

Identifikation auslegungsrelevanter Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen

Raphael Bleilevens(*), Albert Moser

Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW) der
RWTH Aachen University
Schinkelstraße 6, 52062 Aachen, Deutschland
r.bleilevens@iaew.rwth-aachen.de
www.iaew.rwth-aachen.de

Kurzfassung: Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze sind Gegenstand aktueller Forschung. Für die Planung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen ist die Kenntnis der maximalen Kurzschlussströme zur Auslegung stromführender Betriebsmittel erforderlich. Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Arbeit die Identifikation der auslegungsrelevanten Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen. Dazu wurden transiente Kurzschlussstromberechnungen basierend auf einem dynamischen Modell eines Gleichstromnetzes durchgeführt, wobei die möglichen Kurzschlussarten und eine Vielzahl relevanter Kurzschlusspositionen untersucht wurden. Auf Basis der Ergebnisse der transienten Berechnungen zeigt sich, dass für den asymmetrischen Monopol mit metallischem Rückleiter der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung und der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung auslegungsrelevant sind, während für den symmetrischen Monopol der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung als auslegungsrelevant anzusehen ist. Zusätzlich wurde ermittelt, dass die Kurzschlusspositionen entweder am Eingang oder am Ausgang von Abgangsfeldern die maximalen auslegungsrelevanten Kurzschlussströme hervorrufen.

Keywords: MVDC-Netze, LVDC-Netze, DC-Kurzschlüsse, DC-Kurzschlussarten

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Aufgrund der Entwicklungen auf dem Gebiet der Leistungselektronik und der gestiegenen Bedeutung der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) für das Elektrizitätsversorgungssystem rücken Gleichstromnetze auch auf Mittel- und Niederspannungsebene zunehmend in den Fokus der Forschung. So wird beispielsweise im Projekt „Direct Current Components + Grid“ (DCC+G) [1] die Nutzung eines Niederspannungsgleichstromnetzes zur Verteilung in Gebäuden und im Rahmen des Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN) [2] die Nutzung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen für die öffentliche Elektrizitätsversorgung untersucht.

Für die Planung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen ist äquivalent zur Planung von Drehstromnetzen die Kenntnis der maximalen Kurzschlussströme zur wirtschaftlich angemessenen Auslegung stromführender Betriebsmittel notwendig [3]. Für die erforderliche Kurzschlussstromberechnung ist zur Reduktion des Rechenbedarfs die Kenntnis über die

auslegungsrelevanten Kurzschlüsse erforderlich. Dabei können sich potentielle Kurzschlüsse hinsichtlich der Kurzschlussart und des Kurzschlussorts (Kurzschlussposition) unterscheiden.

1.2 Ziel der Arbeit und methodische Herangehensweise

Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Arbeit die Ermittlung der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und Kurzschlusspositionen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen. Zur Ermittlung wird auf eine simulative Herangehensweise zurückgegriffen. Dazu wird eine Vielzahl transienter Kurzschlussstromberechnungen durchgeführt, wobei Variationen bezüglich der möglichen Kurzschlussarten und verschiedener Kurzschlusspositionen erfolgen.

Dieser Arbeit gliedert sich dazu wie folgt. In Kapitel 2 wird der Aufbau von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen inklusive der stromführenden Betriebsmittel vorgestellt und die möglichen Kurzschlussarten werden identifiziert. Anschließend erfolgt in Kapitel 3 die Vorstellung der Grundlagen der Untersuchungen mitsamt der verwendeten Modelle. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Untersuchungen präsentiert, wobei aufgrund der Vielzahl an Untersuchungen der Fokus auf eine detaillierte Darstellung repräsentativer Ergebnisse gelegt wird.

2 Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze

Im Gegensatz zu heutigen Mittel- und Niederspannungsdrehstromnetzen werden Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze über Umrichter- bzw. Gleichspannungswandlerstationen mit anderen elektrischen Netzen verbunden [4]. Dies ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. In diesem Rahmen ist der Einsatz von unterschiedlichen Umrichter- und Gleichspannungswandlerstationen möglich, die ein teils unterschiedlichem Verhalten im Kurzschlussfall aufweisen [5].

