

Einbindung von Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter in das Überlagerungsverfahren zur Kurzschlussstromberechnung

N. Schäkel , L. Hofmann

In diesem Aufsatz wird eine Erweiterung des Überlagerungsverfahrens vorgestellt, um das spannungsabhängige Fault Ride Through-Verhalten von Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter zur Berechnung des betriebspunktabhängigen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms zu berücksichtigen. Zudem werden die physikalischen Grenzen des in den Technischen Anschlussregeln in Deutschland geforderten Kurzschlussstrombeitrags aufgezeigt. In dem entwickelten iterativen Kurzschlussstromberechnungsverfahren führt das Überschreiten der physikalischen Grenzen durch den Kurzschlussstrombeitrag der Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter zu Konvergenzproblemen. Zur Identifikation der betroffenen Anlagen werden die zulässigen bzw. unzulässigen Betriebspunkte in Abhängigkeit von der Kurzschlussspannung hergeleitet. Eine exemplarische Kurzschlussstromberechnung zeigt den Einfluss des Vorfehlerzustandes der Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter sowie die Auswirkungen einer Wirkstromspeisung im Kurzschlusszustand auf den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom.

Schlüsselwörter: Anfangs-Kurzschlusswechselstrom; Fault Ride Through; Kurzschlussstromberechnung; Überlagerungsverfahren; Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter

Integrating power plants with a full-scale converter into the superposition method for short circuit current calculations.

This article presents an expansion of the superposition method for short circuit current calculations to take the voltage-dependent fault ride through behavior of power plants with a full-scale converter into account. Furthermore, it shows the physical limits of the short circuit current contribution to the grid required by the German Technical Connection Rules. Exceeding these physical limits through the short circuit current contribution of power plants with a full-scale converter leads to convergence problems of the developed iterative short circuit current calculation method. In order to identify the power plants with an impermissible short circuit contribution, the permissible operating points depending on the short circuit voltage are derived. An illustrative short circuit current calculation shows the influence of the pre-fault load flow as well as the effects of an active current feed-in during the short circuit on the initial short circuit current.

Keywords: initial short circuit current; fault ride through; short circuit current calculation; superposition method; full-scale converter

Eingegangen am 30. Juli 2021, angenommen am 13. September 2021, online publiziert am 28. September 2021
© The Author(s) 2021



1. Einleitung

Die Anforderungen an das Fault Ride Through Verhalten von Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter (Vollumrichteranlagen) bei Spannungseinbrüchen beschreiben in Deutschland die technischen Regeln für den Anschluss von Erzeugungsanlagen [1–3]. Demnach ist in Abhängigkeit vom Spannungseinbruch ein zusätzlicher Blindstrom zur Spannungsstützung einzuspeisen und im Rahmen der verbleibenden Stromtragfähigkeit die Einspeisung des technisch maximal möglichen Wirkstroms vorgeschrieben. Ausgenommen sind Spannungseinbrüche mit Restspannungen kleiner 15 % der Nennspannung, bei denen keine Anforderungen an den Kurzschlussstrombeitrag bestehen.

In der Kurzschlussstromberechnung [4–8] bilden die gängigen Verfahren wie das Überlagerungsverfahren [5] oder das Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle [4, 5] das geforderte Fault Ride Through von Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter für die Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme nur genähert ab [9]. In dem normierten Verfahren mit der Ersatz-

spannungsquelle an der Kurzschlussstelle der DIN EN 60909-0 [4] werden die Anforderungen zwecks einer betriebspunktunabhängigen Berechnung vernachlässigt. Für die Berechnung des maximalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms werden die Vollumrichteranlagen mit ihrer betragsmäßig maximalen Kurzschlussstromspeisung berücksichtigt und für die Abschätzung des minimalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms vollständig vernachlässigt. Mit diesen Vereinfachungen ermöglicht die normierte Berechnung eine Abschätzung des maximalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms auf der sicheren Seite [5, 10]. Die Vernachlässigung der Vollumrichteranlagen bei der Berechnung des minimalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms, der zur Auswahl des Netzschutzes dient, kann jedoch zu einer Überschätzung führen [9].

Schäkel, Nils, Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, Deutschland (E-Mail: schaekel@ifes.uni-hannover.de); **Hofmann, Lutz**, Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Das normierte Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle entspringt dem Überlagerungsverfahren [5]. Bislang ist jedoch in der einschlägigen Fachliteratur [4–7] keine Einbindung von Vollumrichteranlagen in das Überlagerungsverfahren beschrieben, die das Kurzschlussverhalten gemäß der in Deutschland gültigen technischen Anschlussregeln exakt berücksichtigt [9]. Die exakte Einbindung von Vollumrichteranlagen in das Überlagerungsverfahren wird in diesem Aufsatz allgemeingültig beschrieben.

Einführend wird in Abschn. 2 der Kurzschlusszustand mit Vollumrichteranlagen als Überlagerung des stationären Vorfehlerzustandes mit dem Änderungszustand dargestellt. In Abschn. 3 zeigt die erneute Anwendung des Überlagerungsprinzips auf den Änderungszustand, dass zwischen der Überlagerung zur separaten Betrachtung der Strom- und Spannungsquellen gemäß DIN EN 60909-0 und der Überlagerung zur Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms mit und ohne Vollumrichteranlagen zu unterscheiden ist. Für die exakte Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms ohne Vollumrichteranlagen ist im Änderungszustand die Trennung der Vollumrichteranlagen vom Netz und die damit verbundene Stromänderung zu berücksichtigen. In Abschn. 4 wird das iterative Verfahren zur exakten Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms unter Berücksichtigung des spannungsabhängigen Kurzschlussstrombeitrags der Vollumrichteranlagen vorgestellt. Aufgrund der Spannungsabhängigkeit des Kurzschlussstrombeitrags der Vollumrichteranlagen ist eine iterative Berechnung erforderlich. Abschnitt 5 veranschaulicht mögliche Konvergenzprobleme des Algorithmus, die zum Beispiel durch eine unausgeglichene Wirkleistungsbilanz im Netz aufgrund einer physikalisch unzulässigen Blindstromeinspeisung der Vollumrichteranlagen hervorgerufen werden können. Die physikalischen Grenzen der Blindstromeinspeisung, die in gleicherweise für die Wirkstromeinspeisung beschrieben werden können, werden hergeleitet. In diesem Zusammenhang wird Bezug zu dem Verlust des Synchronismus bzw. der Stabilität der Vollumrichteranlagen genommen. Die Leistungsbilanz kann bspw. durch gezieltes Abschalten einzelner Anlagen wiederhergestellt werden. Die abzuschaltenden Anlagen können mit Hilfe der in Abschn. 6 hergeleiteten zulässigen Betriebspunkte der Vollumrichteranlagen in Abhängigkeit von der Kurzschlussspannung ohne Vollumrichteranlagen identifiziert werden. In Abschn. 7 zeigt eine exemplarische Kurzschlussstromberechnung den Einfluss des Vorfehlerzustandes der Vollumrichteranlagen sowie die Auswirkungen einer Wirkstromeinspeisung im Kurzschlusszustand auf den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom. Sowohl eine Wirkstromeinspeisung im Kurzschlusszustand als auch der eingespeiste Strom der Vollumrichteranlagen im Vorfehlerzustand kann den resultierenden Anfangs-Kurzschlusswechselstrom senken. Der Aufsatz schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschn. 8.

2. Der Kurzschlusszustand als Überlagerung des Vorfehlerzustandes mit dem Änderungszustand

Das für die Kurzschlussstromberechnung angewandte Überlagerungsverfahren basiert auf der Darstellung des Kurzschlusszustandes (k) als Überlagerung des Vorfehlerzustandes (0) mit dem Änderungszustand (Δ) [5, 7]. Die jeweiligen Zustände sind in Abb. 1 dargestellt und werden in den nachstehenden Abschnitten erläutert. Es wird ein satter dreipoliger Kurzschluss am Knoten i angenommen. Der Index i steht im Weiteren immer für den Kurzschlussknoten. Die Vektoren zur Beschreibung der elektrischen Größen im Kurzschluss- und Änderungszustand werden zum Hinweis auf den jeweiligen Kurzschlussknoten mit einem zusätzlichen tiefgestellten i indiziert, um die jeweiligen Vektoren bei der Matrizenrechnung in Abschn. 4 eindeutig zuzuweisen. Das i -te Element dieser Vektoren beschreibt die elektrische Größe an der Kurzschlussstelle.

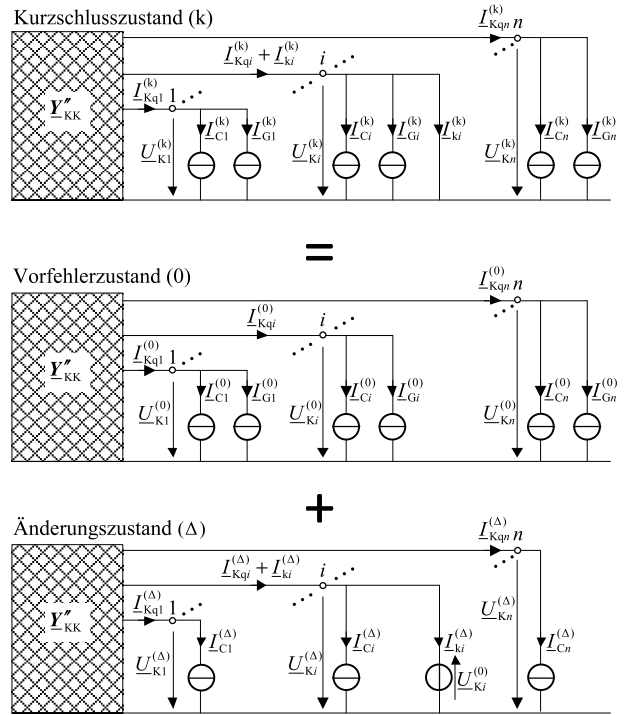


Abb. 1. Kurzschlusszustand (k) als Überlagerung des stationären Vorfehlerzustandes (0) mit dem Änderungszustand (Δ)

Unter der Voraussetzung eines linearen Systems gilt für den Vektor der Knotenspannungen $\underline{u}_{Ki}^{(k)}$, der Quellenströme an den Knoten $\underline{i}_{Kqi}^{(k)}$ und der Kurzschlussströme $\underline{i}_{Ki}^{(k)}$ an allen Orten des Netzes:

$$\underline{u}_{Ki}^{(k)} = \underline{u}_{Ki}^{(0)} + \underline{u}_{Ki}^{(\Delta)} \tag{1}$$

$$\underline{i}_{Kqi}^{(k)} = \underline{i}_{Kqi}^{(0)} + \underline{i}_{Kqi}^{(\Delta)} \tag{2}$$

$$\underline{i}_{Ki}^{(k)} = \underline{i}_{Ki}^{(0)} + \underline{i}_{Ki}^{(\Delta)} \tag{3}$$

Ungeachtet des jeweiligen Zustandes kann der überwiegende Anteil der Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter (engl. full scale converter, C) wie gesteuerte Stromquellen mit unendlich großer Parallelimpedanz modelliert werden. Die Anlagen werden in der Ersatzschaltung in Abb. 1 als Stromquellen mit dem Strom \underline{i}_{Cj} berücksichtigt [4, 5]. Die Ströme \underline{i}_{Gj} beschreiben die Quellenströme der Stromquellenersatzschaltungen der aktiven Betriebsmittel wie Generatoren, Motoren oder Ersatznetze und werden mit einem tiefgestellten G indiziert. Die Innenimpedanzen dieser Betriebsmittel sind in der erweiterten Knotenadmittanzmatrix \underline{Y}''_{KK} des Netzes berücksichtigt. Der Strom $\underline{i}_{Gj}^{(\Delta)}$ im Änderungszustand ist gleich null und entfällt daher (vgl. Abschn. 2.3).

