

Dynamische Untersuchungen eines netzgekoppelten Photovoltaik-Wechselrichters unter Fehlerbedingungen

Tobias Neumann

Abstract—Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem dynamischen Verhalten von netzgekoppelten Photovoltaik-Wechselrichtern. Hierbei wird besonderer Fokus auf das Verhalten des Wechselrichters bei verschiedenen Kurzschlussarten im überlagerten Energieversorgungsnetz gelegt. Durch die bestehenden Netzanschlussregeln sind Erzeugungseinheiten aus dem Bereich der Erneuerbaren Energien genauso wie konventionelle Einheiten dazu verpflichtet, während Kurzschlägen zum einen sich nicht vom Netz zu trennen und zum anderen mit einer Spannungsregelung netzstützend zu wirken. Dieses geforderte Verhalten wird in dem Beitrag mit Hilfe von Simulationsergebnissen veranschaulicht und erklärt.

Index—Photovoltaik, Wechselrichter, Regelung, Fault Ride Through, Spannungsregelung

I. EINLEITUNG

IM Bereich der elektrischen Energieversorgung wird in Deutschland zunehmend auf Erneuerbare Energien gesetzt. Die zentralen Technologien sind hierbei die Windenergie, die Stromerzeugung aus Biomasse, die Wasserkraft und die Photovoltaik (PV). Der Bereich der Photovoltaik machte im Jahr 2010 einen Anteil von ungefähr 2 % der gesamten erzeugten elektrischen Energie in Deutschland aus. Die installierte Leistung aller PV-Erzeugungseinheiten betrug am Ende des Jahres 2010 etwa 17 GWp. Gefördert wird die PV wie auch die anderen Erneuerbaren Energien durch gesetzlich festgelegte Einspeisevergütungen. Durch die hohe Förderung der PV kam es in den letzten Jahren zu einem regelrechten Boom, was zur Folge hatte, dass die Förderungen durch festgesetzte Einspeisevergütungen staatlicherseits reduziert wurden.

Da die Einspeisung aus PV-Erzeugungseinheiten stark von der solaren Einstrahlung abhängt, ist ein kontinuierlicher Grundlastbetrieb dieser Art der Erzeugungseinheit nicht möglich. Der Anteil aus PV an der gesamten Energieerzeugung ist demnach in den Sommermonaten besonders relevant. Kleine PV-Anlagen werden in der Niederspannung angeschlossen. Größere Einheiten hingegen

T. Neumann arbeitet im Institut Elektrische Anlagen und Netze an Universität Duisburg-Essen. Seine Emailadresse lautet: tobias.neumann@uni-duisburg-essen.de.

werden in der Mittelspannung und zum Teil in Hochspannungsebene mit dem elektrischen Netz verbunden.

Große Kapazitäten an installierter PV-Leistung und die entsprechende Beeinflussung des Leistungsflusses im Mittel- und Hochspannungsnetz führen dazu, dass Anforderungen an Erzeugungseinheiten bezüglich deren elektrischen Verhaltens formuliert wurden. Neben den Anforderungen für den stationären Betrieb einer Erzeugungseinheit, auf die in dieser Veröffentlichung nicht weiter eingegangen wird, bestehen Anforderungen bezüglich des dynamischen Verhaltens während Netzfehlern. Es ist gefordert, dass eine Erzeugungseinheit für eine definierte Zeit während eines Spannungseinbruch mit dem elektrischen Netz verbunden bleiben muss und sich nicht trennen darf. Hintergrund ist hierbei, dass der Verlust einer großen Anzahl an Erzeugungseinheiten während Kurzschlägen zu Stabilitätsproblemen im elektrischen Versorgungsnetz führen kann, da das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch dann nicht mehr gegeben ist. Dieses geforderte Verhalten des Durchfahrens von Netzfehlern wird auch als Fault Ride Through (FRT) bezeichnet. Neben dieser Eigenschaft muss die Erzeugungseinheit zusätzlich während einer dynamischen Spannungsänderung einen definierten Blindstrom ins Netz einspeisen. Handelt es sich um einen Spannungseinbruch (Low Voltage Ride Through, LVRT), so muss die Einheit kapazitiven Blindstrom einspeisen und so spannungsanhebend wirken. Während einer Spannungsüberhöhung (High Voltage Ride Through HVRT) muss die Einheit induktiven Blindstrom anregeln und demnach spannungssenkend fungieren.