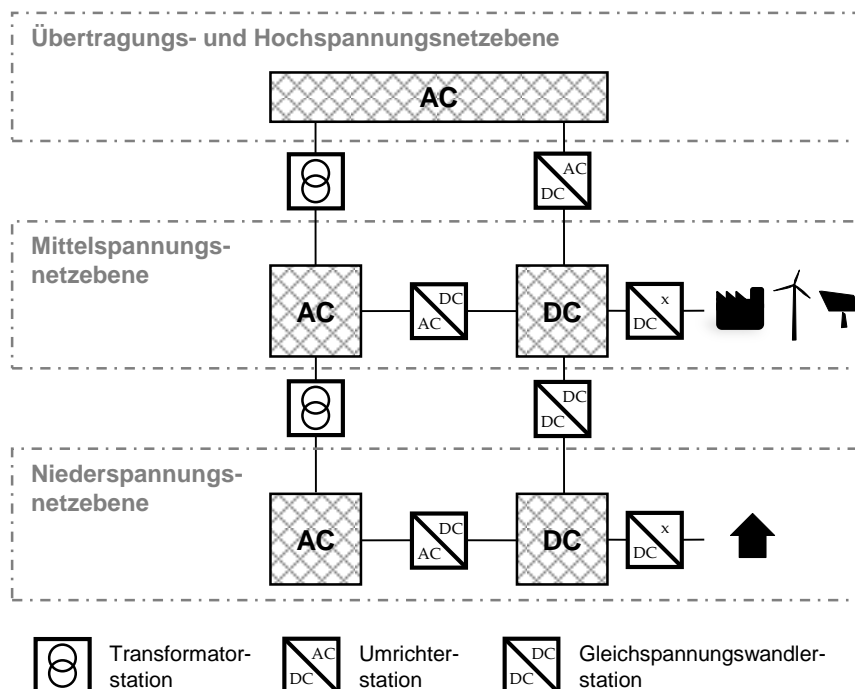


Abbildung 1: Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen im bestehenden Elektrizitätsversorgungssystem

Darüber hinaus werden wie in Drehstromnetzen die stromführenden Betriebsmittel Leitungen, Sammelschienen und Abgangsfelder mit Trennschaltern und ggf. Leistungsschaltern eingesetzt. Hinsichtlich der Ausführung dieser stromführenden Betriebsmittel im Vergleich zu Drehstrombetriebsmitteln können jedoch deutliche Unterschiede existieren. Bspw. ist das Funktionsprinzip heutiger Drehstromleistungsschalter aufgrund des fehlenden Stromnulldurchgangs nicht unmittelbar für Gleichstromnetze anwendbar [6]. Aber auch der Aufbau hinsichtlich der Anzahl spannungsführender Phasen von Leitungen kann sich unterscheiden, da für Gleichstromsysteme unterschiedliche Stations- und Leitungskonfigurationen möglich sind [7]. Nach [8] sind für die Mittel- und Niederspannungsebene insbesondere das asymmetrische monopolare System mit metallischem Rückleiter und das symmetrisch monopolare System relevant. Die Anordnung der stromführenden Betriebsmittel für diese beiden monopolaren Systeme ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

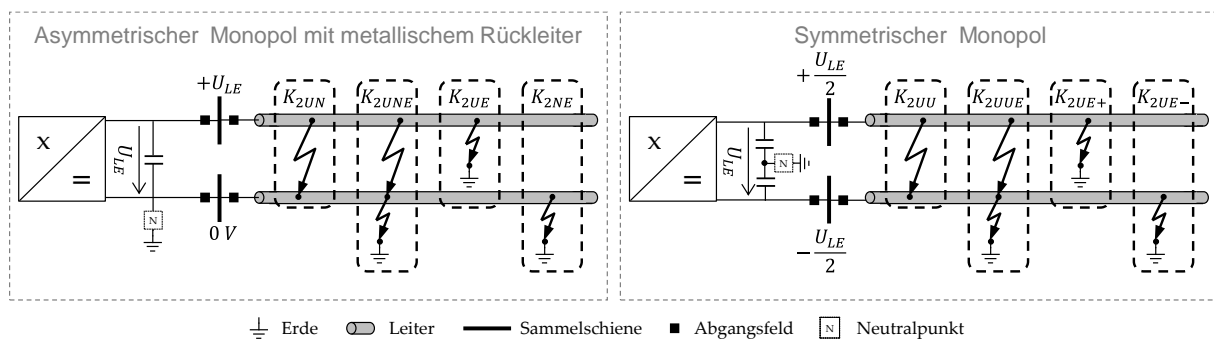


Abbildung 2: Asymmetrischer Monopol und symmetrischer Monopol mit den möglichen Kurzschlussarten

