution of reactive power demand for the offshore network.

The work explains the implementation of the FixRef control, in line-side inverters of wind turbines with full size converter application, as well as in machine-side inverters of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). Electro mechanical wind farm simulations in the time domain show the operation of FixReF-controlled wind turbines on a diode rectifier HVDC-link and investigate the different possibilities of reactive power distribution when using this method. In addition, simulation results of an optimized behavior of the plant during offshore grid faults and a strategy for auxiliary power supply in down wind conditions are presented, based on FixReF-control. An emergency operation offers a solution for loss of the synchronization signals of individual wind turbines within the windfarm.

The implementation and validation of the FixReF-control in a laboratory test bench that interconnects downscaled wind turbine converters to a diode-rectifier HVDC system via a 25 V laboratory network.