Die Überprüfung dieser geforderten, elektrischen Eigenschaften erfolgt durch ein Zertifizierungsverfahren. Hierbei überprüfen akkreditierte Zertifizierungs- und Prüfinstitutionen die jeweilige Erzeugungseinheit. Aufsetzend auf dem Zertifikat einer einzelnen Erzeugungseinheit kann ein Anlagenzertifikat erstellt werden (Windpark, große PV-Anlagen). Grundlage hierbei ist die BDEW-Mittelspannungsrichtlinie. Weitere relevante Netzanschlussregeln sind der Transmission Code und die Systemdienstleistungsverordnung. Umgesetzt werden diese Netzanschlussregeln und insbesondere die BDEW-Mittelspannungsrichtlinie durch die Technischen Richtlinien der Fördergesellschaft Wind (FGW). Zur Erlangung eines

Zertifikates nach BDEW Mittelspannungsrichtlinie muss der Hersteller zum einen die elektrischen Eigenschaften der Erzeugungseinheit im Labor nachgewiesen haben. Zum anderen muss er aber auch das Verhalten der Einheit mit einer Computer-basierten Simulation validiert haben. Hintergrund ist herbei, dass Netzbetreiber den Anschluss von Erzeugungseinheiten und Erzeugungsanlagen prüfen. Hierzu sind exakte Computer-basierte Simulationen notwendig.

II. DYNAMISCHE ANFORDERUNGEN AN PV-WECHSELRICHTER

Netzgekoppelte PV-Wechselrichter müssen die in den folgenden drei Abbildungen beschriebenen dynamischen, elektrischen Eigenschaften zur Zertifizierung nach der BDEW Mittelspannungsrichtlinie erbringen. Abbildung 1 zeigt den Spannungstrichter, der im Falle eines Fehlers im Netz ohne Abschaltung der Erzeugungseinheit durchfahren werden muss.

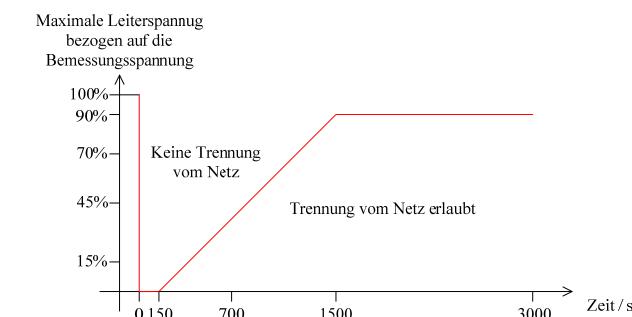


Abb. 1. Anforderungen zum Durchfahren von Netzfehlern

Abbildung 2 zeigt das Prinzip der Spannungsregelung. Ausgehend von der dynamischen Spannungsänderung im Fehlerfalle ergibt sich aus der entsprechenden Kennlinie ein einzustellender Blindstrom. Der Verstärkungsfaktor wird voreingestellt mit dem Faktor 2 gewählt, kann aber je nach Anforderungen und Netztopologie abweichen.

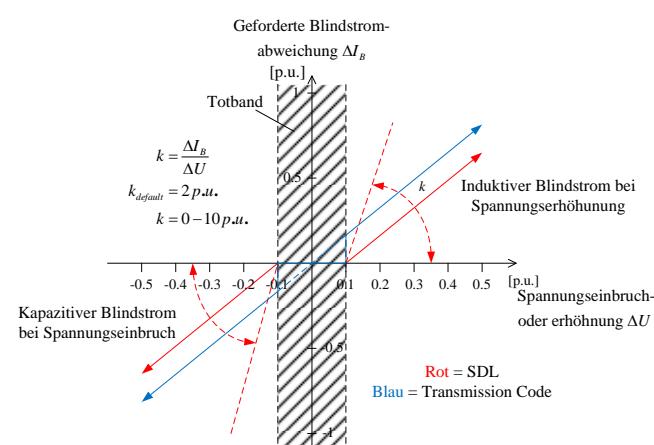


Abb. 2. Prinzip der Spannungsregelung

Abbildung 3 verdeutlicht die dynamischen Anforderungen bezüglich des Anregels des Blindstromes im Fehlerfalle. Der

stationäre Endwert, der sich aus Abbildung 2 ergibt, ist mit einem Toleranzband von -10 und +20 % versehen. Das erstmalige Erreichen dieses Toleranzbandes soll nach einer maximalen Anschwingzeit von 30 ms erreicht sein. Das stationäre Verbleiben innerhalb des Toleranzbandes soll nach einer maximalen Einschwingzeit von 60 ms gewährleistet sein.

