

Multiple Anwendungsfälle im Betrieb hybrider AC/DC Verteilungsnetze

Merlin Engel*, Hannes Newe, Sebastian Deters
Innovationsmanagement / IT-Technische Anwendungen
Stromnetz Hamburg GmbH
Hamburg, Deutschland
*merlin.engel@stromnetz-hamburg.de

Christian Becker
Elektrische Energietechnik
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

Kurzfassung – Die Integration von DC Betriebsmitteln auf Verteilungsebene ist eine Möglichkeit, um die vor dem Hintergrund der Energiewende notwendige Flexibilisierung des elektrischen Energiesystems zu unterstützen. In Abhängigkeit der gewählten Topologie erschließen die entstehenden hybriden AC/DC Verteilungsnetze zusätzliche planerische und betriebliche Anwendungsfälle. Eine spezielle Formulierung der Optimal Power Flow Methode kann die Umsetzung eines optimalen Parallelbetriebs multipler Anwendungsfälle ermöglichen und damit den potenziellen Mehrwert der Integration von DC Betriebsmitteln im Verteilungsnetz steigern. Ein Anwendungsbeispiel illustriert die Verwendung dieser Methode.

Stichworte – Hybride AC/DC Verteilungsnetze, Netzbetrieb, Multiple Anwendungsfälle, Optimal Power Flow

I. EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der Energiewende befindet sich das elektrische Energiesystem in einem umfassenden Wandel. Während die Erzeugungsseite zunehmend von dezentralen erneuerbaren und dargebotsabhängigen Anlagen dominiert wird, welche an die Verteilungsebene angeschlossen sind, steigt die Last durch die Elektrifizierung von Sektoren wie Verkehr und Wärmeversorgung [1]. Zur Unterstützung des notwendigen Netzausbaus erfordert die Gemengelage die Erschließung von Flexibilitätspotentialen [2], [3].

Ein vielversprechender Ansatz für die Flexibilisierung der vorhandenen Netzinfrastruktur besteht in der Nutzung von Gleichstrombetriebsmitteln nicht nur in Erzeugungs-, Speicher- und Verbrauchseinrichtungen, sondern auch in der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie in Form von hybriden AC/DC Netzen [4].

Dieser Beitrag widmet sich den Herausforderungen der parallelen Umsetzung multipler Anwendungsfälle im Betrieb hybrider AC/DC Verteilungsnetze und hat folgende Gliederung. Kapitel II führt mit einem Review möglicher Topologien und Anwendungsfälle in das Feld hybrider AC/DC Verteilungsnetze ein. Hierauf aufbauend wird in Kapitel III eine spezielle Formulierung der Optimal Power Flow (OPF) Methode entwickelt, welche auf die optimale Kombination und Koordination der multiplen Anwendungsfälle im Betrieb hybrider AC/DC Verteilungsnetze abzielt. Die Erprobung der Methode an einem Referenznetz und ihre Ergebnisse sind Gegenstand von Kapitel IV. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel V.

II. HYBRIDE AC/DC VERTEILUNGSNETZE

Ein hybrides AC/DC Verteilungsnetz entsteht durch die Integration von DC Netzsegmenten in ein bestehendes herkömmliches AC Verteilungsnetz. Hierbei existiert eine Vielzahl möglicher Topologien für hybride AC/DC Verteilungsnetze, die sich sowohl in der Konfiguration des DC Segments als auch in dessen Integration in das umgebende AC Netz unterscheiden können. Die möglichen Betriebsstrategien für die Umrichter der Kopplungsterminals und damit die Anwendbarkeit bestimmter Anwendungsfälle hängen stark von der Topologie ab.

A. Topologien hybrider AC/DC Verteilungsnetze

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den potenziellen Mehrwerten für den Betrieb der bestehenden AC Infrastruktur durch die Erweiterung um DC Segmente. Die folgende Klassifizierung der in ABBILDUNG 1 dargestellten Netztopologien erfolgt entsprechend anhand der verschiedenen Varianten, die DC Segmente in das bestehende AC Netz zu integrieren. Sie ist abgeleitet von [5]–[7].

