



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

Marten Probst (B. Sc.), Victor Schnell (M. Sc.)
TenneT TSO GmbH

A moment for safety

Gemeinsam sorgen wir für ein sicheres Arbeitsumfeld, in dem wir aus Fehlern lernen und der Austausch von Ideen, Bedenken und Fragen eine Selbstverständlichkeit ist.



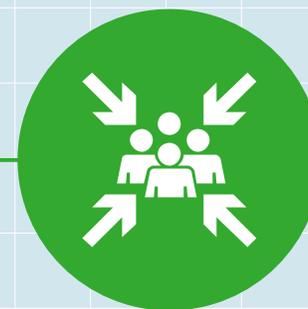
Im Falle einer Evakuierung der Räumlichkeiten möchten wir auf folgende Sicherheitsmaßnahmen hinweisen



Benutzen Sie die angegebenen Fluchtwege



Benutzen Sie nicht den Aufzug sondern die Treppe



Begeben Sie sich zum Sammelplatz



Befolgen Sie die Anweisungen der betrieblichen Evakuierungshelfer

Agenda

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

Motivation

Technische Grundlagen

Fallstudie DC Hub Heide

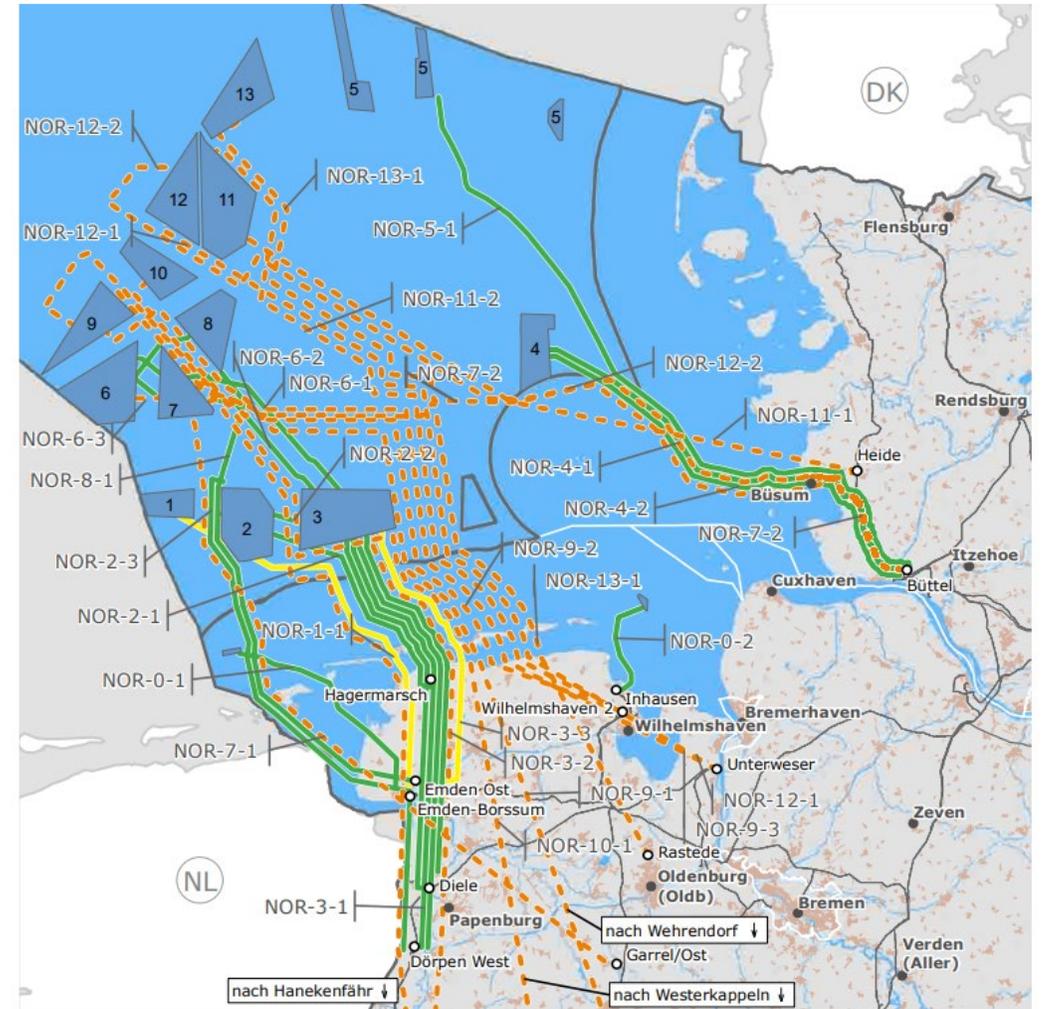
Simulationsergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Motivation

- Ziel: Klimaneutralität bis 2045¹
- Netzausbau in Küstenregionen:
 - Offshorewindenergie: Ausbau von 8,4 GW (Juni 2023)² auf 70 GW bis 2045³
 - Bei TenneT sind Offshoreprojekte mit 14,8 GW installierter Leistung bis 2031 in Bau/Planung⁴
- Innovative Lösung für Anbindung zahlreicher offshore HGÜ-Verbindungen
- Verknüpfte HGÜ-Systemstrukturen gewährleisten die Sicherheit und Stabilität des Stromnetzes



Quelle: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.): https://data.netzausbau.de/Vorhaben/Monitoring/Monitoringbericht_Q3-23.pdf

Quellen:

^{1,3} Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: www.bundesregierung.de

² Deutsche Windguard GmbH: www.wind-energie.de

⁴ TenneT TSO GmbH: www.tennet.eu (Stand: 05.02.2024)