2.1 Kurzschlusszustand

Das kurzschlussbehaftete Netz ist gegenüber dem Vorfehlerzustand um einen Kurzschlusszweig am Knoten i erweitert worden. Zur Kennzeichnung des Kurzschlussknotens im Netzgleichungssystem werden die Strom- und Spannungsvektoren mit einem zusätzlichen tiefgestellten i gekennzeichnet. Der im Kurzschlusszweig fließende Strom wird durch ein tiefgestelltes k indiziert. Für das Netzgleichungssystem gilt:

$$\underline{Y}''_{KK} \underline{u}_{Ki}^{(k)} = \underline{i}_{Kqi}^{(k)} + \underline{i}_{Ki}^{(k)} = \underline{i}_{Ci}^{(k)} + \underline{i}_{Gi}^{(k)} + \underline{i}_{Ki}^{(k)} \tag{4}$$

Das i -te Element des Knotenspannungsvektors $\underline{u}_{K_i}^{(k)}$ beschreibt die Spannung $\underline{u}_{K_i}^{(k)}$ am Kurzschlussknoten i und ist gleich null. Der Quellenstromvektor $\underline{i}_{Kq_i}^{(k)}$ auf der rechten Gleichungsseite umfasst die Quellenströme der Vollumrichteranlagen $\underline{i}_{C_i}^{(k)}$ und der übrigen aktiven Betriebsmittel $\underline{i}_{G_i}^{(k)}$. Die Elemente des Fehlerstromvektors $\underline{i}_{ki}^{(k)}$ sind mit Ausnahme des i -ten Elementes gleich null.

$$\underline{i}_{ki}^{(k)} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \underline{i}_{ki}^{(k)} \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (5)$$

2.2 Stationärer Vorfehlerzustand

Der stationäre Zustand vor dem Kurzschluss beschreibt die Ströme und Spannungen unmittelbar vor Kurzschlusseintritt. Die Knotenspannungen können bspw. mit Hilfe einer Leistungsflussberechnung wie dem Stromiterationsverfahren oder dem Newton-Raphson-Verfahren [7] ermittelt werden. Für das Netzgleichungssystem im stationären Vorfehlerzustand gilt:

$$\underline{Y}_{KK}'' \underline{u}_K^{(0)} = \underline{i}_K^{(0)} = \underline{i}_C^{(0)} + \underline{i}_G^{(0)} \quad (6)$$

2.3 Änderungszustand

Es wird angenommen, dass sich die Quellenströme der Generatoren, Motoren und Ersatznetze beim Übergang vom stationären zum subtransienten Zustand nicht ändern ($\underline{i}_{G_i}^{(k)} = \underline{i}_G^{(0)}$). Ihre Beiträge entfallen deshalb im Änderungszustand [5]. Das Netzgleichungssystem für den Änderungszustand lautet:

$$\underline{Y}_{KK}'' \underline{u}_{K_i}^{(\Delta)} = \underline{i}_{Kq_i}^{(\Delta)} + \underline{i}_{C_i}^{(\Delta)} = \underline{i}_{C_i}^{(\Delta)} + \underline{i}_{ki}^{(\Delta)} \quad (7)$$

Das i -te Element $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ des Spannungsvektors $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ beschreibt die Spannungsänderung am Kurzschlussknoten i . Diese Spannungsänderung entspricht der negativen Betriebsspannung unmittelbar vor Kurzschlusseintritt und wird in Abb. 1 durch eine Spannungsquelle mit umgekehrten Zählpfeil abgebildet.

$$\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)} = \underline{u}_{K_i}^{(k)} - \underline{u}_{K_i}^{(0)} = 0 - \underline{u}_{K_i}^{(0)} = -\underline{u}_{K_i}^{(0)}. \quad (8)$$

Der Vektor $\underline{i}_{C_i}^{(\Delta)}$ beschreibt die Stromänderungen der Vollumrichteranlagen, welche an den Knoten ohne angeschlossene Vollumrichteranlagen gleich null sind.

Der Vektor $\underline{i}_{ki}^{(\Delta)}$ beschreibt die Stromänderung im Kurzschlusszweig. Die Elemente sind mit Ausnahme des i -ten Elementes gleich null.

$$\underline{i}_{ki}^{(\Delta)} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \underline{i}_{ki}^{(\Delta)} \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (9)$$

Die Stromänderung $\underline{i}_{ki}^{(\Delta)}$ im Kurzschlusszweig entspricht dem Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{i}_{ki}^{(k)}$, da im Vorfehlerzustand kein Kurzschlusszweig existiert und daher der Strom $\underline{i}_{ki}^{(0)}$ gleich null ist.

$$\underline{i}_{ki}^{(\Delta)} = \underline{i}_{ki}^{(k)} - \underline{i}_{ki}^{(0)} = \underline{i}_{ki}^{(k)} - \mathbf{0} = \underline{i}_{ki}^{(k)} \quad (10)$$

Zur Berechnung des resultierenden Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $\underline{i}_{ki}^{(k)}$ wird Gl. (7) zunächst nach dem Spannungsvektor $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ umgestellt:

$$\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)} = (\underline{Y}_{KK}'')^{-1} (\underline{i}_{C_i}^{(\Delta)} + \underline{i}_{ki}^{(\Delta)}) = \underline{Z}_{KK}'' (\underline{i}_{C_i}^{(\Delta)} + \underline{i}_{ki}^{(\Delta)}) \quad (11)$$

Einsetzen von Gl. (10) in Gl. (11) sowie Auflösen nach der Spannungsänderung $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ am Kurzschlussknoten liefert:

$$\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)} = \underline{z}_{ii}'' \underline{i}_{ki}^{(k)} + \sum_{j=1}^n \underline{z}_{ij}'' \underline{i}_{C_j}^{(\Delta)} \quad (12)$$

Aus Gl. (12) folgt für den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{i}_{ki}^{(k)}$ [5]:

$$\underline{i}_{ki}^{(k)} = \frac{\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}}{\underline{z}_{ii}''} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} \underline{i}_{C_j}^{(\Delta)} \quad (13)$$

3. Anwendung des Überlagerungsprinzips auf den Änderungszustand

Basierend auf Gl. (13) ist es naheliegend, den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{i}_{ki}^{(k)}$ aus der Überlagerung des Änderungszustandes (Δ oC) ohne die Stromänderungen der Vollumrichteranlagen mit dem Änderungszustand (Δ C) durch die Stromänderungen der Vollumrichteranlagen zu bestimmen (siehe Abb. 2 links), wie dies auch in der Kurzschlussnorm DIN EN 60909-0 der Fall ist [4, 5].

$$\underline{i}_{ki}^{(k)} = \frac{\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}}{\underline{z}_{ii}''} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} \underline{i}_{C_j}^{(\Delta)} = \underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{oC})} + \underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{C})} \quad (14)$$

Diese Überlagerung ermöglicht eine separate Betrachtung der Strom- und Spannungsquellen im Änderungszustand. Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{oC})}$ ohne Stromänderungen der Vollumrichteranlagen ist ausschließlich abhängig von der Spannungsänderung $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ an der Kurzschlussstelle. Der Beitrag der Stromänderungen $\underline{i}_{C_j}^{(\Delta)}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom wird durch $\underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{C})}$ berücksichtigt. Die so berechneten Teilströme $\underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{oC})}$ und $\underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{C})}$ sind jedoch nur für den Änderungszustand gültig.

Die Zerlegung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $\underline{i}_{ki}^{(k)}$ in den auch für den Kurzschlusszustand gültigen Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{i}_{ki}^{(\text{koC})}$ ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen (bei einer Trennung sämtlicher Vollumrichteranlagen im Kurzschlussfall) und dem Kurzschlussstrombeitrag $\underline{i}_{ki}^{(\text{kC})}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (siehe Abb. 2 rechts) wird im Weiteren beschrieben. Grundsätzlich gilt für die Stromänderungen $\underline{i}_{C_j}^{(\Delta)}$ der Vollumrichteranlagen:

$$\underline{i}_{C_j}^{(\Delta)} = \underline{i}_{C_j}^{(k)} - \underline{i}_{C_j}^{(0)} \quad (15)$$

Mit Gl. (13) und der Spannungsänderung $\underline{u}_{K_i}^{(\Delta)}$ am Kurzschlussknoten nach Gl. (8) folgt für den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom:

$$\begin{aligned} \underline{i}_{ki}^{(k)} &= \frac{-\underline{u}_{K_i}^{(0)}}{\underline{z}_{ii}''} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} (\underline{i}_{C_j}^{(k)} - \underline{i}_{C_j}^{(0)}) \\ &= \frac{-\underline{u}_{K_i}^{(0)}}{\underline{z}_{ii}''} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} (-\underline{i}_{C_j}^{(0)}) + \left(-\sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} \underline{i}_{C_j}^{(k)} \right) \\ &= \underline{i}_{ki}^{(\text{koC})} + \underline{i}_{ki}^{(\text{kC})} \end{aligned} \quad (16)$$

Für die Berechnung von $\underline{i}_{ki}^{(\text{koC})}$ ist entsprechend Gl. (16) der negative Betriebsstrom der Vollumrichteranlagen zu berücksichtigen. Der Strom $\underline{i}_{ki}^{(\text{koC})}$ entspricht der Stromänderung $\underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{koC})}$ an der Kurzschlussstelle im Änderungszustand ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen (Δ koC). Es gilt:

$$\begin{aligned} \underline{i}_{ki}^{(\text{koC})} &= \underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{koC})} \\ &= \frac{-\underline{u}_{K_i}^{(0)}}{\underline{z}_{ii}''} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} (-\underline{i}_{C_j}^{(0)}) \\ &= \underline{i}_{ki}^{(\Delta\text{oC})} - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} (-\underline{i}_{C_j}^{(0)}) \end{aligned} \quad (17)$$

Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{I}_{ki}^{(koC)}$ ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen unterscheidet sich vom Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{I}_{ki}^{(\Delta oC)}$ ohne Stromänderungen der Vollumrichteranlagen um die summierten Ströme $\underline{I}_{Cj}^{(0)}$ im Vorfehlerzustand.

Der Kurzschlussstrombeitrag $\underline{I}_{ki}^{(kC)}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom berücksichtigt die Kurzschlussstromspeisung der Vollumrichteranlagen während des Kurzschlusses.

$$\underline{I}_{ki}^{(kC)} = \underline{I}_{ki}^{(\Delta kC)} = - \sum_{j=1}^n \frac{\underline{z}_{ij}''}{\underline{z}_{ii}''} \underline{I}_{Cj}^{(k)} \quad (18)$$

Die Wirkung von $\underline{I}_{ki}^{(kC)}$ wird im Änderungszustand durch Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen (ΔkC) beschrieben.

Durch diese Zerlegung wird eine exakte iterative Berücksichtigung des spannungsabhängigen Kurzschlussstrombeitrags $\underline{I}_{ki}^{(kC)}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $\underline{I}_{ki}^{(k)}$ ermöglicht. Zudem kann die Wirkung der Kurzschlussstrombeiträge auf die Kurzschlussspannungen explizit berechnet werden.

4. Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms

Die nachfolgend dargestellte Berechnung des resultierenden Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $\underline{I}_{ki}^{(k)}$ basiert auf der Betrachtung des Änderungszustandes nach Abb. 2 rechts, in dem die Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms ohne Vollumrichteranlagen $\underline{I}_{ki}^{(koC)}$ sowie der Beitrag $\underline{I}_{ki}^{(kC)}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom explizit dargestellt sind. Der Ansatz ermöglicht die exakte Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $\underline{I}_{ki}^{(koC)}$ ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen bereits im ersten Schritt der Initialisierung (vgl. Abschn. 4.1). Der spannungsabhängige Beitrag $\underline{I}_{ki}^{(kC)}$ der Vollumrichteranlagen zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom wird anschließend iterativ berechnet (vgl. Abschn. 4.2). Für die Berechnungen ist die Kenntnis aller Knotenspannungen $\underline{U}_{Kj}^{(0)}$ sowie der Ströme $\underline{I}_{Cj}^{(0)}$ aller Vollumrichteranlagen unmittelbar vor Kurzschlusseintritt erforderlich.

Abbildung 3 zeigt den Algorithmus zur gleichzeitigen iterativen Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme an allen Knoten auf Basis der Matrixgleichungen. Matrizen werden fett und in Großbuchstaben dargestellt. Die elementweise Matrixmultiplikation und -Division ist im Anhang beschrieben und wird durch die Symbole „/“ und „o“ gekennzeichnet. Das Symbol „diag“ erweitert einen Vektor (fett und Kleinbuchstaben) auf eine Diagonalmatrix bzw. entnimmt einer Matrix die Diagonalelemente und fasst sie in einem Vektor zusammen.

Auf eine explizite Kennzeichnung des jeweiligen Iterationsschrittes ν im oberen Index der Vektoren und Matrizen wird aus Darstellungsgründen weitestgehend verzichtet.

4.1 Initialisierung

Initial wird die Matrix $\underline{I}_k^{(koC)}$ mit den Anfangs-Kurzschlusswechselströmen ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen auf Basis von Gl. (17) berechnet.

$$\underline{I}_k^{(koC)} = \text{diag} \left(-\underline{u}_k^{(0)} \right) \underline{Y}_K'' + \text{diag} \left(\underline{Y}_K'' \underline{Z}_{KK}'' \underline{I}_C^{(0)} \right) \quad (19)$$

$$\text{mit } \underline{Y}_K'' = \begin{bmatrix} 1/\underline{z}_{11}'' & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\underline{z}_{22}'' & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\underline{z}_{nn}'' \end{bmatrix} \text{ und } \underline{I}_C^{(0)} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{C1}^{(0)} \\ \underline{I}_{C2}^{(0)} \\ \vdots \\ \underline{I}_{Cn}^{(0)} \end{bmatrix}$$

Die Matrix $\underline{I}_k^{(koC)}$ besteht aus den Vektoren $\underline{i}_{ki}^{(koC)}$, welche die Anfangs-Kurzschlusswechselströme $\underline{I}_{ki}^{(koC)}$ ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen in dem Kurzschlusszweig des jeweiligen kurzschlussbehafteten Knotens beinhalten.

$$\underline{I}_k^{(koC)} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{k1}^{(koC)} & \underline{i}_{k2}^{(koC)} & \dots & \underline{i}_{kn}^{(koC)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{k1}^{(koC)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{i}_{k2}^{(koC)} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \underline{i}_{kn}^{(koC)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Die spannungsabhängigen Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen werden auf Basis des in Abschn. 4.2 beschriebenen Algorithmus (siehe auch Abb. 3) iterativ berechnet und durch die Matrix $\underline{I}_C^{(k)}$ dargestellt:

$$\underline{I}_C^{(k)} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{C1}^{(k)} & \underline{i}_{C2}^{(k)} & \dots & \underline{i}_{Cn}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Der Vektor $\underline{i}_{Ci}^{(k)}$ beschreibt die Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen bei einem Kurzschluss am Knoten i . Für die Initialisierung zum Start der iterativen Berechnung werden die Kurzschlussstrombeiträge $\underline{I}_C^{(k)}$ zunächst den Betriebsströmen vor dem Kurzschluss gleichgesetzt.

$$\underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_C^{(0)} \quad (22)$$

Eine Initialisierung zu null würde eine Trennung der Vollumrichteranlagen beschreiben und kann im Vergleich zu einer Initialisierung mit den Betriebsströmen (Gl (22)) zu abweichenden Ergebnissen führen: Unterschiedliche Startwert für die Kurzschlussstrombeiträge $\underline{I}_C^{(k)}$ führen zu unterschiedlichen Kurzschlussspannungen während der ersten Iteration des Algorithmus. Da der Kurzschlussstrombeitrag und auch der Verbleib der Vollumrichteranlagen am Netz spannungsabhängig ist, können unterschiedliche Startwerte zu einer Vernachlässigung einzelner Anlagen im weiteren Verlauf der iterativen Berechnung führen. Aufgrund möglicher Abweichungen der Kurzschlussstrombeiträge in Abhängigkeit von der Initialisierung sind gegebenenfalls Vergleichsrechnungen mit unterschiedlicher Initialisierung durchzuführen.