Analog zur Sternpunktbehandlung von Transformatoren in Drehstromsystemen ist eine Behandlung der gleichstromseitigen Neutralpunkte (Neutralpunktbehandlung) von leistungselektronischen Wandlern für Gleichstromsysteme notwendig. Mithilfe der Neutralpunktbehandlung kann ähnlich zur Sternpunktbehandlung in Drehstromsystemen der Erdkurzschlussstrom aktiv beeinflusst werden, wobei unterschiedliche Möglichkeiten zur Neutralpunktbehandlung existieren. Diese sind laut [7]:

- Starre Neutralpunktbehandlung:
Neutralpunkt wird mit möglichst kleinem Widerstand geerdet
- Resistive Neutralpunktbehandlung:
Neutralpunkt wird mit einem ausgelegtem Widerstand geerdet
- Induktive Neutralpunktbehandlung:
Neutralpunkt wird mit einer ausgelegten Spule geerdet
- Isolierte Neutralpunktbehandlung:
Neutralpunkt wird nicht geerdet

Hinsichtlich der Neutralpunktbehandlung ist zur Verhinderung von konstanten Erdströmen im Normalbetrieb festzuhalten, dass höchstens ein Wandler des Gleichstromnetzes über eine starre, resistive oder induktive Neutralpunktbehandlung verfügen darf. Alle anderen Wandler sind entsprechend mit einer isolierten Neutralpunktbehandlung auszuführen. [7]

Entsprechend Abbildung 2 sind unterschiedliche Kurzschlussarten für den asymmetrischen Monopol mit metallischem Rückleiter und dem symmetrischen Monopol möglich. Diese

aufgezeigten Kurzschlussarten werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Zudem hat die Kurzschlussposition einen wesentlichen Einfluss auf den von den stromführenden Betriebsmitteln erfahrenen Kurzschlussstrom, sodass neben den auslegungsrelevanten Kurzschlussarten auch die auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen zu identifizieren sind. Die mit diesem Hintergrund verwendete methodische Herangehensweise zur Identifikation der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und -positionen wird nachfolgend vorgestellt.

3 Grundlagen der Untersuchungen

Zur Identifikation der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und -positionen wird eine Variantenrechnung mithilfe einer Vielzahl an transienten Kurzschlussstromberechnungen herangezogen. Dabei basiert eine transiente Berechnung auf einer numerischen Zeitverlaufssimulation und wird mit dem Softwareprogramm PLECS[®] durchgeführt, welches ein Simulationstool speziell für leistungselektronische Systeme darstellt. Somit erlaubt PLECS[®] die detaillierte Berücksichtigung des Verhaltens von Umrichtern und Gleichspannungswandlern im Kurzschlussfall.

Für die transienten Berechnungen in Form von numerischen Zeitverlaufssimulationen ist ein dynamisches Modell eines Gleichstromnetzes erforderlich. Die Herleitung des verwendeten Modells wird in Kapitel 3.1 vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der durchgeführten Variationen, bevor abschließend die verwendeten Bewertungsgrößen vorgestellt werden.

3.1 Untersuchtes Gleichstromnetz

Um die möglichen Charakteristika von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen in ausreichendem Maße zu berücksichtigen und dennoch eine übersichtliche Anzahl an möglichen stromführenden Betriebsmitteln zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein 6-Knoten Gleichstromnetz mit einer Leiter-Leiter-Spannung von 10 kV ausgewählt. Eine schematische Darstellung der Netzstruktur des 6-Knoten Gleichstromnetzes ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gegeben.

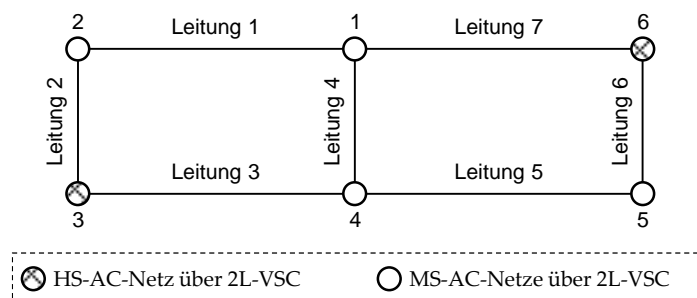


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Netzstruktur des verwendeten 6-Knoten Gleichstromnetzes