Technische Grundlagen

Technische Grundlagen

Fehlerbehandlung

Vorgehensweise einer Fehlerbehandlung in HGÜ-Netzen

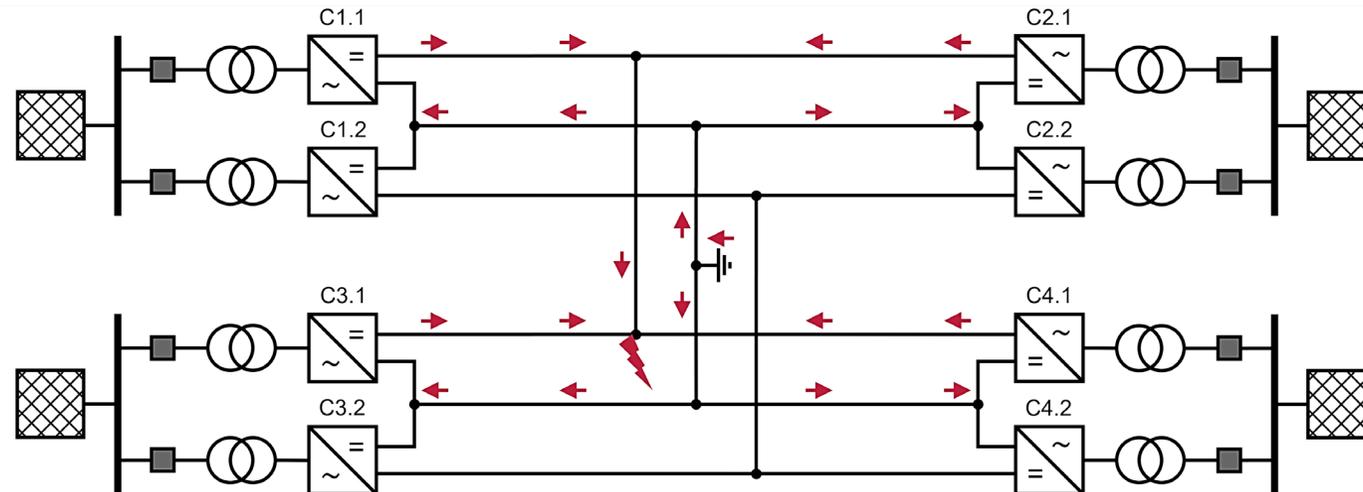


Technische Grundlagen

Fehlereintritt

Fehlerausbreitung bei einem DC-Fehler:

- Sofortiger Spannungseinbruch an Fehlerstelle
- Ausbreitung des Spannungstrichters im HGÜ-System
- Schneller Anstieg hin zu einem hohen DC-Fehlerstrom



Darstellung einer beispielhaften Fehlerstromschleife

Technische Grundlagen

Fehlereintritt

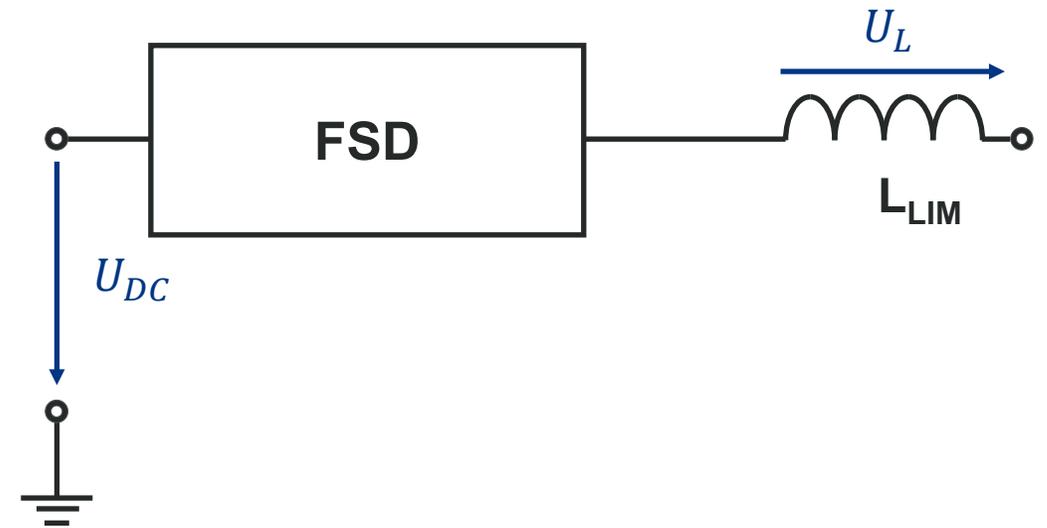
Einflussfaktoren auf den Gleichstromfehler:

Bewertungskriterien	Einflussfaktoren		
	Fehlerart	AC-Netzstärke	Fehlerort
Verlauf der Fehlerstromschleife	✓	x	✓
Ausfallszenario der Übertragungsleistung	✓	x	x
Ort des maximalen Fehlerstroms	x	x	✓
Höhe des maximalen Fehlerstroms	✓	x	✓
Höhe des DC-Fehlerstromverlaufes	✓	✓	✓

- Topologie und Verknüpfungsgrad des HGÜ-Systems
- Ort und Ausführung der Erdung
- Gesamtimpedanz des HGÜ-Systems

Technische Grundlagen Fehlerdetektion

- Überstromschutz (OC-Schutz, engl. overcurrent)
 - Auslösen des FSDs (engl. Fault Separation Device) bei unzulässig hohem Strom
- Gradientenbasierter Algorithmus
 - ROCOC (engl. rate of change of current):
Bedingt durch L_{Lim}
$$\frac{di}{dt} = \frac{U_L}{L_{Lim}}$$
 - ROCOV (engl. rate of change of voltage):
Messung von Polspannung U_{DC} an Kabel
 - Vorteil: Gradienten schneller detektierbar als Grenzwertüberschreitung



Technische Grundlagen Fehlerdetektion

- Fehlerdetektion und Klassifizierung basierend auf Detektion von Spannungs-Wanderwellen¹ (TW, engl. traveling wave)

