

Universelle Umrichterregelung für ein- und dreiphasige Systeme im Netzparallel- und Inselnetz-Betrieb

Christoph Siedle, Stefan Reichert, Benjamin Stickan, Manuel Rauscher
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme – Abteilung Umrichtersysteme
Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg
Tel.: +49 761 4588 5420, Fax: +49 761 4588 9420
E-Mail: christoph.siedle@ise.fraunhofer.de
Internet: <https://www.ise.fraunhofer.de/>

Einleitung

Im Allgemeinen unterscheidet man bei (Photovoltaik-) Wechselrichtern zwei Betriebsfälle: den Netzparallel- und den Inselbetrieb. Im Netzparallelbetrieb wird der Strom eingeregelt, der mit dem starren (d. h. Spannung und Frequenz bestimmenden) Netz ausgetauscht wird. Dieser Betriebsfall wird „netzfolgend“ (*grid-following*) genannt (Tabelle 1). Im Inselbetrieb hingegen bildet der Wechselrichter ein eigenes "Inselnetz". Er gibt dann Spannung und Frequenz vor, während der Strom durch die angeschlossenen Verbraucher bestimmt wird. Dieser Betriebsfall wird „netzführend“ (*grid-leading*) genannt. In der Praxis vermischen sich beide Extremfälle zunehmend durch die hohe Durchdringung der Stromnetze mit einer Vielzahl von Einspeisewechselrichtern. Ein Inselbetrieb oder auch der Betrieb eines rein aus Umrichtern gebildeten Netzes ist mit Einspeisewechselrichtern nicht möglich, da die Umrichter weiterhin als Stromquelle das Netz lediglich stützen, jedoch nicht bilden oder erhalten können. Sind aufgrund der (zukünftigen) Einspeisesituation gar keine rotierenden Generatoren am Netz, müssen die Umrichter selbst für die "Starrheit" von Spannung und Frequenz sorgen.

Die Herausforderungen liegen dabei in der hochdynamischen Regelung der Spannung, der Begrenzung des Umrichterstroms und der ohmsch-induktiven Entkopplung der beiden wirkenden Spannungsquellen (Umrichter und Netz). In bisherigen Ansätzen kommt entweder einer kaskadierte Spannungs-/Stromregelung zum Einsatz oder die vollständige mathematische Nachbildung und Emulation einer physikalischen Synchronmaschine (virtuelle Synchronmaschine).

Der hier vorgestellte Ansatz ist in der Lage, nahezu jede beliebige Ausgangsimpedanz im Bereich der Netzgrundfrequenz regelungstechnisch zu emulieren. Diese „künstliche Impedanz“ wird innerhalb der Spannungsregelschleife implementiert und verhält sich analog zu einer nun nicht mehr benötigten realen Impedanz. Die von diesem universellen Ansatz erreichte Betriebsweise kann als „netzbildend“ (*grid-forming*) bezeichnet werden (Tabelle 1) und vereint die Betriebsweisen „netzführend“ und „netzfolgend“.

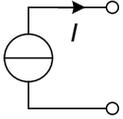
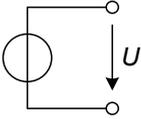
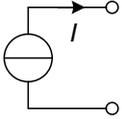
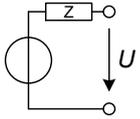
| | | | | |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Betriebsweise | netzfolgend <i>grid-following</i> | netzführend <i>grid-leading</i> | netzstützend <i>grid-supporting</i> | netzbildend <i>grid-forming</i> |
| Netzform | Verbundnetz | Inselnetz | Verbundnetz | Verbundnetz oder Inselnetz |
| Anwendung | Netz mit hohem Anteil an rotierenden Generatoren | Netz wird durch einen Wechselrichter gebildet | Netz mit hohem Anteil an Wechselrichtern | Umrichterdominiertes Netz / keine rotierenden Generatoren |
| Quellencharakteristik bei Grundschwingung (50 Hz) | Stromquelle $Z \rightarrow \infty$ | Spannungsquelle $Z \rightarrow 0$ | Stromquelle $Z \rightarrow \infty$ | Spannungsquelle mit künstlicher Impedanz $\underline{Z} = R + j\omega L$ |
| Ersatzschaltbild |  |  |  |  |
| Statikregelung | nein | nein | $P(f), Q(U)$ | $f(P), U(Q)$ [netzkompatibel] |

Tabelle 1: Betriebsweisen und Verhalten von Umrichtern¹

¹ nach Rebekka Denninger, Stefan Reichert, Sönke Rogalla, Kamran Jalili: Testing Characteristics of Grid Forming Converters Part II: Voltage Source Properties and Contribution to Power Quality. 19th Wind Integration Workshop, Online , 11.-12.11.2020

Parallelbetrieb mit Hilfe von Statiken

Die Synchronmaschine am starren Netz

Das stationäre Betriebsverhalten der Synchronmaschine am starren Netz kann durch das Einphasen-Ersatzschaltbild nach Abbildung 1 beschrieben werden.

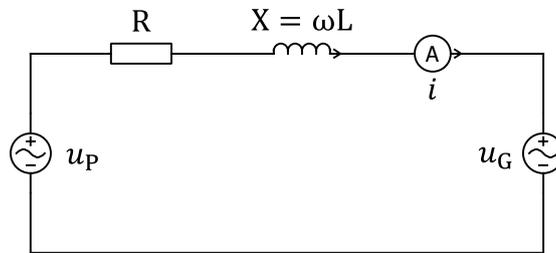


Abbildung 1: Einphasiges Ersatzschaltbild der Synchronmaschine am starren Netz (Erzeugerzählpeilsystem)

Hierbei ist u_P die Polradspannung und u_G die Netzspannung. R und L bilden die Impedanz der Maschine, wobei i. a. $R \ll \omega L$ gilt.

Für die Grundschiwingung der Kreisfrequenz ω ist der Strom in komplexer Schreibweise mit ruhenden Effektivwertzeigern

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_P - \underline{U}_G}{R + j\omega L}. \quad (1)$$

Die ins Netz eingespeiste Leistung beträgt

$$P + jQ = \underline{U} \cdot \underline{I}^*. \quad (2)$$

Orientiert man das System so, dass die Netzspannung in der komplexen Ebene auf die reelle Achse zu liegen kommt, so werden

$$\underline{U} = U \quad (3)$$

und

$$\underline{U}_P = U_P \cdot (\cos(\theta) + j \cdot \sin(\theta)). \quad (4)$$

Hierbei ist θ der Polrad- oder Lastwinkel. Einsetzen von (1), (3) und (4) in (2) liefert

$$P + jQ = U \cdot \frac{\begin{bmatrix} R \cdot (U_P \cdot \cos(\theta) - U) + \omega L \cdot U_P \cdot \sin(\theta) \cdots \\ -j \cdot (R \cdot U_P \cdot \sin(\theta) - \omega L \cdot (U_P \cdot \cos(\theta) - U)) \end{bmatrix}}{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (5)$$

Also ist die Wirkleistung

$$P = U \cdot \frac{R \cdot (U_P \cdot \cos(\theta) - U) + \omega L \cdot U_P \cdot \sin(\theta)}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (6)$$

und die Blindleistung

$$Q = U \cdot \frac{-R \cdot U_P \cdot \sin(\theta) + \omega L \cdot (U_P \cdot \cos(\theta) - U)}{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (7)$$

Mit den maximal üblichen Polradwinkeln von höchstens 30° bei Nennleistung können noch die Näherungen

$$\sin(\theta) \approx \theta \quad \text{und} \quad \cos(\theta) \approx 1 \quad (8)$$

gemacht werden; damit erhält man aus (6) und (7)

$$P = U \cdot \frac{R \cdot (U_P - U) + \omega L \cdot U_P \cdot \theta}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (9)$$

und

$$Q = U \cdot \frac{-R \cdot U_P \cdot \theta + \omega L \cdot (U_P - U)}{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (10)$$

Führt man die Effektivwertdifferenz

$$\Delta U = U_P - U \quad (11)$$

ein, so erhält man aus (9) und (10):

$$P = U \cdot \frac{R \cdot \Delta U + \omega L \cdot (U + \Delta U) \cdot \theta}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (12)$$

sowie

$$Q = U \cdot \frac{-R \cdot (U + \Delta U) \cdot \theta + \omega L \cdot \Delta U}{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (13)$$

Falls man noch von der oben erwähnten Relation $R \ll \omega L$ Gebrauch machen kann, ergeben sich schließlich für Wirk- und Blindleistung die Zusammenhänge

$$P = \frac{U}{\omega L} \cdot (U + \Delta U) \cdot \theta \quad (14)$$

und

$$Q = \frac{U}{\omega L} \cdot \Delta U. \quad (15)$$

Ist die Spannungsdifferenz ΔU klein gegen die Netzspannung U , so kann der Wirkleistungsterm (14) noch einfacher geschrieben werden:

$$P = \frac{U^2}{\omega L} \cdot \theta \quad (16)$$

Wirkleistung P und Blindleistung Q hängen dann ausschließlich von ΔU bzw. θ ab und sind völlig entkoppelt.

Modellierung des Wechselrichters

Ein Wechselrichter mit der Ausgangsspannung u_W wird, wie in Abbildung 2 gezeigt, über eine ohmsch-induktive Impedanz mit der Netzspannung u_G gekoppelt. Die Impedanz kann physikalisch vorhanden sein oder virtuell durch die Wechselrichterregelung nachgebildet werden. Formal erhält man dieselbe Anordnung wie in Abbildung 1.

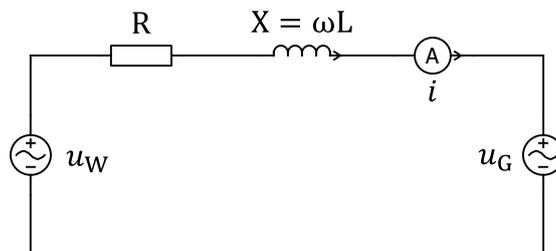


Abbildung 2: Über die ohmsch-induktive Impedanz $R+j\omega L$ gekoppelte Spannungen eines Wechselrichters (u_W) und eines Netzes (u_G)

Entsprechend gelten für den netzgekoppelten Wechselrichter mit (virtueller) Impedanz auch die beiden Statik-Gleichungen (15) und (16).

Wirkleistungs-Frequenz-Statik $f(P)$

Eine verlustfreie elektrische Maschine arbeitet bei konstanter Drehzahl, wenn sich die Wirkleistung auf der elektrischen Seite und die mechanische Leistung an der Welle im Gleichgewicht befinden. Eine Erhöhung der Wirkleistung bremst einen Generator daher bei gleichbleibender mechanischer Antriebsleistung ab. Dies gilt natürlich auch für netzgekoppelte Generatoren, ein Absinken der Frequenz ist ein Zeichen dafür, dass die mechanische Turbinenleistung in den Kraftwerken erhöht werden muss. Dies wird durch die sog. Primärregelung sichergestellt. Damit die Leistungsaufteilung zwischen den Erzeugern definiert bleibt, darf der Primärregelkreis nur ein Proportionalverhalten aufweisen. Daraus resultiert die Steigung der Wirkleistungs-Frequenz-Statik nach Abbildung 3.