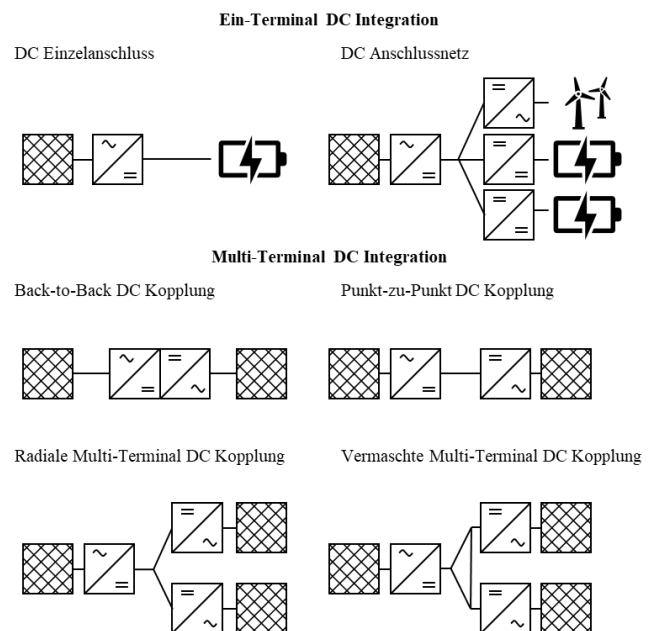


ABBILDUNG 1: MÖGLICHE VARIANTEN DER INTEGRATION VON DC SEGMENTEN IN DAS UMLIEGENDE AC NETZ. ADAPTIERT NACH [5].

1) Ein-Terminal Integration von DC Segmenten

In diesem Beitrag wird der Begriff *DC Anschluss* für DC Segmente verwendet, die über ein einziges Terminal mit dem AC Netz verbunden sind. Bei DC Anschlüssen lassen sich zwei grundsätzliche Konfigurationen unterscheiden:

- **DC Einzelanschluss**
DC Einzelanschlüsse umfassen einen einzigen DC Strang und werden für den Anschluss einer einzelnen komplexen Anlage verwendet. Häufig handelt es sich um erneuerbare Erzeugungsanlagen oder leistungsstarke kommerzielle Speicher- und Verbrauchseinrichtungen.
- **DC Anschlussnetz**
DC Anschlussnetze bestehen aus mehreren Strängen und werden häufig für Cluster von erneuerbaren Erzeugungsanlagen, Speichern oder anspruchsvollen Verbrauchern verwendet beispielsweise im Fall von Sammelnetzen für Wind und Photovoltaik oder industriellen DC Verteilungsnetzen.

2) Multi-Terminal Integration von DC Segmenten

Für DC Segmente, die über mehr als ein Terminal in ein AC Netz integriert sind, wird der Begriff *DC Kopplung* verwendet. Auch eine DC Kopplung kann zusätzliche DC Stränge ohne direkten Anschluss an ein Terminal beinhalten, welche sich wie DC Anschlüsse verhalten. DC Kopplungen werden häufig entsprechend der folgenden vier Konfigurationen klassifiziert:

- **Back-to-Back DC Kopplung**
Befinden sich die zwei Terminals einer DC Kopplung geografisch dicht beieinander, kann eine Back-to-Back Aufstellung realisiert werden, welche ohne ausgedehnte DC Übertragungsstrecke auskommt.
- **Punkt-zu-Punkt DC Kopplung**
Eine Punkt-zu-Punkt DC Kopplung verbindet zwei geografisch entfernte Terminals über Gleichstromkabel oder -freileitungen.
- **Radiale Multi-Terminal DC Kopplung**
In einer Radialen Multi-Terminal DC Kopplung werden alle Terminals durch einen einzigen Hauptstrang miteinander verbunden. Hinsichtlich seiner betrieblichen Implikationen handelt es sich hierbei um die einfachste Realisierung einer Multi-Terminal DC Kopplung.
- **Vermaschte Multi-Terminal DC Kopplung**
In einer Vermaschten Multi-Terminal DC Kopplung sind die verschiedenen Terminals über mehrere Stränge miteinander verbunden, wodurch eine höhere Redundanz und Flexibilität ermöglicht wird, gleichzeitig jedoch eine höher Komplexität entsteht.