4.2 Iterative Berechnung

Die iterative Berechnung der spannungsabhängigen Kurzschlussstrombeiträge beginnt mit der Bestimmung der Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen $\underline{I}_k^{(kC)}$ zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom an der Kurzschlussstelle.

$$\underline{I}_k^{(kC)} = -\text{diag} \left(\text{diag} \left(\underline{Y}_K'' \underline{Z}_{KK}'' \underline{I}_C^{(k)} \right) \right) \quad (23)$$

Die Matrix $\underline{I}_k^{(kC)}$ ist analog zur Matrix $\underline{I}_k^{(koC)}$ aufgebaut:

$$\underline{I}_k^{(kC)} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{k1}^{(kC)} & \underline{i}_{k2}^{(kC)} & \dots & \underline{i}_{kn}^{(kC)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{k1}^{(kC)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{i}_{k2}^{(kC)} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \underline{i}_{kn}^{(kC)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

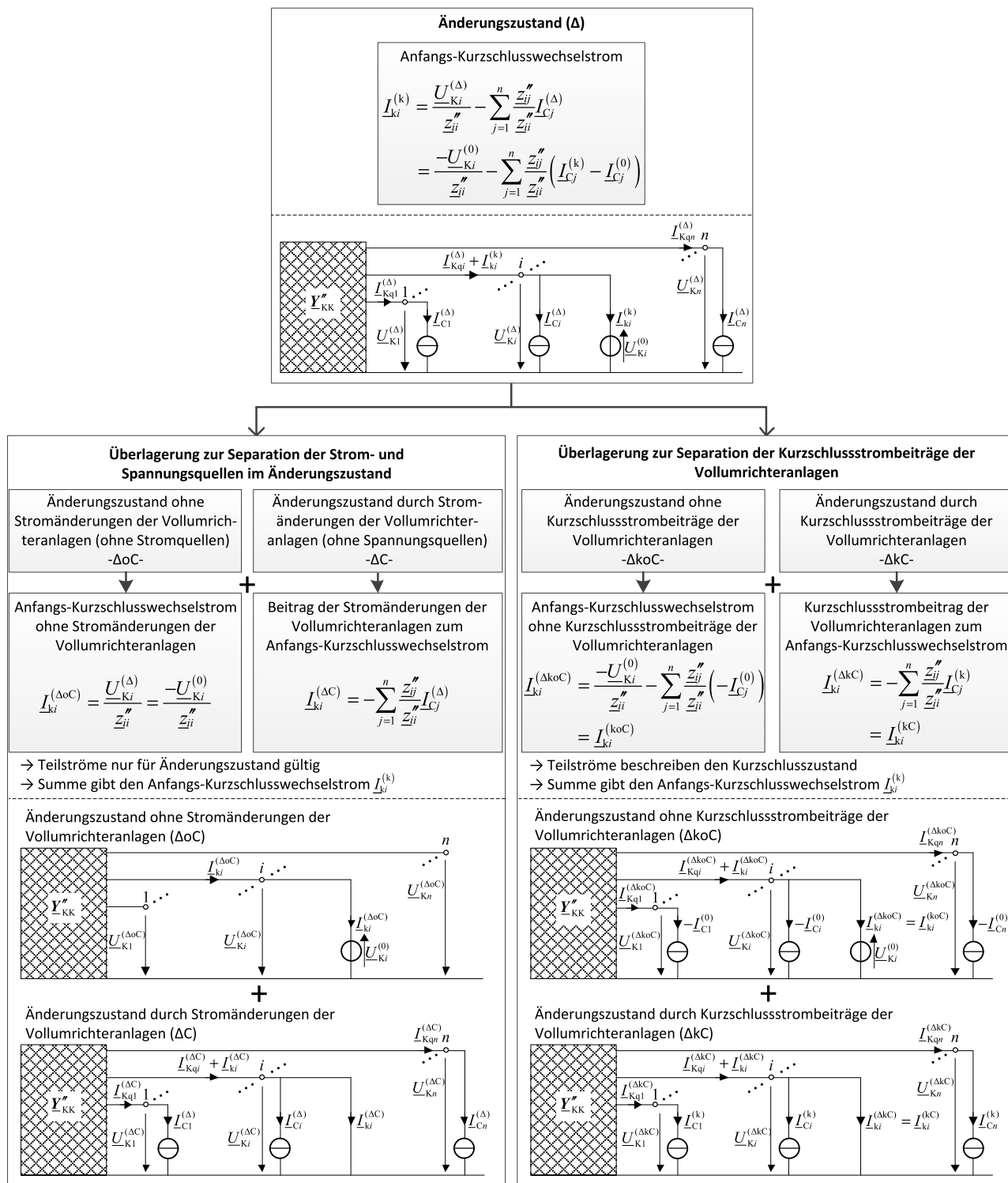


Abb. 2. Anwendung des Überlagerungsverfahrens auf den Änderungszustand zur Separation der Strom- und Spannungsquellen (links) und zur Separation der Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen (rechts)

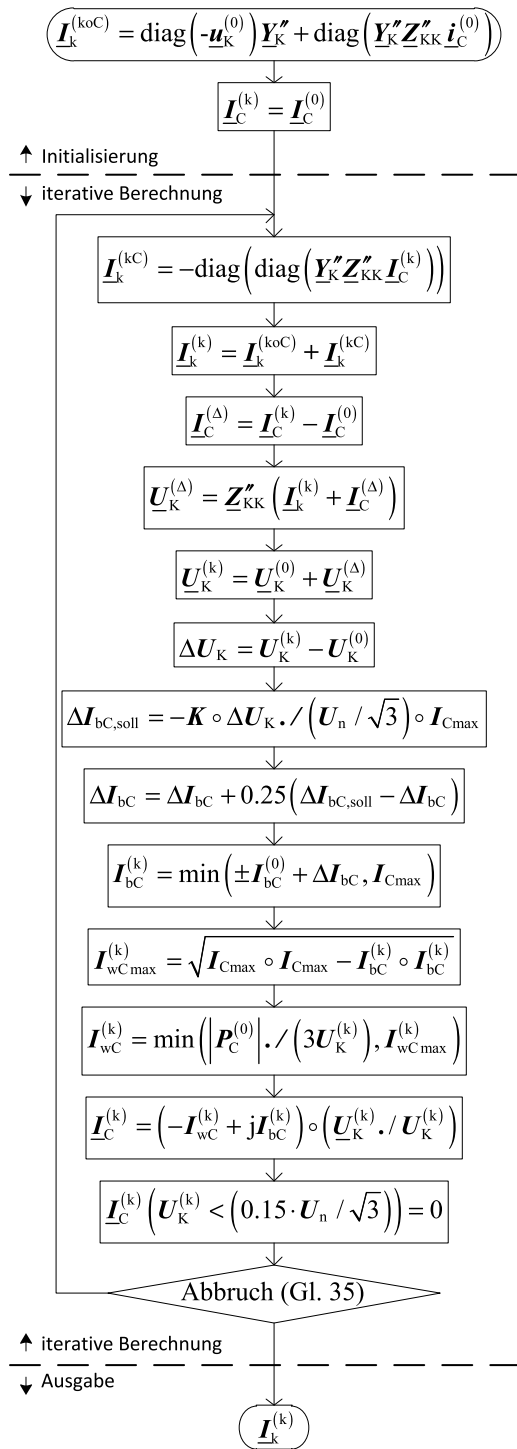


Abb. 3. Iteratives Verfahren zur Kurzschlussstromberechnung in Netzen mit Vollumrichteranlagen

Anschließend werden entsprechend Gl. (15) die Stromänderungen $I_C^{(\Delta)}$ der Vollumrichteranlagen bestimmt. Anhand der Stromänderungen an den jeweiligen Knoten werden die Spannungsänderungen gemäß Gl. (11) berechnet:

$$U_K^{(\Delta)} = Z_{KK} (I_k^{(k)} + I_C^{(\Delta)}) \quad (25)$$

Die Überlagerung der Spannungsänderungen $U_K^{(\Delta)}$ mit den Spannungen $U_K^{(0)}$ im Vorfehlerzustand liefert die Knotenspannungen im Kurzschlusszustand.

$$U_K^{(k)} = U_K^{(0)} + U_K^{(\Delta)} \quad (26)$$

Die für die Bestimmung der zusätzlichen Blindstromeinspeisung während des Fault Ride Through notwendigen absoluten Spannungsänderungen ΔU_K unterscheiden sich betragsmäßig von den Spannungsänderungen $U_K^{(\Delta)}$ ($\Delta U_K \neq U_K^{(\Delta)}$).

$$\Delta U_K = U_K^{(k)} - U_K^{(0)} \quad (27)$$

Die Berechnung der Kurzschlussstrombeiträge $I_C^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen erfolgt unter Annahme einer schnellen Einschwingzeit bzw. der Vernachlässigung von Verzögerungen hervorgerufen durch den Regelkreis und die Synchronisationstechnik der Vollumrichteranlagen [11–13]. Eine genaue Analyse und mathematische Beschreibung der geforderten Kurzschlussströme sowie der Stromänderungen der Anlagen gibt [9]. Die Kurzschlussstrombeiträge $I_C^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen umfassen auch die zusätzlichen Blindströme ΔI_{bc} [1–3], die während des Fault Ride Through zur Spannungsstützung durch die Vollumrichteranlagen eingespeist werden müssen. Zur Vermeidung von Konvergenzproblemen (vgl. Abschn. 5.2) werden diese mittels ihrer Sollwerte $\Delta I_{bc,soll}$ (Gl. (28)) schrittweise mit Gl. (29) im Verlauf der iterativen Berechnung eingestellt. Die Sollwerte $\Delta I_{bc,soll}$ werden in Abhängigkeit von den absoluten Spannungsänderungen ΔU_K in Gl. (27) durch elementweise Matrizenmultiplikation bzw. Division (vgl. Abschn. 9.1 und 9.2) ermittelt.

$$\Delta I_{bc,soll} = -K \circ \Delta U_K \cdot / (U_n / \sqrt{3}) \circ I_{Cmax} \quad (28)$$

$$\Delta I_{bc} = \Delta I_{bc} + 0.25 (\Delta I_{bc,soll} - \Delta I_{bc}) \quad (29)$$

Die Matrix K enthält die k -Faktoren entsprechend der hinterlegten Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik der Vollumrichteranlagen [1–3], die Matrix I_{Cmax} beinhaltet die jeweiligen Maximalströme der Vollumrichteranlagen und die Matrix U_n die jeweiligen Netzspannungen. Die Matrizen bestehen jeweils aus n identischen Spaltenvektoren.

Die Blindströme $I_{bc}^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen im Kurzschlusszustand folgen aus der Überlagerung der Blindströme aus dem Vorfehlerzustand $\pm I_{bc}^{(0)}$ (Vorzeichen abhängig vom Betriebszustand im Vorfehlerzustand) mit den zusätzlichen Blindströmen ΔI_{bc} . Die Blindströme $I_{bc}^{(k)}$ werden auf die Maximalströme der Vollumrichteranlagen I_{Cmax} begrenzt.

$$I_{bc}^{(k)} = \min(\pm I_{bc}^{(0)} + \Delta I_{bc}, I_{Cmax}) \quad (30)$$

Die verbleibenden Stromtragfähigkeiten $I_{wCmax}^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen und die Wirkleistungseinspeisungen $P_C^{(b)}$ im Vorfehlerzustand bestimmen die einzuspeisenden technisch maximal möglichen Wirkströme $I_{wC}^{(k)}$ [1–3].

$$I_{wCmax}^{(k)} = \sqrt{I_{Cmax} \circ I_{Cmax} - I_{bc}^{(k)} \circ I_{bc}^{(k)}} \quad (31)$$

$$I_{wC}^{(k)} = \min(|P_C^{(0)}| \cdot / (3U_K^{(k)}), I_{wCmax}^{(k)}) \quad (32)$$

Es folgt die Berechnung der resultierenden Kurzschlussströme $\underline{I}_C^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen.

$$\underline{I}_C^{(k)} = \left(-\underline{I}_{wC}^{(k)} + j\underline{I}_{bC}^{(k)} \right) \circ \left(\underline{U}_K^{(k)} \cdot \underline{U}_K^{(k)} \right) \quad (33)$$

Die elementweise Division der komplexen Kurzschlussspannung durch die Beträge der Kurzschlussspannungen $\underline{U}_K^{(k)}$ liefert die Phasenlagen der Kurzschlussspannungen. Positive Vorzeichen der Wirk- $\underline{I}_{wC}^{(k)}$ und Blindströme $\underline{I}_{bC}^{(k)}$ führen zu einem generatorischen bzw. kapazitiven Betriebsverhalten der Vollumrichteranlagen in Bezug auf die Knotenspannung im Kurzschlusszustand.