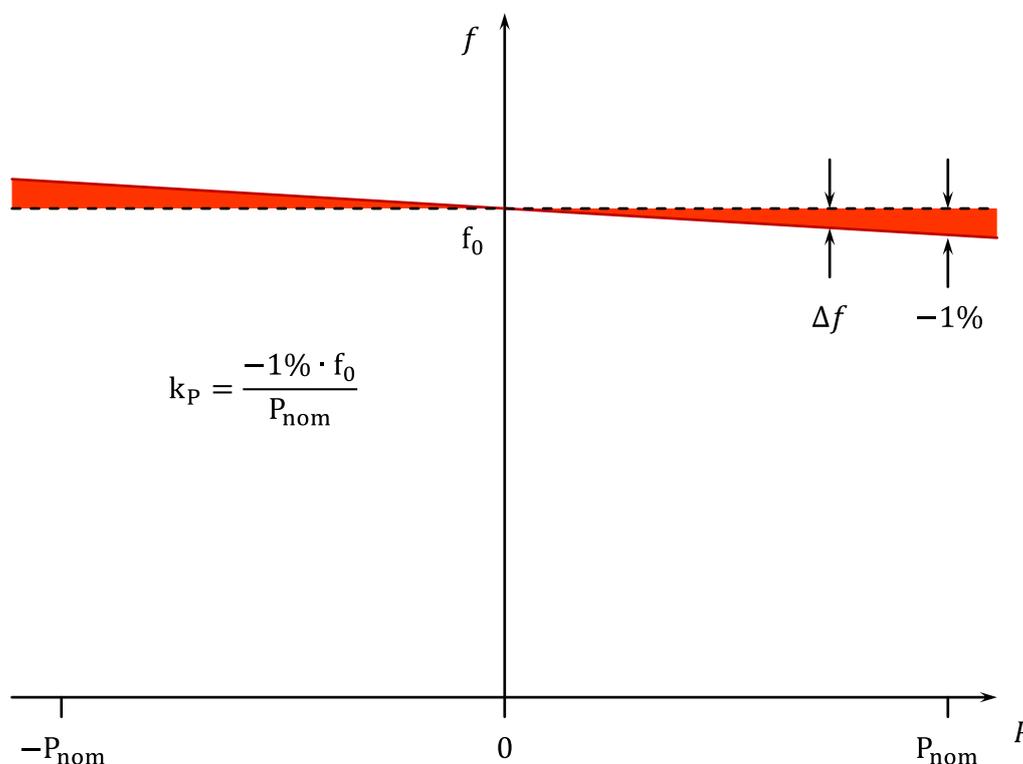


Abbildung 3: Wirkleistungs-Frequenz-Statik $f(P)$ ²

Blindleistungs-Spannungs-Statik $U(Q)$

Aufgrund der induktiven Anteile der Netzimpedanz kann die Spannung zur Blindleistungsregelung genutzt werden. Durch Einspeisen induktiver Blindleistung erhöht sich die Spannung am Verknüpfungspunkt aufgrund des Spannungsabfalls an der Netzreaktanz. Analog zur Wirkleistungs-Frequenz-Statik kann daher eine Blindleistungs-Spannungs-Statik – ebenfalls mit Proportionalverhalten – nach Abbildung 4 eingeführt werden.

² nach: A. Engler: Applicability of droops in low voltage grids, DER JOURNAL NO. 1, Januar 2005

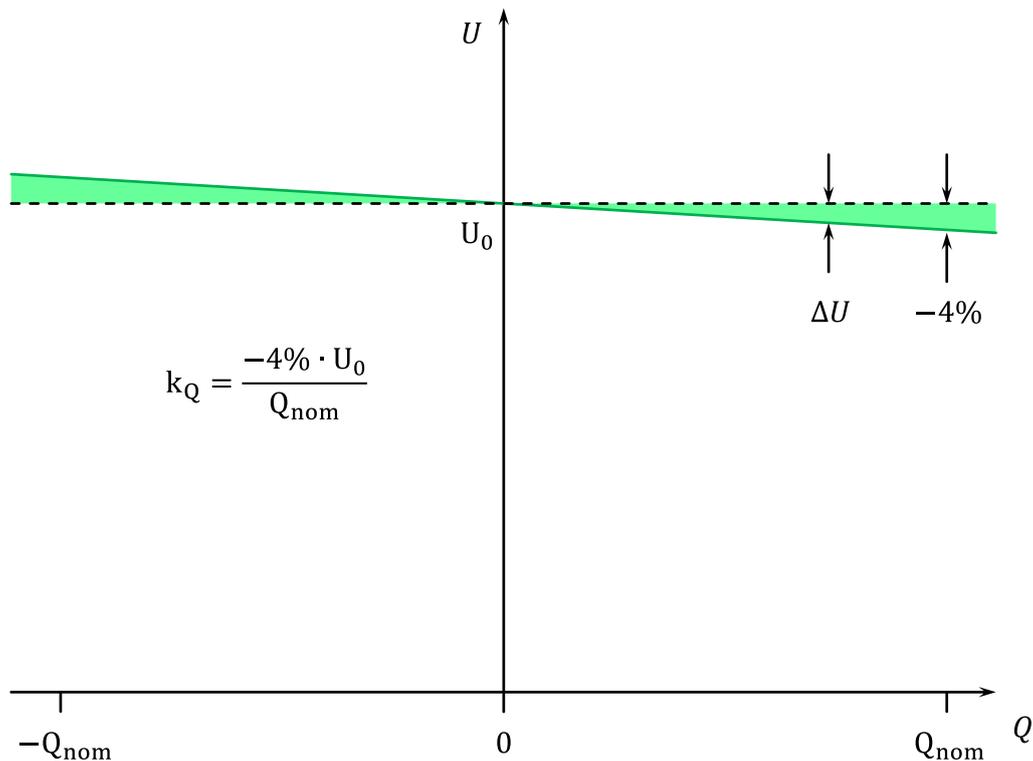


Abbildung 4: Blindleistungs-Spannungs-Statik $U(Q)^2$

Statik-Regelkreise

Implementiert man die beiden Statiken in einen geschlossenen Regelkreis, gelangt man zu der Mehrgrößenstruktur nach Abbildung 5. Die Statikkoeffizienten k_P und k_Q wurden mit den Zeitkonstanten τ_P und τ_Q zu Tiefpässen erster Ordnung erweitert. Diese Tiefpässe glätten etwaige Restwelligkeiten aus der Leistungsmessung, sie werden sinnvollerweise länger als die Netzperiode gewählt, das Fünffache der Netzperiodendauer ist dabei ein praktikabler Wert. In Systemen mit rotierenden Maschinen repräsentieren sie die mechanische bzw. elektrische Zeitkonstante. Im Gegensatz zu den Erzeuger-Zählpfeil-Diagrammen in Abbildung 1 und Abbildung 2 weisen die Statikkoeffizienten hier positive Vorzeichen auf, denn in Abbildung 5 wurde zum Verbraucher-Zählpfeil-System gewechselt. P_{soll} entspricht der Antriebsleistung am Generator, also der mechanisch aufgenommenen oder „verbrauchten“ Leistung.

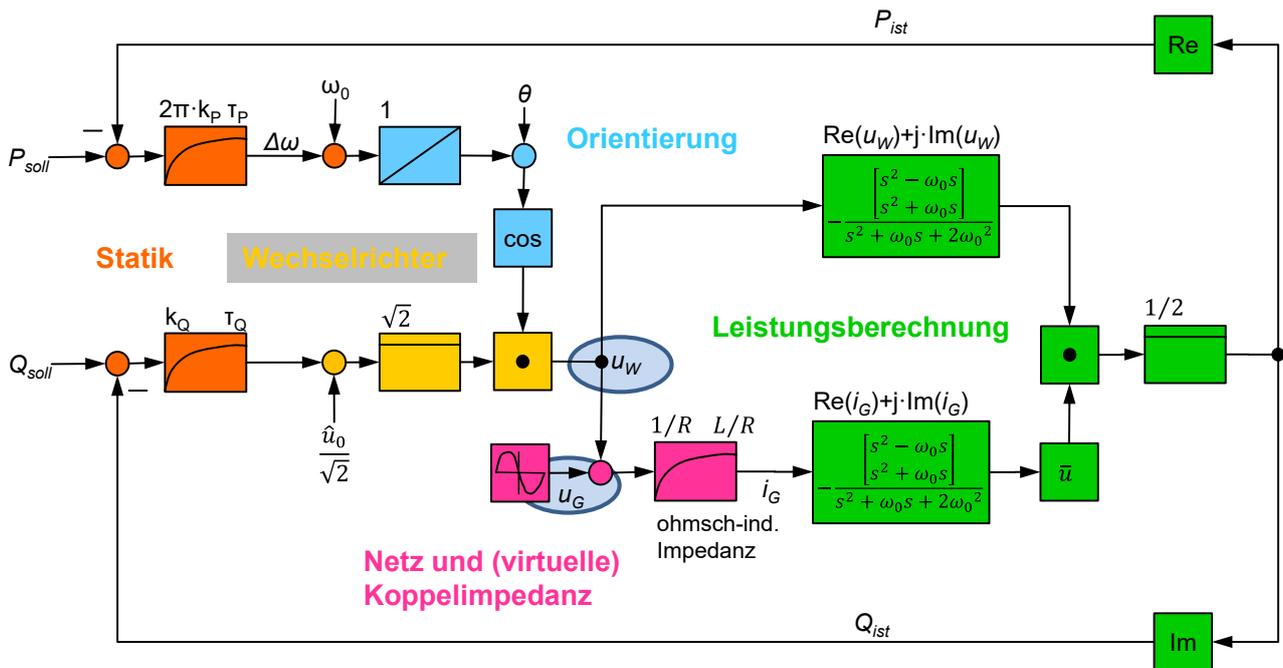


Abbildung 5: Über die ohmsch-induktive Impedanz $R+j\omega L$ gekoppelte Spannungen eines Wechselrichters (u_W) und eines Netzes (u_G)

Stationäres und dynamisches Verhalten sind in den Sprungantworten aus Abbildung 6 dargestellt. Überschwingweite und Dämpfungsverhalten in der Wirkleistung sind unbefriedigend, der stationäre Fehler verschwindet aufgrund der integrierenden Strecke. Der Blindleistungszweig ist besser gedämpft, jedoch ist dort der stationäre Fehler inakzeptabel hoch. In beide Richtungen sind leichte Verkopplungen feststellbar. Im Blindleistungsverlauf (gelb) sind beim Abklingvorgang ab $t = 1$ s Restanteile der ersten Harmonischen beobachtbar, im Wirkleistungsverlauf (blau) ab $t = 2$ s.