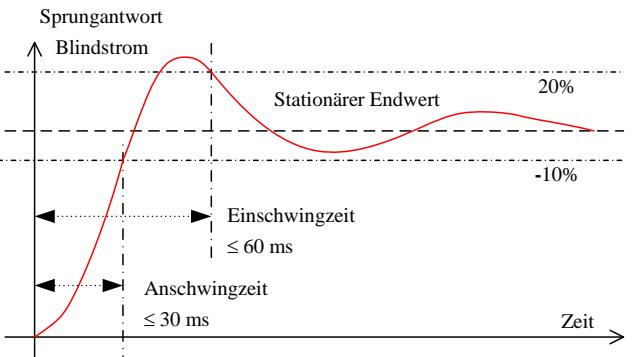


Abb. 3. Anforderungen an die Sprungantwort des Blindstroms

Für den Nachweis des dynamischen Verhaltens von Erzeugungseinheiten im Rahmen des BDEW Zertifizierungsverfahren ist ein möglicher Testaufbau in Abbildung 4 veranschaulicht. Da Kurzschlussuntersuchungen nicht am realen Mittelspannungsnetz durchgeführt werden können, nutzt man bei diesem Aufbau die Längsreaktanz X1. Mit dieser Längsdrossel schwächt man bewusst die Kurzschlussleistung des Netzes, um so einen sicheren Betrieb des Netzes gewährleisten zu können. Im stationären Betrieb ist Schalter S1 geschlossen. Öffnet man diesen und legt somit X1 zwischen Netz und Erzeugungseinheit, erhöht man die Impedanz des Netzes und reduziert somit Kurzschlussleistung. Nachdem X1 eingelegt ist und sich der Prüfaufbau in einem eingeschwungenen Zustand befindet, wird über den Schalter S2 der definierte Kurzschluss erzeugt. Über das Teilverhältnis des induktiven Spannungsteilers kann die entsprechende Spannungseinbruchtiefe realisiert werden. Die unterschiedlichen Fehlerdauern können durch gezielte Ansteuerungen des Schalters S2 gewährleistet werden. Außerdem können durch selektives Schalten der einzelnen Phasen mit S2 auch unsymmetrische Fehler erzeugt werden und das Verhalten der Erzeugungseinheit hierbei analysiert werden. Diese besteht aus einer DC-Quelle, die die reale PV-Zelle emuliert und dem eigentlichen Prüfling, dem PV-Wechselrichter.

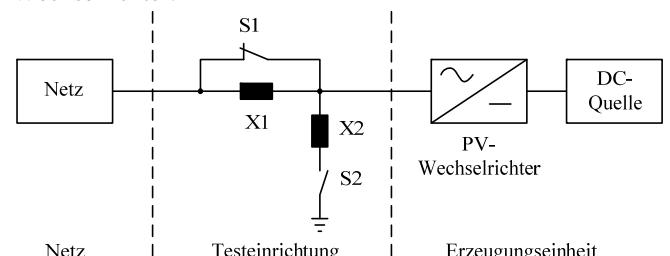


Abb. 4. Testaufbau für den Nachweis der dynamischen Eigenschaften von PV-Wechselrichtern

III. REGELUNG PV-WECHSELRICHTER

Ein dreiphasiger PV-Wechselrichter besteht üblicherweise aus einer IGBT-basierten Sechspulsbrücke, die in Abbildung 5 veranschaulicht ist. Jedes IGBT-Modul wird über den Controller der Erzeugungseinheit einzeln mit pulsweitenmodulierten Signalen angesteuert. Aufgaben des PV-Wechselrichters sind das MPP-Tracking und die entkoppelte Regelung von Wirk- und Blindleistung. Beschrieben wird im Folgenden eine klassische netzspannungsorientierte Stromregelung mit überlagertem Zwischenkreisspannungsregler.