Für Kurzschlussspannungen kleiner 15 % der Netznominalspannung ($\underline{U}_K^{(k)} < 0,15 \cdot \underline{U}_N$) bestehen keine Anforderungen an eine Kurzschlussstromspeisung [1–3], so dass die Kurzschlussströme an diesen Knoten zu null gesetzt werden. Dies entspricht einer Trennung der Vollumrichteranlagen vom Netz. Alternative Ansätze sind in weiteren Forschungsarbeiten zu untersuchen (siehe Abschn. 8).

$$\underline{I}_C^{(k)} \left(\underline{U}_K^{(k)} < (0,15 \cdot \underline{U}_N / \sqrt{3}) \right) = 0 \quad (34)$$

Der Klammerausdruck ($\underline{U}_K^{(k)} < (0,15 \cdot \underline{U}_N / \sqrt{3})$) liefert die Positionen, an denen die Kurzschlussströme $\underline{I}_C^{(k)}$ zu null gesetzt werden.

Im Verlauf der Iterationen werden die Kurzschlussstrombeiträge $\underline{I}_C^{(k)}$ den sich einstellenden Knotenspannungen $\underline{U}_K^{(k)}$ entsprechend der k -Faktoren angepasst und damit die Spannungsstützung durch die zusätzlichen Blindstromspeisungen $\Delta \underline{I}_{bC}^{(k)}$ berücksichtigt. Sobald die Änderungen aller Kurzschlussströme $\underline{I}_C^{(k)}$ zwischen zwei Iterationsschritten ($\nu-1$) und (ν) unterhalb einer Grenze ε verbleibt, konvergiert der Algorithmus und die resultierenden Anfangs-Kurzschlusswechselströme $\underline{I}_K^{(k)}$ werden ausgegeben.

$$\max \left(\max \left(\left| \underline{I}_C^{(k)(\nu-1)} - \underline{I}_C^{(k)(\nu)} \right| \right) \right) < \varepsilon \quad (35)$$

5. Konvergenzprobleme

Simulationen verschiedener Testnetze und Szenarien zeigen, dass der Algorithmus nicht konvergiert, wenn bspw. die durch den eingespeisten Blindstrom der Vollumrichteranlagen an den ohmschen Übertragungselementen verursachten Wirkverluste nicht durch die übrigen aktiven Betriebsmittel wie Generatoren oder Motoren ausgeglichen werden können. Diese physikalisch unzulässige Blindstromspeisung bei nicht ausreichender Wirkleistungsbereitstellung führt im Verlauf der Iterationen zu rotierenden Strom- und Spannungszeigern. In der Realität führen die in Bezug auf das Wirkleistungsgleichgewicht unzulässigen Betriebszustände der Vollumrichteranlagen zu Frequenzabweichungen des eingespeisten Stroms und damit zum Verlust der Synchronität bzw. des stabilen Netzbetriebs [14, 15]. Der Verlust der Synchronität wird in diesem Zusammenhang auch als Strom-Winkel-Instabilität (engl. current angle instability) bezeichnet [15]. Die beschriebenen Zusammenhänge können in gleicherweise auf eine unzulässige Wirkstromspeisung (technisch maximal möglicher Wirkstrom im Kurzschlusszustand) bei nicht ausreichender Blindleistungsbereitstellung übertragen werden. In Abschn. 5.1 wird die Auswirkung einer unausgeglichenen Wirkleistungsbilanz auf die iterative Kurzschlussstromberechnung beschrieben und die physikalischen Grenzen der Blindstromspeisung hergeleitet.

Eine weitere Ursache für Konvergenzprobleme ist das Springen zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik zwischen zwei Iterationsschritten. Dies ist auf die Wirkung des Sollwerts für den Blindstrom auf die Kurzschlussspannung

am NAP der Vollumrichteranlage zurückzuführen und hat mathematische Gründe. In Abschn. 5.2 wird diese Problematik beschrieben.

5.1 Konvergenzprobleme durch kapazitive Blindstromspeisung

Das Verhalten der Vollumrichteranlagen ist von der Regelstrategie des Umrichters abhängig (z.B. grid supporting, grid forming [16]). Während Anlagen mit grid forming Regelung mit ihrem Spannungsquellenverhalten naturgemäß das Netz stützen, müssen die netzstützenden Eigenschaften beim Stromquellenverhalten (grid supporting) regelungstechnisch eingebracht werden. Anlagen mit grid supporting Regelung speisen bei Spannungseinbrüchen in Abhängigkeit ihres k -Faktors einen kapazitiven Blindstrom in das Netz ein. Kurzschlussnahe Anlagen können hierbei ein vollständig kapazitives Verhalten aufweisen. In Abhängigkeit von der Netzimpedanz sowie den aktiven Betriebsmitteln am Netz ist die Möglichkeit zur Einspeisung eines reglementierten Blindstroms jedoch physikalisch begrenzt. Verbleibt zum Beispiel eine Vollumrichteranlage als einzige Quelle im Netz, so ist die Phasenlage des Kurzschlussstroms allein durch die Netzimpedanz definiert. Der Versuch der Einspeisung eines Kurzschlussstroms mit reglementierter Phasenlage kann daher zum Verlust der Synchronität führen, wenn die Anlagenregelung die Winkeldifferenz zwischen dem Stromsollwert und dem eingespeisten Strom fortlaufend integriert und dadurch die Frequenz ansteigt [15]. Bei der iterativen Kurzschlussstromberechnung führt dies zum Ausbleiben der Konvergenz aufgrund von rotierenden Strom- und Spannungszeigern. Der Effekt wird im Weiteren mit Bezug zum Spannungszeiger der Kurzschlussspannung $\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$ ohne Vollumrichteranlagen beschrieben.

Zunächst wird der Einfluss einer kapazitiven Blindstromspeisung einer Vollumrichteranlage auf die Knotenspannung unter der Annahme eines rein induktiven Netzes in Abschn. 5.1.1 und eines rein ohmschen Netzes in Abschn. 5.1.2 betrachtet. Das Beispiel des induktiven Netzes demonstriert den spannungsstützenden Effekt der Blindstromspeisung. Beim ohmschen Netz sinkt die Spannung mit steigender Blindstromspeisung jedoch ab. Grenzen der kapazitiven Blindstromspeisung werden aufgezeigt. Schließlich wird in Abschn. 5.1.3 für ein ohmsch-induktives Netz gezeigt, dass die reglementierte Blindstromspeisung zu rotierenden Strom- und Spannungszeigern führen kann.

Im Kontrast zu den vorausgegangenen Ausführungen in Abschn. 3 bis 4 wird ausschließlich der Kurzschlusszustand betrachtet. Zudem werden zwecks einer vereinfachten Beschreibung nur eine Vollumrichteranlage und ein Synchrongenerator am Netz berücksichtigt. Die Ausführungen basieren auf dem in Abb. 4 gezeigten Netz mit einer Vollumrichteranlage und einem Generator am Knoten j sowie einem satten dreipoligen Kurzschluss am Knoten i . Der Kurzschlusszustand wird als Überlagerung des Kurzschlusszustandes ohne Vollumrichteranlage und dem Beitrag der Vollumrichteranlage zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beschrieben (vgl. Abschn. 3).

Mit Gl. (18) wird der Kurzschlussstrombeitrag $\underline{I}_{Ki}^{(kC)}$ der Vollumrichteranlage am Kurzschlussknoten i berechnet.

$$\underline{I}_{Ki}^{(kC)} = -\frac{\underline{Z}_{ij}''}{\underline{Z}_{ij}''} \underline{I}_{Cj}^{(k)} = -\frac{\underline{Z}_{ij}''}{\underline{Z}_{ij}''} \underline{I}_{Cj}^{(k)} \quad (36)$$

mit $\underline{Z}_{ij}'' = \underline{Z}_{ij}''$. Für die Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$ gilt:

$$\underline{U}_{Ki}^{(kC)} = \underline{Z}_{Kk}'' \left(\underline{I}_{Kqi}^{(kC)} + \underline{I}_{Ki}^{(kC)} \right) \quad (37)$$

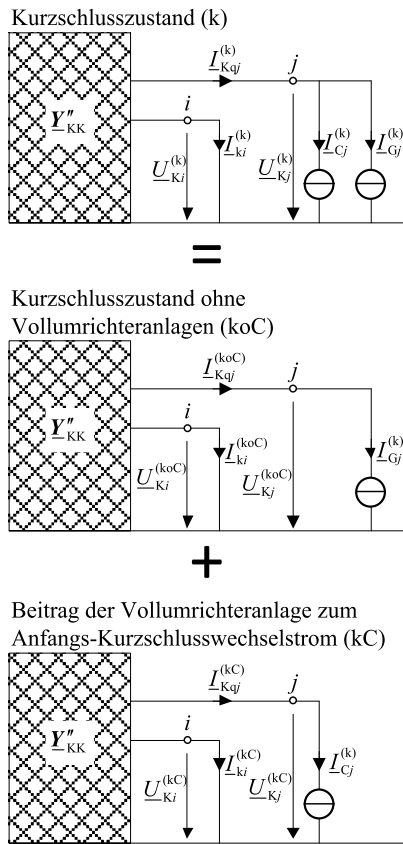


Abb. 4. Kurzschlusszustand (k) als Überlagerung des Kurzschlusszustandes (koC) ohne Vollumrichteranlage und dem Zustand (kC) mit den Kurzschlussstrombeitrag der Vollumrichteranlage

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Kj}^{(kC)} &= \underline{I}_{Cj}^{(k)} z_{jj}'' + \underline{I}_{Ki}^{(kC)} z_{ji}'' \\ &= \underline{I}_{Cj}^{(k)} \left(z_{jj}'' - \frac{z_{ji}''^2}{z_{ii}''} \right) \\ &= \underline{I}_{Cj}^{(k)} \underline{z}_{Cjj}'' \end{aligned} \quad (38)$$

Bei dem betrachteten Sonderfall mit nur einer einzigen Vollumrichteranlage kann die Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$ mit dem Strom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ und der Ersatzimpedanz \underline{z}_{Cjj}'' beschrieben werden. Aus der Berechnung der Impedanzmatrix \underline{z}_{KK}'' durch Inversion von \underline{Y}_{KK}'' und aufgrund des Verbraucherzählpfeilsystems sowie der Passivität des Netzes folgt für die Impedanz \underline{z}_{Cjj}'' :

$$\underline{z}_{Cjj}'' = \begin{cases} - \left| \underline{z}_{Cjj}'' \right| & \text{für ein rein ohmsches Netzwerk} \\ -j \left| \underline{z}_{Cjj}'' \right| & \text{für ein rein induktives Netzwerk} \end{cases} \quad (39)$$

Die Vollumrichteranlage soll im Folgenden ein rein kapazitives Verhalten aufweisen, wie dies gemäß den technischen Anschlussregeln [1–3] bei einem Kurzschluss mit niedriger Kurzschlussspannung am NAP der Anlage gefordert wird. Für die Phasenlage des Kurzschlussstrombeitrags $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ gilt daher in Bezug zur Kurzschlussspannung $\underline{U}_{Kj}^{(k)}$ am NAP der Vollumrichteranlage:

$$\arg \left(\underline{I}_{Cj}^{(k)} \right) = \arg \left(\underline{U}_{Kj}^{(k)} \right) + \pi/2 \quad (40)$$

Tab. 1. Ausgewählte Formelzeichen aus Abb. 4 bis Abb. 9

Formelzeichen	Erläuterung
$\underline{I}_{Cj}^{(k)}$	Kurzschlussstrom der Vollumrichteranlage
$\underline{I}_{Gj}^{(k)}$	Generatorquellenstrom im Kurzschlusszustand
$\underline{I}_{Kqj}^{(k)}$	resultierender Knotenstrom
$\underline{U}_{Kj}^{(k)}$	Kurzschlussspannung am NAP der Vollumrichteranlage
$\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$	Kurzschlussspannung am NAP der Vollumrichteranlage verursacht durch den Kurzschlussstrombeitrag $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage
$\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$	Kurzschlussspannung am NAP der Vollumrichteranlage ohne Kurzschlussstrombeitrag $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage
$\Delta \underline{U}_{Kj}^{(k)}$	Spannungsdifferenz gemäß Gl. (54)

Die maximal mögliche Blindstromeinspeisung $\underline{I}_{Cj,max}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage in Bezug zur Kurzschlussspannung ohne Vollumrichteranlage $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$ wird hergeleitet. Die Kurzschlussspannung $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$ am NAP ist unabhängig vom Kurzschlussstrombeitrag der Vollumrichteranlage. Sie bildet den Ausgangspunkt zur Untersuchung der unzulässigen bzw. zulässigen Betriebszustände und wird in Abschn. 5.1.1 und 5.1.2 auf die reelle Achse gelegt. In Abschn. 5.1.3 wird aus konstruktiven Gründen und zwecks einer besseren Anschaulichkeit eine abweichende Phasenlage für $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$ gewählt. Zwecks einer besseren Nachvollziehbarkeit ist eine Auswahl der in Abb. 4 bis Abb. 9 verwendeten Formelzeichen in Tab. 1 aufgeführt.