Ein weiterer relevanter topologischer Aspekt, welcher in der vorgestellten Klassifizierung allerdings nicht enthalten ist, besteht im Vorhandensein eines parallelen AC Leistungspfad zwischen den Terminals der DC Kopplung. Liegt dieser vor, ist die DC Kopplung vollständig in ein einziges AC System eingebettet. Ebenfalls möglich ist eine DC Kopplung, die verschiedene unabhängige AC Systeme miteinander verbindet.

B. Anwendungsfälle hybrider AC/DC Verteilungsnetze

Bei der Verwendung selbstgeführter Stromrichter kann an jedem Terminal eines DC Segments individuell Blindleistung bereitgestellt werden. Das DC Segment selbst hat darüber hinaus keinen Blindleistungsbedarf. Der Wirkleistungsfluss an einem DC Anschluss ergibt sich aus dem Gleichgewicht von Last und Erzeugung innerhalb des DC Segments. Bei DC Kopplungen hingegen lässt sich der Wirkleistungsfluss zwischen den Terminals steuern, wodurch zusätzliche Flexibilität für den Betrieb des umgebenden AC Netzes entsteht.

Neben der beschriebenen Steuerbarkeit von Wirk- und Blindleistung sind der Erhalt der galvanischen Trennung, die höhere Leistungsdichte bei gleichem Spannungsniveau und das hochdynamische Verhalten der leistungselektronischen Komponenten weitere Vorteile bei der Verwendung von DC Betriebsmitteln gegenüber herkömmlichen AC Alternativen. Diese Eigenschaften ermöglichen eine Vielzahl von Anwendungsfällen sowohl aus planerischer als auch aus betrieblicher Perspektive. [5]–[7]

1) Planerische Anwendungsfälle

Aus planerischer Sicht bietet der Einsatz hybrider AC/DC Verteilungsnetze zusätzliche Freiheitsgrade für Optimierung, Verstärkung und Ausbau des Netzes. Die damit verbundene Planungsaufgabe besteht darin, zu bestimmen, wo und wie DC Segmente am vorteilhaftesten in das bestehende Netz integriert werden können.

- **Alternative zu klassischem AC Netzausbau**
Wie im Bereich der Übertragungsnetze bereits etabliert, sollte auch bei der Planung der Verteilungsnetze vermehrt geprüft werden, ob die Realisierung notwendiger Netzausbaumaßnahmen mit AC oder DC Betriebsmitteln umgesetzt wird und wie sich beide optimal kombinieren lassen. [7], [8]
- **DC Umrüstung bestehender AC Netzsegmente**
Neben der Berücksichtigung von DC Betriebsmitteln beim Neubau von Netzsegmenten, besteht auch die Möglichkeit bestehende AC Betriebsmittel auf DC umzurüsten. Insbesondere die Umrüstung bestehender Kabeltrassen ist Gegenstand aktueller Forschungen. [9], [10]
- **Kopplung bestehender AC Systeme**
Die Verwendung von DC Kopplungen ermöglicht die Verbindung von AC Systemen, die mit klassischen Lösungen aufgrund unterschiedlicher Frequenzen, Sternpunktbehandlung oder aufgrund der Begrenzung des Kurzschlussstroms nicht ohne weiteres umgesetzt werden kann. [7], [8], [11]
- **Auftrennung bestehender AC Systeme**
Ein weiterer planerischer Anwendungsfall für DC Kopplungen ist die Auftrennung bestehender AC Systeme zur Begrenzung des Kurzschlussstroms. [8]

2) Betriebliche Anwendungsfälle

Durch die Integration eines DC Segments werden die Sollwerte für die Blindleistungsbereitstellung an jedem Terminal sowie der Sollwert für den Wirkleistungsfluss zwischen den Terminals als zusätzliche betriebliche Freiheitsgrade gewonnen. Abhängig von der Position der Terminals und ihrer Integration in das umliegende AC Netz ergeben sich hieraus verschiedene betriebliche Anwendungsfälle.

Die nachfolgend aufgelisteten betrieblichen Anwendungsfälle wurden aus vorangegangenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zusammengetragen und im Kontext des vorliegenden Beitrags weiter spezifiziert. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf individuellen Anforderungen und ihren Implikationen, um gegenseitige Abhängigkeiten abzuleiten und die Entwicklung einer Methode für den parallelen Betrieb multipler Anwendungsfälle zu ermöglichen.