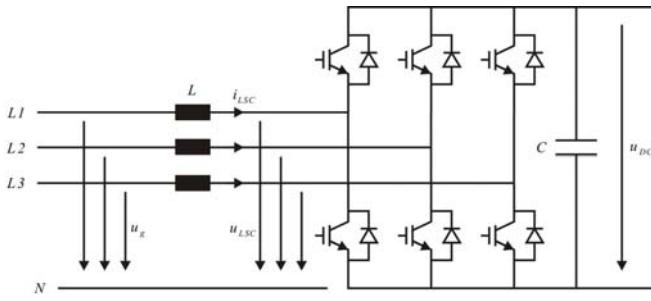


Abb. 5. Prinzipielle Anordnung eines dreiphasigen PV-Wechselrichters

Aus dem Maschenumlauf von der Netzspannung über den Spannungsabfall über der Netzinaktivität bis zur Spannung des Wechselrichters folgt die Gleichung (1).

$$\begin{pmatrix} u_{g,L1} \\ u_{g,L2} \\ u_{g,L3} \end{pmatrix} = L \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{LSC,L1} \\ i_{LSC,L2} \\ i_{LSC,L3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{LSC,L1} \\ u_{LSC,L2} \\ u_{LSC,L3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Nach der Transformation in ein mit dem Netzspannungswinkel Θ_g mitrotierendes Koordinatensystem erhält man die folgenden Gleichungen (2) und (3).

$$u_{g,d}^{\angle u_g} = L \cdot \frac{di_{LSC,d}^{\angle u_g}}{dt} - \omega_0 L \cdot i_{LSC,q}^{\angle u_g} + u_{LSC,d}^{\angle u_g} \quad (2)$$

$$u_{g,q}^{\angle u_g} = L \cdot \frac{di_{LSC,q}^{\angle u_g}}{dt} + \omega_0 L \cdot i_{LSC,d}^{\angle u_g} + u_{LSC,q}^{\angle u_g} \quad (3)$$

Die Referenzspannung des Wechselrichters ergeben sich nach Umstellung von (2) und (3) zu

$$u_{LSC,d_ref}^{\angle u_g} = u_{g,d}^{\angle u_g} - u_{LSC,d}^{\angle u_g} + \omega_0 L \cdot i_{LSC,q}^{\angle u_g} \quad (4)$$

$$u_{LSC,q_ref}^{\angle u_g} = u_{g,q}^{\angle u_g} - u_{LSC,q}^{\angle u_g} - \omega_0 L \cdot i_{LSC,d}^{\angle u_g} \quad (5)$$

wobei gilt:

$$u_{LSC,d}^{\angle u_g} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_s} \right) \cdot (i_{LSC,d_ref}^{\angle u_g} - i_{LSC,d}^{\angle u_g}) \quad (6)$$

und

$$u_{LSC,q}^{\angle u_g} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_s} \right) \cdot (i_{LSC,q_ref}^{\angle u_g} - i_{LSC,q}^{\angle u_g}) \quad (7)$$

Für die Wirk- und Blindleistung am Wechselrichter gelten die nachfolgenden Gleichungen:

$$p_{LSC} = u_{g,d}^{\angle u_g} \cdot i_{LSC,d}^{\angle u_g} + u_{g,q}^{\angle u_g} \cdot i_{LSC,q}^{\angle u_g} \quad (8)$$

$$q_{LSC} = u_{g,q}^{\angle u_g} \cdot i_{LSC,d}^{\angle u_g} - u_{g,d}^{\angle u_g} \cdot i_{LSC,q}^{\angle u_g} \quad (9)$$

Da die mitrotierende Querkomponente $u_{g,q}^{\angle u_g}$ der Netzspannung im symmetrischen Fall null ist, folgt daraus, dass die Längskomponente $i_{LSC,d}^{\angle u_g}$ und die Querkomponente $i_{LSC,q}^{\angle u_g}$ des Wechselrichters proportional zu Wirk- und Blindleistung sind. Für die Leistungsbilanz zwischen Gleich- und Wechselspannungsseite des Wechselrichters gilt:

$$p_{LSC} = u_{DC} \cdot i_{DC} \approx u_{LSC,d}^{\angle u_g} \cdot i_{LSC,d}^{\angle u_g} \quad (10)$$

Somit wird ersichtlich, dass die Zwischenkreisspannung durch die Längskomponente $i_{LSC,d}^{\angle u_g}$ des netzseitigen Umrichterstroms einstellbar ist. Den Referenzwert für den Längstrom liefert folgende Gleichung:

$$i_{LSC,d_ref}^{\angle u_g} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_s} \right) \cdot (u_{DC_ref} - u_{DC}) \quad (11)$$

Somit ergibt sich folgendes Zeigerdiagramm für die Spannungen und Ströme am Wechselrichter.