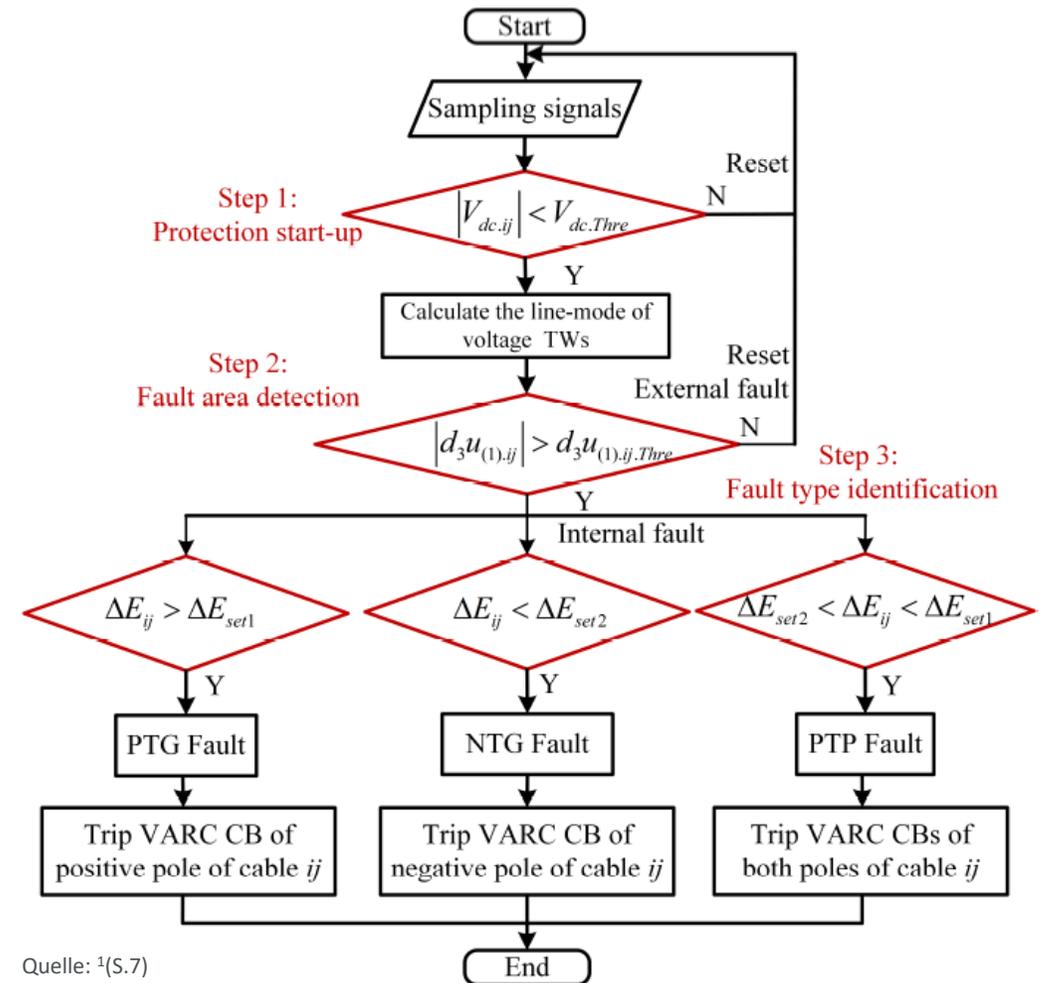
- Drei-stufiges-Verfahren

- 1. Fehlerdetektion durch Spannungseinbruch von Spannung zwischen den Polen

$$2U_{DC} < U_{min}$$

- 2. Klassifizierung als interner oder externer Fehler durch Betrachtung der d_3 -Komponente der Spannung nach Wavelet-Transformation

- 3. Klassifizierung des Fehlers durch Betrachtung der Wavelet-Energie der Polspannungen



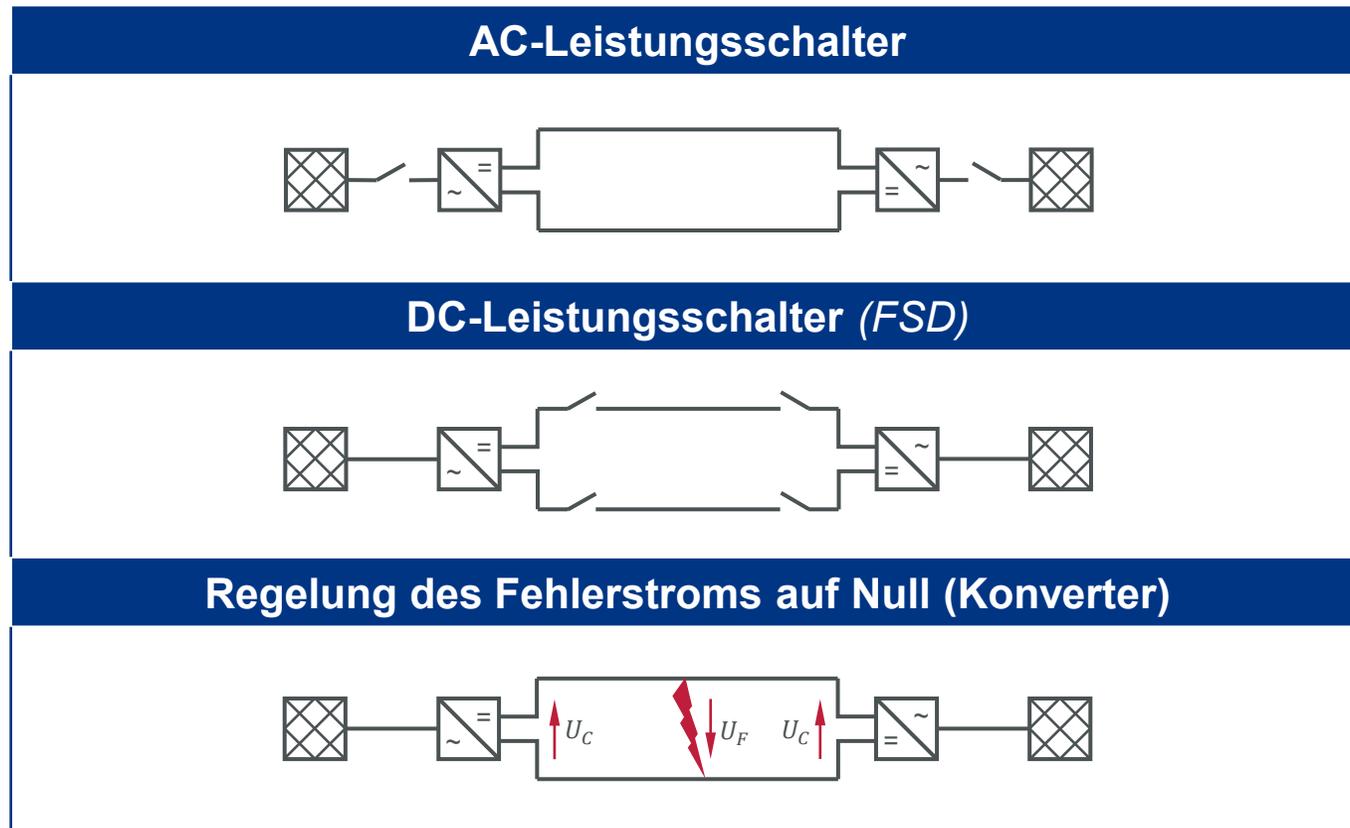
Quelle: ¹(S.7)