5.1.1 Rein induktives Netz

Für ein rein induktives Netz wird das Zeigerdiagramm in Abb. 5 konstruiert. Der Kurzschlussstrom der Vollumrichteranlage $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ eilt der resultierenden Kurzschlussspannung $\underline{U}_{Kj}^{(k)}$ um $\pi/2$ voraus (vgl. Gl. (40)). Der durch den Kurzschlussstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ verursachte Spannungsabfall $\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$ ist phasengleich zur Kurzschlussspannung $\underline{U}_{Kj}^{(k)}$ (vgl. Gl. (38) und Gl. (39)). Mit Gl. (41) folgt die Phasengleichheit zu $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$.

$$\underline{U}_{Kj}^{(k)} = \underline{U}_{Kj}^{(koC)} + \underline{U}_{Kj}^{(kC)} \quad (41)$$

Eine Erhöhung des Kurzschlussstroms $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ führt zu einer Erhöhung der Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(kC)}$ bzw. $\underline{U}_{Kj}^{(k)}$. Der Strom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ kann auf den maximalen Anlagenstrom $\underline{I}_{Cj,max}^{(k)}$ erhöht werden, ohne an konstruktive Grenzen für das Zeigerdiagramm zu stoßen. Das induktive Netz nimmt die kapazitive Blindleistung der Vollumrichteranlage auf. Der kapazitive Blindstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ führt zu keiner unausgeglichene Wirkleistungsbilanz.

5.1.2 Rein ohmsches Netz

Dieser fiktive Sonderfall zeigt, dass die maximal mögliche Blindstromeinspeisung der Vollumrichteranlagen nicht nur durch die maximale Stromtragfähigkeit des Umrichters begrenzt ist, sondern auch durch die physikalischen Gegebenheiten des Netzes eingegrenzt

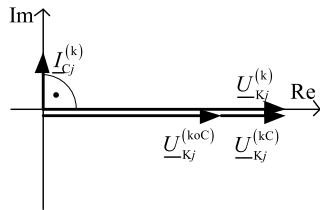


Abb. 5. Zeigerdiagramm am NAP der Vollumrichteranlage bei einem rein induktivem Netz

$$I_{Cj\max}^{(k)} < \frac{U_{Kj}^{(koC)}}{Z_{Cij}''}$$

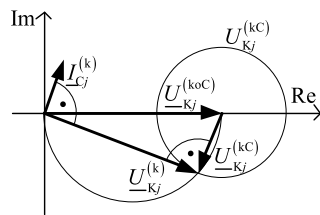


Abb. 6. Zeigerdiagramm am NAP der Vollumrichteranlage bei einem rein ohmschen Netz

wird. Für ein rein ohmsches Netz wird das Zeigerdiagramm in Abb. 6 konstruiert. Der Strom $I_{Cj}^{(k)}$ eilt der resultierenden Kurzschlussspannung $U_{Kj}^{(k)}$ um $\pi/2$ voraus (vgl. Gl. (40)). Mit Gl. (38) und Gl. (39) folgt, dass die Spannung $U_{Kj}^{(kc)}$ in Gegenphase zum Strom $I_{Cj}^{(k)}$ liegt.

$$\arg(I_{Cj}^{(k)}) = \arg(U_{Kj}^{(kc)}) + \pi \quad (42)$$

Mit Gl. (40) und Gl. (42) wird der Winkel zwischen den Spannungen $U_{Kj}^{(k)}$ und $U_{Kj}^{(kc)}$ bestimmt.

$$\arg(I_{Cj}^{(k)}) = \arg(U_{Kj}^{(k)}) + \pi/2 = \arg(U_{Kj}^{(kc)}) + \pi \quad (43)$$

$$\arg(U_{Kj}^{(k)}) = \arg(U_{Kj}^{(kc)}) + \pi/2 \quad (44)$$

Für die Einhaltung der Winkelbeziehung in Gl. (44) und der Summe in Gl. (41) folgt, dass die resultierende Kurzschlussspannung $U_{Kj}^{(k)}$ auf dem mit den beiden Endpunkten des Spannungszeigers $U_{Kj}^{(koC)}$ beschriebenen Thaleskreis liegen muss. Eine Erhöhung des Stroms $I_{Cj}^{(k)}$ führt zu einer Erhöhung der Spannung $U_{Kj}^{(kc)}$ und zu einer Verringerung der resultierenden Kurzschlussspannung $U_{Kj}^{(k)}$. Für die maximal mögliche Spannung $U_{Kj\max}^{(kc)}$ folgt:

$$U_{Kj\max}^{(kc)} < U_{Kj}^{(koC)} \quad (45)$$

Sofern für die Spannungen $U_{Kj}^{(kc)} \geq U_{Kj}^{(koC)}$ gilt, kann das Zeigerbild mit den beschriebenen Zusammenhängen (vgl. Gl. (41) und Gl. (44)) nicht konstruiert werden, da die Winkelbeziehungen nicht eingehalten werden können und für $U_{Kj}^{(kc)} = U_{Kj}^{(koC)}$ die Spannung $U_{Kj}^{(k)}$ gleich

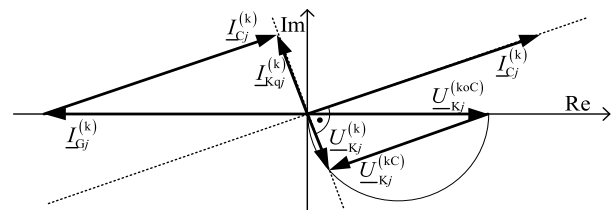


Abb. 7. Vollständiges Zeigerdiagramm am NAP der Vollumrichteranlage bei einem rein ohmschen Netz

null ist. Die Spannung $U_{Kj}^{(koC)}$ begrenzt den Strom $I_{Cj}^{(k)}$ auf den maximalen Strom $I_{Cj\max}^{(k)}$.

$$I_{Cj\max}^{(k)} < \frac{U_{Kj}^{(koC)}}{Z_{Cij}''} \quad (46)$$

Das vollständige Zeigerdiagramm für den Kurzschlusszustand zeigt Abb. 7. Für die Spannung $U_{Kj}^{(koC)}$, die durch den Generator eingeprägt wird, gilt:

$$U_{Kj}^{(koC)} = I_{Gj}^{(k)} Z_{Cij}'' = -I_{Gj}^{(k)} \cdot |Z_{Cij}''| \quad (47)$$

Der Generatorquellenstrom $I_{Gj}^{(k)}$ liegt in dem rein ohmschen Netz in Gegenphase zu $U_{Kj}^{(koC)}$. Der resultierende Knotenstrom $I_{Kqj}^{(k)}$ liegt als reiner Wirkstrom in Gegenphase zu der Spannung $U_{Kj}^{(k)}$. Die innere Stromquelle des Generators bildet die einzige Senke für den kapazitiven Blindstrom $I_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage. Der maximale Blindstrom $I_{Cj\max}^{(k)}$ entspricht dem Generatorstrom $I_{Gj}^{(k)}$.

$$I_{Gj}^{(k)} = (-I_{Kqj}^{(k)} - jI_{Cj}^{(k)}) \cdot e^{j\angle U_{Kj}^{(k)}} \quad (48)$$

$$I_{Cj\max}^{(k)} = -I_{Gj}^{(k)} \quad (49)$$

Es wird deutlich, dass ein kapazitives Verhalten der Vollumrichteranlage in einem rein ohmschen Netz nur begrenzt möglich ist und spannungssenkend wirkt. Für den untersuchten Sonderfall mit nur einer Vollumrichteranlage am Netz führen Kurzschlussströme mit $I_{Cj}^{(k)} > I_{Gj}^{(k)}$ zu unzulässigen Betriebszuständen und einer ausbleibenden Konvergenz des Algorithmus.

5.1.3 Ohmsch-induktives Netz

Dieser Abschnitt beschreibt den Effekt der rotierenden Strom- und Spannungszeiger bei einer unausgeglichenen Wirkleistungsbilanz aufgrund einer unzulässigen Blindstromeinspeisung der Vollumrichteranlage und fortlaufender Iteration des Algorithmus. Der jeweilige Iterationsschritt wird durch ein hochgestelltes (v) indiziert. Für ein ohmsch induktives Netz zeigt Abb. 8 die Zeigerdiagramme am Knoten j für den grenzstabilen und den instabilen Zustand. Im grenzstabilen Zustand konvergiert der Algorithmus in den durch das Zeigerdiagramm (links) beschriebenen Zustand. Der Strom $I_{Cj\max}^{(k)(v)}$ eilt der Spannung $U_{Kj}^{(k)(v)}$ um $\pi/2$ voraus (vgl. Gl. (40)). Mit dem Strom $I_{Cj\max}^{(k)(v)}$ wird in dem nächsten Iterationsschritt die Spannung $U_{Kj\max}^{(k)(v+1)}$ berechnet. Die Differenz zwischen der Spannung $U_{Kj\max}^{(k)(v+1)}$ und der

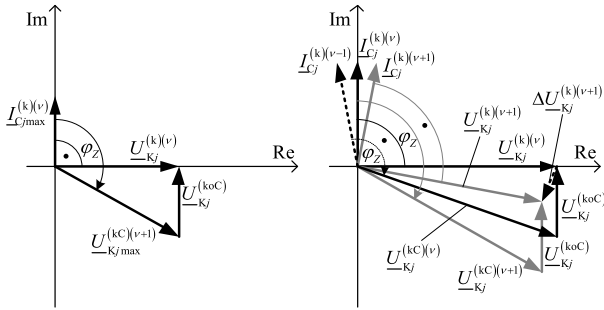


Abb. 8. Zeigerdiagramm am Knoten j: grenzstabiler Zustand (links) und instabiler Zustand (rechts)

Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(k)(v)}$ entspricht der Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$.

$$\underline{U}_{Kj}^{(k)(v)} - \underline{U}_{Kj \max}^{(kC)(v+1)} = \underline{U}_{Kj}^{(koC)} \quad (50)$$

Damit gilt $\underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)} = \underline{U}_{Kj}^{(k)(v)}$ und der Algorithmus konvergiert. Im grenzstabilen Zustand beträgt der Phasenversatz zwischen der Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$ und der Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(k)(v)}$ genau $\pi/2$. Der Strom $\underline{I}_{Cj \max}^{(k)(v)}$ ist phasengleich zu $\underline{U}_{Kj}^{(koC)}$.

$$\arg(\underline{U}_{Kj}^{(koC)}) - \arg(\underline{U}_{Kj}^{(k)(v)}) = \pi/2 \quad (51)$$

$$\arg(\underline{I}_{Cj \max}^{(k)(v)}) = \arg(\underline{U}_{Kj}^{(koC)}) \quad (52)$$

Übersteigt der kapazitive Blindstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)(v)}$ den maximalen Strom $\underline{I}_{Cj \max}^{(k)}$, so übersteigt die Spannung $\underline{U}_{Kj}^{(kC)(v+1)}$ die maximale Spannung $\underline{U}_{Kj \max}^{(kC)}$. Es gilt:

$$\left| \underline{U}_{Kj}^{(k)(v)} - \underline{U}_{Kj}^{(kC)(v+1)} \right| > \underline{U}_{Kj}^{(koC)} \quad (53)$$

mit $\underline{U}_{Kj}^{(kC)(v+1)} > \underline{U}_{Kj \max}^{(kC)}$ bzw. $\underline{I}_{Cj}^{(k)(v)} > \underline{I}_{Cj \max}^{(k)}$.

Das Überschreiten des maximal möglichen Blindstroms führt zu der Spannungsdifferenz $\Delta \underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)}$, die im Verlauf der Iteration fortlaufend ungleich null ist.

$$\Delta \underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)} = \underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)} - \underline{U}_{Kj}^{(k)(v)} \quad (54)$$

Die Spannungsdifferenz $\Delta \underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)}$ führt bei fortlaufender Iteration zur Rotation des Spannungszeigers $\underline{U}_{Kj}^{(k)(v+1)}$, der einen Kreis beschreibt (siehe Abb. 9). Der Algorithmus konvergiert nicht.