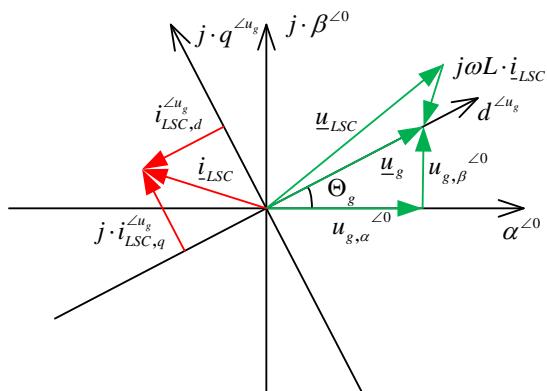


Abb. 6. Zeigerdiagramm PV-Wechselrichter

IV. SIMULATIONSERGEBNISSE

Der folgende Abschnitt zeigt beispielhaft drei Simulationsergebnisse vom Verhalten eines netzgekoppelten PV-Wechselrichters bei Spannungseinbrüchen.

Die Nennleistung dieser Erzeugungseinheit beträgt 100kW. Das Verhältnis zwischen Kurzschlussleistung des Netzes nach Einlegen der Längsdrossel und Nennleistung des Wechselrichters beträgt 5:1. Für die folgenden Simulationsergebnisse wurden der Reglerkern mit realistischen Abtastzeiten und die IGBTs mit entsprechender Ansteuerung durch die PWM-Signale nachgebildet. Hierdurch ist eine exakte Validierung von Messergebnissen möglich. Die Dauer der jeweiligen Fehler beträgt in allen drei Beispielen 150 ms.

In Beispiel eins (Abbildung 7) wird das Verhalten des Wechselrichters bei Nennleistung und einem Leistungsfaktor von eins hinsichtlich eines symmetrischen Spannungseinbruchs auf 50% Restspannung untersucht. Die verbleibende Restspannung von 50% repräsentiert einen Fehler, der im überlagerten Energieversorgungsnetz an einer entfernten Stelle auftritt. Die Erzeugungseinheit reduziert den Wirkstrom nach Erkennung des Fehlers zu null und speist einen reinen Blindstrom nach Spannungsregelungskennlinie in das Netz. Bei einem Einbruch auf 50% Restspannung und einem Verstärkungsfaktor von 2 ergibt dies einen Blindstrom von etwa 1 p.u..

Beispiel zwei (Abbildung 8) zeigt das Verhalten des Wechselrichters bei gleichen stationären Bedingungen und einem symmetrischen Spannungseinbruchs auf 0% Restspannung. Der Spannungseinbruch auf 0% bedeutet das der Kurzschluss in unmittelbarer Nähe der Erzeugungseinheit auftritt. Die Erzeugungseinheit selber reduziert erneut den Wirkstrom nach Erkennung des Fehlers zu null und speist nach Kennlinie Blindstrom. Da der maximal einzuprägende Blindstrom 1 p.u. ist, speist die Erzeugungseinheit den maximal verfügbaren Blindstrom.

In Beispiel drei (Abbildung 9) wird nun das Verhalten des Wechselrichters bei einem unsymmetrischen Fehler gezeigt. So ist in Netzanschlussrichtlinien auch bei unsymmetrischen

Netzfehlern, wie einem einpoligen Erdkurzschluss oder einem zweipoligen Kurzschluss mit oder ohne Erdberührung, gefordert, dass einer reiner Mitsystemblindstrom nach Kennlinie einzuspeisen ist. Hierfür ist eine Trennung zwischen Mit- und Gegensystem erforderlich. Bei dem Beispiel handelt es sich um einen zweipoligen Kurzschluss mit einem Spannungseinbruch auf 0% Restspannung in der kleinsten Leiter-Leiter Spannung. Ohne Berücksichtigung der auftretenden Gegensystemspannung in der Regelung des Wechselrichters würde ein erheblicher Gegensystemstrom fließen, der hinsichtlich der dynamischen Anforderungen nicht akzeptabel ist. Bei geeigneter Verwendung der Gegensystemspannung in der Regelung, ist es möglich einen reinen Mitsystemstrom in das Netz zu speisen. Somit kann gewährleistet werden, den geforderten Mitsystemblindstrom nach Kennlinie auch bei unsymmetrischen Fehlern zu liefern.