¹ Liu, L., Lekić, A. & Popov, M. "Robust Traveling Wave-Based Protection Scheme for Multiterminal DC Grids". In: IEEE Transactions on Power Delivery (2023). ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3265748. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10100888> (aufgerufen am 24. 04. 2023)

Technische Grundlagen

Fehlerklärung

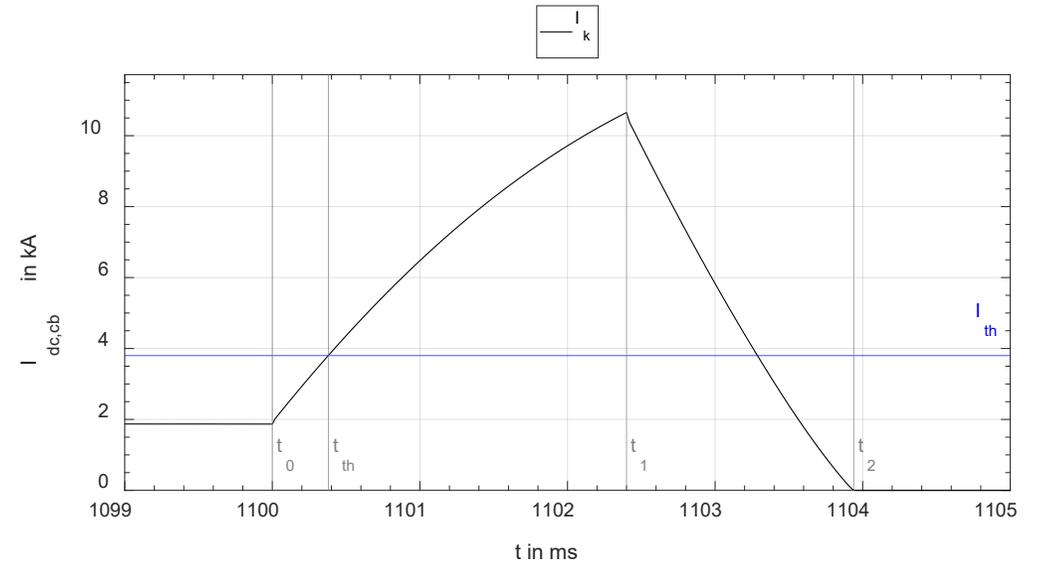
Fehlerunterbrechungsmöglichkeiten



Technische Grundlagen Fehlerklärung

Isolierung der Fehlerstelle

- Die Fehlerbeseitigungsdauer wird durch zwei Faktoren bestimmt:
 - die Ansprechzeit des Schutzes (Stromanstiegsperiode)
 - die Auslösezeit des DC-Leistungsschalters (Stromabsenkungsperiode)
- Effizienz des Schutzsystems beeinflusst durch verschiedene Parameter des Netzmodells, wie:
 - Summe der Gleichstromimpedanzen der Fehlerschleife
 - Topologie des HGÜ-Systems
 - Kurzschlussleistung der anliegenden AC-Netze
 - Fehlerort



Stromverlauf eines DC-Leistungsschalters bei
Auftreten eines Fehlers

Fallstudie DC Hub Heide

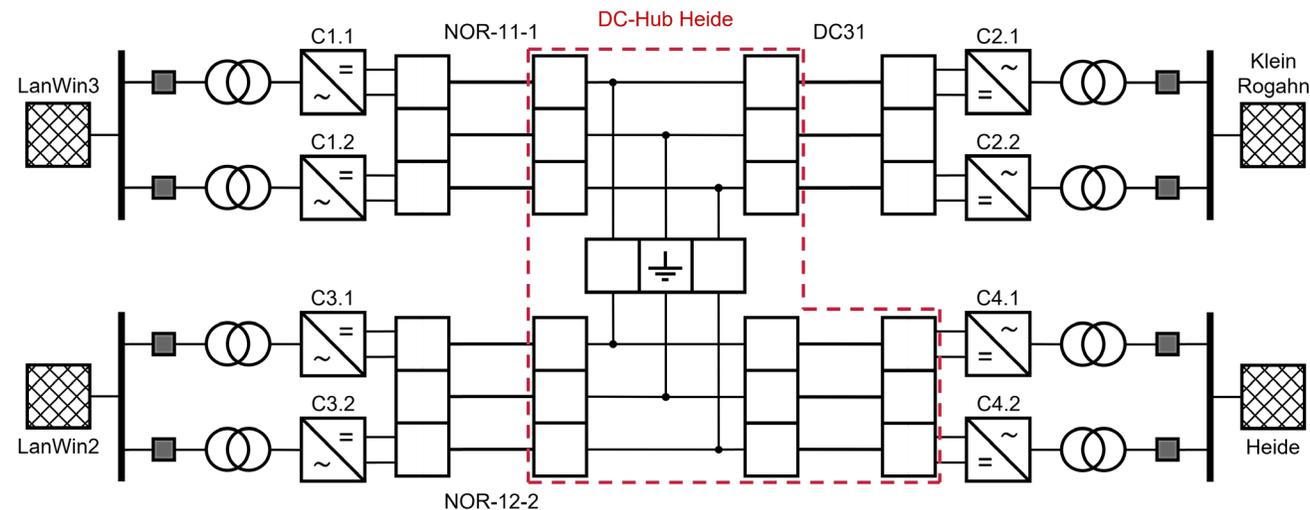
8. April 2024

18. Symposium Energieinnovation, 14.-16.02.2024, Graz/Austria

Fallstudie DC Hub Heide

Kenndaten

- Verknüpfung von zwei bipolaren Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindungen durch DC Hub mit DMR
- Übertragungsstrecken mit einer Nennspannung $U_{dc,nenn}$ von ± 525 kV und einer Nennleistung P_{nenn} von 2 GW
- Jede Stromrichterstation besteht aus zwei HB-MMC-VSCs, welche im Mittelpunkt mit DMR verbunden sind
- Systemerdungspunkt im Längskopplungsschaltfeld des DC Hub Heide