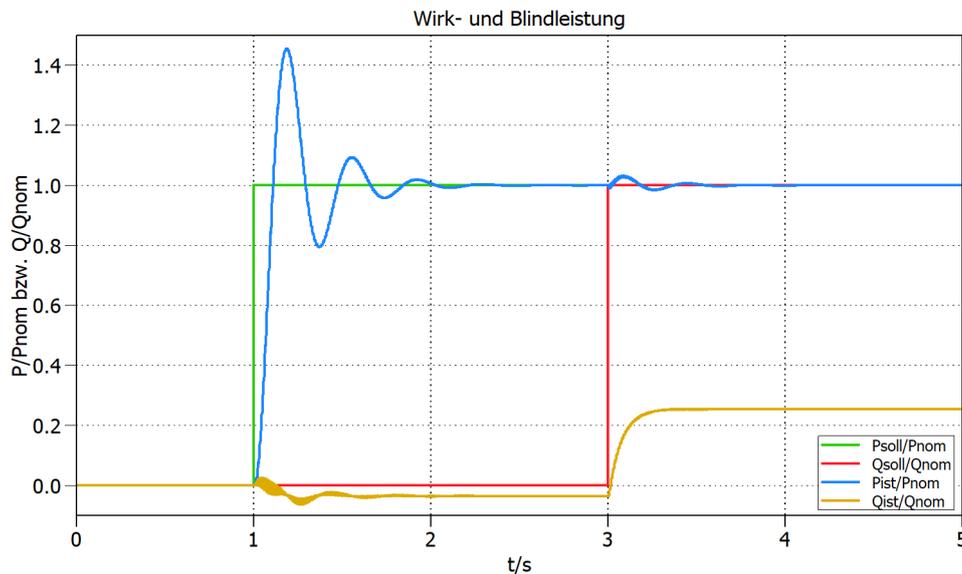


Abbildung 6: Sollwertsprünge von 0 auf Nennleistung bei 1 s (Wirkleistung) und 3 s (Blindleistung) der Anordnung aus Abbildung 5³

³ Die Simulationen beruhen auf einem Modell mit bezogenen Größen, die Nennfrequenz beträgt 50 Hz. Koppelimpedanz = $(0,01+0,1j)$ pu; Wirkleistungsstatik $k_P = 1\%$ der Nenn-

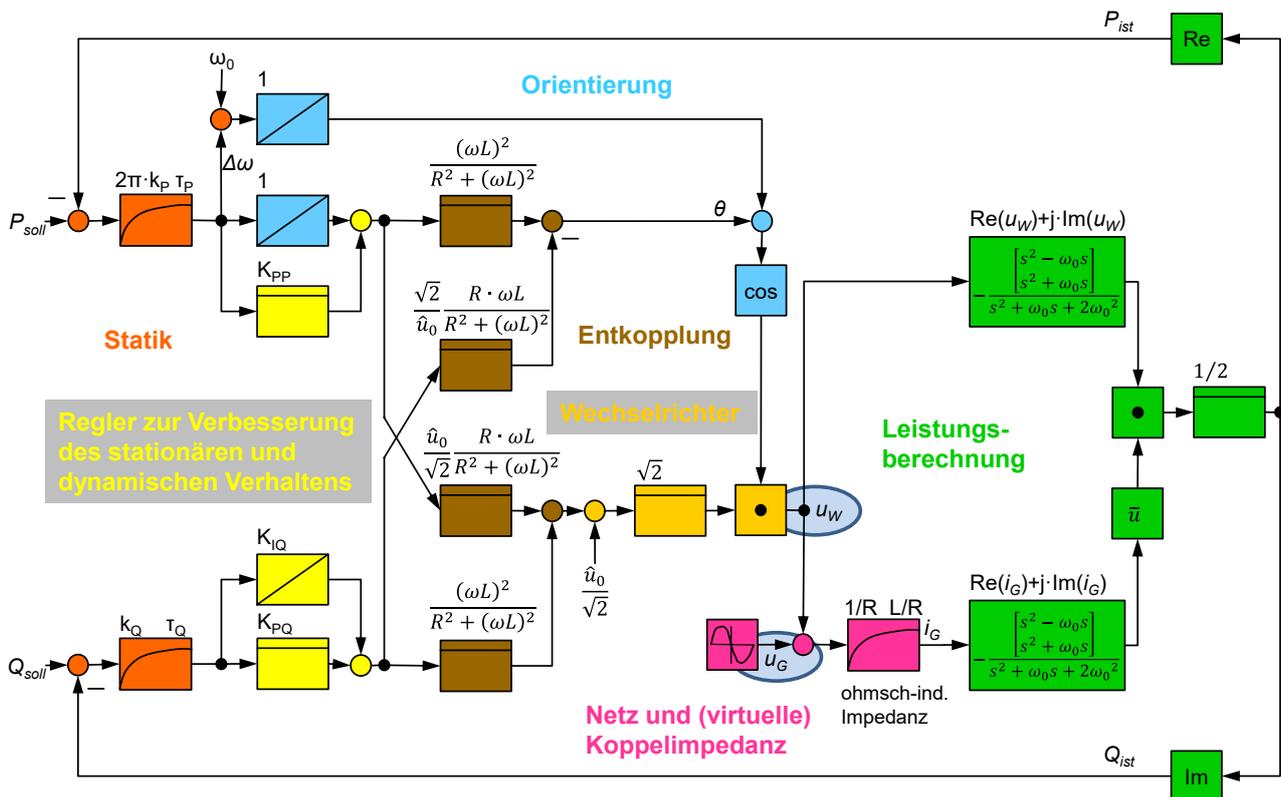


Abbildung 7: Mit Entkopplung und Reglern verbessertes Wechselrichtermodell am Netz

Die Ausstattung der Statikregelkreise mit einem Entkopplungsterm und Reglern (Abbildung 7) behebt diese Unzulänglichkeiten. Die beiden Sprungantworten für Wirk- und Blindleistung (Abbildung 8) zeigen jetzt ein nahezu identisches Verhalten. Insbesondere wird die Blindleistung jetzt dank des Integralreglers ohne bleibenden Fehler eingeregelt.

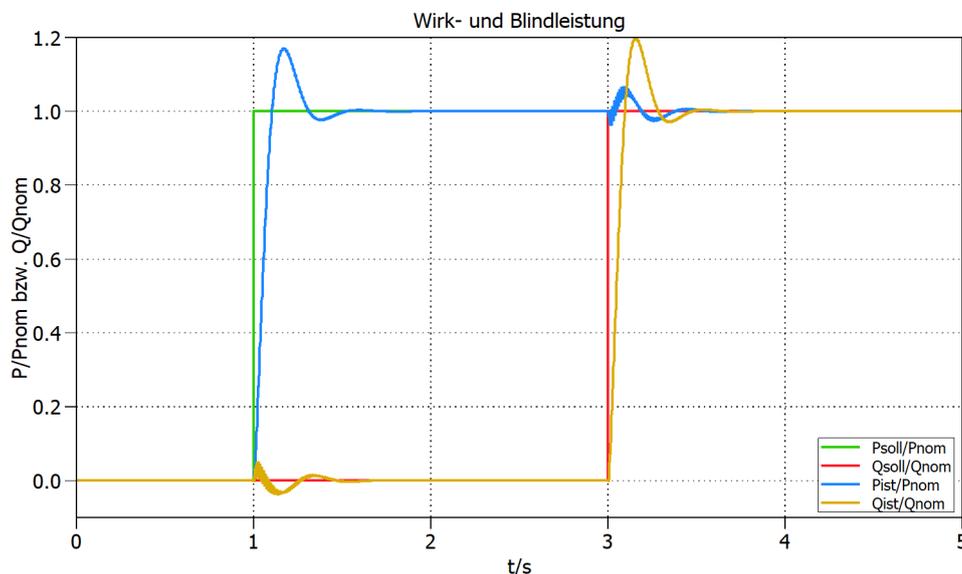


Abbildung 8: Sollwertsprünge von 0 auf Nennleistung bei 1 s (Wirkleistung) und 3 s (Blindleistung) der Anordnung aus Abbildung 7

frequenz bei Nennleistung; Blindleistungsstatik $k_Q = 4\%$ der Nennspannung bei Nennleistung. Die Zeitkonstanten τ_P und τ_Q sind fünfmal so groß wie die Netzperiodendauer, also 100 ms.

Die Entkopplung gelingt transient aufgrund der Nichtlinearitäten in der Strecke nicht vollständig, wird aber stationär von den beiden Reglern sichergestellt.

Unterlagerte zeitdiskrete Wechselrichterregelung

Die von der Statik kommenden Momentan-Sollwerte für die Spannung sollen möglichst schnell und ohne stationären Fehler von der unterlagerten Spannungsregelstrecke umgesetzt werden. Insbesondere die Realisierung der virtuellen Impedanz stellt hohe Anforderungen an den Regler.

Im Gegensatz zur elektrischen Maschine ist ein Wechselrichter i. A. nur wenig überlastbar. Aus diesem Grund muss die unterlagerte Regelstrecke die Ströme begrenzen können. Dabei soll die Wirkungsweise der Statik von der Strombegrenzung möglichst nicht beeinträchtigt werden.

Mit Zustandsreglern lassen sich die hohen dynamischen Anforderungen bei hinreichender Robustheit erfüllen. Die stationäre Genauigkeit bei Grundfrequenz kann man durch einen resonanten Reglerintegrator sicherstellen. Realisiert man diesen mit zwei orthogonalen Zustandsgrößen, können durch gewichtete Rückführung des Ausgangsstroms auf die beiden Komponenten sowohl der resistive als auch der reaktive Anteil der virtuellen Impedanz realisiert werden.