- **Entlastung hoch ausgelasteter Netzsegmente**
Das Ziel dieses Anwendungsfalls besteht in der Angleichung der Betriebsmittelauslastung im Netz und der Vermeidung von Engpässen in hoch ausgelasteten Netzabschnitten. Hierdurch kann die Sicherheit und Effizienz des Netzbetriebs gesteigert und die potenzielle Anschlussleistung erhöht werden. Hierzu werden die Wirk- und Blindleistungssollwerte der Umrichter genutzt, um Leistungsflüsse in vermaschten Netzen zu steuern oder über das DC Segment umzuleiten. [8], [12]–[16]
- **Reduktion von Netzverlusten**
Ein weiterer Anwendungsfall im Betrieb hybrider AC/DC Verteilungsnetze ist die Reduktion der Netzverluste durch die lokale Bereitstellung von Blindleistung und die Leistungsflusssteuerung in vermaschten Netzen. [8]
- **Kompensation von Transitflüssen**
In AC Systemen mit mehreren geografisch verteilten Kopplungspunkten zur überlagerten Netzebene können unkontrollierte Transitflüsse auftreten. Die Kompensation dieser Transitflüsse stellt eine spezielle Kombination der beiden vorangegangenen Anwendungsfälle dar, da sie sowohl zur Reduktion der Netzverluste als auch zur Vereinheitlichung der Betriebsmittelauslastung beitragen kann. [8]
- **Verbesserung der Spannungsqualität**
Die hoch dynamische Bereitstellung von Blindleistung an den Terminals des DC Segments kann auch zur Verbesserung der lokalen Spannungsqualität genutzt werden. [8], [11]
- **Kurativer Netzbetrieb**
Die traditionelle präventive Absicherung des Netzbetriebs basiert auf der Vorhaltung ausreichender Systemreserven unter Verwendung des (n-1)-Kriteriums, um die Verletzung der Betriebsgrenzen kritischer Anlagen im Fehlerfall zu verhindern. Im Gegensatz dazu bedient sich der kurative Netzbetrieb der Flexibilitäten im Netz, um das System nach Auftreten eines Fehlers in einen sicheren Betriebspunkt zurückzuführen. Je nach Ort und Art des Fehlers können die Umrichter an den Terminals der DC Segmente zum kurativen Netzbetrieb beitragen, indem sie ihre Wirk- und Blindleistungssollwerte anpassen. [8], [17], [18]
- **Unterstützung beim Netzwiederaufbau**
Nach einem Black oder Brown Out kann eine DC Kopplung mit einem versorgten Terminal dazu verwendet werden, die AC Systeme an anderen Terminals wiederaufzubauen. Hierbei verhält sich die

Kopplung wie ein konventionelles Kraftwerk allerdings ohne die technische Herausforderung der Resynchronisierung. [8]

- **Nicht-technische Anwendungsfälle**

Neben den bisher vorgestellten Anwendungsfällen, welche auf die Optimierung technischer Zustandsgrößen des Netzes und seiner Betriebsmittel abzielen, kann der Betrieb hybrider AC/DC Verteilungsnetze auch zur wirtschaftlichen oder ökologischen Optimierung beitragen. Diese Betriebsziele sind unter anderem von den regulatorischen Rahmenbedingungen abhängig und umfassen beispielsweise die Minimierung von Betriebskosten oder Netzentgelten, die Bereitstellung von Systemdienstleistungen, die Vermeidung von Redispatch-Maßnahmen und die Maximierung der erneuerbaren Erzeugung. [12], [14], [19]–[23]

Für einige dieser Anwendungsfälle wurden bereits Konzepte und Methoden für eine isolierte Implementierung und Planung vorgestellt [10]–[23]. Trotz dieser Arbeiten stellt die Quantifizierung des Gesamtnutzens von DC Segmenten in Verteilungsnetzen weiterhin eine große Herausforderung dar, da Konzepte und Methoden für die kombinierte Betrachtung der verschiedenen Anwendungsfälle fehlen. Für die Netzbetreiber ist es aus diesem Grund schwierig, die Chancen und Risiken zu bewerten, welche mit der Realisierung entsprechender Projekte in ihrem Netz verbunden sind.

