

# STRATEGIEN FÜR DIE FEHLERORTUNG, KLÄRUNG UND FREISCHALTUNG IN MULTI-TERMINAL-DC-SYSTEMEN

**Victor SCHNELL**, victor.schnell@tennet.eu, **Marten PROBST\***,  
marten.probst@tennet.eu, **Dr. Robert DIMITROVSKI**,  
robert.dimitrovski@tennet.eu, **Dr. Cora PETINO-WAGNER**, cora.petino-  
wagner@tennet.eu, **Dr. Wilhelm WINTER**, wilhelm.winter@tennet.eu,  
**Dr. Christian SCHULZ**, christian.schulz@tennet.eu,

TenneT TSO GmbH, Energy System Planning, Bernecker Str. 70, 95448 Bayreuth

**Prof. Dr. Martin KÖNEMUND**, m.koenemund@ostfalia.de,

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften – Hochschule  
Braunschweig/Wolfenbüttel, Salzdahlumer Straße 46/48, 38302 Wolfenbüttel

**Marc René LOTZ**, m.lotz@tu-braunschweig.de,

**Prof. Dr. Michael KURRAT**, m.kurrat@tu-braunschweig.de,

TU Braunschweig, elenia, Schleinitzstraße 23, 38106 Braunschweig

## Motivation

Die zunehmende Realisierung von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen (HGÜ) sowie die Planung von Multi-Terminal-DC-Systemen (MTDC) erhöhen den Bedarf an wirksamen Techniken zur Fehlerdetektion, -klassifikation, und -freischaltung um die Sicherheit und Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten. Gleichstromfehler können schwerwiegende Probleme verursachen, die die Versorgungssicherheit gefährden können. Daher ist es wichtig, effiziente und zuverlässige Strategien zur Fehlerbehandlung zu entwickeln und umzusetzen, um die Auswirkungen von Fehlern in Gleichstromnetzen zu minimieren.

## Multi-Terminal-Hubs

Die bisherige Topologie zum Anschluss von Offshore-Windparks mittel HGÜ stellt die Punkt-zu-Punkt-Verbindung dar, für die jeweils zwei Konverterstationen benötigt werden. In Anbetracht der hohen Kosten für eine Konverterstation und dem absehbaren Mehrbedarf an Offshore-Verbindungen, plant die TenneT TSO GmbH derzeit mehrere MTDC-Systeme, in dem mehrere Punkt-zu-Punkt-Verbindungen in einer DC-Schaltanlage (DC HUB) zusammengeführt werden [1]. Pro DC-Hub können hiermit zwei Konverter eingespart werden.

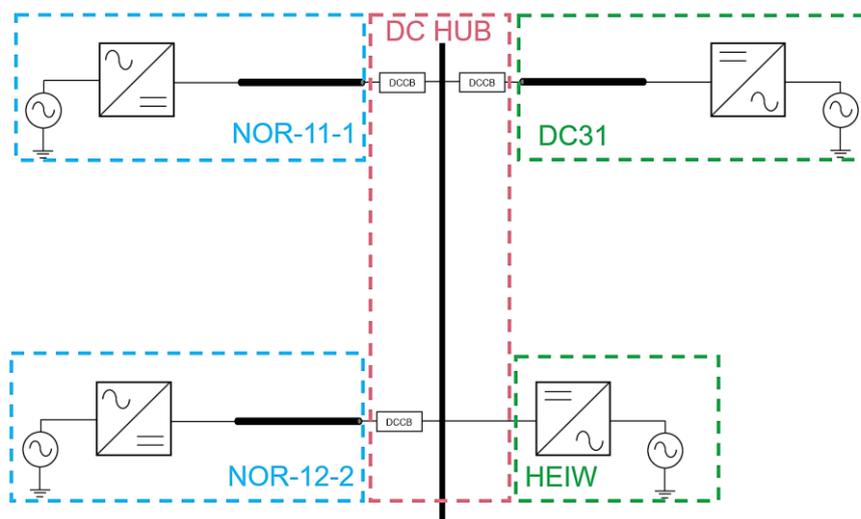


Abbildung 1: Topologie des DC-Hubs Heide West.

Diese neue Topologie eines vermaschten Netzes führt jedoch zu weiteren Herausforderungen hinsichtlich gesteigerter Anforderungen an Schutzeinrichtungen für die Detektion, Klärung und Freischaltung von Fehlern, innerhalb einer Millisekunde [2]. Vor diesem Hintergrund wurden aktuelle Fehlerdetektionsalgorithmen für Fehler auf DC-Kabeln mit verschiedenen Netzkomponenten mit der Simulationssoftware PSCAD untersucht. Als Modellierungsgrundlage für das in PSCAD aufgebaute Netzmodell dient ein MTDC-Benchmarksystem, welches von der CIGRE B4.57 Arbeitsgruppe entwickelt wurde und öffentlich verfügbar ist [3,4].

### **Fehlerdetektionsalgorithmen**

Anhand dieses Modells wurden ein Überstromschutz, gradientenbasierte Verfahren (ROCOV und ROCOC) und ein Fehlerdetektionsalgorithmus, der über die Detektion von Wanderwellen (Travelling Wave, siehe [5]) die Fehleridentifizierung und -klassifikation vornimmt, untersucht. Um die Fehlerdetektionsalgorithmen umfangreich testen zu können, wurden unterschiedliche interne DC-Fehler, die auf den drei DC-Kabeln auftreten können, implementiert. Die Fehler unterscheiden sich hinsichtlich ihres Fehlertyps, Fehlerortes und des Fehlerwiderstands  $R_f$ . Gezeigt wird die Zuverlässigkeit der Fehlerdetektion anhand verschiedener Fehlerdetektionsalgorithmen.