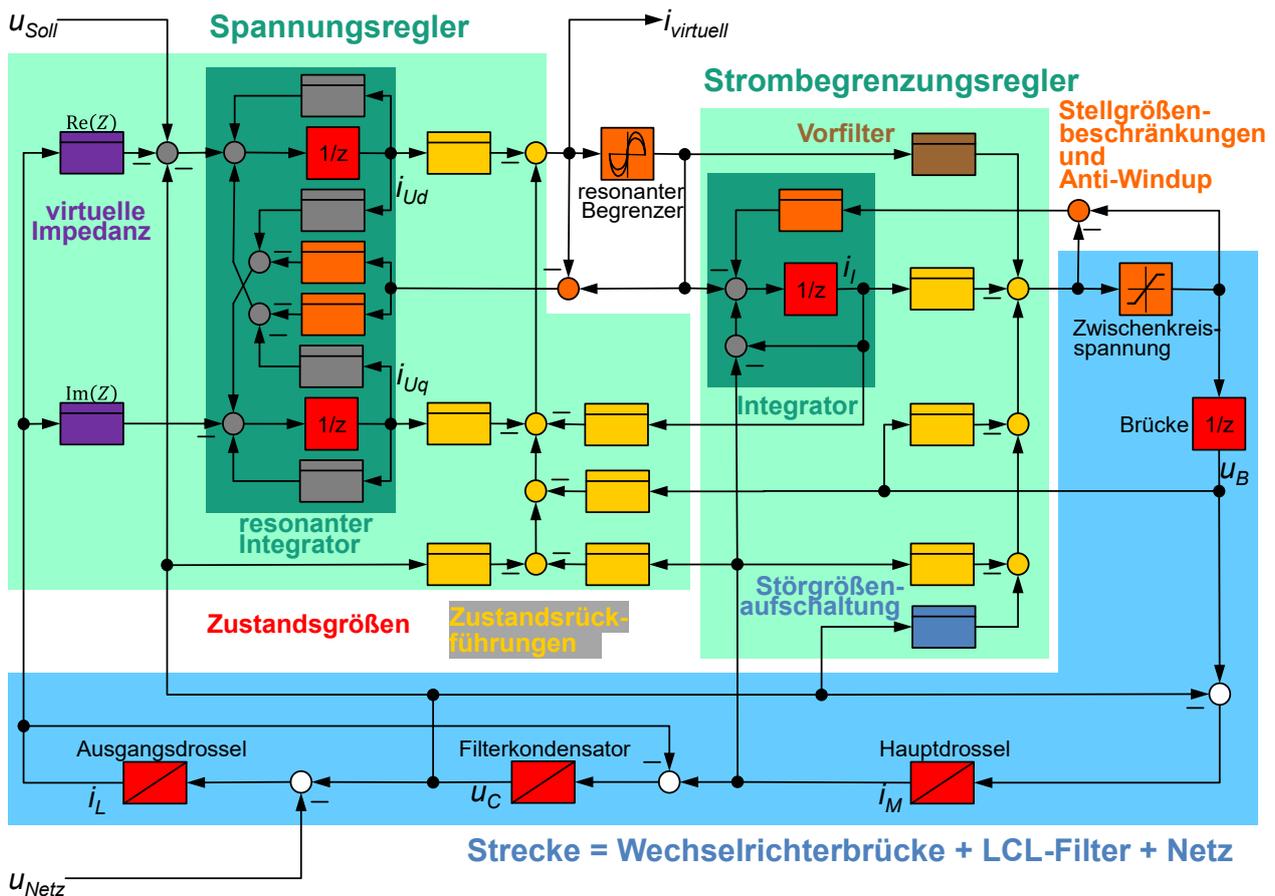


Abbildung 9: Ausgangsspannungsregler und unterlagerter Stromregler einschließlich Strecke. Die Spannungsregelung regelt die Filterkondensatorspannung, die unterlagerte Stromregelung den Hauptdrosselstrom. Die Begrenzung des Stroms erfolgt durch die resonante Limitierung des vom überlagerten Spannungsregler kommenden Stromsollwerts.

Die Strombegrenzung wird durch eine unterlagerte Drosselstromregelung realisiert, die ihren Sollwert vom überlagerten Spannungsregler bezieht. Der Stromsollwert wird hierbei durch einen neuartigen resonanten Begrenzer limitiert, womit man auch im Begrenzungsfall sinusförmige Ströme ermöglicht. Eine sinusförmige Begrenzung hat bei induktiven und kapazitiven Lasten den sehr großen Vorteil, dass die Spannung ebenfalls sinusförmig bleibt. Der resonante Begrenzer passt sich dabei eigenständig an die erforderliche Phasenlage zwischen Strom und Spannung an. Durch die Verwendung von Zustandsreglern entledigt man sich der Notwendigkeit, den überlagerten Spannungsregler vom unterlagerten Stromregler zeitlich zu entkoppeln. Auf diese Weise können Spannungsregelung und Strombegrenzung mit ähnlichen dynamischen Eigenschaften realisiert werden.

Damit die Statik auch bei limitiertem Strom sicher funktioniert, werden Wirk- und Blindleistung für die überlagerten Statikregelkreise nicht aus dem tatsächlichen Strom, sondern aus dem vom Spannungsregler erzeugten unlimitierten Stromsollwert berechnet. Mit diesen „virtuellen“ Leistungen können trotz geringerer Kurzschlussleistung der Wechselrichter ähnlich schnelle Synchronisationsvorgänge wie bei echten Synchronmaschinen erreicht werden.

Bei kleinen Inselsystemen mit wenigen Wechselrichtern können beim unsynchronisierten Zuschalten starke Spannungseinbrüche auftreten. Damit in diesem Fall - selbst bei Spannungen von Null - die Statikregelkreise noch arbeiten, werden die „virtuellen“ Leistungen zudem aus Spannungen berechnet, deren Einbruchtiefe wiederum virtuell nach unten begrenzt ist.

Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell wurde in verschiedenen praxisnahen Umgebungen getestet. Im Wesentlichen wurde dabei das Verhalten am starren Netz, das Verhalten in einem von zwei Wechselrichtern aufgebauten Inselssystem und schließlich der Inselbetrieb eines einzigen Wechselrichters mit unterschiedlichen Lasten getestet.

Betrieb am starren Netz

Den Zuschaltvorgang eines zuvor nicht synchronisierten Wechselrichters auf ein starres Netz zeigt Abbildung 10. Die Leistungssollwerte des leer laufenden Wechselrichters sind Null, so dass die Wirkleistungsstatik den Wechselrichter aufgrund der Statik mit Nennfrequenz laufen lässt. Die Phasenlage gegenüber dem Netz wird vor dem Zuschalten aber nicht synchronisiert, vielmehr soll dies von der Statik im Zusammenspiel mit der Strombegrenzung bewerkstelligt werden.

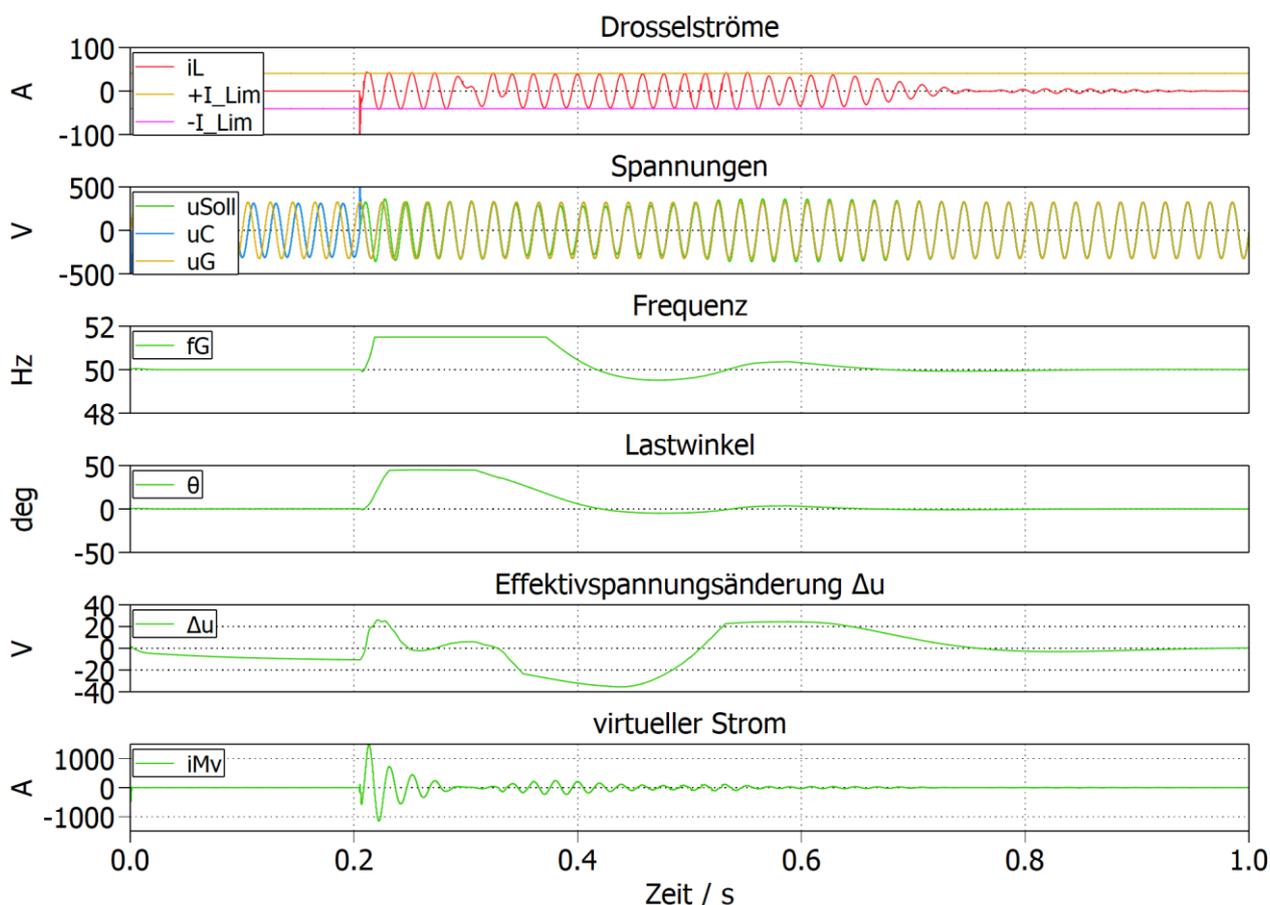


Abbildung 10: Zuschaltung eines um 90° nacheilenden Wechselrichters auf ein starres Netz.

Im Zuschaltzeitpunkt $t = 200$ ms eilt der Wechselrichter dem Netz um 90° nach. Beim Schließen des Koppelschützes wird die Spannung u_C am Filterkondensator fast sprunghaft an die Netzspannung u_G herangezogen (zweites Oszillogramm von oben), während der von der Statik erzeugte Spannungssollwert u_{Soll} unverändert bleibt. Der Ausgangsstrom i_L steigt aufgrund des Phasenunterschieds sehr schnell an, wird dann aber sinusförmig begrenzt auf eine Amplitude von 50 A. Der die Statik beeinflussende virtuelle Strom (unterstes Oszillogramm) hingegen steigt auf einen Scheitelwert von fast 1500 A. Die

Wirkleistungsstatik hebt dann die Frequenz an, um den Phasenunterschied zwischen Spannungssollwert und Netz aufzuholen. Der sich aus dem Phasenunterschied ergebende Blindleistungsanteil erzeugt dabei über die Blindleistungsstatik vorübergehend eine Spannungsabsenkung um ca. 20 V (viertes Oszillogramm). Bereits nach 18 Netzperioden ist der Synchronisationsvorgang soweit erfolgt, dass der Strom nicht mehr begrenzt werden muss, schließlich wird er Null entsprechend den Leistungsvorgaben.

Das leichte Ansteigen der Spannungsänderung Δu und des Lastwinkels θ (kaum sichtbar) zu Beginn vor dem Zuschaltvorgang ist auf den Einschwingvorgang in der Leistungsmessung zurückzuführen, der seinerseits die Reglerintegratoren in Wirk- und Blindleistungsstatik-Regelkreis anregt. Da deren Pole beim leer laufenden Wechselrichter auf der Stabilitätsgrenze liegen, bleiben diese von den Startbedingungen abhängenden Abweichungen bis zur Zuschaltung des Netzes bestehen. Physikalisch bedeutet dies, dass sich Phasenlage und Spannungsamplitude beim leer laufenden Wechselrichter „zufällig“ einstellen. Die Leistungen an den Wechselrichterklammern sind Null, was bei einer Leistungsvorgabe von ebenfalls Null stationäres Verhalten in den Statik-Regelkreisen bewirkt. Da die Statik-Reglerintegratoren begrenzt werden, treten keine Betriebszustände außerhalb der erlaubten Spannungs- und Frequenzgrenzen auf.

Das transiente Verhalten bei sprunghaftigen Leistungsvorgabeänderungen am starren Netz zeigt Abbildung 11.

