Auswirkungen asymmetrisch angeschlossener dezentraler Erzeugungsanlagen auf die Effektivität gängiger Netzplanungskriterien

Christian Aigner, Christoph Simon, Rolf Witzmann

TU München, Arcisstr. 21, +49.89.289.25587, christian.aigner@tum.de, www.een.ei.tum.de

Kurzfassung:

In diesem Beitrag wird der Einfluss von veränderten Schieflastgrenzen durch dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA) auf die Spannungsqualität untersucht. Durch unterschiedliche Anschlussszenarien (Phasenaufteilungen) wird die Robustheit konventioneller, symmetrischer Netzplanungskriterien gegenüber asymmetrischer Grenzwertverletzungen (GWV) bewertet. Dazu wird mittels asymmetrischer Lastflussrechnung ein synthetisch generierter und nach Planungskriterien ausgelegter Mittelspannungsstrang hinsichtlich gängigen der Auftrittshäufigkeit asymmetriebedingter Grenzwertverletzungen bewertet. Um eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu erreichen wird eine Probabilistik durch Variation der Anlagenverteilungen angewandt. Der Einsatz von statischer Spannungshaltung wird exemplarisch durch die Untersuchung von Anlagen mit Blindleistungsbereitstellung, sowie von regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) berücksichtigt.

Keywords: Asymmetrie, Schieflast, Einspeisung, dezentrale Erzeugungsanlage, Netzplanung

1 Motivation

Die dezentrale Einspeisung erneuerbarer Energien erfolgt zu einem beachtlichen Teil durch Klein- und Kleinstanlagen, welche in der Regel nicht dreiphasig an das Stromsystem angeschlossen werden. Gängige Netzplanungskriterien [1], [2] gehen in der Regel jedoch nur von einer symmetrischen Betrachtungsweise unter Festlegung einer Schieflastgrenze von 4,6 kVA je Netzverknüpfungspunkt (NVP) aus. Untersuchungen an unterschiedlichen Ortsnetzen zeigten dabei, dass je nach Philosophie des Netzbetreibers nicht ansatzweise von einer gleichmäßigen Aufteilung der Erzeugungsanlagen auf die Außenleiter ausgegangen werden kann [3], was zu starker Schieflast führt. Da für den internationalen Markt konzipierte leistungselektronische Betriebsmittel wie Umrichter jedoch mangels weltweit verfügbarer dreiphasiger Drehstromnetze oft für höhere einphasige Leistungen als die Schieflastgrenze nach VDE dimensioniert werden, ist zudem von einer Unterwanderung dieser Grenze in Kundenanlagen (insb. durch Elektromobilität) auszugehen. Des Weiteren erlauben moderne Methoden der statischen Spannungshaltung eine zunehmend bessere Ausnutzung der Kapazitäten bestehender Netzinfrastruktur, was mit einer höheren Gefahr unerkannter thermischer Überlastungen durch Asymmetrie verknüpft ist.

2 Methodik

In einem synthetisch generierten Verteilnetzmodell werden unterschiedliche DEA-Durchdringungsgrade durch Hinzufügen zufällig gewählter PV- und Windanlagen aus einer Verteilungsfunktion erzeugt. Bei Erreichen unterschiedlicher Durchdringungsgrade (im Folgenden auch als "Stützstelle" bezeichnet) ergeben sich früher oder später Grenzwertverletzungen hinsichtlich Spannungsqualität und Betriebsmittelauslastung, welchen durch geeignete Maßnahmen wie Netzverstärkung und/oder statische(r) Spannungshaltung begegnet wird. Um eventuelle Grenzen von symmetrischen Netzplanungsgrundsätzen bei gewissen Unsymmetriegraden aufzuzeigen, werden die so generierten Szenarien um unterschiedliche Anschlussszenarien (Außenleiteraufteilungen) der DEA verfeinert.