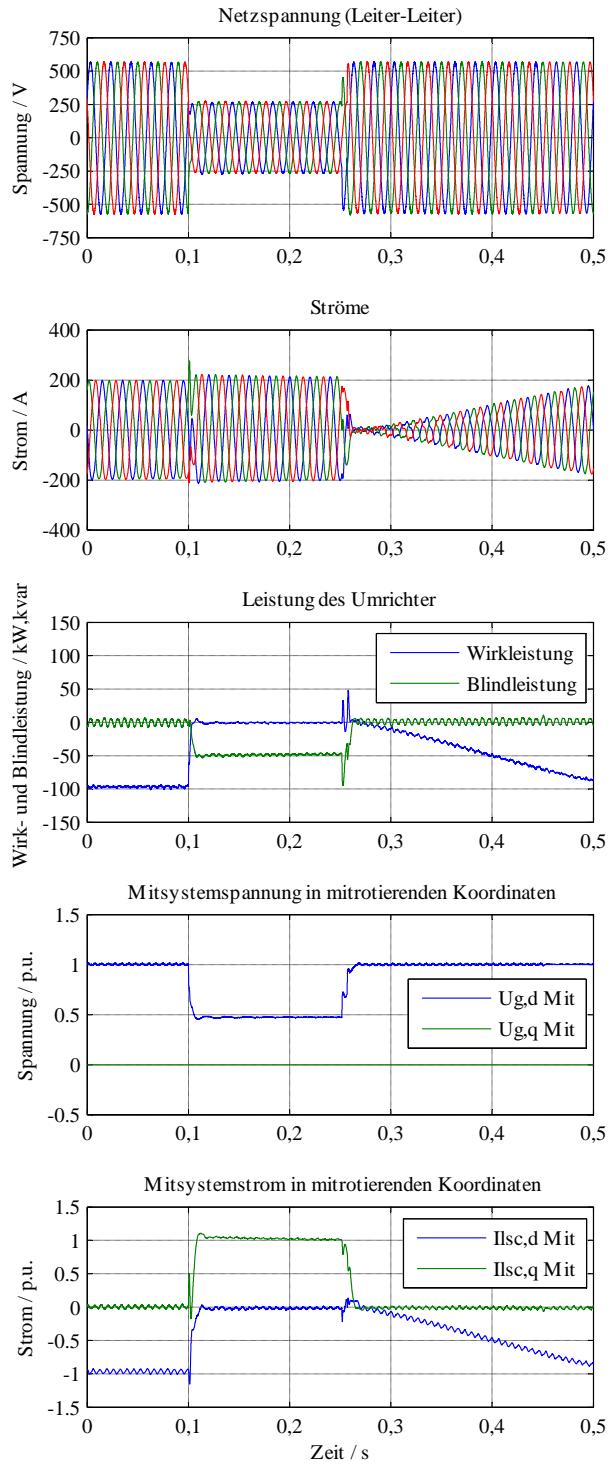


Abb. 7. Momentanwerte Spannung und Strom, Wirk- und Blindleistung, Mitsystemspannung und -strom in mitrotierenden Koordinaten bei einem symmetrischen Spannungseinbruch auf 50 % verbleibende Restspannung