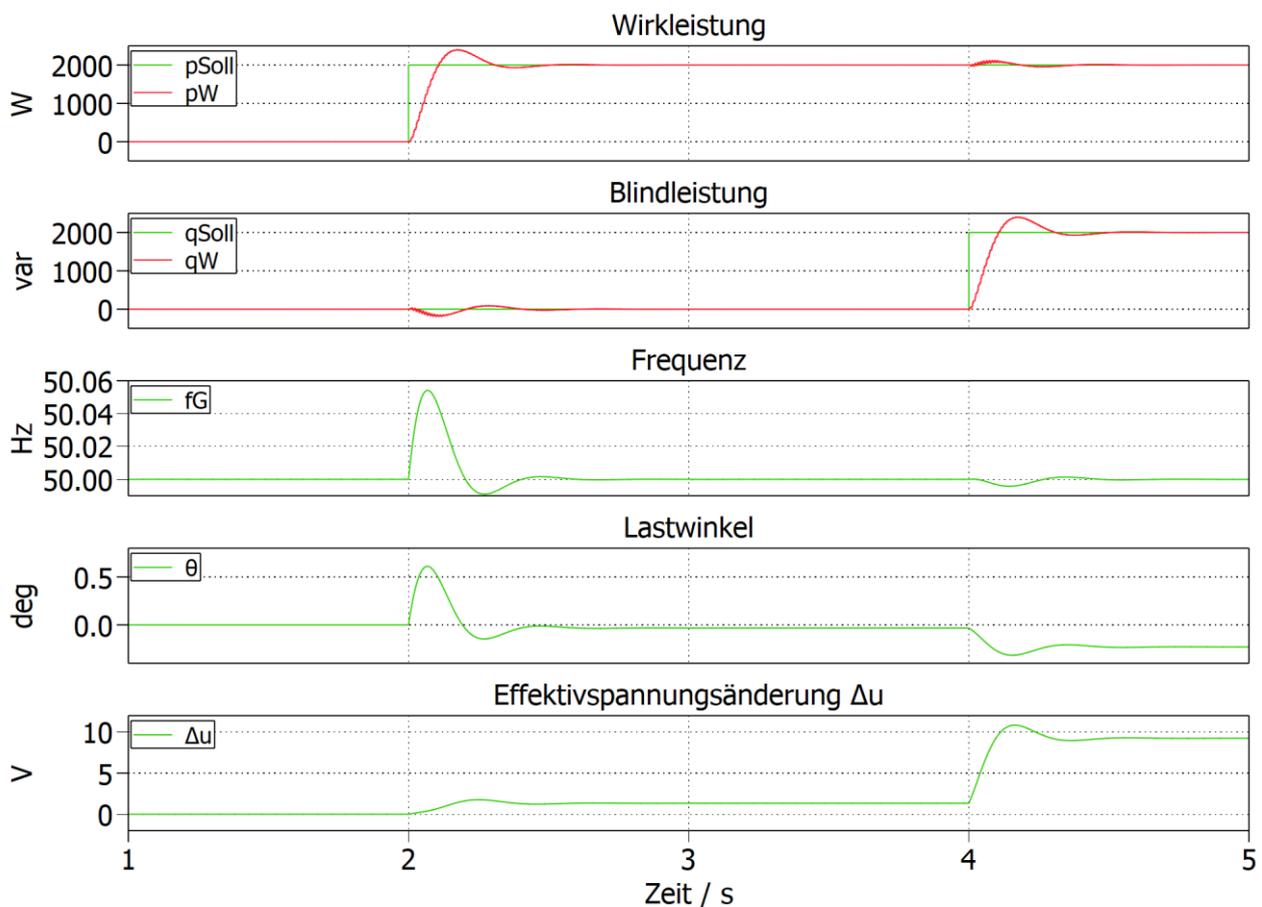


Abbildung 11: Einregelung der Leistungsvorgaben am starren Netz.

Die zeitlichen Verläufe sind praktisch identisch zu denen aus Abbildung 8. Die unterlagerte Wechselrichterregelung beeinflusst nicht das Verhalten der übergeordneten Statikregler, solange der Strom nicht begrenzt werden muss.

Betrieb eines Inselsystems mit zwei Wechselrichtern

Zwei mit gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Phasenlage leer laufende Wechselrichter mit Leistungsvorgaben Null werden in Abbildung 12 gekoppelt. Der nacheilende Wechselrichter erhöht seine Frequenz, der voreilende reduziert sie. Nach einer kurzen Leistungspendelung mit Strombegrenzung synchronisieren sich die beiden Geräte und die ausgetauschten Leistungen werden Null. Die Effektivspannungsänderungen Δu , die während des Synchronisationsvorgangs beide abgesenkt wurden, behalten diese Werte bei, solange die beiden Wechselrichter leer weiterlaufen mit Leistungsvorgabe Null.

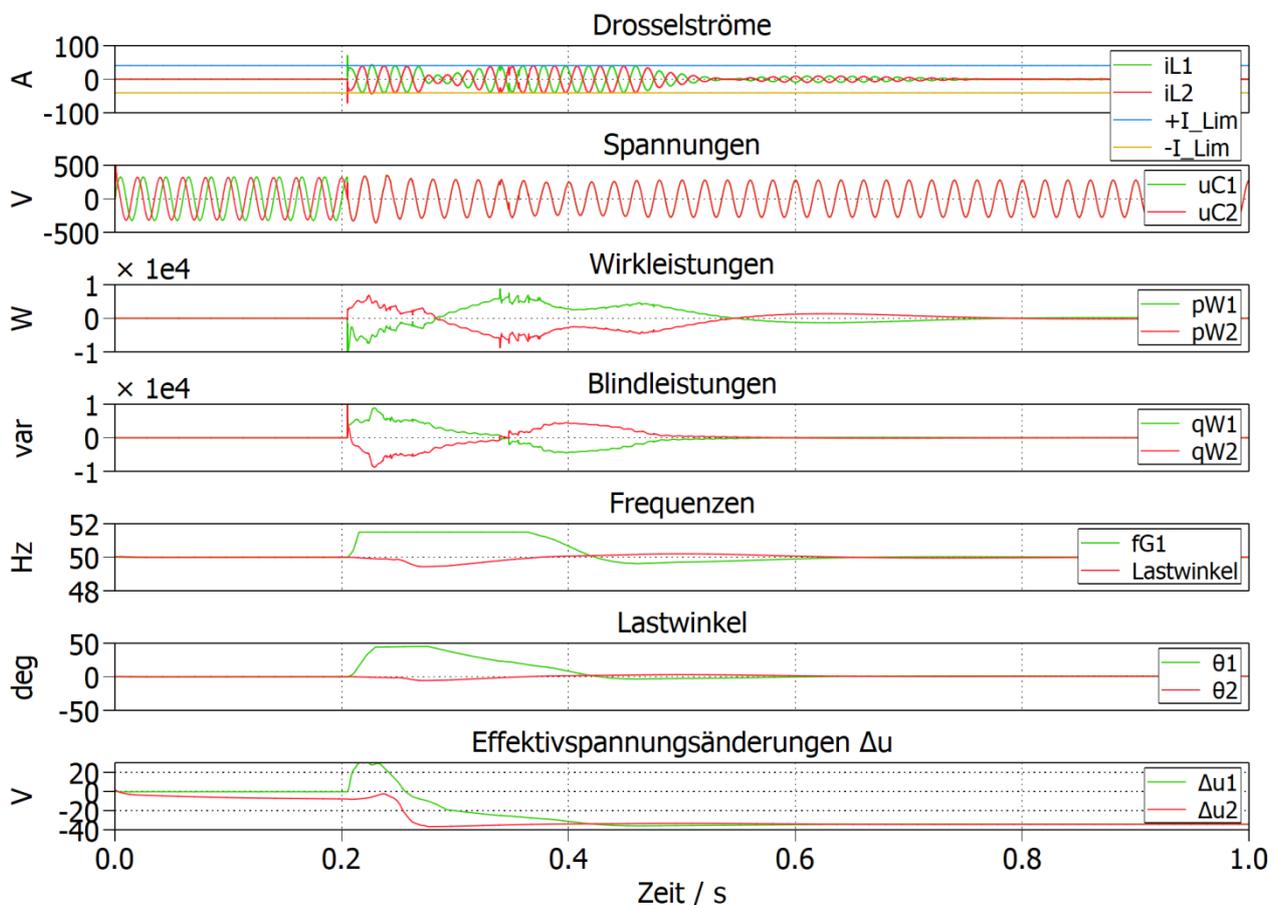


Abbildung 12: Kopplung zweier leer laufender Wechselrichter mit Phasenunterschied

In kleinen Inselnetzen (Mikronetze, engl. micro grids) werden bei Teillast zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads einzelne Wechselrichter abgeschaltet. Bei gestiegenem Verbrauch müssen diese dann sukzessive wieder zugeschaltet werden. Abbildung 13 zeigt ein derartiges Szenario. Zunächst versorgt der erste Wechselrichter (grüne Kurven) eine ohmsche Last mit 150% P_{nom} . Die Spannung ist hierbei reduziert, weil der Strom begrenzt wird. Der zweite Wechselrichter (rote Kurven) läuft schon im Leerlauf und wird zum Zeitpunkt $t = 205$ ms zugeschaltet. Nach einer kurzen Leistungspendelung teilt sich die Last gleichmäßig auf beide Wechselrichter auf und die Spannungsamplitude erreicht

wieder den Nennwert. Im Simulationsbeispiel wurde der zweite Wechselrichter vor der Zuschaltung synchronisiert. Die Regelung erlaubt zwar auch ein asynchrones Zuschalten, allerdings kann dann der Synchronisationsvorgang erheblich länger dauern, außerdem entsteht ein aus Verbrauchersicht unerwünschter Flicker. Man wird daher in der praktischen Umsetzung die Betriebsführung stets noch mit einer zusätzlichen Synchronisationseinrichtung versehen.