### **Fehlerbehandlung**

In der HGÜ besteht, aufgrund der niedrigen Impedanz und der damit verbunden geringen Dämpfung von DC-Netzen, die Problematik der sich, im Vergleich zu AC-Netzen, deutlich rapideren Fehlerausbreitung mit hohen Stromgradienten [6]. In den bisherigen Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindungen wurde bei der Anwendung von Halbbrücken-MMC der Fehlerschutz über das Auslösen der AC-Leistungsschalter ohne spezifische Konfigurationsanforderungen realisiert. Dieses Konzept unterbindet zwar nach dem Blockieren des Konverters die Einspeisung unkontrollierter Fehlerströme aus dem AC-Netz, welche durch die Freilaufdioden der Konverter-Submodule hervorgerufen werden, jedoch wird damit auch eine Trennung der HGÜ vom Übertragungsnetz mit vollständigem Leistungstransportverlust herbeigeführt [7]. In MTDC-Systemen besteht die Anforderung, den vom Fehlerfall betroffenen Teilabschnitt zu isolieren, um den Zusammenbruch des gesamten MTDC-Systems zu verhindern. Hieraus lassen sich folgende Anforderungen an die Fehlerbehandlung ableiten: Empfindlichkeit, Selektivität, Zuverlässigkeit und Robustheit des Fehlerschutzsystems [8], welche ebenfalls in PSCAD anhand der Topologie des Heide-Hubs-West untersucht wurden.

### **Ergebnisse und Ausblick**

Es wurde ein detailliertes Simulationsmodell zur qualitativen Analyse von elektromagnetischen Vorgängen in Folge von Fehlerereignissen in der Simulationsumgebung PSCAD aufgebaut welches die Bipol-Topologie des DC-Hubs Heide-West mit MRT Ausführung repräsentiert. Zunächst wurden für die Identifikation kritischer Fehlerszenarien zum einen unterschiedliche Fehlerarten und zum anderen unterschiedliche Stärken des Netzanschlusspunkts in Heide West untersucht, um den Fehlerschutz auf den maximalen auftretenden Fehlerstrom auszulegen und den Einfluss der AC-Netzparameter auf den DC-Fehler zu ermitteln. Des Weiteren wurde durch Variation des Fehlerortes die Auswirkungen auf die Fehlerklärung beleuchtet. Mit der Analyse gängiger Schutzalgorithmen konnte als nächster Schritt aufgezeigt werden, dass das Travelling-Wave-Verfahren für die untersuchten Szenarien geringe Fehlerquoten hinsichtlich Selektivität und Empfindlichkeit liefert. Das untersuchte ROCOV- und ROCOC-Verfahren ist gegenüber dem Travelling-Wave-Verfahren schneller und weist eine höhere Empfindlichkeit auf, jedoch auf Kosten einer verringerten Selektivität. Die Detektionsgeschwindigkeiten beider Verfahren haben sich robust gegenüber  $R_f$  erwiesen, der größte Einfluss auf diese stellt die Entfernung zum Fehlerort dar. Die korrekte Parametrierung ist für ein gute Performance beider Verfahren essenziell, hier besteht für zukünftige Untersuchungen ein Optimierungspotential. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit einer passenden Auslegung der Schutzkomponenten und der richtigen Auswahl der Schutzalgorithmen die Anwendung einer teilselktiven Fehlerklärungsstrategie in Konfigurationen, wie sie derzeit geplant werden, generell möglich ist. Jedoch müssen in zukünftigen Simulationen die richtige Auslegung der Konverterregelung, umfangreiche Betrachtung der Interaktionen zwischen den DC- und AC-Netzen, Variationen des Erdungskonzeptes, sowie mögliche Erweiterungsoptionen des DC-Hubs thematisiert werden.

## Referenzen

- [1] TenneT TSO GmbH, Hrsg. Neues Energiewende-Projekt an der Westküste: TenneT und 50Hertz planen innovatives Stromdrehkreuz in Heide. 2022. URL: <https://www.tennet.eu/de/blog/neues-energiewende-projekt-derwestkueste-tennet-und-50hertz-planen-innovatives-stromdrehkreuz>
- [2] Chaudhuri, N. R. et al. Multi-Terminal direct-current grids: Modeling, analysis, and control. Hoboken, New Jersey: IEEE Press Wiley, 2014. ISBN: 978-1-118-72910-6
- [3] Manitoba Hydro International Ltd., Hrsg. CIGRE B4-57 working group developed models. URL: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/57>
- [4] Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ) (2014): Guide for the development of models for HVDC converters in a HVDC grid: Working Group B4.57. Paris: CIGRÉ, 2014. ISBN: 978-2-85873-305-7.
- [5] L. Liu, A. Lekić and M. Popov, "Robust Traveling Wave-Based Protection Scheme for Multiterminal DC Grids," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 5, pp. 3117-3129, Oct. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3265748.
- [6] Häfner, J., & Jacobson, B. (2011). Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key Innovation for Reliable HVDC Grids.
- [7] Jovcic, Dragan: "High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids", Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2019. ISBN:9781119566632
- [8] Ansari, Jamshed Ahmed; Liu, Chongru; Khan, Shahid Aziz (2020): MMC Based MTDC Grids: A Detailed Review on Issues and Challenges for Operation, Control and Protection Schemes. In: IEEE Access 8, S. 168154–168165. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023544.