2.1 Verteilnetzmodell

Als Untersuchungsgrundlage dient ein auf der Datenbasis realer Versorgungsnetze synthetisch generierter, ländlich geprägter Mittelspannungsstrang. Die Länge umfasst 20 km, wobei diesem 33 individuell gestaltete Niederspannungsortsnetze unterlagert sind (Abbildung 1). Die Ortsnetze variieren dabei in ihren Dimensionen, wie z.B. Anzahl der NVP, Leitungstypen und –längen sowie der Transformatorleistungen und lassen sich anhand dieser in die Klassen "Landnetz" und "Dorfnetz" einteilen [4], [5]. In Summe umfasst das modellierte Netzgebiet 1208 NVP im Niederspannungs-, sowie 3 NVP im Mittelspannungsnetz. Die Netzstruktur ist durchgängig als Strahlennetz ausgestaltet.



Abbildung 1: Struktur des ländlichen Musternetzes

Das Netzmodell beinhaltet Ortsnetztransformatoren in den Leistungsklassen von 160 kVA bis 630 kVA (je nach Netzklasse). Für die Modellierung wird durchgehend die in Deutschland weit verbreitete Schaltgruppe Dyn5 angenommen. Der Sternpunkt sei unterspannungsseitig mit dem Neutralleiter verbunden – ein möglicher Einfluss der Sternpunktbehandlung auf die Neutralleiterimpedanz wird aufgrund fehlender Kenntnisse über die in der Praxis lokal sehr unterschiedlichen Erdungsverhältnisse [6] nicht weiter betrachtet.

2.2 Versorgungsaufgabe

Als Versorgungsaufgabe wird im Kontext dieses Beitrages Art, Leistungsverteilung, Durchdringungsgrad und Außenleiteraufteilung der einzelnen DEA an das öffentliche

Versorgungsnetz definiert. Für die Anwendung üblicher Netzplanungsgrundsätze [2] werden unterschiedliche Einspeiseszenarien bei Volleinspeisung im lastfreien Zustand und mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von eins definiert.

2.2.1 Leistungsverteilung der DEA

Wie eine Analyse der in Deutschland installierten Anlagenleistungen [7] zeigt, gibt es bei Niederspannungshausanschlüssen angeschlossenen DEA eine signifikante Anzahl von Anlagen im Leistungsbereich unter 10 kW_p (Abbildung 2), welche gemäß gültiger Richtlinien [2] potenziell asymmetrisch in das Netz einspeisen könnten. In den Untersuchungen werden

aufgrund ihrer starken Dominanz nur rein umrichtergestützte Erzeugungsanlagen vom Typ II nach VDE-AR-N 4105 betrachtet. [2] Um die daraus resultierende Abhängigkeit der späteren Ergebnisse von einer bestimmten Versorgungsaufgabe zu minimieren, erwies es sich bereits in Vorarbeiten [4], [8] als sinnvoll, über einen probabilistischen Ansatz 1000 unterschiedliche Anlagenverteilungen zu berücksichtigen.



2.2.2 Anschlussszenarien

Auswertungen von Lastgangdaten aus einem Netzgebiet in [3] zeigen einen starken Hang zur Bevorzugung des Außenleiters L1 beim einphasigen (85% der EZA bis 5 kVA), sowie beim zweiphasigen (55% zwischen L1 und L2) Anschluss (Abbildung 3). Aus diesem Fall werden die beiden weiteren Szenarien "S_4,6kVA" und "S_7,4kVA" abgeleitet, bei dem zur Abbildung eines Worst-Case alle Erzeugungsanlagen bis zur angegebenen Leistungsklasse in den Außenleiter L1 einspeisen. Im Szenario S_7,4kVA wird diese Schieflastgrenze von 4,6 kVA (20 A @230 V) auf 7,4 kVA (32 A @230 V) angehoben. Letzterer Wert lässt sich aus den

marktüblichen Nennleistungen bei Photovoltaik- und Elektromobilitätsbranche ableiten. Dies passt ebenfalls mit der durch Selektivitätsbedingungen maximal möglichen Absicherung von Endstromkreisen bei modernen Hausanschlüssen (50 A) zusammen. Eine Übersicht der untersuchten Szenarien ist der nachstehenden Tabelle 1 zu entnehmen.