Als leistungselektronische Wandler (Umrichter und Gleichspannungswandler) werden ausschließlich Zwei-Level Voltage-Source-Umrichter (2L-VSC) mit angrenzenden Drehstromnetzen berücksichtigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein 2L-VSC im Vergleich zu den anderen leistungselektronischen Wandlern die höchsten Kurzschlussströme verursacht [5]. Somit wird durch die Wahl der 2L-VSC eine Worst-Case-Abschätzung durchgeführt. Die Modellierung von 2L-VSC erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch die

Berücksichtigung aller Teilkomponenten, wie bspw. IGBTs, Dioden, Spulen, Kondensatoren, sowie der Regelung inklusive Schaltsignalgenerierung, wobei parasitäre Effekte vernachlässigt werden. Darüber hinaus werden die angrenzenden Drehstromnetze entsprechend [7] durch eine ideale Drehstromspannungsquelle mit einer zugehörigen Innenimpedanz abgebildet, welche basierend auf der Kurzschlussleistung parametrisiert wird. Dabei wird für die Hochspannungsdrehstromnetze (HS-AC-Netze) eine Kurzschlussleistung von 2 GVA mit einem R-zu-X-Verhältnis von 0,1 und für die Mittelspannungsdrehstromnetze (MS-AC-Netze) eine Kurzschlussleistung von 50 MVA bis 100 MVA mit einem R-zu-X-Verhältnis von 0,5 bis 1 angesetzt.

Bezüglich der benötigten Kondensatoren am DC-seitigen Ausgang des 2L-VSC (siehe Abbildung 2) erfolgt eine Modellierung durch eine ideale Kapazität mit zugehörigem idealem Innenwiderstand. Dabei ist die Berücksichtigung des Innenwiderstands für kondensatornahe Kurzschlüsse von großer Bedeutung, da dieser die Kondensatorentladung in einem relevanten Ausmaß beeinflussen kann [9].

Aus denselben Gründen kann anders als bei der Drehstromkurzschlussstromberechnung das resistive und induktive Verhalten von Sammelschienen und Abgangsfeldern nicht als vernachlässigbar klein angenommen werden, da insbesondere bei kondensatornahen Kurzschlüssen bereits kleine Widerstände bzw. Induktivitäten einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrom haben können. Die Modellierung von Sammelschienen und Abgangsfeldern erfolgt daher entsprechend **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

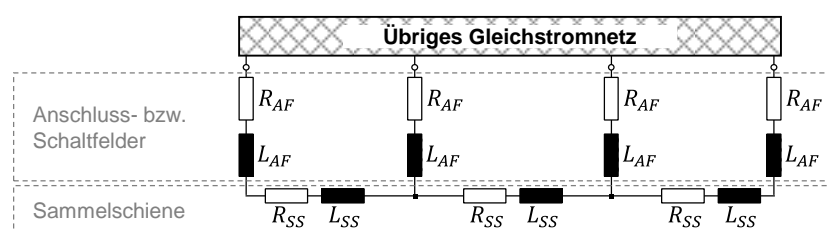


Abbildung 4: Exemplarisches Modell einer Sammelschiene mit vier Abgangsfeldern

Des Weiteren wird für die Modellierung der Leitungen auf eine Kettenschaltung, bestehend aus T-Kettengliedern mit konzentrierten Elementen, zurückgegriffen [10]. Dabei wird ein T-Kettenglied je 500 m Leitungslänge verwendet, wobei die Leitungslängen im untersuchten 6-Knoten Gleichstromnetz zwischen 3,5 km und 7,9 km variieren, wodurch mindestens 7 T-Kettenglieder verwendet werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass unterschiedliche Kurzschlusspositionen für eine Leitung untersucht werden können.

Die Erde als Rückleiter und der Kurzschluss werden zwecks Abschätzung zur sicheren Seite als ideal leitfähige Leiter angenommen. Zudem wird zwecks Abschätzung zur sicheren Seite eine starre Neutralpunktbehandlung am 2L-VSC von Knoten 3 angenommen, während alle anderen 2L-VSC über eine isolierte Neutralpunktbehandlung verfügen.

3.2 Untersuchungsprogramm

Im Rahmen der Untersuchungen wird eine Vielzahl transienter Berechnungen durchgeführt. Dabei wird das vorgestellte dynamische Modell eines 6-Knoten Gleichstromnetzes gemäß

Kapitel 3.1 verwendet, wobei sowohl der asymmetrische Monopol mit metallischem Rückleiter als auch der symmetrischen Monopol untersucht werden.

