

**Contributions to simulation and control of converter-dominated grid systems
with focus on MMC-based HVDC systems**

Leistungselektronik ist eine Technologie, die in vielen Produkten und Anwendungen integriert ist. Aktuell steigt die Anzahl an Umrichter-dominierten Netzsystemen stark an. Exemplarisch seien Offshore-Windparks mit DC-Übertragungssystem angeführt. Für diese neuen Netzsystem-Klassen können zwei Kernherausforderungen identifiziert werden: Zum einen steigt das Risiko für Instabilitäten bei den Netzsystemen aufgrund der vielen geregelten leistungselektronischen Umrichter, die im Verhältnis zu den konventionellen Netzteilnehmern immer dominierender werden. Die auftretenden Instabilitäten entstehen hierbei aufgrund der Interaktion der geregelten Umrichter. Der grundsätzliche Effekt ist bereits aus anderen Anwendungsgebieten bekannt (Bahn- und Schiffsnetze). Zum anderen setzt sich gerade bei HGÜ-Anwendungen mit weitergehenden systemischen Anforderungen (z.B. Anforderungen an Schwarzstart-Fähigkeit und hohe Netzqualität) der modulare Mehrpunktumrichter (MMC) durch. Bei dieser Umrichter-Topologie werden kleine Standard-Umrichter-Einheiten verwendet, um zwei Netzsysteme mit beliebiger Spannungsamplitude und Netzführungsgröße miteinander zu verbinden. Neben den allgemeinen Vorteilen selbstgeführter Umrichter-Technik sei vor allem auf die beim MMC resultierenden quasi-sinusförmigen Spannungen und Ströme hingewiesen.

Um die Vorteile und Möglichkeiten der MMC-Topologie und der Umrichter-dominierten Netzsysteme nutzen zu können, müssen mehrere Herausforderungen gelöst werden. Unter anderem müssen eine robuste und dynamische Regelung zur Realisierung einer leistungsfähigen Störgrößen-Unterdrückung, eine intelligente Pulsmustererzeugung zur Realisierung der Sollwerte bei gleichzeitiger Minimierung der notwendigen Signalleitungen sowie Methoden zur hochqualitativen Simulation von Systemen mit hoher Komplexität entwickelt werden. Im Rahmen dieser Doktorarbeit werden Vorgehensmodelle und Maximen für die definierten Herausforderungen entwickelt und dargestellt.

Für die eigentliche MMC-Topologie werden die grundsätzlichen Eigenschaften der Topologie sowie Betriebsführungsprinzipien beschrieben. Für ein MMC-basiertes Netzverbindingssystem werden eine Regelungsstruktur sowie deren Leistungsfähigkeit anhand von Simulationsergebnissen dargestellt. Ein neuartiges dezentrales Verfahren zur Pulsmustererzeugung wird eingeführt. Dieses erlaubt eine hohe stationäre Signalqualität und Schaltfrequenz-Konstanz bei gleichzeitiger Minimierung des Kommunikationsaufwands. Strategien zur Statik-basierten Symmetrierung der Zweigenergien sowie zur Kompensation nicht-idealer Stromrichter-Eigenschaften werden dezentral implementiert. Auf diese Weise kann beim Entwurf von Anlagen eine hohe Verfügbarkeit realisiert werden, was für Hochspannungs-Hochleistungs-Anwendungen essentiell ist.

Im Anbetracht des Bedarfs an hochqualitativen Simulationsuntersuchungen, bei denen die komplexen Topologien Umrichter-dominiertes Netzsysteme berücksichtigt werden, wird eine ganzheitliche Analyse der Simulationsanforderungen vorgenommen. Hierbei werden vor allem die hybride Struktur sowie die notwendige Behandlung der zeitvarianten und nichtlinearen Systemeigenschaften geregelter Stromrichter berücksichtigt. Abstrakt gesehen wird eine Spezifikation für die hochqualitative Simulation Umrichter-dominiertes Netzsysteme erarbeitet.

Die präsentierten Betriebsführungs- und Regelungsstrategien werden in einem realitätsnahen Simulationssetup für ein Offshore-Netzsystem analysiert. Die Konfiguration beinhaltet 160 geregelte Windkraftanlagen sowie ein HGÜ-basiertes Netzverbindingssystem. Neben der Analyse des Gesamtverhaltens liegt ein Schwerpunkt auf dem detaillierten Vergleich der thermischen Ventilbelastungen einer Transformator-basierten und einer Transformator-losen MMC-Realisierung. Der herausfordernde AC- und DC-seitige Parallelbetrieb von HGÜ-Systemen ohne Master-Slave-Konzept wird unter dynamischen Bedingungen dargestellt.