Szenario	S_4,6 kVA	S_7,4 kVA	S_zufDis
Verteilung auf Außenleiter	<u>≤4,6kVA:</u> 100% L1 <u>>4,6kVA</u> : 100% L123	<u>≤7,4kVA</u> : 100% L1 <u>>7,4kVA:</u> 100% L123	siehe Abbildung 3

Tabelle 1: Betrachtete Anschlussszenarien

2.2.3 Durchdringungsgrade

Es werden unterschiedliche Durchdringungsgrade (Abbildung 4) nachgebildet, indem solange DEA aus der Verteilungsfunktion zufällig dem Netz hinzugefügt werden, bis die jeweilige Gesamtanlagenleistung erreicht ist. Dabei stellt die erste Stufe das erreichbare Integrationspotenzial dar, welches nach den gängigen Netzanschlussbewertungskriterien ohne zusätzliche Eingriffe in die Netzstruktur erreicht ist und in der Regel aufgrund von Überschreitung der zulässigen Spannungsänderung begrenzt wird [4]. In weiteren Durchdringungsstufen wird die installierte DEA- Leistung unter Zuhilfenahme von folgend kurz erläuterten Netzverstärkungsmaßnahmen weiter erhöht.



Abbildung 4: DEA-Durchdringungsgrade und beschränkende Faktoren im ländlichen MS-Strang

2.2.4 Netzverstärkungsmaßnahmen

Netzverstärkungsmaßnahmen werden im Folgenden zwischen Leitungsverstärkung und Transformatorverstärkung unterschieden. Sie werden angewendet, wenn Grenzwerte im symmetrischen Berechnungsfall überschritten werden und so gewisse Durchdringungsgrade nicht erreicht werden können.

2.2.5 Verstärkung der Ortsnetztransformatoren

Allen Transformatoren wird eine maximale Belastung von 120% der Nennscheinleistung zugestanden. Bei Überschreitung dieser wird ein standardmäßiger Tausch gegen die Leistungsklasse 630 kVA veranlasst. Sollte diese Größe nicht ausreichen, wird auf die nächsten Stufen mit 800 kVA und 1 MVA aufgerüstet. Bei alleiniger Überschreitung von Spannungsgrenzwerten wird kein Austausch von Transformatoren vollzogen.

2.2.6 Leitungsverstärkung

Im MS-Netz wird im Falle einer thermischen Überlastung das betroffene Segment mit einer Parallelleitung verstärkt. Bei Verletzung von Spannungsgrenzen wird das bestehende



Abbildung 5: Leitungsverstärkung im MS-Netz

Leitungsnetz mit Parallelleitungen, ausgehend vom Knoten mit der stärksten Grenzwertverletzung zum Umspannwerk segmentweise erweitert (Abbildung 5). Als Parallelleitung kommt der standardisierte Typ NA2XS2Y 3x1x185mm² zum Einsatz. In den Niederspannungsortsnetzen hingegen erfolgt bei Grenzwertverletzungen grundsätzlich eine



2.3 Statische Spannungshaltung

Wie bereits aus Abbildung 4 hervorgeht, ist die Aufnahmefähigkeit der Netze stark durch Verletzung von Spannungsgrenzwerten beschränkt. Maßnahmen zur Spannungshaltung erlauben eine Steigerung der Aufnahmefähigkeit und eine Reduktion des Aufwandes für Netzausbau. Hier werden die beiden Konzepte Blindleistungsbereitstellung an den DEA sowie Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren betrachtet.

2.3.1 Blindleistungsbereitstellung der DEA

Grundsätzlich ist Spannungshaltung mittels $\cos\varphi(P)$ -Kennlinie oder festem $\cos\varphi$ für unsymmetrisch an das Netz angeschlossene Anlagen vorgesehen. Dabei wird jedoch der minimal zulässige Leistungsfaktor bei Kleinstanlagen bis 4,6 kVA von $\cos\varphi_{min}=0,95$ gefordert. Im Gegensatz dazu die höheren Leistungsklassen, für welche hier ein Stellbereich bis $\cos\varphi_{min}=0,9$ gefordert wird [2]. Symmetrisch einspeisende Umrichteranlagen betrachten dabei jedoch nur den Fall symmetrischer Belastung und beziehen sich bei allen Größen ausdrücklich auf die Mitsystemkomponente.