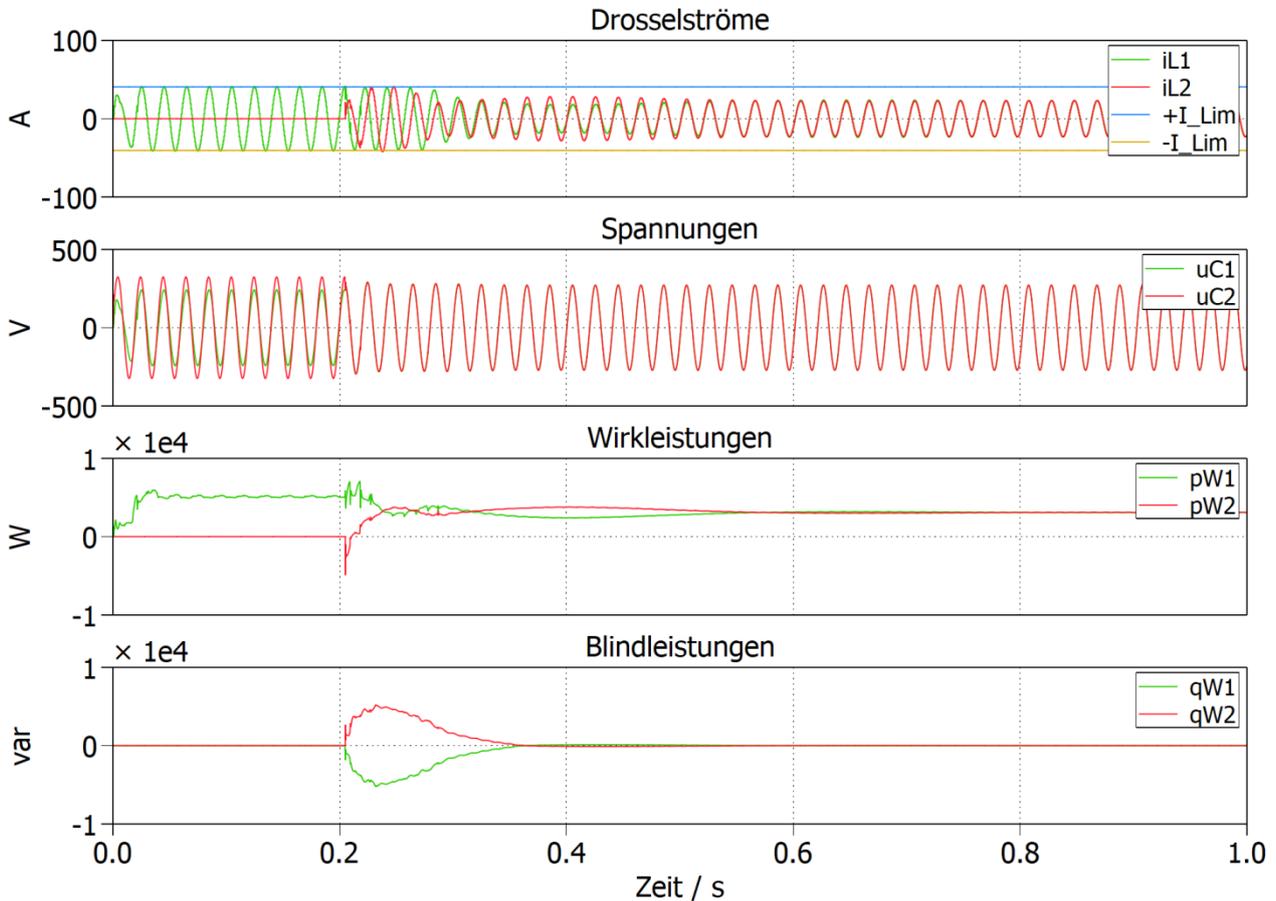


Abbildung 13: Stützung eines überlasteten Wechselrichters (grüne Kurven) durch einen zweiten (rote Kurven). Der zweite Wechselrichter läuft bereits, wird aber erst zum Zeitpunkt $t = 205$ ms auf das Mikronetz aufgeschaltet.

Einzelwechselrichter mit unterschiedlichen Verbrauchern

Bei Netzbildung durch einen einzigen Wechselrichter wird die Statik nicht benötigt, da die Ausgangsleistung ja im Wesentlichen durch die Verbraucher bestimmt wird. Insofern charakterisieren die Simulationen in diesem Abschnitt vor allem den Spannungsregler mit der unterlagerten Strombegrenzung. Frequenz und Amplitude des Spannungssollwerts können von der überlagerten Statik in gewissen Grenzen beeinflusst werden. Die folgenden Tests wurden alle mit aktiver Statik bei Wirk- und Blindleistungsvorgabe Null durchgeführt.

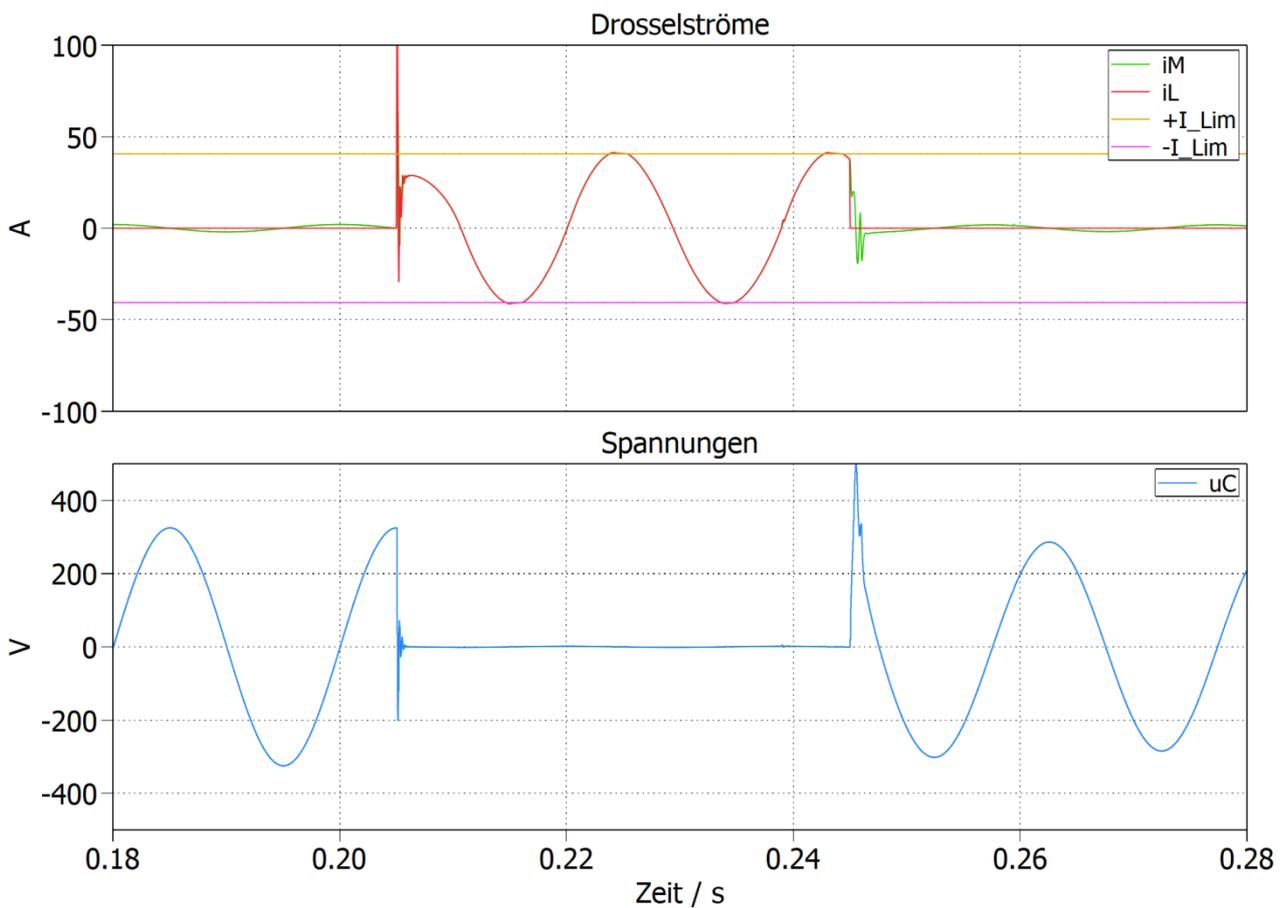


Abbildung 14: Temporärer Kurzschluss am leer laufenden Wechselrichter. Der Hauptdrosselstrom i_M wird sinusförmig begrenzt (oben), der Ausgangsstrom i_L folgt ihm entsprechend. Unten dargestellt die Spannung u_C am Filterkondensator.

Die Reaktion der Wechselrichterregelung bei Kurzschluss an den Ausgangsklemmen zeigt Abbildung 14. Der leer laufende Wechselrichter wird im Spannungsscheitel kurzgeschlossen. Die dabei auftretende Stromspitze wird durch die schlagartige Entladung des Filterkondensators über die Ausgangsdrossel hervorgerufen, der Regler dämpft die Filteroszillation sehr stark. Während des zwei Netzperioden dauernden Kurzschlusses wird ein sinusförmiger Strom vom unterlagerten Strombegrenzungsregler eingestellt. Da der Strombegrenzungsregler nur einen Reglerintegrator erster Ordnung hat, erzeugt er einen leichten Phasenfehler zwischen Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom. Nach 40 ms wird der Kurzschluss wieder aufgehoben. Die Filteroszillation hat hier eine niedrigere Frequenz als zu Beginn des Kurzschlusses, weil jetzt nur noch die Hauptdrossel als induktives Bauelement wirkt. Die Spannung wird nach Dämpfung dieser Oszillation wieder sinusförmig weitergeführt. Der verbleibende Hauptdrosselstrom lädt dabei den Filterkondensator entsprechend zyklisch um. Der am Ende des Kurzschlusses unterbrochene Strom in der Ausgangsdrossel wurde in der Simulation über einen hochohmigen Parallelwiderstand abgeführt. Ähnliche Maßnahmen zum Schutz vor Überspannung müssen natürlich auch im realen Gerät vorhanden sein.

Der Betrieb von linearen ohmschen Lasten ist aus regelungstechnischer Sicht weiter nicht interessant, da sie gut gedämpfte Betriebsfälle zwischen den Extrempunkten Leerlauf und Kurzschluss darstellen. Auf die Wiedergabe von Simulationsergebnissen wird deshalb an

dieser Stelle verzichtet. Aufschlussreicher sind nichtlineare Lasten, z. B. ohmsche Verbraucher im Halbwellenbetrieb.