Des Weiteren erfolgt im Rahmen der Untersuchungen eine Variation der möglichen 4 Kurzschlussarten je monopolarer Ausgestaltung (siehe Abbildung 2).

Zusätzlich erfolgt im Rahmen der Untersuchungen eine Variation der Kurzschlusspositionen. Um sich der in der Theorie unendlichen Anzahl an möglichen Kurzschlusspositionen zu nähern, werden dazu ausgewählten Kurzschlusspositionen berücksichtigt. Die ausgewählten Kurzschlusspositionen sind schematisch in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** hervorgehoben.

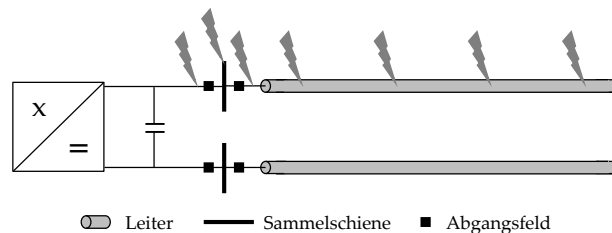


Abbildung 5: Schematische Darstellung der ausgewählten Kurzschlusspositionen

Bei den ausgewählten Kurzschlusspositionen handelt es sich zum einen um die Positionen am Eingang (aus Sicht der Sammelschiene) der Abgangsfelder, was gleichbedeutend mit einem Kurzschluss auf der Sammelschiene ist. Zum anderen werden Kurzschlusspositionen unmittelbar am Ausgang (aus Sicht der Sammelschiene) der Abgangsfelder berücksichtigt. Zusätzlich werden unterschiedliche Kurzschlusspositionen auf den Leitungen überprüft, sodass insgesamt rund 50 verschiedene Kurzschlusspositionen berücksichtigt werden.

Durch die Kombination der Variationen von Kurzschlussarten und Kurzschlusspositionen werden im Rahmen der Untersuchungen insgesamt ca. 400 transiente Kurzschlussstromberechnungen durchgeführt. Dabei werden für jede Kurzschlussstromberechnung die erfahrenen Kurzschlussströme aller sich im Netz befindenden stromführenden Betriebsmittel berücksichtigt, wodurch eine Auswertungsbasis von über 10.000 Kurzschlussstromverläufen resultiert.

3.3 Bewertungskenngrößen

Zum Vergleich der Kurzschlussstromverläufe wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vergleich basierend auf einzelnen Charakteristika der Stromverläufe (Bewertungskenngrößen) herangezogen. Bei den Bewertungskenngrößen handelt es sich um die aus der Drehstromkurzschlussstromberechnung bekannten Kurzschlussstromkenngrößen Stoßkurzschlussstrom i_p und thermisch äquivalenter Kurzzeitstrom I_{th} [3]. Mithilfe des Stoßkurzschlussstroms können aufgrund des funktionalen Zusammenhangs von Strom und magnetischer Kraft die mechanischen Belastungen von stromführenden Betriebsmitteln abgeschätzt werden. Der thermisch äquivalente Kurzzeitstrom dient hingegen der Abschätzung der thermischen Belastung während eines Kurzschlusses. Dabei kann sowohl für den Stoßkurzschlussstrom als auch für den thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom festgehalten werden, dass die maximale Belastung bei maximaler Kurzschlussstromkenngröße auftritt. Aus diesem Grund erfolgt nachfolgend die Identifikation von

auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und –positionen anhand der maximalen Stoßkurzschluss- und thermisch äquivalenten Kurzzeitströme. [3]

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die repräsentativen Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt, um die auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und –positionen zu identifizieren.

4.1 Auslegungsrelevanten Kurzschlussarten

Repräsentative Ergebnisse bezüglich der Ermittlung der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten für den asymmetrischen Monopol mit metallischem Rückleiter sind in Abbildung 6 dargestellt. Dort sind exemplarisch die maximalen Kurzschlussstromkenngrößen des Abgangsfeldes von Knoten 1 zum Umrichter (K1 AF U), des Abgangsfeldes von Knoten 3 zum Umrichter (K3 AF U), des Abgangsfeldes von Knoten 2 zu Leitung 2 (K2 AF L2), des Abgangsfeldes von Knoten 6 zu Leitung 6 (K6 AF L6) und der Sammelschiene von Knoten 4 (K4 SS) für jeweils den positiven (+) und neutralen Pol (N) aufgezeigt.