2.3.2 Regelbarer Ortsnetztransformator (rONT)

Durch die Entkopplung der Spannungsniveaus von Mittel- und Niederspannung und die Ausnutzung des kompletten Spannungsbandes in der Niederspannung, weist der rONT ein hohes Integrationspotenzial auf und zeichnet sich durch niedrige Aufwände für Netzausbau Transformatoren stellen über aus [8]. Die eine stufenlose Anderung des Übersetzungsverhältnisses einen unterspannungsseitigen Sollwert von 100 % Un ein. Bei dreiphasiger symmetrischer Regelung wird der arithmetische Mittelwert der Spannung aller Außenleiter herangezogen, wie auch in [2] beschrieben. Diese verhältnismäßig einfache, verbreitete Regelmethode wurde gewählt, da sie weder eine Kenntnis der Netzimpedanz wie bei der Stromkompoundierung, noch eine weitere Kommunikationsinfrastruktur (wie z.B. bei abgesetztem Messpunkt) voraussetzt. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob sich das Betriebsmittel prinzipiell für den Ausgleich von Spannungsasymmetrien durch phasenselektiv einstellbare Übersetzungsverhältnisse eignet.

2.4 Stationäre Grenzwerte zur symmetrischen Netzplanung

Die Aufnahmefähigkeit von Netzen für dezentrale Erzeugungsanlagen wird durch einige Kriterien, welche bei der Anschlussbewertung zu berücksichtigen sind, festgelegt. Bei stationären Spannungsgrenzwerten soll zwischen langsamer Spannungsänderung, Spannungshöhe sowie Spannungsunsymmetrie unterschieden werden. Erstere werden üblicherweise nur für den symmetrischen Fall geprüft – sollen aber im Folgenden auf Ihre tatsächliche Einhaltung auch im unsymmetrischen Fall untersucht werden.

2.4.1 Spannungsänderung

Für die Bewertung wird in Niederspannungsnetzen das 3%-Spannungsanhebungskriterium nach VDE-AR-N4105 [2] für eine Netzanschlussbeurteilung angewendet. Im Asymmetrischen Fall werden hierbei die einzelnen Außenleiterspannungen auf Abweichung vom 3%-Grenzwert untersucht. Dieser Wert zählt per se nicht als Spannungsqualitätsmerkmal, hilft aber diese durch eine vorgegebene Spannungsbandaufteilung besser einzuhalten [4]. Da aber im Falle der Anwendung von rONT das komplette Spannungsband in der Niederspannung zur Verfügung steht, wird eine Aufteilung überflüssig und darf unberücksichtigt bleiben [2].

2.4.2 Spannungsband

Die Zulässige Spannungshöhe orientiert sich primär an den Vorgaben nach EN50160, welche im Regelfall an den NVP maximal eine Abweichung von $U_n\pm10\%$ im Mittel- und Niederspannungsnetz vorsieht. Eine Aufteilung dieses Spanungsbandes auf die Ebenen wird nicht weiter spezifiziert. Für eine Netzplanung kann im Mittelspannungsbereich eine reduzierte Spannungsgrenze von 105% U_n angewendet werden, um eine ausreichende Reserve für die Auslegung der unterlagerten Niederspannungsnetze zu gewährleisten [4]. Abbildung 7 zeigt eine Gesamtübersicht der Spannungsbandaufteilung im Verteilnetz. Bei einer symmetrischen Netzplanung wird durchgängig eine Reserve von 1% U_n für Toleranz der Spannungsmessung [2] sowie für Auswirkungen einer Spannungsasymmetrie [3] reserviert. Die somit zulässige Gesamtspannung reduziert sich damit auf $U_n\pm8\%$.



$$\Delta u_{MS} = \Delta u_{EN50160} - \Delta u_{NS} - \Delta u_{tol} - \Delta u_{unsym} = 10\% - 3\% - 1\% - 1\% = 5\%$$
(1)

Abbildung 7: Spannungsbandaufteilung angelehnt an [3]

Im asymmetrischen Fall wird der maximal zulässige Grenzwert auf alle drei Außenleiterspannungen angewandt.