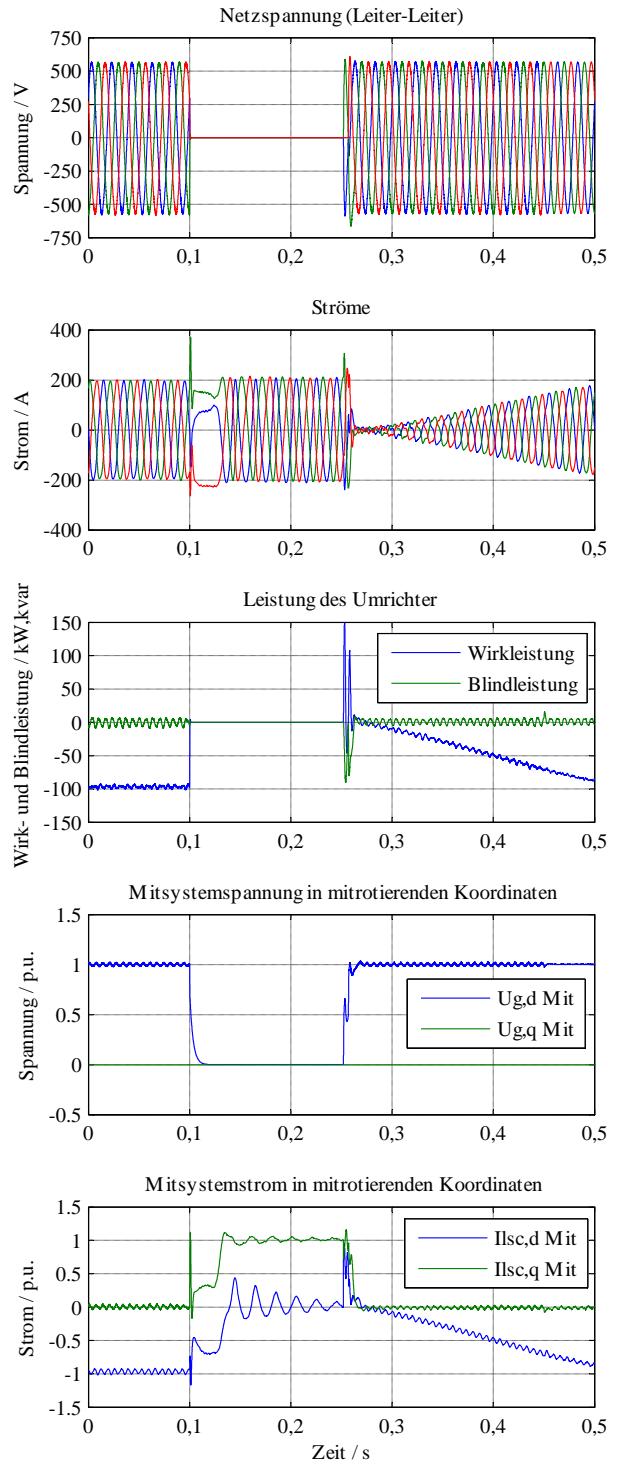


Abb. 8. Momentanwerte Spannung und Strom, Wirk- und Blindleistung, Mitsystemspannung und -strom in mitrotierenden Koordinaten bei einem symmetrischen Spannungseinbruch auf 0 % verbleibende Restspannung