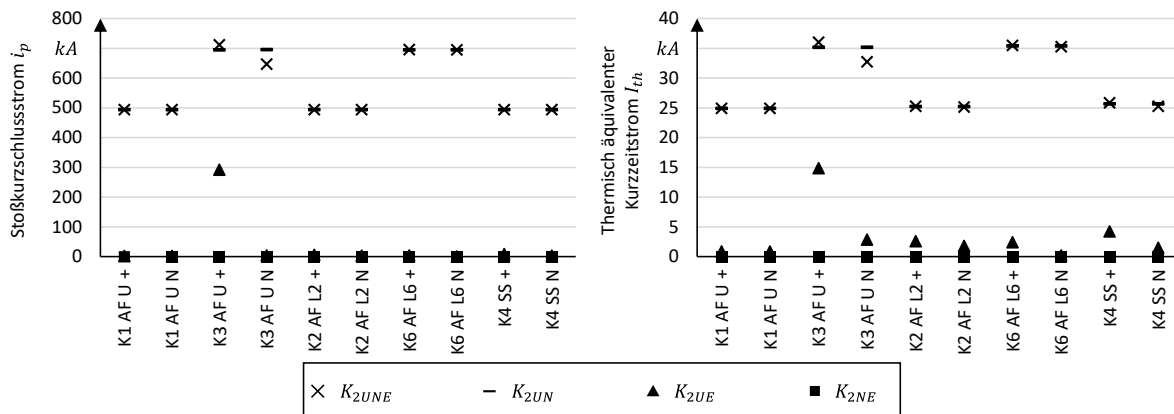


Abbildung 6: Exemplarische, repräsentative Ergebnisse für unterschiedliche Kurzschlussarten des asymmetrischen Monopols

Es ist zu erkennen, dass für die Betriebsmittel des positiven Pols der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung zu den größten Belastungen führt. Dies lässt sich auf die teilweise Parallelschaltung des Rückleitersystems zur Erde zurückführen, wodurch der resultierende Kurzschlusswiderstand sinkt. Zudem ist zu erkennen, dass durch die Erdberührung und den damit verbundenen Stromfluss über die Erde die Betriebsmittel des neutralen Pols geringere Belastungen erfahren können, wobei diese geringer sein können als die Belastungen durch den zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung. Zusätzlich wird gezeigt, dass die einpoligen Kurzschlüsse keine auslegungsrelevanten Belastungen hervorrufen, da deren Kurzschlussstromkenngrößen immer kleiner als die Kurzschlussstromkenngrößen der zweipoligen Kurzschlüsse sind.

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch für die restlichen, nicht dargestellten stromführenden Betriebsmittel, sodass festgehalten werden kann, dass für den asymmetrischen Monopol mit metallischem Rückleiter der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung und ohne Erdberührung auslegungsrelevant ist.

Repräsentative Ergebnisse bezüglich der Ermittlung der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten für den symmetrischen Monopol sind in Abbildung 8 dargestellt. Dort sind die Ergebnisse für dieselben stromführenden Betriebsmittel wie in Abbildung 6 dargestellt, wobei zwischen dem Betriebsmittel des positiven (+) und des negativen Pols (-) unterschieden wird.