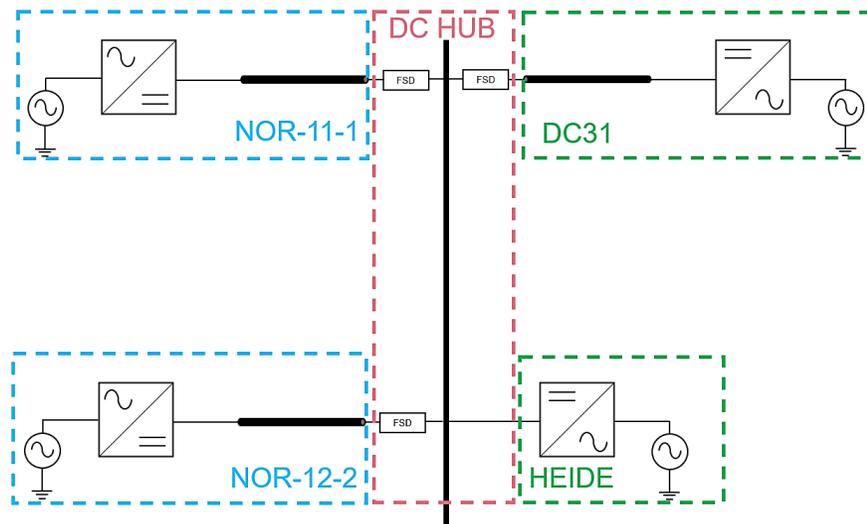


Schematischer Aufbau der Fallstudie DC-Hub Heide

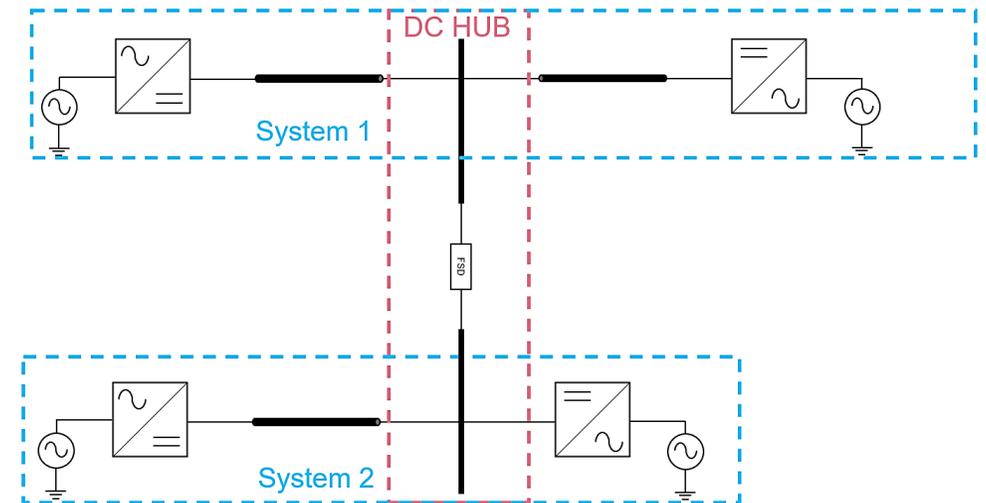
Technische Grundlagen

Fehlerklärungsstrategien Fallstudie DC Hub Heide

- Vollselektiver Ansatz:
gezieltes Freischalten der einzelnen Übertragungsstrecken möglich, ein FSD je Übertragungsstrecke benötigt
- Teilselektiver Ansatz:
Auftrennung in zwei separate Verbindungen mit Freischaltung der fehlerhaften, nur ein FSD benötigt