5.2 Iteratives Springen zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik

Der Algorithmus konvergiert nicht, wenn der berechnete Wert für den spannungsabhängigen zusätzlichen Blindstrom einer Vollumrichteranlage während der Iteration zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik springt. Am Beispiel der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik einer Vollumrichteranlage am Knoten j (siehe Abb. 10) wird das Problem erklärt. Die relative Spannungsänderung Δu_{Kj} und der zusätzliche relative Blindstrom werden entsprechend der technischen Anschlussregeln [1–3]

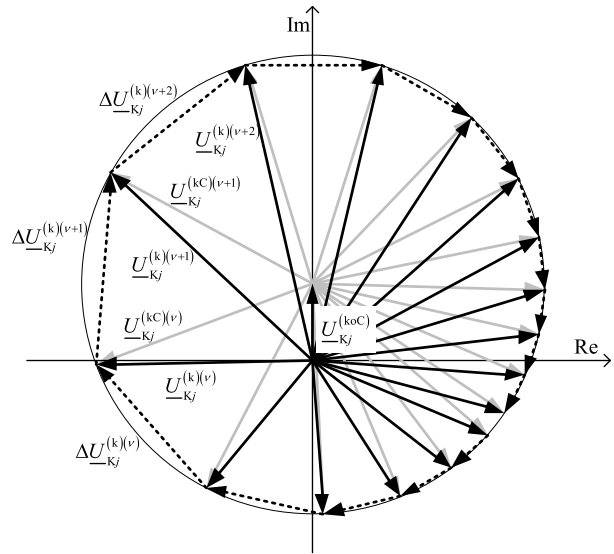


Abb. 9. Zeigerdiagramm am Knoten j bei Überschreiten des maximal möglichen Blindstroms $\underline{I}_{Cj \max}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage und fortlaufender Iteration des Algorithmus

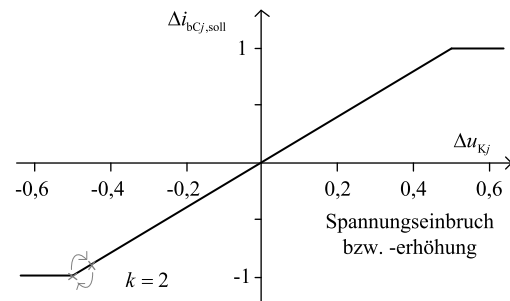


Abb. 10. Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik einer Vollumrichteranlage am Knoten j mit $k = 2$

berechnet:

$$\Delta u_{Kj} = \frac{\Delta U_{Kj}}{U_n / \sqrt{3}} = \frac{U_{Kj}^{(k)} - U_{Kj}^{(0)}}{U_n / \sqrt{3}} \quad (55)$$

$$\Delta i_{bCj, \text{soll}} = k \cdot \Delta u_{Kj} = \frac{\Delta i_{bCj, \text{soll}}}{I_{C \max}} \quad (56)$$

Im Netz tritt ein symmetrischer dreipoliger Kurzschluss auf, so dass die relative Spannungsänderung $\Delta u_{Kj}^{(0C)}$ ohne einen Kurzschlussstrombeitrag der Vollumrichteranlage am NAP der Anlage $-0,95$ p.u. beträgt. Entsprechend der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik soll der maximal mögliche zusätzliche relative Blindstrom $\Delta i_{bCj, \text{soll}} = -1$ p.u. eingespeist werden. Der spannungsabhängige zusätzliche Blindstrom der Vollumrichteranlage dient der Spannungsstützung während des Kurzschlusses und reduziert die relative Spannungsänderung. In Abb. 11 wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem zusätzlichen relativen Blindstrom Δi_{bCj} und der resultierenden relativen Spannungsänderung Δu_{Kj} angenommen. Wird der zusätzliche relative Blindstrom direkt dem Sollwert gleichgesetzt $\Delta i_{bCj} = \Delta i_{bCj, \text{soll}} = -1$ p.u., führt dies in der nächsten Iteration ($v = 2$) in diesem Beispiel zu der relativen Spannungsänderung $\Delta u_{Kj} = -0,45$ p.u. Durch die verringerte relative

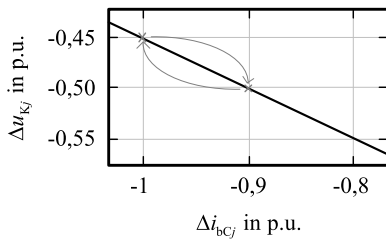


Abb. 11. Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen zusätzlichem relativem Blindstrom Δi_{bCj} und relativer Spannungsänderung Δu_{kj}

Tab. 2. Schwingender zusätzlicher relativer Blindstrom Δi_{bCj} und relative Spannungsänderung Δu_{kj} im Verlauf der Iteration

v	Δu_{kj} in p.u.	$\Delta i_{bCj} = \Delta i_{bCj,soll}$ in p.u.
1	-0,95	-1,0
2	-0,45	-0,9
3	-0,50	-1,0
4	-0,45	-0,9
5	-0,50	-1,0

Spannungsänderung folgt für den zusätzlichen relativen Blindstrom $\Delta i_{bCj} = \Delta i_{bCj,soll} = -0,9$ p.u. Im Verlauf der iterativen Berechnung des relativen zusätzlichen Blindstroms ergeben sich die in Tab. 2 aufgeführten Werte. Es ist zu erkennen, dass die relativen Strom- und Spannungsänderungen zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik springen. Dieses Springen kann durch eine schrittweise Annäherung des relativen zusätzlichen Blindstroms Δi_{bCj} an den Sollwert $\Delta i_{bCj,soll}$ zum Beispiel entsprechend Gl. (29) weitestgehend vermieden werden. Der empirisch ermittelte Faktor 0,25 in Gl. (29) hat sich hierzu als geeignet erwiesen.

6. Identifikation instabiler Vollumrichteranlagen im Kurzschlusszustand

Durch die zeichnerische Ermittlung zulässiger Betriebspunkte der Vollumrichteranlagen wird ein Filterkriterium hergeleitet, um Anlagen mit einem unzulässigen bzw. instabilen Betriebspunkt (vgl. Abschn. 5.1) zu identifizieren. Das Wirk- bzw. Blindleistungsgleichgewicht kann in gewissen Grenzen durch die am Netz verbleibenden Generatoren sichergestellt werden. Daher ist es das Ziel, ein Filterkriterium auf Basis der Spannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ ohne Vollumrichteranlagen zu identifizieren, da diese Spannung nur das Verhalten der Generatoren, Motoren und Ersatznetze berücksichtigt und für die Berechnung des Kurzschlussstrombeitrags der Vollumrichteranlagen eine konstante Größe darstellt.

Es wird entsprechend des geforderten Fault Ride Through Verhaltens ein generatorisch-kapazitives Betriebsverhalten der Vollumrichteranlagen angenommen. In Abb. 12 ist der Kurzschlussstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlagen in Bezug zur Spannung $\underline{U}_{kj}^{(k)}$ am NAP einer Vollumrichteranlage dargestellt. Der Strom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ führt gemäß Gl. (38) und Gl. (39) zu dem Spannungsabfall $\underline{U}_{kj}^{(kC)}$. Bei ausschließlich induktivem Netz liegt die Spannung $\underline{U}_{kj}^{(kC)}$ im Quadranten I und bei ausschließlich ohmschen Netz im Quadranten IV. Die Addition der Spannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ ohne Vollumrichter liefert die resultierende Knoten-

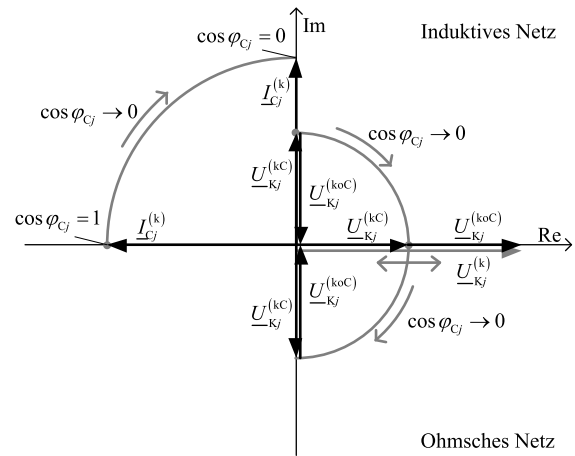


Abb. 12. Strom und Spannung in Abhängigkeit vom Betriebspunkt der Vollumrichteranlage bei induktiven bzw. ohmschem Netz

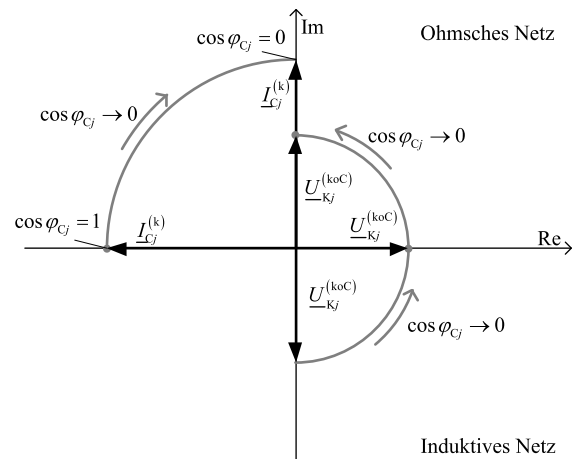


Abb. 13. Resultierende Strom- und Spannungsbeziehungen zwischen dem Kurzschlussstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage und der Kurzschlussspannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ ohne Vollumrichteranlagen (Zwischenschritt)

spannung $\underline{U}_{kj}^{(k)}$. Für die Darstellung in Abb. 12 wird $\underline{U}_{kj}^{(kC)} = \underline{U}_{kj}^{(koC)}$ angenommen.

Aus Abb. 12 werden in einem Zwischenschritt die resultierenden Strom- und Spannungsbeziehungen zwischen dem Kurzschlussstrombeitrag $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage und der Kurzschlussspannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ ohne Vollumrichteranlage abgeleitet (siehe Abb. 13).

Wird die Spannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ auf die reelle Achse gelegt, folgt das in Abb. 14 dargestellte Zeigerdiagramm. Für potenziell mögliche stabile Betriebspunkte gilt in Bezug auf den Phasenversatz δ_j zwischen dem Kurzschlussstrom $\underline{I}_{Cj}^{(k)}$ und der Kurzschlussspannung $\underline{U}_{kj}^{(koC)}$:

$$270^\circ < \delta_j = \arg \left(\underline{I}_{Cj}^{(k)} \right) - \arg \left(\underline{U}_{kj}^{(koC)} \right) < 0 \quad (57)$$

Für $\underline{U}_{kj}^{(kC)} > \underline{U}_{kj}^{(koC)}$ bzw. $\underline{U}_{kj}^{(kC)} < \underline{U}_{kj}^{(koC)}$ nimmt die Spannbreite des Phasenversatzes δ_j weiter ab. Die beiden Betriebspunkte mit $\underline{U}_{kj}^{(kC)} = -\underline{U}_{kj}^{(koC)}$ ($\delta_j = 0$ und $\delta_j = 270^\circ$) in Abb. 12 sind keine stabilen Be-

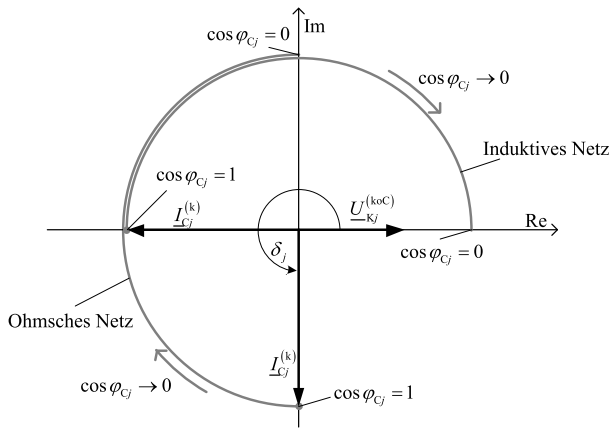


Abb. 14. Ortskurve des Zeigers des Kurzschlussstroms $I_{CJ}^{(k)}$ der Vollumrichteranlage in Bezug zur Kurzschlussspannung $U_{KJ}^{(koC)}$ ohne Vollumrichteranlagen

triebspunkte, da die Spannung $U_{KJ}^{(k)} = 0$ ist. Mit Hilfe der Beziehung in Gl. (57) können die rotierenden Stromzeiger der Vollumrichteranlagen mit unzulässigem Betriebspunkt identifiziert und vom Netz getrennt werden.

7. Exemplarische Kurzschlussstromberechnung

Es wird eine 380-kV-Windsammelschiene mit elf 110-kV-Netzen in Abb. 15 links aus [5] betrachtet. Die 110-kV-Netze enthalten jeweils acht Windparks á 30 MVA Leistung. Es werden die Anfangskurzschlusswechselströme $I_{KJ}^{(k)}$ für einen symmetrischen dreipoligen Kurzschluss mit dem Verfahren in Abb. 3 berechnet. Der Anfangskurzschlusswechselstrom $I_{kk5}^{(k)}$ an Knoten K5 wird analysiert.

Für die Berechnung wird der reduzierte Impedanzersatzschaltplan in Abb. 15 rechts [5] verwendet. Die Kurzschlussleistung des 380-kV-Netzes beträgt $S_{KQ}'' = 5000\text{MVA}$ und das R-X-Verhältnis ist 0,1. Die Knoten K1 bis K5 sind durch Doppelleitungen miteinander verbunden. Die auf die 380-kV-Ebene bezogenen Impedanzen $Z_{2,6}, Z_{3,7}, Z_{4,8}$ und $Z_{5,9}$ berücksichtigen die für die normierte Kurzschlussstromberechnung korrigierten Impedanzen der 400 kV/115 kV-Transformatoren und der 110 kV/20 kV Windparktransformatoren. Die Impedanzen der 110-kV- und 20-kV-Leitungen werden vernachlässigt. Tabelle 3 im Anhang gibt die bezogenen Werte der Impedanzen an.