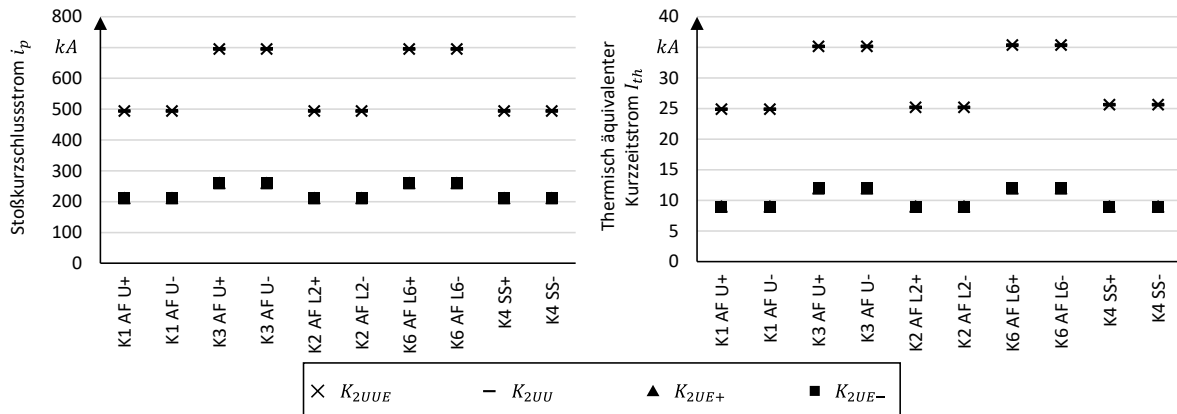


Abbildung 7: Exemplarische, repräsentative Ergebnisse für unterschiedliche Kurzschlussarten

Es ist zu erkennen, dass der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung und ohne Erdberührung die gleichen Kurzschlussstromkenngrößen hervorrufen. Die beiden einpoligen Kurzschlüsse rufen hingegen keine auslegungsrelevanten Kurzschlussströme hervor, da deren Kurzschlussstromkenngrößen immer kleiner sind als die Kurzschlussstromkenngrößen der zweipoligen Kurzschlüsse.

Vergleichbare Ergebnisse sind auch für die restlichen nicht dargestellten stromführenden Betriebsmittel ermittelt worden, sodass festzuhalten ist dass für den symmetrischen Monopol ausschließlich der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung auslegungsrelevant ist.

4.2 Auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen

Die ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass sowohl für den asymmetrischen Monopol mit metallischem Rückleiter als auch für den symmetrischen Monopol dieselben Kurzschlusspositionen auslegungsrelevant sind. Aus diesem Grund werden nachfolgend ausschließlich Ergebnisse für den symmetrischen Monopol vorgestellt.

Repräsentative Ergebnisse bezüglich der Ermittlung der auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen sind in Abbildung 8 dargestellt. Dort sind exemplarisch die maximalen Kurzschlussstromkenngrößen des Abgangsfeldes von Knoten 1 zum Umrichter (K1 AF U) für unterschiedliche Kurzschlusspositionen (KP) dargestellt.

Abbildung 8 verdeutlicht, dass KP1 zu den höchsten Belastungen führt. Das liegt darin begründet dass bei dieser Kurzschlussposition das stromführende Betriebsmittel K1 AF U zwischen der dominierenden Kurzschlussstromquelle und der Kurzschlussposition liegt, wobei die elektrische Distanz einen minimalen Wert annimmt.

Für die Abgangsfelder zu den Leitungen wurden ähnliche Ergebnisse ermittelt. Beispielsweise stellt sich für das Abgangsfeld zu Leitung 1 die Kurzschlussposition KP3 als auslegungsrelevant heraus. Vergleichbare Ergebnisse konnten auch für die restlichen

Abgangsfelder ermittelt werden. Somit ist insgesamt festzuhalten, dass entweder die Kurzschlussposition unmittelbar am Eingang oder am Ausgang eines Abgangsfeldes für das Abgangsfeld auslegungsrelevant ist.

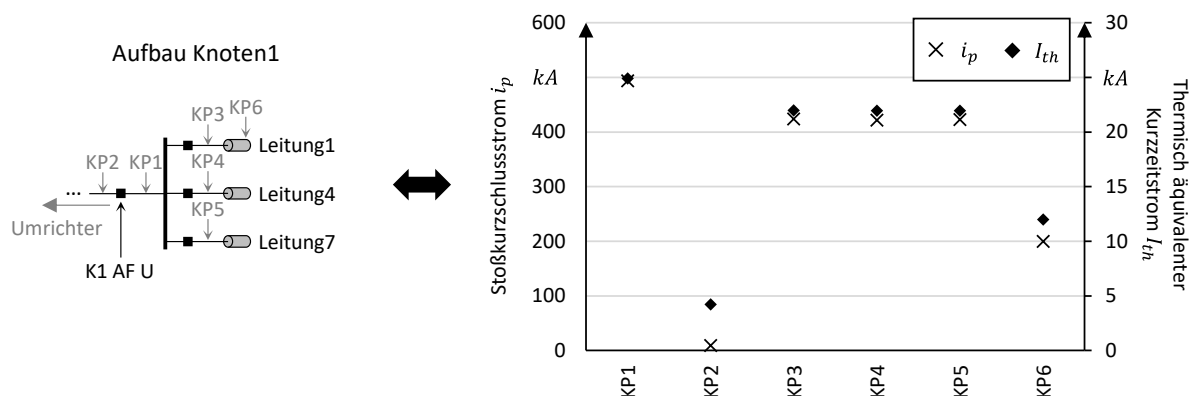


Abbildung 8: Exemplarische Ergebnisse für die Belastung von K1 AF U für unterschiedliche Kurzschlusspositionen