V. SCHLUSSFOLGERUNG

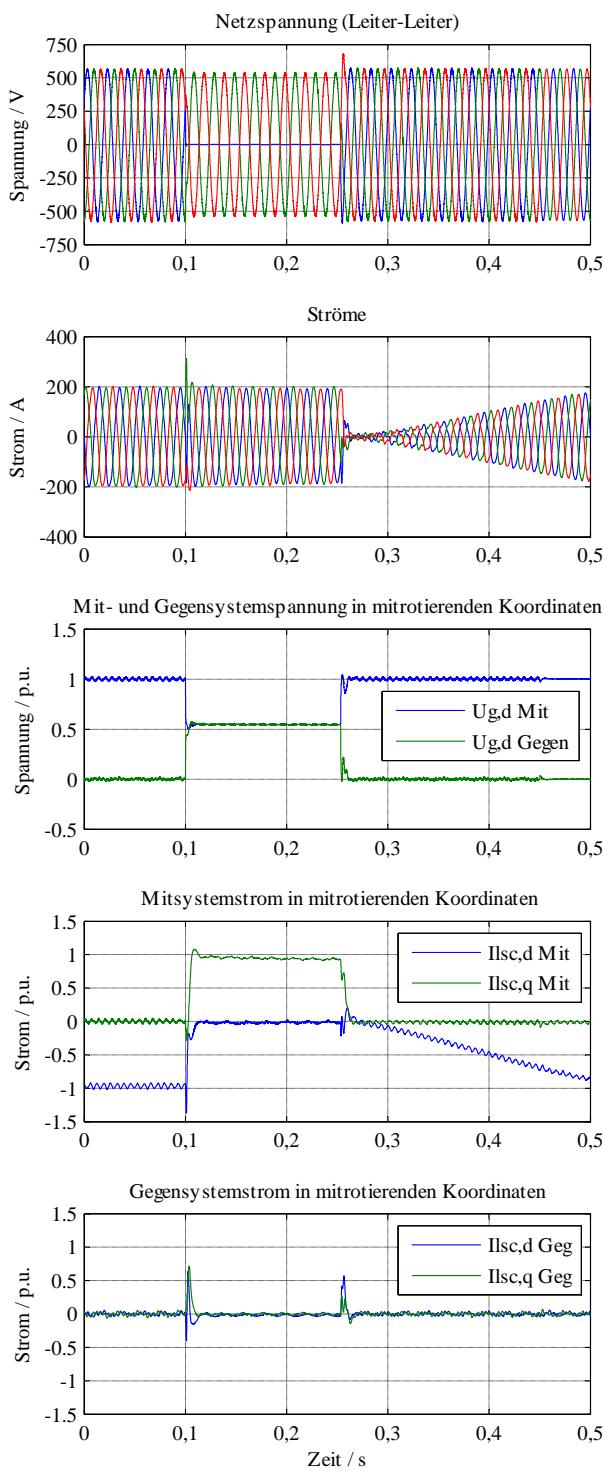


Abb. 9. Momentanwerte Spannung und Strom, Mit- und Gegensystemspannung in mitrotierenden Koordinaten, Mit- und Gegensystemstrom in mitrotierenden Koordinaten bei einem unsymmetrischen Spannungseinbruch (zweipoliger Kurzschluss)

Die Anforderungen der BDEW Mittelspannungsrichtlinie müssen auch von PV-Wechselrichtern, die an die Mittelspannung angeschlossen werden wollen, erfüllt werden. Hierfür ist eine geeignete Prüfung und Zertifizierung durchzuführen. Ein Bestandteil dieser Zertifizierung ist die Überprüfung der dynamischen Eigenschaften von PV-Wechselrichtern. Hinsichtlich des dynamischen Verhaltens bei Netzfehlern müssen die Anforderungen bezüglich des Durchfahrens von Netzfehlern sowie die Spannungsregelung nachgewiesen werden. Neben Messungen ist der Wechselrichterhersteller verpflichtet, die Messergebnisse mit einem Computer-basierten Modell zu validieren.

Der vorliegende Beitrag veranschaulicht Simulationsergebnisse eines PV-Wechselrichters. Hierbei wurde der Wechselrichter realistisch, mit geringen Abtastzeiten modelliert. Durch eine geeignete und intelligente Regelung des Wechselrichters ist es möglich, die Anforderungen der BDEW Mittelspannungsrichtlinie zu erfüllen. Speziell bezüglich der Anregelzeit des geforderten Blindstroms im Fehlerfalle ist eine hohe Dynamik durch entsprechende Regelalgorithmen möglich. Neben symmetrischen Fehlern, wo eine reine Mitsystembetrachtung ausreicht, ist es durch eine entsprechende Regelung möglich, unsymmetrische Fehler im Sinne der Anforderungen zu durchfahren. Hierbei muss die im unsymmetrischen Fehlerfalle auftretende Gegensystemspannung berücksichtigt werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, „Erneuerbare Energien 2010“, Stand, 14. März 2011
- [2] Verband der Netzbetreiber, „Transmission Code 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber“
- [3] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, „Technische Richtlinie, Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“
- [4] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009, „Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen (Systemdienstleistungsverordnung SDLWindV)“

Tobias Neumann (1977) erlangte den akademischen Grad des Diplom-Ingenieurs im Bereich der Elektro- und Informationstechnik der Universität Duisburg-Essen im Jahre 2009. Sein Schwerpunkt lag hierbei im Bereich der elektrischen Energietechnik. Seit 2010 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Elektrische Anlagen und Netze an der Universität Duisburg-Essen. Sein Schwerpunkt liegt in der NetzinTEGRATION von Erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie und der Photovoltaik. Hierbei stehen die Modellierung und die Regelung dieser Erzeugungseinheiten im Fokus. Er ist Mitglied von IEEE und vom VDE