vollselektive Fehlerklärungsstrategie im DC-Hub Heide

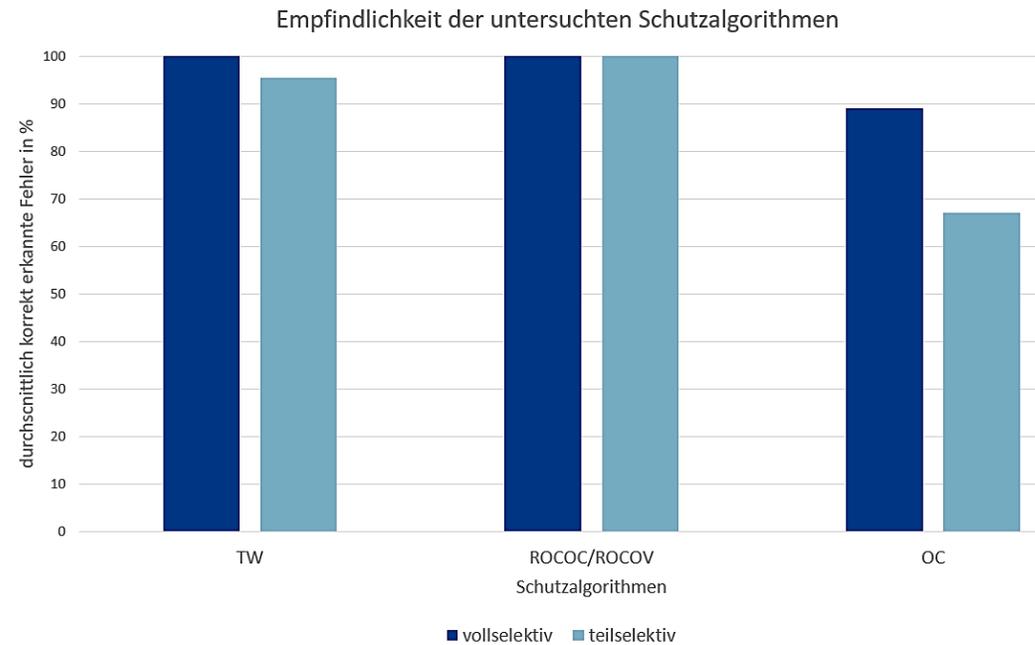


teilselektive Fehlerklärungsstrategie im DC-Hub Heide

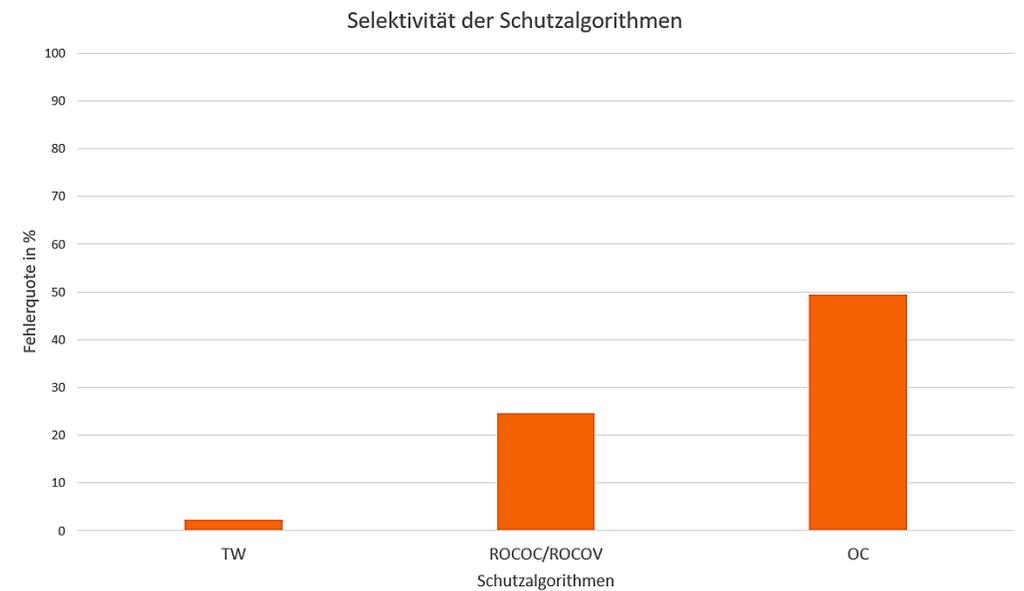
Simulations- ergebnisse

Empfindlichkeit und Selektivität

- Höchste Empfindlichkeit bei dem ROCOC/ROCOV-Schutzalgorithmus

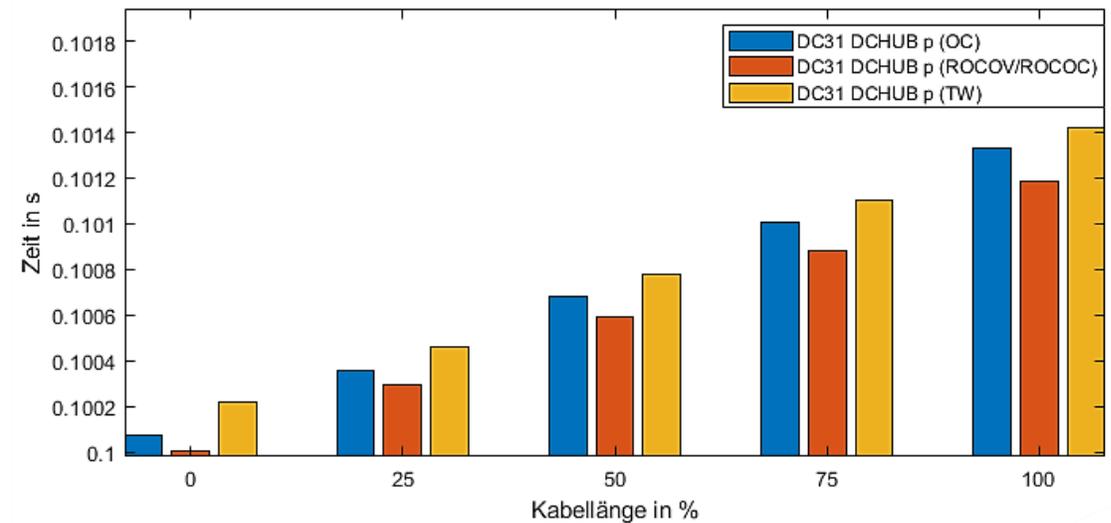
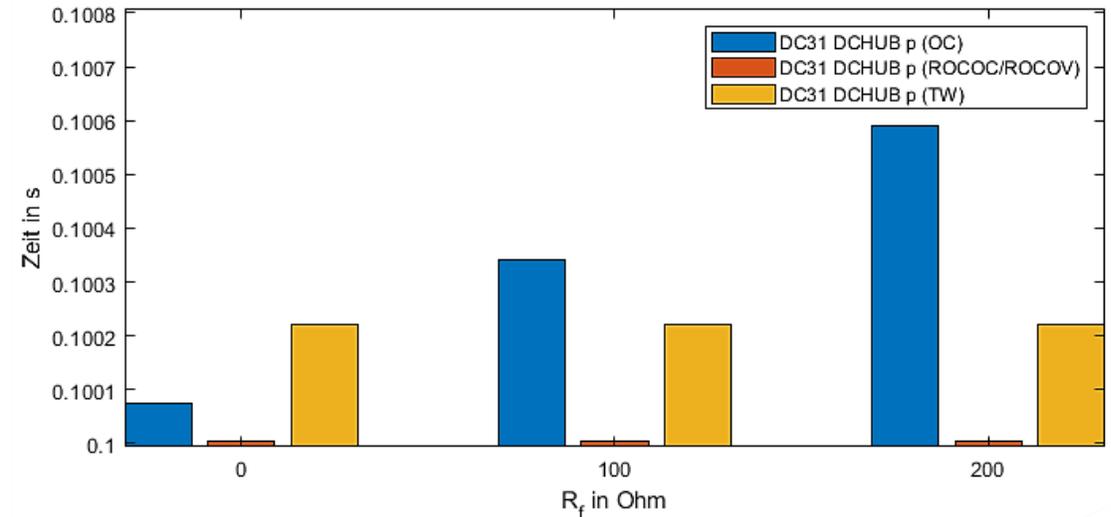