III. MULTI-USE CASE OPTIMAL POWER FLOW FÜR HYBRIDE AC/DC VERTEILUNGSNETZE

Als Beitrag zur besseren Bewältigung der oben beschriebenen Problematik wird in diesem Kapitel eine Methode zur Handhabung des parallelen Betriebs multipler Anwendungsfälle in hybriden AC/DC Verteilungsnetzen entwickelt. Diese basiert auf der Beobachtung, dass die Realisierung aller in Kapitel II vorgestellten betrieblichen Anwendungsfälle ausschließlich auf der Anpassung der Wirk- und Blindleistungssollwerte der Terminalumrichter basiert, welche jedoch jeweils unterschiedliche Zielvorgaben verfolgen. Die Bestimmung optimaler Sollwerte resultiert entsprechend in einem multikriteriellen Optimierungsproblem. Aufgrund der gleichzeitigen Abhängigkeit von den physikalischen Zusammenhänge im elektrischen Energiesystem lässt sich das Optimierungsproblem durch eine spezielle Formulierung der OPF Methode beschreiben [21], [24], [25].

A. Kombinierte Zielfunktion und Kontrollvariablen

Um mehrere Anwendungsfälle im Rahmen einer multikriteriellen Optimierung zu berücksichtigen, kann die Gesamtzielfunktion als eine skalare Kombination einzelner Zielfunktionen konstruiert werden, welche dann als Ganzes minimiert wird [21], [24]. Die kombinierte Zielfunktion lässt sich darstellen als

$$f = \min \sum_{i \in \text{Anwendungsfälle}} \alpha_i \frac{f_i(\overline{P_c}, \overline{Q_c})}{\hat{f}_i}, \quad (1)$$

wobei i ein Element der Menge der berücksichtigten Anwendungsfälle ist. Weiterhin bezeichnet f_i eine universelle Kostenfunktion, welche die Zielvorgabe des entsprechenden Anwendungsfalles quantifiziert und \hat{f}_i einen Koeffizienten zur Normalisierung, welcher vom erwarteten Wertebereich

B. Definition der Zielfunktionen

Entsprechend der in [29] dargestellten Methode zur Auswahl relevanter Anwendungsfälle wird für das Beispielsystem die parallele Implementierung der Anwendungsfälle *Entlastung hoch ausgelasteter Netzsegmente*, *Reduktion von Netzverlusten* und *Verbesserung der Spannungsqualität* angestrebt und untersucht. Zur Quantifizierung der jeweiligen Zielvorgaben werden für die einzelnen Anwendungsfälle sowie für deren parallelen Betrieb die in TABELLE 1 dargestellten Zielfunktionen entwickelt. Diese sind so konstruiert, dass sie der Struktur der oben dargestellten OPF Methode entsprechen. Auch dieser Prozess ist detaillierter in [28] dargestellt.

TABELLE 1: ZIELFUNKTIONEN FÜR DIE BEISPIELHAFT ANWENDUNG DER OPF METHODE FÜR MULTIPLE ANWENDUNGSFÄLLE IM BETRIEB HYBRIDER AC/DC VERTEILUNGSNETZE.

Label	Titel	Implementierte Zielfunktion
Sim0	Referenz	Keine - Lastflussberechnung ohne Optimierung
Sim1	Entlastung hoch ausgelasteter Netzsegmente	$f_1 = \min \frac{1}{16} \sum_{l=1}^{16} \left(\frac{I_l}{I_{max,l}} \right)^2$
Sim2	Reduktion von Netzverlusten	$f_2 = \min \frac{1}{16} \sum_{l=1}^{16} \frac{P_{L,l}}{0,1 \text{ [MW]}}$
Sim3	Verbesserung der Spannungsqualität	$f_3 = \min \frac{1}{15} \sum_{n=1}^{15} \frac{(V_n - 1)^2}{0,01}$
Sim4	Paralleler Betrieb der multiplen Anwendungsfälle	$f_4 = \min \left(\frac{1}{16} \left(\sum_{l=1}^{16} \left(\frac{I_l}{I_{max,l}} \right)^2 + \frac{P_{L,l}}{0,1 \text{ [MW]}} \right) + \frac{1}{15} \left(\sum_{n=1}^{15} \frac{(V_n - 1)^2}{0,01} \right) \right)$