Hinsichtlich der auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen von Sammelschienen zeigen die Ergebnisse, dass bei einer Modellierung entsprechend Abbildung 4 keine allgemeingültige auslegungsrelevante Kurzschlussposition existiert. Jedoch wurde ermittelt, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen bereits durch die auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen der Abgangsfelder berücksichtigt werden, wodurch sich die Anzahl der insgesamt zu untersuchenden auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen nicht erhöht.

Bezüglich der Leitungen konnte äquivalent zu [11] festgestellt werden, dass Kurzschlüsse am Anfang oder am Ende einer Leitung zu den größten Belastungen von Teilstücke der Leitung führen. Demzufolge ist als Abschätzung zur sicheren Seite die Berücksichtigung der Kurzschlusspositionen zwischen Abgangsfeld und Leitung auslegungsrelevant. Somit ist zusammenfassend festzuhalten, dass auch diese auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen bereits durch die auslegungsrelevanten Kurzschlusspositionen der Abgangsfelder berücksichtigt werden.

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung der auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und Kurzschlusspositionen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen. Dazu wurde eine Vielzahl an transienten Kurzschlussstromberechnungen für Variationen von Kurzschlussarten und Kurzschlusspositionen durchgeführt.

Für den asymmetrischen Monopol wurden zwei auslegungsrelevante Kurzschlussarten ermittelt. Diese sind der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung und der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung. Für den symmetrischen Monopol hat sich der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung als auslegungsrelevante Kurzschlussarten herausgestellt.

Hinsichtlich der relevanten Kurzschlusspositionen hat sich herausgestellt, dass die Betrachtung von Kurzschlüssen am Eingang und am Ausgang von Abgangsfeldern ausreicht, um die auslegungsrelevanten Kurzschlussströme und damit die maximalen Belastungen zu ermitteln.

Zusammenfassen ist festzuhalten, dass für die Ermittlung der maximalen Belastungen von stromführenden Betriebsmitteln für die Netzplanung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen die Berechnung der Kurzschlussströme für die auslegungsrelevanten Kurzschlussarten und -positionen ausreicht.

6 Danksagung

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ03SF0488), Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN)

7 Literatur

- [1] BOEKE, U.; WEIß, R.; MAUDER, A. et al.:
White Paper: Efficiency Advantage Efficiency Advantages of ± 380 V DC Grids in Comparison with in Comparison with 230 V/400 V AC Grids.
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG:
Der Forschungscampus Flexible Elektrische Netze.
- [3] BALZER, G.; NELLES, D.; TUTTAS, C. (2009):
Kurzschlussstromberechnung nach IEC und DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, 2, VDE Verlag GmbH, 2009.
- [4] PRIEBE, J.; WEHBRING, N.; MOSER, A.:
Planning and Design of Medium Voltage DC Grids– An Overview
2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2018.
- [5] BLEILEVENS, R.; MOSER, A.:
Identification of Required Converter Models for a Simplified Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids
54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2019.
- [6] LILJESTRAND, L.; BACKMAN, M.; JONSSON, L. et al.:
Medium voltage DC vacuum circuit breaker
3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2015.
- [7] BUCHER, M. K. (2014):
Transient Fault Currents in HVDC VSC Networks During Pole-to-Ground Faults
Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) 2014.
- [8] BLEILEVENS, R.; PRIEBE, J.; WEHBRING, N.; MOSER, A.:
Reliability Analysis of DC Distribution Grids
54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2019.
- [9] WASSERRAB, A. (2016):
Kurzschlussstromberechnung in Gleichstromnetzen der elektrischen Leistungsübertragung Dissertation, Technische Universität Darmstadt 2016.
- [10] KATZIER, H. (2015):
Elektrische Kabel und Leitungen, Erste Auflage, Leuze Verlag, 2015.

- [11] PFENDLER, A.; SACIAK, A.; HANSON, J.; BALZER, G.:
Fault Location Dependency of Short-Circuit Currents in MMC based Meshed HVDC Cable Systems
2019 IEEE Milan PowerTech,