- Höchste Fehlerquoten hinsichtlich Selektivität treten beim OC-Schutzalgorithmus auf



Detektionszeit

- Deutlicher Einfluss von Fehlerwiderstand R_f auf OC-Algorithmus erkennbar
 - Sowohl ROCOC/ROCOV-, als auch TW-Algorithmus sind resistent gegenüber R_f
-
- Betrachtung eines PP-Fehlers mit $R_f = 0 \Omega$ auf Kabel DC31
 - Detektionsgeschwindigkeit steigt mit Abstand zum Fehlerort an
 - Deutliche Abhängigkeit für alle drei Algorithmen erkennbar

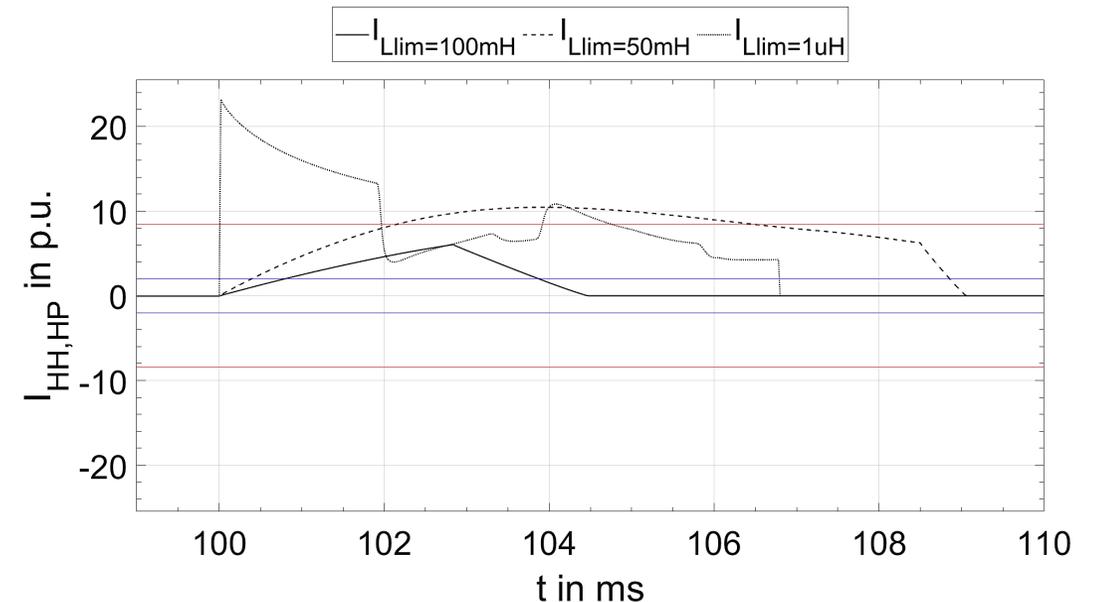


Untersuchung des MT-HGÜ-Systemverhaltens mit OC-Schutzlogik bei unterschiedlichen L_{lim}

- Parameter des Stromverlaufs auf dem Pluspol der DC-Schaltanlage

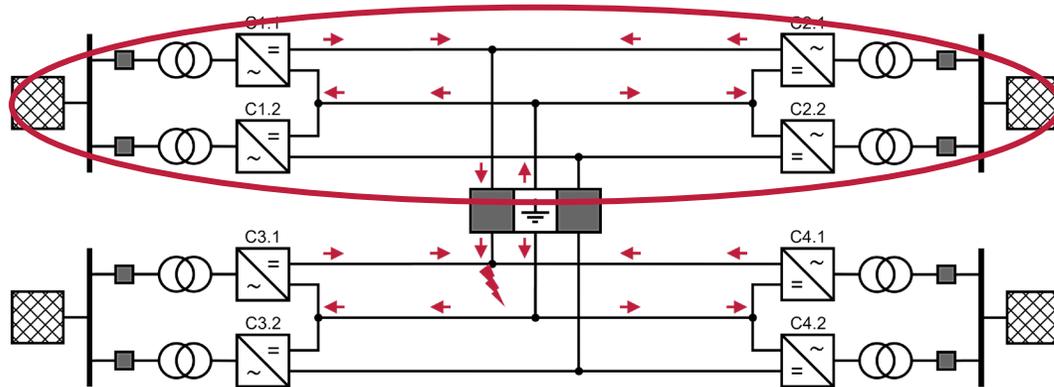
Parameter	$L_{lim} = 1 \mu\text{H}$	$L_{lim} = 50 \text{ mH}$	$L_{lim} = 100 \text{ mH}$
$I_{\text{fault,peak}}$	23,21 p.u.	10,45 p.u.	6,05 p.u.
$t_{\text{fault,peak}}$	20 μs	3,92 ms	2,84 ms
$t_{\text{OC,th}}$	20 μs	0,40 ms	0,80 ms
$t_{\text{cb,max}}$	20 μs	2,16 ms	-
t_2	6,80 ms	9,06 ms	4,48 ms

- DC-Stromverlauf am Pluspol der DC-Schaltanlage



Untersuchung des MT-HGÜ-Systemverhaltens mit OC-Schutzlogik bei unterschiedlichen L_{lim}

- Konverter C1.1 blockiert bei $L_{lim} = 50$ mH im Vergleich zu $L_{lim} = 1$ μ H um 2,64 ms verzögert
- Konverter C2.1 blockiert bei $L_{lim} = 50$ mH im Vergleich zu $L_{lim} = 1$ μ H um 1,12 ms verzögert
- Bei $L_{lim} = 100$ mH können beide Konverter den Fehler durchfahren
- Unbetroffene Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindung kann $P_{nenn} = 2$ GW aufrechterhalten