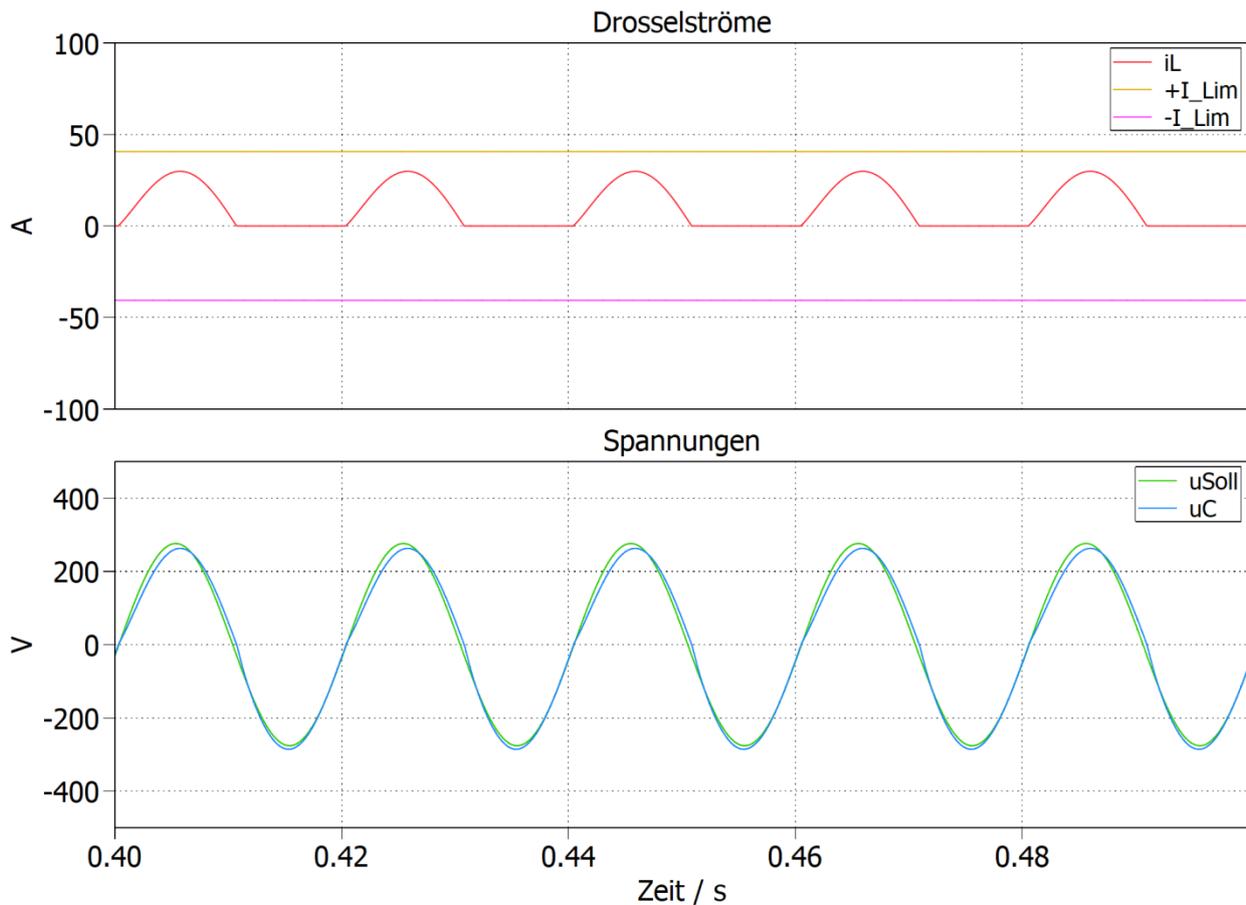


Abbildung 15: Ohmsche Nennlast im Halbwellenbetrieb

Abbildung 15 zeigt den Fall einer ohmschen Nennlast mit vorgeschaltetem Einweggleichrichter. Der Stromverlauf ist perfekt; die Spannungsabweichungen vom Sollwert zeigen die Wirkung der virtuellen Impedanz, die sowohl Einfluss auf die Amplitude als auch auf die Phasenlage nimmt.

In Abbildung 16 wurde der Verbraucherwiderstand halbiert, so dass jetzt die Strombegrenzung eingreift; die Spannung in der oberen Halbwelle wird dadurch deutlich reduziert. Der kurze Einbruch jeweils zu Beginn der positiven Halbwelle wird durch die resonante Strombegrenzung hervorgerufen, die durch die Stromüberschwingungen dieser Last irritiert wird. Halbwellenlasten großer Leistung kommen in der Praxis aber kaum vor.

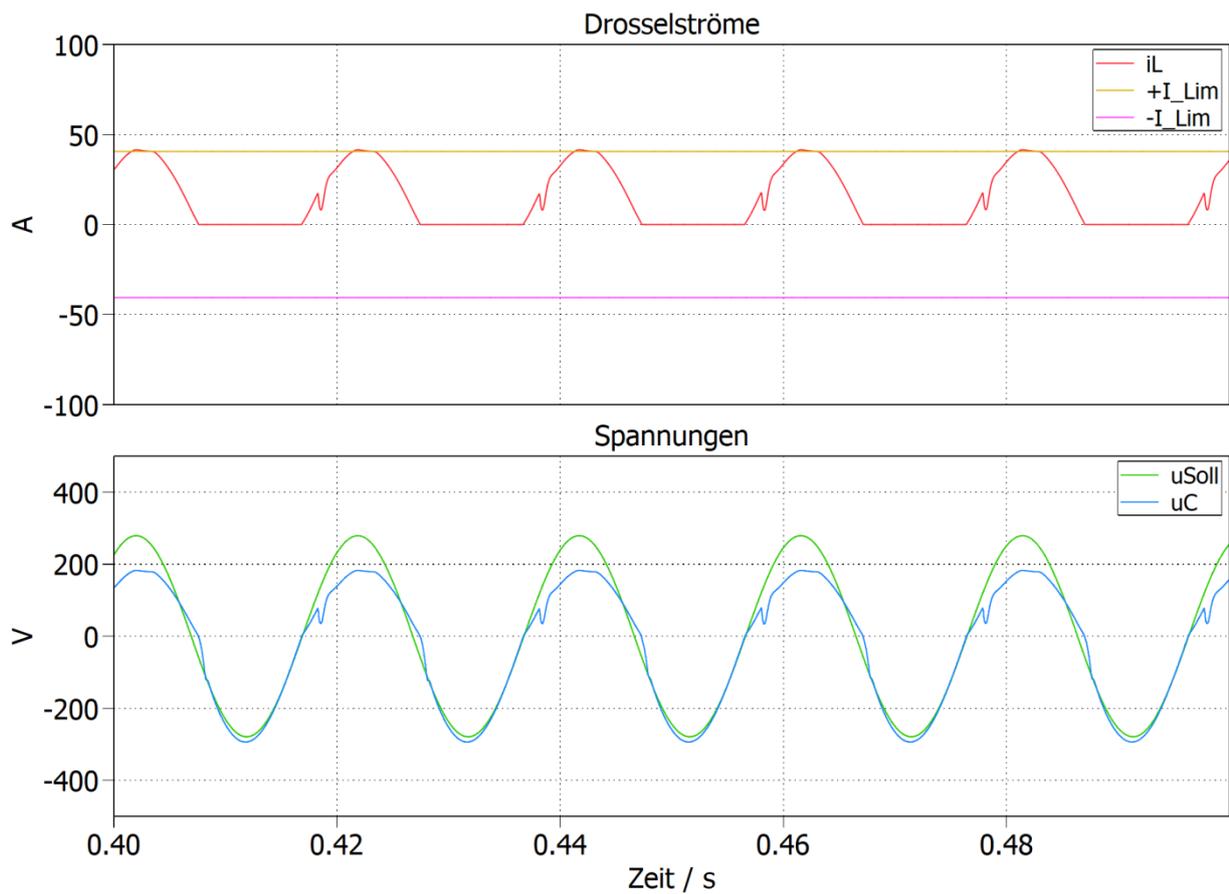


Abbildung 16: Doppelte ohmsche Nennlast im Halbwellenbetrieb

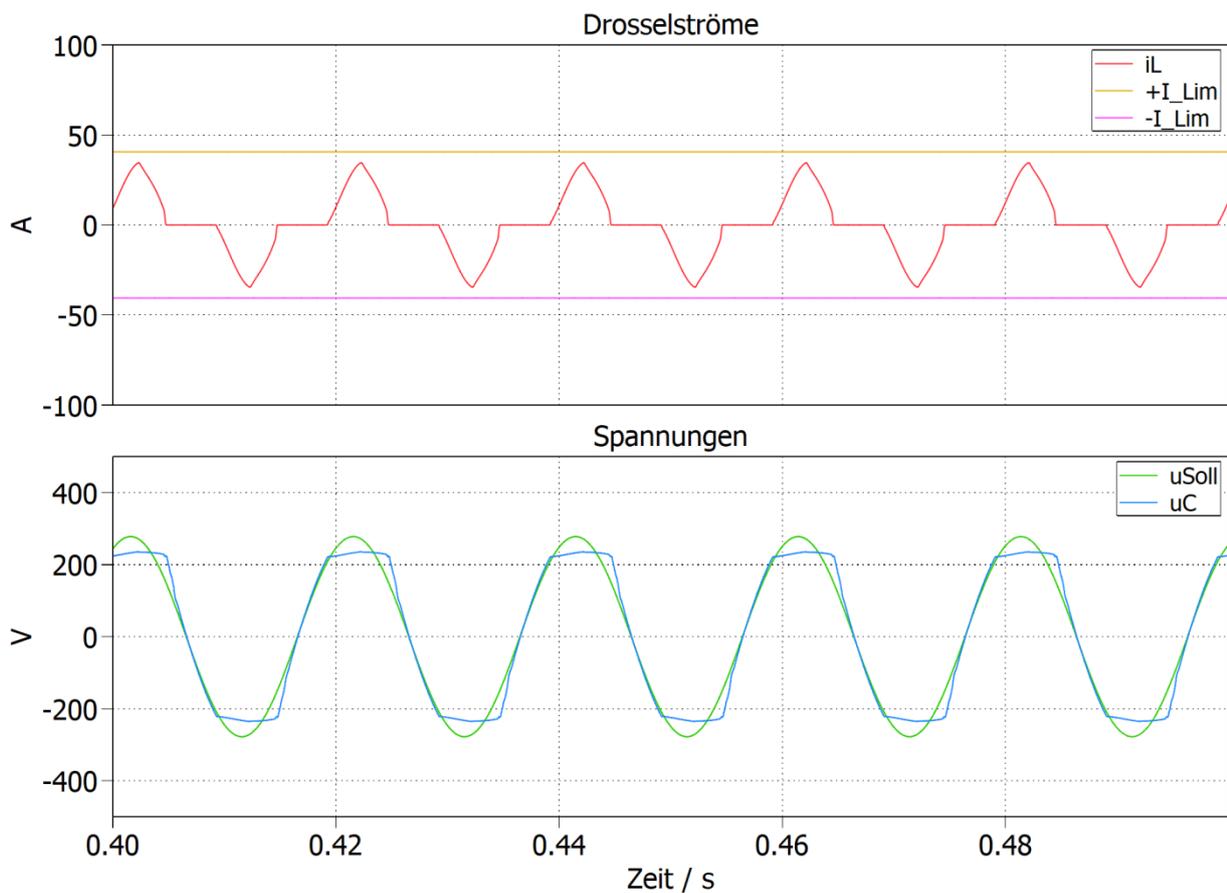


Abbildung 17: Nichtlineare USV-Last nach DIN EN 62040-3

In der USV-Norm DIN EN 62040-3 wird eine nichtlineare Last definiert, die aus einem ohmschen Verbraucher hinter einer Gleichrichterbrücke mit Ladekondensator besteht. Hier erzeugen die Stromspitzen des Ladekondensators über den virtuellen Innenwiderstand sehr starke Abflachungen im Spannungsscheitel (Abbildung 17). Die resultierende Verzerrungsblindleistung liegt deutlich über den von der Norm definierten Grenzen. Mit der vorliegenden Auslegung können die zulässigen Werte nur mit Lasten von 1/3 der in der Norm spezifizierten Leistung eingehalten werden. Eine Optimierung ist aber möglich durch Reduktion der virtuellen Impedanz und geringfügige Anhebung der Stromamplitudengrenze.

Das Verhalten bei induktiven Verbrauchern entnimmt man Abbildung 18. Während die Nennlast (helle Kurven) rein spannungsgeregelt versorgt wird, wird bei der doppelten und erst recht bei der fünffachen Nennleistung der Strom begrenzt, was mit einem Rückgang der Spannungsamplitude einhergeht. Bei Überlast bildet sich eine stationäre Schwingung von ca. 410 Hz aus, die auf die Störgrößenaufschaltung der Filterkondensatorspannung im unterlagerten Stromregler zurückzuführen ist. Durch Reduktion des Vorsteuerkoeffizienten lässt sich die Schwingung unterdrücken, allerdings um den Preis eines erhöhten stationären Fehlers der Stromregelung. Da der Betrieb mit mehrfacher Überlast weder eine reguläre Lastsituation darstellt noch Instabilität vorliegt (bei weiterer Laststeigerung Richtung Kurzschluss verschwindet die Oszillation wieder), kann die 410-Hz-Schwingung ohne Weiteres toleriert werden.