C. Ergebnisse

Unter Verwendung der erweiterbaren OPF Struktur von MATPOWER [30], [31] lässt sich die dargestellte Methode in MATLAB [32] simulativ auf das Beispielsystem anwenden. Konkret werden die zehn Untersuchungsszenarien, die sich aus den Kombinationen der fünf OPF Formulierungen mit den Zielfunktionen *Sim 0* bis *Sim 4* aus TABELLE 1 und den zwei Lastsituationen *Scenario 1* und *Scenario 2* ergeben, mit dem MATPOWER Interior Point Solver [33] gelöst und optimale Wirk- und Blindleistungswerte für die Umrichter der Back-to-Back DC Kopplung zwischen Node 9 und Node 15 berechnet.

Eine Bewertung der Methode mit Blick auf die Zielvorgaben der einzelnen Anwendungsfälle ermöglicht zum Beispiel die Auswertung der resultierenden Werte für jede der Zielfunktionen f_1 bis f_4 . Eine entsprechende Darstellung bietet TABELLE 2. Die dargestellten Ergebnisse verifizieren einerseits die ermittelten Lösungen des Optimierungsverfahrens, da das hervorgehobene Minimum pro Szenario für jede Zielfunktion mit der OPF Formulierung korrespondiert, in welcher die entsprechende Zielfunktion auch zur Berechnung der Sollwerte implementiert wurde. Andererseits ist ersichtlich, dass der Betrieb der DC Kopplung bei der Implementierung jedes einzelnen Anwendungsfalles zu einer Verbesserung bezüglich der zugehörigen Zielvorgabe führt, da die berechneten Werte der Zielfunktion jeweils niedriger sind, als für die Referenzlastflussberechnung *Sim 0*. Außerdem führt die Implementierung des parallelen Betriebs der multiplen Anwendungsfälle

in *Sim 4* für beide Lastsituation zu einer Verbesserung aller Zielvorgaben f_1 bis f_4 gegenüber *Sim 0*.

TABELLE 2: RELATIVE AUSWERTUNG DER BERECHNETEN WERTE DER ZIELFUNKTIONEN f_1 BIS f_4 FÜR DIE ZEHN UNTERSUCHUNGSSZENARIOEN UND DEREN BERECHNETE OPTIMALE UMRICHTERSOLLWERTE GEGENÜBER DER REFERENZLASTFLUSSBERECHNUNG *Sim 0*.

Sim	f_1	f_2	f_3	f_4	
Scenario 1	0	100 %	100 %	100 %	100 %
	1	66 %	67 %	27 %	42 %
	2	68 %	64 %	31 %	45 %
	3	121 %	163 %	1 %	54 %
	4	68 %	64 %	26 %	42 %
Scenario 2	0	100 %	100 %	100 %	100 %
	1	43 %	41 %	41 %	41 %
	2	45 %	37 %	32 %	36 %
	3	89 %	132 %	5 %	47 %
	4	46 %	37 %	28 %	34 %

Für die berücksichtigten Anwendungsfälle und die untersuchten Lastsituationen lässt sich unter Verwendung der entwickelten OPF Methode für das Beispielsystem also tatsächlich ein für alle einzelnen Anwendungsfälle positiver Parallelbetrieb erreichen.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorgestellte Methode ermöglicht eine systematische Herangehensweise an den parallelen Betrieb multipler Anwendungsfälle in hybriden AC/DC Verteilungsnetzen und ihre Auswertung liefert Anhaltspunkte in Bezug auf deren Gesamtnutzen. Dies ist ein wichtiger Beitrag für die Bewertung von Chancen und Risiken bei entsprechenden Realisierungsprojekten.

Das Anwendungsbeispiel illustriert die Verwendung der Methode und zeigt, dass die Back-to-Back DC Kopplung im Beispielsystem einen positiven Beitrag zur Zielvorgabe aller untersuchten Anwendungsfälle sowohl im isolierten Betrieb als auch im Parallelbetrieb leisten kann.

Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse wurde im Rahmen dieses Beitrags jedoch nicht abschließend untersucht. Die Methode sollte daher auch für komplexere und vorzugsweise reale Verteilungsnetze mit weiteren Anwendungsfällen in unterschiedlichen Kombinationen getestet werden. Die Durchführung von Zeitreihensimulationen mit realen Last- und Erzeugungsdaten über längere Untersuchungszeiträume könnte ebenfalls zu einer Validierung der vorgestellten Ergebnisse beitragen.

Darüber hinaus ist die Kombination der vorgestellten OPF Methode mit Techniken der State Estimation für praktische Anwendungen von großem Interesse, da die Echtzeit-Beobachtbarkeit von Systemzuständen im realen Betrieb vor allem von Mittel- und Niederspannungsnetzen noch sehr begrenzt ist.

Weitere mögliche Erweiterungen bestehen in Algorithmen zur Optimierung von Schaltzuständen und der Netztopologie, um die Sensitivität der Terminalumrichter in Bezug auf bestimmte Netzabschnitte oder spezifische Anlagen während des Betriebs zu modifizieren.

Neben der betrieblichen Betrachtung bietet auch der Bereich der strategischen Netzplanung Ansätze für weiterführende Untersuchungen. So stellt die optimale Positionierung und Dimensionierung von integrierten DC Segmenten weiterhin eine Herausforderung dar. Wie bei anderen flexiblen Komponenten im elektrischen Energiesystem auch stellt die gegenseitige Abhängigkeit zwischen strategischer Netzplanung und späterem Betrieb eine Herausforderung dar, die es zu bewältigen gilt, um einen großflächigen Einsatz hybrider AC/DC-Verteilungsnetze zu ermöglichen.