- Blockierungszeitpunkte der Konverter

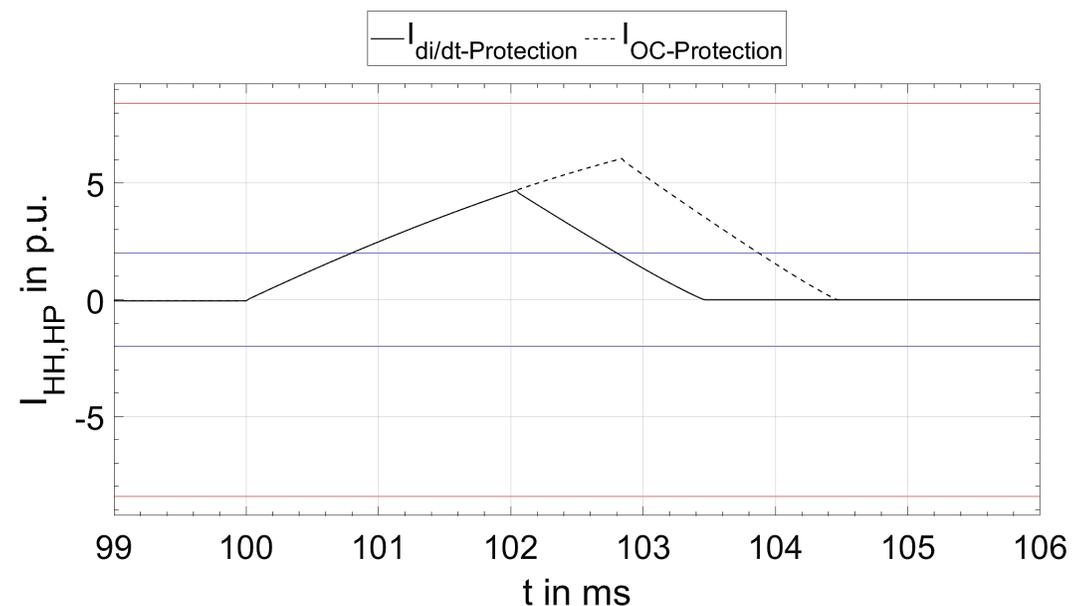
Konverter	$t_{BLK,C}$		
	$L_{lim} = 1 \mu H$	$L_{lim} = 50 mH$	$L_{lim} = 100 mH$
C1.1	3,30 ms	5,94 ms	-
C1.2	-	-	-
C2.1	5,06 ms	6,18 ms	-
C2.2	-	-	-

Untersuchung des MT-HGÜ-Systemverhaltens bei verschiedenen Schutzlogiken

- Parameter des Stromverlaufs auf dem Pluspol der DC-Schaltanlage

- DC-Stromverlauf am Pluspol der DC-Schaltanlage

Parameter	di/dt-Schutz	OC-Schutz
$I_{\text{fault,peak}}$	4,96 p.u.	6,05 p.u.
$t_{\text{fault,peak}}$	2,04 ms	2,84 ms
t_2	3,46 ms	4,48 ms



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Aufbau eines detaillierten Simulationsmodells für die Fallstudie DC Hub Heide in PSCAD
- Identifikation kritischer Fehlerszenarien und Einflussfaktoren auf den DC-Fehler
- Fehlerdetektion
 - ROCOC/ROCOV-Algorithmus weist geringste Detektionszeit auf, jedoch auf Kosten der Selektivität
 - TW-Algorithmus liefert insgesamt geringste Fehlerquoten bei Selektivität
 - ROCOC/ROCOV- und TW-Algorithmus weitestgehend unabhängig von R_f
 - Kein Algorithmus kann alle Fehler innerhalb 1 ms erkennen
- Erfüllung der Anforderung des Schutzsystems bei teilselektiver Fehlerklärungsstrategie mit ausreichend großer Strombegrenzungsinduktivität L_{lim} und korrekter Parametrierung des di/dt-Schutzalgorithmus

Ausblick

- Optimierungspotential hinsichtlich der Parametrierung der Schutzalgorithmen und L_{lim}
- Tiefergehende Analyse des Systemverhaltens für abschließende Bewertung der Algorithmen notwendig
- Überprüfung der Effektivität der Schutzauslegung für unterschiedliche Fehlerszenarien
- Untersuchung der Einflüsse der Konverterregelung auf das HGÜ-Systemverhalten

Fragen oder Anregungen?



TenneT ist ein führender europäischer Netzbetreiber. Wir setzen uns für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung ein – 24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr. Wir gestalten die Energiewende mit – für eine nachhaltige, zuverlässige und bezahlbare Energiezukunft. Als erster grenzüberschreitender Übertragungsnetzbetreiber planen, bauen und betreiben wir ein fast 24.500 km langes Hoch- und Höchstspannungsnetz in den Niederlanden und großen Teilen Deutschlands und ermöglichen mit unseren 16 Interkonnektoren zu Nachbarländern den europäischen Energiemarkt. Mit einem Umsatz von 6,4 Mrd. Euro und einer Bilanzsumme von 32 Mrd. Euro sind wir einer der größten Investoren in nationale und internationale Stromnetze, an Land und auf See. Jeden Tag geben unsere 6.600 Mitarbeiter ihr Bestes und sorgen im Sinne unserer Werte Verantwortung, Mut und Vernetzung dafür, dass sich mehr als 42 Millionen Endverbraucher auf eine stabile Stromversorgung verlassen können.

Lighting the way ahead together.

Disclaimer

Diese PowerPoint-Präsentation wird Ihnen von der TenneT TSO GmbH („TenneT“) angeboten. Ihr Inhalt, d.h. sämtliche Texte, Bilder und Töne, sind urheberrechtlich geschützt. Sofern TenneT nicht ausdrücklich entsprechende Möglichkeiten bietet, darf nichts aus dem Inhalt dieser PowerPoint-Präsentation kopiert werden, und nichts am Inhalt darf geändert werden. TenneT bemüht sich um die Bereitstellung korrekter und aktueller Informationen, gewährt jedoch keine Garantie für ihre Korrektheit, Genauigkeit und Vollständigkeit.

TenneT übernimmt keinerlei Haftung für (vermeintliche) Schäden, die sich aus dieser PowerPoint-Präsentation ergeben, beziehungsweise für Auswirkungen von Aktivitäten, die auf der Grundlage der Angaben und Informationen in dieser PowerPoint-Präsentation entfaltet werden.