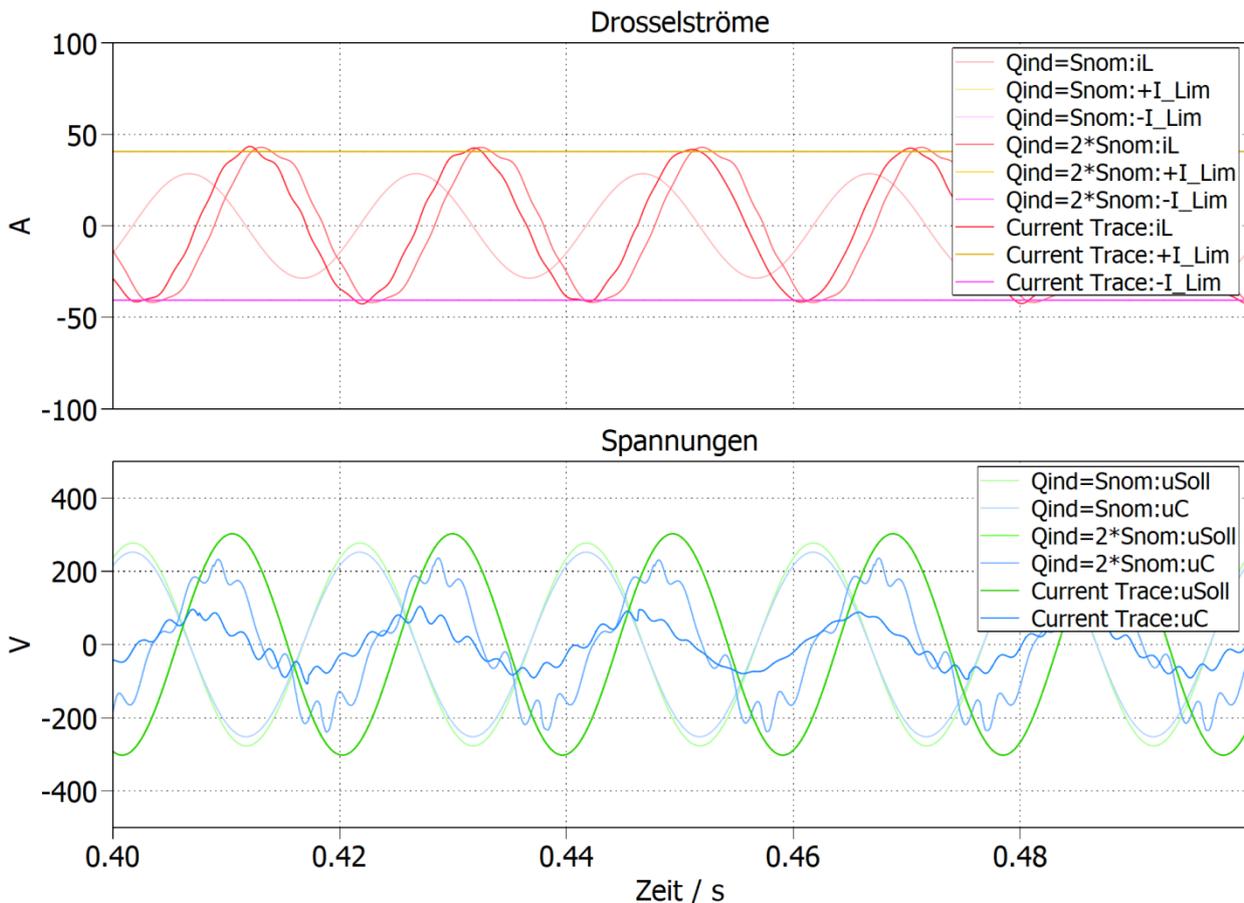


Abbildung 18: Induktive Lasten mit Nennleistung (helle Kurven), doppelter und fünffacher Nennleistung (dunkle Kurven). Im zweiten und dritten Fall begrenzt die Regelung den Strom.

Während induktive Lasten als Kurzschlussfall mit vergrößerter Ausgangsinduktivität aufgefasst werden können, erhöhen kapazitive Lasten die Systemordnung. Es bildet sich ein neuer Pol aus, den die Zustandsregelung nicht dämpfen kann, weil er ja nicht immer vorhanden ist. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 19 zeigen, dass der Regler im Zusammenspiel mit der virtuellen Impedanz sowohl spannungsgeregelt als auch strombegrenzt problemlos mit kapazitiven Lasten zurechtkommt. Erst bei sehr kleinen Lasten (etwa 1/20 der Nennleistung), wo die Lastkapazität nicht größer ist als die Filterkapazität, bilden sich Instabilitäten aus. Die Resonanzfrequenz der Strecke ist dann bereits höher als $\frac{1}{4}$ der Abtastrate. Diese Lastsituation ist mit einem robusten Universalregler kaum beherrschbar, kann aber durch schaltungstechnische Maßnahmen entschärft werden. Eine praktikable Lösung ist die Parallelschaltung eines hochohmigen Widerstands zur Ausgangsdrossel. Mit einem tausendfachen Widerstand gegenüber der Drosselimpedanz bei 50 Hz können diese Oszillationen wirksam bedämpft werden. Die dadurch zusätzlich entstehenden Wechselrichterverluste sind so gering, dass sie unterhalb der Nachweisgrenze bei Wirkungsgradmessungen liegen. Ein derartiger Parallelwiderstand kann zudem die Energie der Ausgangsdrossel bei plötzlicher Lasttrennung aufnehmen.

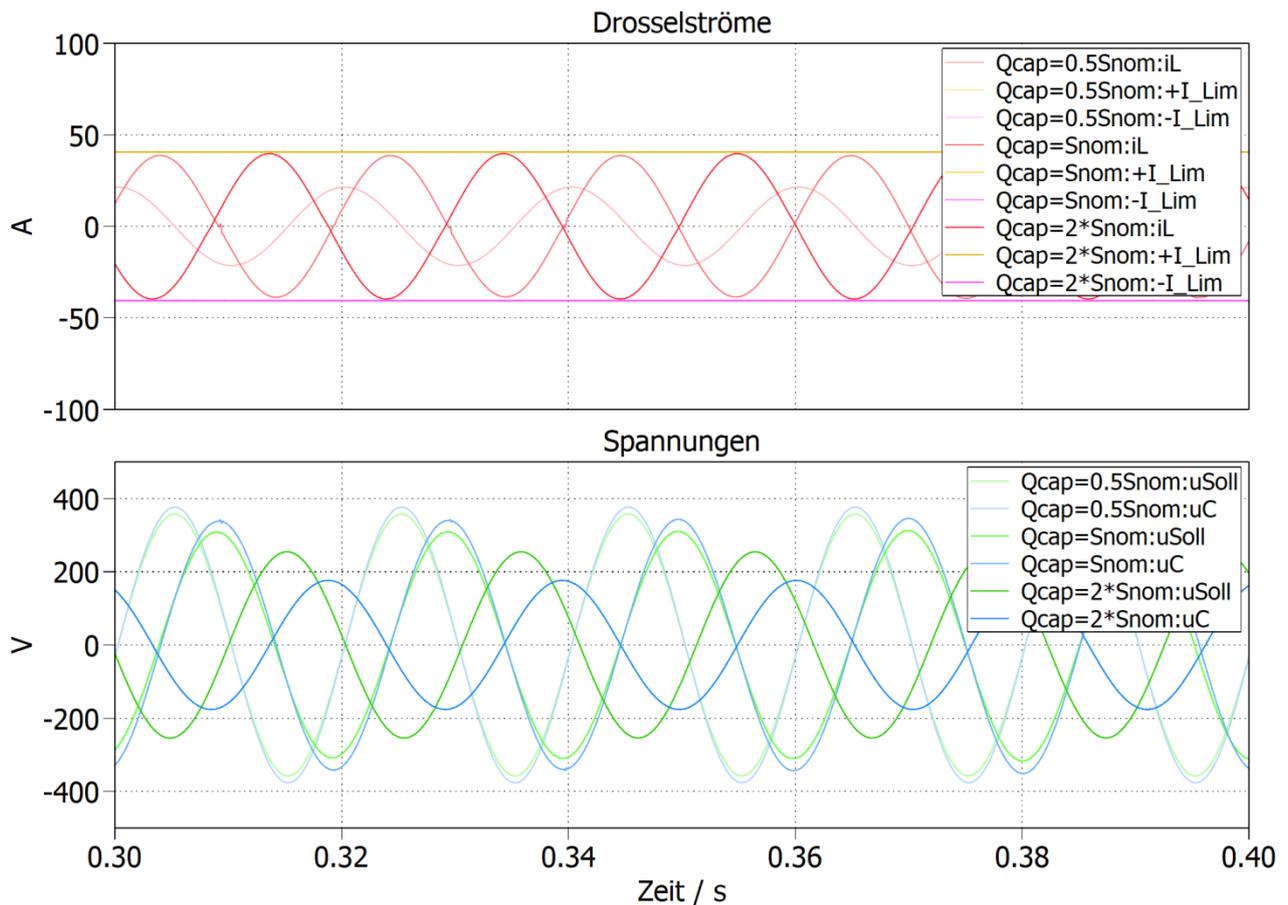


Abbildung 19: Kapazitive Lasten mit halber Nennleistung (helle Kurven), einfacher und doppelter Nennleistung (dunkle Kurven). Wegen der Spannungsanhebung durch Blindleistungsstatik und virtuellem Widerstand tritt bereits bei Nennlast Strombegrenzung auf.

Zusammenfassung

Mit Hilfe des vorgestellten universellen Reglers können Wechselrichter künftig ohne Änderung der Betriebsart eigene Netze einzeln oder im Verbund aufbauen, in bestehende Netze einspeisen oder unterbrechungsfreie Stromversorgungen realisieren. Dabei werden kaum erhöhte Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Mikrocontroller gestellt.

Ein zusätzlicher Vorteil der beschriebenen Umrichterregelung ist die lokale Verbesserung der Spannungsqualität. Die durch nichtlineare Verbraucher (z.B. Schaltnetzteile, Gleichrichterbrücken, etc.) erzeugten Stromüberschwingungen werden aufgrund des sinusförmigen Spannungsquellenverhaltens des Umrichters dezentral kompensiert.

Das Reglerkonzept wurde im Hinblick auf die sich ändernden Anforderungen im Netz entwickelt. Es wird erwartet, dass die Einspeiserichtlinien innerhalb der kommenden Jahre entsprechende Fähigkeiten für Neuanlagen fordern. Gleichzeitig besteht auf Kundenseite der Wunsch, eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher auch bei Netzausfall unterbrechungsfrei nutzen zu können. Dem trägt der neue Ansatz ebenfalls Rechnung.

Die Funktion wurde in der Simulation in allen denkbaren Konfigurationen nachgewiesen. Der vorgestellte neuartige resonante Begrenzer ermöglicht im Begrenzungsfall sinusförmige Ströme, eine entscheidende Verbesserung gegenüber dem bisherigen Konzept mit statischer Strombegrenzung, die einfach die Sinusspitzen kappt.

Für das bisherige Konzept mit statischer Strombegrenzung existieren bereits ein- als auch dreiphasige Implementierungen, die ihre Praxistauglichkeit im Labor unter Beweis gestellt haben und inzwischen mit einem Gerät am Markt verfügbar sind. Das neue Konzept mit sinusförmiger Strombegrenzung wird derzeit im Labor implementiert.