Der maximal eingespeiste Kurzschlussstrom eines 110-kV-Netzes mit acht Windparks zu je zehn Vollumrichteranlagen á $S_{rWC} = 3\text{ MVA}$ und $I_{Cmax} = 1,3I_{rWC}$ beträgt:

$$\begin{aligned}
 I_{110Nmax} &= 8 \cdot 10 \cdot 1,3 \cdot I_{rWC} \cdot \frac{1}{t_{H\delta S/H S}} \cdot \frac{1}{t_{H S/M S}} \\
 &= 8 \cdot 10 \cdot 1,3 \cdot \frac{3\text{MVA}}{\sqrt{3} \cdot 20\text{ kV}} \cdot \frac{115\text{ kV}}{400\text{ kV}} \cdot \frac{20\text{ kV}}{110\text{ kV}} \quad (58) \\
 &= 0,4708\text{ kA}
 \end{aligned}$$

Eine detaillierte Beschreibung des Netzes, der Berechnung der Impedanzen sowie Kurzschlussstromberechnungen nach IEC 60909-0 ist [5] zu entnehmen.

Zwecks der exakten Berechnung des Betriebspunkt abhängigen Anfangskurzschlusswechselstroms wird die eingespeiste Scheinleistung $S_C^{(0)}$ im Vorfehlerzustand aller Vollumrichteranlagen gleichermaßen schrittweise von 0 p.u. auf 1 p.u. erhöht und der resultierende Vorfehlerzustand mit dem Newton-Raphson-Verfahren berech-

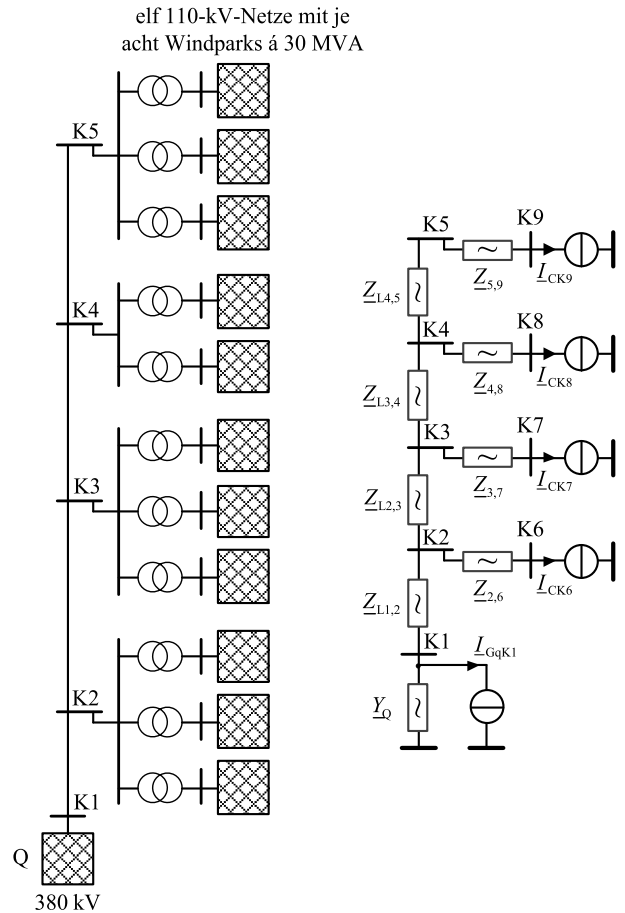


Abb. 15. 380-kV-Windsammelschiene mit 88 Windparks zu je 30 MVA (links) und reduzierter Impedanzersatzschaltplan (rechts) [5]

net. Als Slack-Knoten wird Knoten K1 mit der Spannung $U_{K1}^{(0)} = 380\text{ kV}$ gewählt. Die Knotenspannungen im Vorfehlerzustand an der 380-kV-Windsammelschiene zeigt Abb. 16 für verschiedene Verschiebungsfaktoren $\cos \varphi$. Für den Verschiebungsfaktor $\cos \varphi = 1$ (Abb. 16 links) steigen die Knotenspannungen zunächst mit zunehmender Scheinleistung $S_C^{(0)}$ leicht an und sinken dann ab. Hingegen führt ein generatorisch-kapazitiver Betriebszustand der Vollumrichteranlagen mit $\cos \varphi = 0,95$ (Abb. 16 rechts) zu einer Erhöhung der Knotenspannungen.

Abb. 17 zeigt den resultierenden Anfangskurzschlusswechselstrom $I_{kk5}^{(k)}$, den Anfangskurzschlusswechselstrom ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen $I_{kk5}^{(koC)}$ und den Anfangskurzschlusswechselstrom ohne Stromänderungen der Vollumrichteranlagen $I_{kk5}^{(\Delta oC)}$ (Begriffsdefinition siehe Abb. 2) an Knoten K5 in Abhängigkeit von der eingespeisten Scheinleistung $S_C^{(0)}$. Es wird unterschieden zwischen dem Verschiebungsfaktor $\cos \varphi = 1$ (links) und $\cos \varphi = 0,95$ (kap.) (rechts) im Vorfehlerzustand sowie der Vernachlässigung (oben) und der Berücksichtigung (unten) der Einspeisung des technisch maximal möglichen Wirkstroms (siehe Gl. (32)) der Vollumrichteranlagen im Kurzschlusszustand.

Der Strom $I_{kk5}^{(\Delta oC)}$ ist proportional zur Spannung $U_{K5}^{(0)}$ im Vorfehlerzustand. Der Strom $I_{kk5}^{(koC)}$ ist zusätzlich zur Spannung $U_{K5}^{(0)}$ im Vorfehlerzustand abhängig vom eingespeisten Strom der Vollumrichteranlagen im Vorfehlerzustand. Die vollständige Berücksichtigung des Vorfehlerzustandes führt in Abhängigkeit vom Betriebspunkt zum Über- und Unterschreiten des $I_{kk5}^{(\Delta oC)}$ durch $I_{kk5}^{(koC)}$. Demzu-

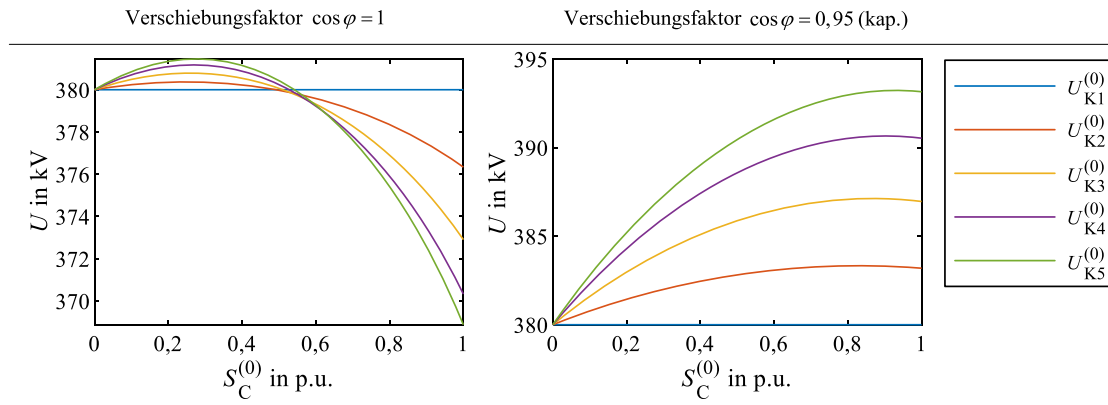


Abb. 16. Knotenspannung an der 380-kV-Windsammelschiene im Vorfehlerzustand in Abhängigkeit von der eingespeisten Scheinleistung $S_C^{(0)}$ der Vollumrichteranlagen und $\cos \varphi = 1$ (links) bzw. $\cos \varphi = 0,95$ (rechts)

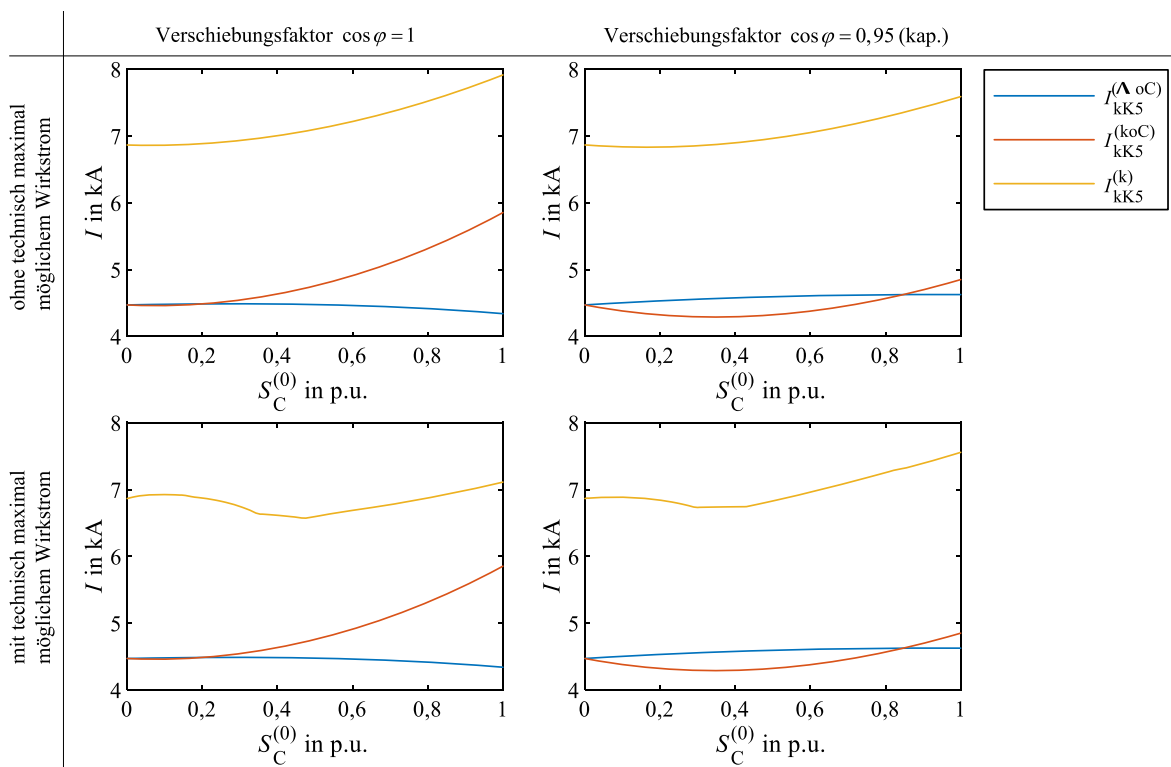


Abb. 17. Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $I_{kk5}^{(k)}$, Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen $I_{kk5}^{(\Delta oC)}$ und Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne Stromänderungen der Vollumrichteranlagen $I_{kk5}^{(koC)}$ am Kurzschlussknoten K5 für unterschiedliche Verschiebungsfaktoren $\cos \varphi$ der Vollumrichteranlagen im Vorfehlerzustand, ohne und mit Einspeisung des maximal möglichen Wirkstroms

folge ist eine vollständige Vernachlässigung der Vollumrichteranlagen bspw. bei der normierten Berechnung des minimalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms [4] kritisch zu hinterfragen, insbesondere da die Berechnungen zeigen, dass der minimale Anfangs-Kurzschlusswechselstrom nicht zwingend bei einer Dunkelflaute mit $S_C^{(0)} = 0$ p.u. auftritt.