LITERATUR

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, „THE 17 GOALS | Sustainable Development“. <https://sdgs.un.org/goals> (zugegriffen 7. Oktober 2022).
- [2] CIGRE WG C6.19, „Technical Brochure on Planning and Optimization Methods for Distribution Systems“. 2014.
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.“, Berlin, Dez. 2012.
- [4] Peng Wang, L. Goel, Xiong Liu, und Fook Hoong Choo, „Harmonizing AC and DC: A Hybrid AC/DC Future Grid Solution“, *IEEE Power and Energy Mag.*, Bd. 11, Nr. 3, S. 76–83, Mai 2013, doi: 10.1109/MPE.2013.2245587.
- [5] CIGRE WG C6.31, „Technical Brochure 793: Medium voltage direct current (MVDC) grid feasibility study“. 2020.
- [6] CIGRE WG C6/B4.37, „Technical Brochure 875: Medium Voltage DC Distribution Systems“. 2022.
- [7] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“, Frankfurt am Main, Grundsatzstudie, Nov. 2018.
- [8] D. Westermann u. a., „Distribution grid interconnection using DC-links“, in *International ETG-Congress 2019; ETG Symposium*, Mai 2019, S. 1–6.
- [9] Sebastian Kraemer u. a., „Conversion of Existing AC into DC Cable Links in Distribution Grids: Benefits and Challenges“, in *ETG Congress 2021*, VDE Verlag GmbH, März 2021.
- [10] J. Yu, K. Smith, M. Urizarbarrena, N. MacLeod, R. Bryans, und A. Moon, „Initial designs for the ANGLE DC project; converting existing AC cable and overhead line into DC operation“, in *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, Feb. 2017, S. 1–6. doi: 10.1049/cp.2017.0002.
- [11] D. N. Dyussembekova u. a., „Piloting Medium-voltage Direct Current (MVDC) in Distribution Grids in Germany - Use Cases and Planning“, S. 6.
- [12] S. Schlegel und D. Westermann, „Coupling of HV distributions systems through multiple point-to-point-DC-connections“, in *15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019)*, Feb. 2019, S. 1–5. doi: 10.1049/cp.2019.0091.
- [13] M. Rose, I. Hebbeln, O. Pohl, und C. Becker, „Planning of an MVDC interconnection considering an increasing penetration of E-Mobility“, in *CIREN Porto Workshop 2022: E-mobility and power distribution systems*, Hybrid Conference, Porto, Portugal: Institution of Engineering and Technology, 2022, S. 1094–1098. doi: 10.1049/icp.2022.0883.
- [14] E. Bach, S. Schlegel, und D. Westermann, „DC coupled Distribution System Groups enable lowering Provision of Ancillary Services“, in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sep. 2020, S. 1–6. doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209881.
- [15] N. Wehring, R. Bleilevens, J. Saat, M. Rose, und A. Moser, „Benefit of a HVDC Back-to-Back Station in a Real Distribution Grid“, in *2020 5th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)*, Aachen, Germany: IEEE, Nov. 2020, S. 1–5. doi: 10.1109/eGRID48559.2020.9330644.
- [16] M. Dahms, T. Sowa, und M. Rose, „Flexibility of grid planning in medium-voltage hybrid AC/DC distribution grids“, *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, Bd. 2020, Nr. 1, S. 229–232, Jan. 2020, doi: 10.1049/oap-cired.2021.0315.
- [17] J. Kayser, S. Schlegel, und D. Westermann, „Activation of Curative Actions as Contribution to System Security in DC-Interconnected Distribution Systems“, in *2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, Aug. 2020, S. 1–5. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281632.
- [18] J. Kayser, S. Schlegel, und D. Westermann, „An advanced control strategy for DC interconnections of distribution systems considering curative system security“, *Electric Power Systems Research*, Bd. 189, S. 106652, Dez. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106652.
- [19] J. Kayser, R. Halbauer, R. Steinhorst, S. Schlegel, und D. Westermann, „Planning Aspects of MVDC Distribution System Interconnections including Analysis of a new Use Case“, in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sep. 2020, S. 1–6. doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209875.
- [20] J. Kircheis, J. Kayser, S. Schlegel, und D. Westermann, „Method for Minimizing Grid Fees in Distribution Grids with DC-Links“, in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sep. 2020, S. 1–6. doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209792.
- [21] Z. Zhu, D. Liu, Q. Liao, F. Tang, J. J. Zhang, und H. Jiang, „Optimal Power Scheduling for a Medium Voltage AC/DC Hybrid Distribution Network“, *Sustainability*, Bd. 10, Nr. 2, Art. Nr. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/su10020318.
- [22] S. Gill, I. Kockar, und G. W. Ault, „Dynamic Optimal Power Flow for Active Distribution Networks“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. 29, Nr. 1, S. 121–131, Jan. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2279263.
- [23] J. Flottesmesch und M. Rother, „Optimized energy exchange in primary distribution networks with DC links“, in *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings*, Hong Kong, China: IEEE, 2004, S. 108–116 Vol.1. doi: 10.1109/DRPT.2004.1338477.
- [24] J. Zhu, *Optimization of power system operation*, Second edition. in IEEE Press series on power engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015.
- [25] H. W. Dommel und W. F. Tinney, „Optimal Power Flow Solutions“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Bd. PAS-87, Nr. 10, S. 1866–1876, Okt. 1968, doi: 10.1109/TPAS.1968.292150.
- [26] M. Hotz, „Optimal Power Flow in Hybrid AC/DC Power Systems: Modeling, Methods, and Design Implications“, Technical University of Munich, 2021.
- [27] CIGRE WG C6.04, „Technical Brochure 575: Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources“. 2014.
- [28] Merlin Engel, Hannes Neue, Sebastian Deters, und Christian Becker, „Optimal Power Flow for Multi-Use Case Operation of Integrated DC Sections in Distribution Systems“, in *NEIS Conference 2023*, Sep. 2023.
- [29] Merlin Engel, Sebastian Deters, und Christian Becker, „Multi-Use Case Operation of DC Sections in Distribution Systems“, in *ETG Congress 2023*, Mai 2023.
- [30] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, und R. J. Thomas, „MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. 26, Nr. 1, S. 12–19, Feb. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.
- [31] Zimmerman, Ray D. und Murillo-Sánchez, Carlos E., „MATPOWER (Version 7.1)“. Zenodo, 8. Oktober 2020. doi: 10.5281/ZENODO.4074135.
- [32] The MathWorks Inc., „MATLAB version: 9.14.0 (R2023a)“. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, United States, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mathworks.com>
- [33] H. Wang, C. E. Murillo-Sanchez, R. D. Zimmerman, und R. J. Thomas, „On Computational Issues of Market-Based Optimal Power Flow“, *IEEE Trans. Power Syst.*, Bd. 22, Nr. 3, S. 1185–1193, Aug. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.901301.