2.4.3 Spannungsunsymmetrie nach EN 50160

Bei den Spannungen ist ein Unsymmetriefaktor nach (2) einzuhalten: Dabei darf im Regelfall die Gegensystemkomponente nicht mehr als 2% der Mitsystemkomponente betragen.

$$u_{unsym} = \frac{U_{gegen}}{U_{mit}} \le 2\%$$
⁽²⁾

2.4.4 Thermische Betriebsmittelauslastung

Die Ortsnetztransformatoren werden als Öltransformatoren modelliert und können aufgrund ihrer thermischen Trägheit mit bis zu 120% ihrer Gesamtnennscheinleistung (S_N) belastet werden, wobei die Maximalbelastung jeder der drei Wicklungen auf maximal 40% S_N begrenzt ist. Bei Leitungen hingegen darf der zulässige Maximalstrom in keinem Leiter überschritten werden. Durch eine asymmetrische Belastung können die maximal zulässigen Betriebsströme einzelner Leiter in Leitungen und Ortsnetztransformatoren überschritten werden ohne dabei die (symmetrische) Nennleistung des Betriebsmittels zu überschreiten.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die mit der zuvor beschriebenen Methodik gewonnenen Ergebnisse dargestellt und diese hinsichtlich ableitbarer Handlungsempfehlungen interpretiert. Die notwendigen Lastflussrechnungen wurden auf Basis einer frei verfügbaren MATLAB-Implementierung [9] durchgeführt und validiert. Da bedingt durch die probabilistische Rechnung stets eine Ergebnismenge für 1000 Varianten entsteht, wurde für eine verbesserte Übersichtlichkeit die Darstellung in Form eines Bandes gewählt. Untere und obere Grenze wird durch das 5%- und 95%-Quantil dargestellt, die Mittellinie repräsentiert den Median. Soweit nicht anders ausgeführt beziehen sich Erläuterungen immer auf letzteren.

3.1 Netzplanung ohne Spannungshaltung

Im ersten Fall werden die unterschiedlichen Anschlussszenarien symmetrisch, "S_4,6 kVA", "S 7,4 kVA" und "S zufDis" hinsichtlich Ihrer Auswirkung auf die Spannungsqualität betrachtet. Auch bei Einhaltung der Schieflastgrenze von 4,6 kVA treten Verletzungen der Spannungsgrenzwerte auf. Dabei wird bei 6% aller NVP die zulässige Spannungsanhebung ("3%-Kriterium"), sowie bei 1% der NVP das zulässige Spannungsband von $U_{n}\pm 10\%$ auf dem Außenleiter L1 überschritten. Dies zeigt sich auch in der Verletzung des 3%-Kriteriums für den Außenleiter L1. Die Szenarien zeigen unterschiedliche Intensitäten. Während bei "S 4,6kVA" die Asymmetrie noch einen relativ geringen Einfluss zeigt, vergrößert sich dieser beim Szenario "S zufDis" deutlich und erreicht sein Maximum bei der Erweiterung der Schieflastgrenze im Szenario "S_7,4 kVA". Das 3%-Kriterium kann bei Einhaltung der Schieflastgrenze von 4,6 kVA in der höchsten Durchdringungsstufe bei 6% der Netzverknüpfungspunkte (trotz Netzverstärkungsmaßnahmen) nichtmehr eingehalten werden. Dieser Wert steigert sich auf bis zu 25% der NVP bei den anderen beiden Szenarien. Die viel essenziellere Überschreitung der Marke von 110% Un (Abbildung 8, rechts) findet bei Einhaltung der aktuellen Schieflastgrenze im niedrigen einstelligen Bereich statt, steigert sich aber bei den beiden anderen Szenarien auf 12% bzw. 20% aller NVP.



Abbildung 8: Überschreitung der Grenzwerte durch Spannungsasymmetrie

Während die Grenzwerte der zulässigen Spannungshöhe bereits überschritten sind, wird das Spannungsqualitätsmerkmal "Unsymmetriefaktor" nur im Szenario "S_7,4kVA" bei einer geringen Anzahl von 3% der NVP überschritten. Thermische Leitungs- und Transformatorüberlastungen durch verstärkte asymmetrische Belastung konnten in keinem Anschlussszenario beobachtet werden.

3.2 Netzplanung mit statischer Spannungshaltung

3.2.1 Dezentrale Spannungshaltung

Abbildung 9 zeigt einen deutlich geringeren Einfluss der asymmetrischen Anschlussszenarien auf die Spannungshöhe. Verletzungen des 3%-Spannungsanhebungs-Kriteriums treten nur bei Abweichung der Schieflastgrenze und erst ab höheren Durchdringungsgraden von 8 MW_p auf. Die Anzahl der verletzten NVP bewegt sich dabei nur im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Eine Überschreitung der absoluten Spannungshöhe nach EN 50160 findet darüber hinaus in keinem Falle statt, ebenso wie thermische Überlastungen der Leiter nur extrem selten vorkommen. Die Überschreitung des zulässigen Unsymmetriefaktors stellt jedoch bei Überschreitung der Schieflastgrenze ab mittleren Durchdringungsgraden von 6 MW_p bei über 20% der NVP einen Einschnitt in die Spannungsqualität dar.



Abbildung 9: asymmetriebedingte Grenzwertverletzungen bei DEA mit Blindleistungsbereitstellung

3.2.2 Spannungshaltung mit regelbarem Ortsnetztrafo

Bei einer Netzplanung unter Verwendung von rONT mit (konventioneller) phasensymmetrischer Stufung macht sich die Verletzung der Schieflastgrenze und hohen Durchdringungsgraden bei einer kleinen Anzahl von NVP durch Überschreitung des Spannungsbandes bemerkbar (Abbildung 10). Gleichzeitig ist beim Auftreten von Spannungsunsymmetrie eine deutlich höhere Häufigkeit festzustellen. Die Schaltgruppe Dy der ONT führt zu einer Übertragung der asymmetrischen Belastung aus den Niederspannungsnetzen in das überlagerte Mittelspannungsnetz [10], wo diese kumuliert eine Spannungsunsymmetrie hervorruft. Dieser Effekt wird im Gegensatz zu Abschnitt 3.1 deutlich sichtbar. da durch die bessere Ausnutzung der Spannungsbänder viele Leitungsverstärkungsmaßnahmen auf der Mittelspannungsebene bei symmetrischer Netzplanung entfallen können. [8]



Abbildung 10: Einfluss der asymmetrischer Einspeisung auf die Spannungsqualität bei Netzplanung mit rONTs

Da die festgestellte Spannungsunsymmetrie hauptsächlich aus dem überlagerten Mittelspannungsnetz übertragen wird, bietet sich die Möglichkeit, diese durch die Technologie

einer phasenindividuellen Anpassung des Übersetzungsverhältnisses im rONT auszugleichen. Die Ergebnisse der Berechnung in Abbildung 11 zeigen, dass Spannungsunsymmetrien mit dieser Technologie bei allen Durchdringungsgraden fast nahezu vollständig vermieden werden können. Im Gegensatz dazu existiert kein markanter Einfluss auf die erst im Ortsnetz entstehenden Spannungsbandverletzungen.



Abbildung 11: Einfluss von rONTs mit phasenindividueller Stufung auf die Spannungsqualität

3.3 Betriebsmittelüberlastung

Auswirkungen asymmetrischer Einspeisung sind vor allem in der Überlastung der speisenden Ortsnetztransformatoren bei Nichteinhaltung der Schieflastgrenze zu erkennen (Abbildung 12). Dabei werden in höheren Durchdringungsgraden bei den Spannungshaltungskonzepten "Leitungsverstärkung" und "Regelbarer Ortsnetztransformator" bis zu etwa 20% der Ortsnetztransformatoren die einzelnen Wicklungen überlastet. Bei Blindleistungsbereitstellung verdoppelt sich dieser Wert auf 40%. Bei den einzelnen Stationsabgängen hingegen konnten in keinem Szenario Leitungsüberlastungen beobachtet werden. Begründet ist dies im verwendeten ländlichen Netzmodell mit tendenziell hohen Stranglängen [5], das schon im symmetrischen Fall eine hohe Anfälligkeit für Spannungsbandverletzungen bei geringer thermischer Auslastung aufweist.



Abbildung 12: Überlastung der Ortsnetztransformatoren bei unterschiedlichen Spannungshaltungskonzepten

4 Zusammenfassung

Eine Erhöhung der aktuell vorgegebenen Schieflastgrenze von 4,6kVA scheint mit den derzeit üblichen Netzplanungskriterien im untersuchten Netzmodell nicht vereinbar. Die Randbedingungen (Schieflastgrenze von 4,6 kVA, sowie Begrenzung der

Spannungsänderung auf 3%) erweisen sich hier jedoch als robust genug, um mit einer symmetrischen Netzanschlussprüfung auszukommen und die Anforderungen an die Spannungsqualität auch unter extrem ungünstiger Außenleiteraufteilung zu erfüllen. Sollten im Versorgungsgebiet Kundenanlagen jedoch vermehrt gegen die festgelegte Schieflastgrenze verstoßen, so können daraus Probleme bei der Einhaltung der Spannungsbandgrenzen sowie bei unzulässiger Höhe der Spannungsasymmetrie ergeben.

Die Probleme in Bezug auf Überschreitung der zulässigen Spannungsasymmetrie ergeben sich insbesondere bei der Anwendung von statischer Spannungshaltung, welche derzeit nicht phasenindividuell vorgesehen ist. Unsymmetriebedingte Spannungsbandverletzungen können durch die Mittelspannungsebene in benachbarte Ortsnetze übertragen werden. Eine Abhilfe für durch das Mittelspannungsnetz provozierte Spannungsasymmetrien kann hier der Ausgleich durch die Verwendung phasenselektiv regelbarer Ortsnetztransformatoren bringen.

Ein Abweichen von der Schieflastgrenze macht eine zusätzliche unsymmetrische Netzverträglichkeitsprüfung in Form von Betrachtung der phasenindividuellen Spannungsänderungen sowie des Unsymmetriefaktors nach EN 50160 nötig.

5 Referenzen

- [1] VDE-AR-N 4100, Technische Anschlussregeln Niederspannung, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2019
- [2] VDE-AR-N 4105, Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [3] Pardatscher, R.: Planungskriterien und Spannungsqualität in Mittel- und Niederspannungsnetzen mit hoher Photovoltaik-Einspeisung, Dissertation, TU-München, 2015
- [4] Aigner, C., Witzmann, R.: Influence of power system planning criteria on hosting capacity of distribution grids with high DER-penetration, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy storage systems (NEIS), Hamburg, 20.-21. September 2018.
- [5] Lindner, M. et al.: Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 10.-12. Februar 2016
- [6] Schrank, W.: Schutz gegen Berührungsspannungen, 3, Aufl., Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1958
- [7] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS): EEG-Anlagenregister von EnergyMap.info 2015, <u>http://www.energymap.info/</u>, letzter Aufruf: 09.01.2020
- [8] Aigner, C., Witzmann, R.: Effectivity of active voltage control concepts in distribution grids, CIRED, Madrid, 03.-06. Juni 2019.
- [9] Avilés Cedeño, J., A Three-Phase Unbalanced Load Flow Solver for Large-Scale Distribution Power Systems, TU Delft, 2017
- [10] La Cour, Jens Lassen: Die Transformatoren, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 1936