Bei der Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I_{kk5}^{(k)}$ wird der Kurzschlussstrom und der Vorfehlerzustand der Vollumrichteranlagen berücksichtigt. In dem Beispiel führt der Kurzschlussstrom der Vollumrichteranlagen zu einem höheren Anfangs-

Kurzschlusswechselstroms $I_{kk5}^{(k)}$ im Vergleich zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne Kurzschlussstrombeiträge der Vollumrichteranlagen $I_{kk5}^{(\Delta oC)}$. Durch die Einspeisung des technisch maximal möglichen Wirkstroms sinkt die Amplitude jedoch und es kommt zu Knickpunkten in den Verläufen. Das Absenken der Amplitude ist auf die Wirkstromeinspeisung in ein überwiegend induktives Netz zurückzuführen, was zu den gleichen Effekten wie bei der Einspeisung eines Blindstroms in ein überwiegend ohmsches Netz führt (siehe Abschn. 5.1.2). Die innere Stromquelle des 380-kV-Netzes bildet die primäre Senke für den Wirkstrom der Vollumrichteranlagen, so

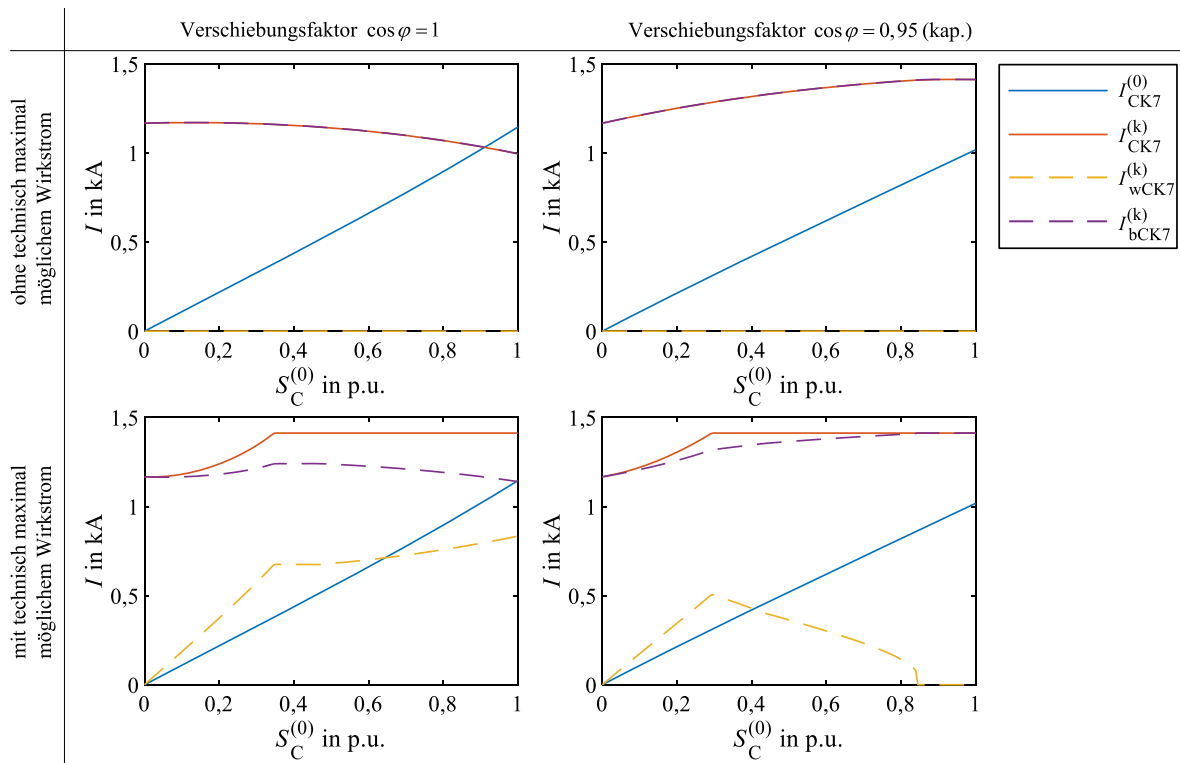


Abb. 18. Ströme der Vollumrichteranlagen am Knoten K7: Strom im Vorfehlerzustand $I_{CK7}^{(0)}$, Kurzschlussstrom $I_{CK7}^{(k)}$, Wirkanteil des Kurzschlussstroms $I_{wCK7}^{(k)}$ und Blindanteil des Kurzschlussstroms $I_{bCK7}^{(k)}$. Berechnet für unterschiedliche Verschiebungsfaktoren $\cos \varphi$ der Vollumrichteranlagen im Vorfehlerzustand und ohne sowie mit Einspeisung des technisch maximal möglichen Wirkstroms im Kurzschlusszustand

dass der Beitrag des Netzes zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom sinkt. Die Knickpunkte entstehen durch das Erreichen des maximalen Kurzschlussstroms der Vollumrichteranlagen. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 18 die zugehörigen Ströme einer Vollumrichteranlage am Knoten K7. Dargestellt ist der Strom im Vorfehlerzustand $I_{CK7}^{(0)}$, der Kurzschlussstrom $I_{CK7}^{(k)}$, der Wirkanteil des Kurzschlussstroms $I_{wCK7}^{(k)}$ sowie der Blindanteil des Kurzschlussstroms $I_{bCK7}^{(k)}$. Der Wirkanteil ist abhängig von der eingespeisten Wirkleistung im Vorfehlerzustand und der Kurzschlussspannung am NAP der Anlage (siehe Gl. (32)). Der Blindanteil ist abhängig vom Spannungseinbruch und wird beim Erreichen des maximal zulässigen Kurzschlussstroms der Vollumrichteranlage priorisiert. Das Erreichen des maximalen Kurzschlussstroms führt zum Knickpunkt in den Verläufen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Aufsatz wird die Erweiterung des Überlagerungsverfahrens zur Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms um die exakte Berücksichtigung der spannungsabhängigen Blindstromeinspeisung und der technisch maximal möglichen Wirkstromeinspeisung von Vollumrichteranlagen vorgestellt. Aufgrund des vorgeschriebenen spannungsabhängigen Fault Ride Through der Vollumrichteranlagen mit einer zusätzlichen Blindstromeinspeisung ist eine iterative Berechnung erforderlich. Das entwickelte iterative Berechnungsverfahren weist in Abhängigkeit des betrachteten Netzes Konvergenzprobleme auf, die auf die reglementierte Kurzschlussstrom-einspeisung der Vollumrichteranlagen zurückzuführen sind. Zum Beispiel kann die geforderte Blindstromeinspeisung zu einem Wirkleistungsungleichgewicht und damit zusammenhängenden Instabilitäten führen. In dem Berechnungsverfahren werden diese Insta-

bilitäten durch rotierende Strom- und Spannungszeiger signalisiert. Zur Identifikation der betroffenen Anlagen werden die zulässigen Betriebspunkte in Abhängigkeit von der Kurzschlussspannung ohne Vollumrichteranlagen ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass die exakte Berechnung der Kurzschlussspannung ohne Vollumrichteranlagen die Berücksichtigung des negativen Betriebsstroms der Vollumrichteranlagen aus dem Vorfehlerzustand erfordert. Neben der Möglichkeit einer betriebspunktabhängigen exakten Kurzschlussstromberechnung nützen die beschriebenen Zusammenhänge bei der Entwicklung und Optimierung von Netzanschlussregeln sowie von Regelungskonzepten für Vollumrichteranlagen.

Anhand einer exemplarischen Kurzschlussstromberechnung mit dem entwickelten iterativen Verfahren werden die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebszustände der Vollumrichteranlagen im Vorfehlerzustand auf den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass der minimale Anfangs-Kurzschlusswechselstrom nicht bei einer Dunkelflaute zu erwarten ist, sondern bei einer Trennung der Vollumrichteranlagen mit generatorisch-kapazitivem Betriebspunkt im Kurzschlussfall. Demzufolge ist eine vollständige Vernachlässigung der Vollumrichteranlage bspw. bei der normierten Berechnung des minimalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms kritisch zu hinterfragen. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die Einspeisung des technisch maximal möglichen Wirkstroms die Amplitude des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms senken kann.

In zukünftigen Untersuchungen werden die Auswirkungen eines hinsichtlich der Netzimpedanz optimierten Kurzschlussstroms der Vollumrichteranlagen untersucht, so dass auch ein mögliches Verhalten von netzbildenden Vollumrichteranlagen in der Kurz-

schlussstromberechnung berücksichtigt werden kann. Voraussichtlich kann durch die Anpassung der Phasenlage des Kurzschlussstroms an die Torimpedanz der Vollumrichteranlage der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom erhöht werden. Zudem werden Instabilitäten hinsichtlich einer unausgeglichenen Leistungsbilanz vermieden, so dass unabhängig von der Höhe der Kurzschlussspannung ein Fault Ride Through aller Vollumrichteranlagen mit einer Kurzschlussstromspeisung sichergestellt wird. Weiterhin werden Vergleichsrechnungen des exakten Überlagerungsverfahrens mit dem normierten Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle angestrebt. Insbesondere soll die Berechnung des minimalen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms kritisch hinterfragt werden.

Funding Note Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. VDE-AR-N 4110:2018–11 (2018): Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung). Ausgabe November 2018.

2. VDE-AR-N 4120:2018–11 (2018): Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung). Ausgabe November 2018.
 3. VDE-AR-N 4130:2018–11 (2018): Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung). Ausgabe November 2018.
 4. DIN EN 60909-0 (VDE 0102) (2016): Kurzschlussströme in Drehstromnetzen - Teil 0: Berechnung der Ströme. Ausgabe 2016.
 5. Oeding, D., Oswald, B. R. (2016): Elektrische Kraftwerke und Netze. Berlin: Springer.
 6. Balzer, G. (2020): Kurzschlussströme in Drehstromnetzen.
 7. Oswald, B. R. (2017): Berechnung von Drehstromnetzen. Wiesbaden: Springer.
 8. Oswald, B. R. (2018): Berechnung der Kurzschlussströme in Elektroenergieversorgungsnetzen mit Bezug auf die Normen IEC 60909-0 und DIN EN 60909-0 (VDE 0102). Leipzig: Leipziger Universitätsverlag.
 9. Schäkel, N., Hofmann, L. (2021): Exakte und genäherte Kurzschlussstromberechnung in Netzen mit Vollumrichteranlagen. Automatisierungstechnik, 69(5), 389–400. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0036>.
 10. Schürhuber, R. (2016): Die Kurzschlussnorm IEC 60909-0: 2016 – Neues und Änderungen. E&I, Elektrotech. Inf.tech., 133(4–5), 228–235. <https://doi.org/10.1007/s00502-016-0416-8>.
 11. Teodorescu, R., Liserre, M., Rodríguez, P. (2011): Grid converters for photovoltaic and wind power systems. Ebrary. Chichester: Inc. Wiley IEEE.
 12. Schäkel, N., Neufeld, A., Hofmann, L. (2020): Hybrid PLL structure for improvement of the dynamic performance of grid-connected converters. In NEIS 2020 - conference on sustainable energy supply and energy storage systems.
 13. Schürhuber, R., Oswald, B. R., Fickert, L., et al. (2020): Verhalten von Windkraftanlagen mit doppelt speisenden Asynchrongeneratoren (DFIG) bei Kurzschlüssen und anderen Netzfehlern. E&I, Elektrotech. Inf.tech., 137(8), 415–424. <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00829-2>.
 14. Goksu, O., Teodorescu, R., Bak, C. L., et al. (2014): Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution. IEEE Trans. Power Syst., 29(4), 1683–1691. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2295261>.
 15. Weise, B. (2015): Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability. IET Renew. Power Gener., 9(1), 25–36. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0116>.
 16. Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., et al. (2012): Control of power converters in AC microgrids. IEEE Trans. Power Electron., 27(11), 4734–4749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>.

Anhang

9.1. Elementweise Matrizenmultiplikation

Bei der elementweisen Matrizenmultiplikation (auch Hadamard-Produkt oder Schur-Produkt) in Gl. (59) ergibt sich die resultierende Matrix durch Multiplikation der jeweils entsprechenden Einträge der Ausgangsmatrizen.

$$\underline{A} \circ \underline{B} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{12}b_{12} & a_{13}b_{13} \\ a_{21}b_{21} & a_{22}b_{22} & a_{23}b_{23} \\ a_{31}b_{31} & a_{32}b_{32} & a_{33}b_{33} \end{bmatrix} \quad (59)$$

9.2. Elementweise Matrizendivision

Bei der elementweisen Matrizendivision in Gl. (60) (Divisionsoperator mit einem vorangestellten Punkt) ergibt sich die resultierende Matrix durch Division der jeweils entsprechenden Einträge der Ausgangsmatrizen.

$$\underline{A} \cdot \underline{B} = \begin{bmatrix} a_{11}/b_{11} & a_{12}/b_{12} & a_{13}/b_{13} \\ a_{21}/b_{21} & a_{22}/b_{22} & a_{23}/b_{23} \\ a_{31}/b_{31} & a_{32}/b_{32} & a_{33}/b_{33} \end{bmatrix} \quad (60)$$

9.3. Impedanzen der exemplarischen Kurzschlussstromberechnung

Tab. 3. Impedanzen in Abb. 15 bezogen auf die 380-kV-Ebene [5]

$\underline{Z}_{2,6} = \underline{Z}_{3,7} = \underline{Z}_{5,9} = (1,6412 + j49,7412) \ \Omega$
$\underline{Z}_{4,8} = (2,4618 + j74,6118)$
$\Omega \underline{Y}_Q = 1/\underline{Z}_Q = 1/(3,1610 + j31,6103) \ \Omega$
$\underline{Z}'_{DL} = (0,0213 + j0,1275) \ \Omega/\text{km}$
$l_{1,2} = 20 \text{ km}, l_{2,3} = 29 \text{ km}, l_{3,4} = 40 \text{ km}, l_{4,5} = 45 \text{ km}$

Autoren**Nils Schäkel**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energiesysteme im Fachgebiet Elektrische Energieversorgung an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen beinhalten den Einfluss von leistungselektronischen Erzeugungseinheiten auf den Kurzschlussstromzeitverlauf und die Kurzschlussstromberechnung.

Nach Tätigkeiten für das unabhängige Planungs- und Beratungsunternehmen Fichtner in Stuttgart und den damaligen deutschen Übertragungsnetzbetreiber E.ON Netz GmbH in Bayreuth ist er seit Oktober 2007 Leiter des Instituts für Elektrische Energiesysteme an der Leibniz Universität Hannover und vertritt dort als Professor das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung. Seit Mai 2011 ist er zudem für das Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) in Kassel zuerst als Abteilungsleiter und seit Mai 2018 als Themenfeldleiter „Übertragungsnetze“ tätig.

**Lutz Hofmann**

geboren 1968 in Bad Oeynhausen, hat Elektrotechnik mit Schwerpunkt Elektrische Energietechnik an der Universität Hannover, Deutschland studiert und mit dem Grad Dipl.-Ing. 1994 abgeschlossen. In 1997 wurde er ebenfalls an der Universität Hannover zum Dr.-Ing. promoviert. In 2002 habilitierte er sich und erlangte die *venia legendi* für das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung.