



Multifunktionale PV-Stromrichter in Industrienetzen Multifunctional PV-Converter in Industrial Grids

Dominik Geibel, Martin Braun, Markus Landau, Philipp Strauß
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.
Königstor 59, 34119 Kassel
Tel.: +49 (0) 561 7294-211, Fax: (0561) 7294-200
E-Mail: dgeibel@iset.uni-kassel.de
www.iset.uni-kassel.de

Christian Hardt, Jürgen Reekers, Mario Vogel
SMA Solar Technology AG
Sonnenallee 1, 34266 Niestetal
Tel.: +49 (0) 561 9522-0, Fax: +49 (0) 561 9522-100
E-Mail: christian.hardt@sma.de
www.sma.de

Zusammenfassung

Eine sichere Versorgung von Industrienetzen mit elektrischer Energie sowie die Einhaltung bestimmter Netzqualitätsanforderungen innerhalb eines Industrienetzes beeinflussen für Unternehmen wichtige Faktoren wie Produktionskosten oder Produktqualität. Zur Sicherung der Versorgungsqualität und einer wirtschaftlichen Energieversorgung werden Maßnahmen ergriffen, die den Einsatz von Kompensationsanlagen für Oberschwingungen oder Blindleistung, Anlagen zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung oder Energiemanagementsystemen beinhalten können.

Prinzipiell können diese Aufgaben auch durch photovoltaische Stromrichter übernommen werden. Diese multifunktionalen PV-Stromrichter, ausgestattet mit einem Batteriespeicher, können damit die Integration und Wirtschaftlichkeit von großen PV-Anlagen im industriellen Umfeld verbessern. Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes wird ein Gerät im 100-kW-Leistungsbereich entwickelt und mit einer realen PV-Anlage in einem Industrienetz erprobt. Aufgrund der stetig steigenden PV-Anlagenleistungen ist der Einsatz dieses Konzeptes auch im größeren Leistungsbereich vorstellbar.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über mögliche Zusatzfunktionen von PV-Stromrichtern anhand von Messergebnissen. Ein Ausblick auf die einjährige Testphase beginnend im Herbst 2008 wird gegeben und die Zusatzfunktionen des von ISET und der SMA Solar Technology AG (SMA) entwickelten Prototypen werden aufgezeigt.



Abstract

A secure supply of industrial grids with electrical power and compliance with particular power quality requirements within industrial grids influence important factors as product costs or product quality for industrial companies. Several measures are taken in order to maximise the quality and minimise the costs of power supply, e.g. usage of compensation equipment for reactive power or for harmonics, uninterruptible power supply or energy management systems.

Principally PV inverters are able to perform these additional functions. The multifunctional PV converter presented here is equipped with battery storage and shall improve the integration and profitability of large PV-systems in industrial applications. An inverter system in the power range of 100 kW is being developed in the frame of the R&D-project and will be proven with a real PV-system in an industrial environment. Also an application of this concept for higher power ranges is possible and imaginable because of a consistent increasing power of PV-plants.

This paper presents an overview of possible additional functionality of PV-converters on the basis of measurement results. An outlook for the one year lasting test phase starting in autumn 2008 is given and the implemented additional functionality of the prototype developed by ISET and SMA Solar Technology AG (SMA) are presented.

1 Einleitung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte FuE-Verbund-Projektes „Multifunktionale Photovoltaik-Stromrichter“ werden die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten für den Betrieb von PV-Stromrichtern mit Zusatzfunktionen zur Netzverbesserung untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf großen PV-Anlagen ab 100 kW_p, die in Industrie- oder Gewerbenetzen betrieben werden sollen.

Die Industrienetze der Projektpartner Hübner GmbH und Daimler AG Werk Kassel dienen in diesem Projekt als Beispiele für die konkrete technische bzw. wirtschaftliche Umsetzung. Diese Industrienetze befinden sich im Versorgungsgebiet eines weiteren Projektpartners, der Städtische Werke AG (Kassel) /MULTI-PV/.

Das ISET und die SMA sind für die inhaltliche Bearbeitung der verschiedenen wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen sowie für die Umsetzung des Labormusters und der Prototypenanlage verantwortlich /REEKERS 2006/.

Ergebnisse des Labormusters bezüglich der Umsetzbarkeit verschiedener Zusatzfunktionen werden in Form von Messungen gegeben, die während des Versuchsbetriebs im Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik (DeMoTec) des ISET entstanden sind.

Im Herbst 2008 sollen einige Zusatzfunktionen im Industrienetz des Projektpartners Hübner für zunächst ein Jahr erprobt werden. Diese Zusatzfunktionen werden hier dargestellt.



2 Einsatzmöglichkeiten multifunktionaler PV-Stromrichter in Industrienetzen

Das Multi-PV System kann vielfältige Funktionen einsetzen (s. Tabelle 1). Die Tabelle benennt auch den möglichen Nutzen, der dem Industrieunternehmen durch deren Einsatz entstehen kann. Der Grundnutzen ist die Einspeisung von PV-Energie. Dieser wird ergänzt durch die Möglichkeiten des Stromrichters, Oberschwingungen zu kompensieren und Blindleistung bereitzustellen.

Eine umfassende Erweiterung der Möglichkeiten erfolgt durch den Einsatz eines Speichers. Mit diesem kann, neben der durch die PV-Anlage verfügbaren Wirkleistung, zusätzliche Wirkleistung aufgenommen und abgegeben werden. Damit ist es möglich bei nicht ausreichender öffentlicher Stromversorgung, ausgewählte Lasten aus der PV-Anlage und dem Speicher lokal weiterzuversorgen.

Neben dieser USV-Funktionalität kann der Speicher auch dazu verwendet werden, ein Spitzenlast- und Energiemanagement im Industrienetz durchzuführen, mit dem die Stromkosten minimiert werden können. Durch ein Energiemanagement kann der Verbrauch von Zeiten mit hohen Energiepreisen in Zeiten mit niedrigen Energiepreisen verlagert werden. Beim Spitzenlastmanagement wird versucht, die Jahresspitze zu minimieren, um die leistungsabhängige Komponente der Stromkosten zu minimieren.

Weitere Funktionen durch den Einsatz des Speichers sind denkbar. Zu diesen gehört die Bereitstellung von Regelleistung für den Netzbetreiber. Regelleistung kann als Netzdienstleistung dafür eingesetzt werden, zur Frequenzhaltung beizutragen oder in Engpasssituationen das Netz zu entlasten. Neben der Bereitstellung von Netzdienstleistungen, kann auch ein Verkauf der zwischengespeicherten Energie an der Strombörse in Erwägung gezogen werden.

Tabelle 1: Übersicht der möglichen Betriebsarten in Abhängigkeit der Systemkonfiguration

Mögliche Betriebsarten	Nutzen durch
Einspeisung PV-Energie	Vergütung nach EEG
Lokale Spannungsqualitätsverbesserung	Ersatz konventioneller Filter und Verbesserung der Spannungsqualität (höhere Produktqualität, geringere Ausfallkosten)
Blindleistungsbereitstellung	Ersatz konventioneller Kompensationsanlagen und Reduktion der Kosten für Blindleistungsbezug
USV-Funktionalität	Ersatz konventioneller USV-Anlagen und Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit (geringere Ausfallkosten)
Spitzenlastmanagement	Reduktion der leistungsabhängigen Komponente der Stromkosten durch Verringerung Jahresspitzenlast
Energiemanagement	Reduktion der arbeitsabhängigen Komponente der Stromkosten



	ten durch Verlagerung der Last von Zeiten mit hohen Preisen in Zeiten mit niedrigen Preisen
Bereitstellung von Regelleistung	Gewinne bei der Teilnahme am Regelleistungsmarkt für Frequenzhaltung oder durch Bereitstellung von Engpassleistung an den Netzbetreiber
Energiehandel	Gewinn bei der Teilnahme an der Strombörse

2.1 Verbesserung der lokalen Versorgungsqualität im Industrienetz

Elektrische Energie kann einen entscheidenden Einfluss auf Produktionskosten und Produktqualität haben. Eine optimale Verfügbarkeit und eine ausreichende Qualität sind für Produktionsbetriebe von großer Wichtigkeit /HECK 2004/.

Zur Beschreibung der Qualitätsmerkmale wird in öffentlichen Netzen auf die Normen DIN EN 50160 /NORM1/ und DIN EN 61000-2-2 /NORM2/ zurückgegriffen. Industrienetze fallen in den Bereich der nichtöffentlichen Netze, hier gilt die Norm DIN EN 61000-2-4 /NORM3/.

Industrienetze haben entsprechend dem Produktionsprozess unterschiedliche Qualitätsanforderungen an die elektrische Versorgung. Berücksichtigung findet diese Tatsache in der DIN EN 61000-2-4 durch die Angabe von drei Umgebungsklassen:

- für geschützte Versorgungen (Klasse 1),
- für Versorgungen mit Anforderungen vergleichbar mit dem öffentlichen Netz (Klasse 2) und
- für Versorgungen mit erhöhten Störpegeln als im öffentlichen Netz (Klasse 3)

Beschrieben werden hierbei u. a. Merkmale wie Spannungsabweichungen, -einbrüche, Kurzzeitunterbrechungen, Oberschwingungen und Flicker.

Durch Netzrückwirkungen von Produktionsanlagen oder durch Störungen des öffentlichen Netzes können im Industrienetz erhöhte Störpegel auftreten, die eine negative Auswirkung auf Verbraucher mit geringeren Verträglichkeitspegeln haben.

2.1.1 Verbesserung der lokalen Spannungsqualität

Schweißmaschinen, große Motoren oder schnell schwankende Lasten können Netzrückwirkungen erzeugen, die den Verträglichkeitspegel anderer Lasten des Industrienetzes verletzen. Um einen sicheren Betrieb dieser empfindlicheren Verbraucher zu garantieren, muss für diese Lasten eine lokal verbesserte Spannungsqualität bereitgestellt werden. Dies kann erreicht werden, indem Oberschwingungen und Spannungsasymmetrien kompensiert sowie Stromanstiegsgeschwindigkei-



ten und Abweichungen vom Spannungssollwert begrenzt werden. Für diese Regelfunktionen sind moderne Stromrichter, wie auch der Multi-PV Stromrichter, einsetzbar.

2.1.2 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)

Kurzzeitunterbrechungen unter einer Sekunde können zu einem unkontrollierten Abschalten von Produktionsanlagen führen. Produktionsausfälle, Schäden an Werkzeugen etc. sind stark vom jeweiligen Herstellungsprodukt abhängig, jedoch meist sehr kostenintensiv /EPRI/. Durch den Einsatz einer USV-Anlage können diese Kosten vermieden werden.

Sind leistungsstarke Produktionsmaschinen vorhanden, ist eine Absicherung der vollständigen Versorgungsleistung mit USV-Anlagen oft nicht wirtschaftlich. Eine getrennte Absicherung der Steuerungseinheit durch eine USV-Anlage für Kurzzeitunterbrechungen kann ausreichend sein, um eine vollständiges Abschalten der Anlage zu vermeiden, zumindest aber ein kontrolliertes Abschalten der Anlage ermöglichen. Werden Steuerungseinheiten von Produktionsanlagen über separate Stromkreise versorgt, besteht in vielen Fällen die Möglichkeit mit einer relativ kleinen USV-Anlage große Produktionsanlagen effektiv zu schützen.

2.2 Einsatz von Spitzenlastmanagement im Industrienetz

Die Kosten für elektrische Energie setzen sich aus Leistungspreis und Arbeitspreis zusammen. Der Leistungspreis (€/kW/Jahr) wird üblicherweise anhand des höchsten mittleren Verbrauchs innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls bestimmt.

Durch ein gezieltes Spitzenlastmanagement können Leistungsspitzen vermieden und damit der Leistungspreis gesenkt werden. Der Spitzenleistungsbezug kann sowohl durch Lastmanagement als auch durch Erzeugungsmanagement begrenzt werden.

Abbildung 1 zeigt im oberen Zeitverlauf am Tag der Maximallast den gemessenen Lastgang der Wirkleistungsaufnahme des Industrieteilnetzes eines Projektpartners mit und ohne Einsatz eines Spitzenlastmanagements. Durch eine gezielte Kappung der Leistungsspitze kann die maximal bezogene Wirkleistung reduziert werden. Der Betrag der Reduktion der Spitzenleistung muss so festgelegt werden, dass sichergestellt ist, diesen unter allen Bedingungen einhalten zu können, da selbst die einmalige Überschreitung zu einem höheren Leistungspreis führt.

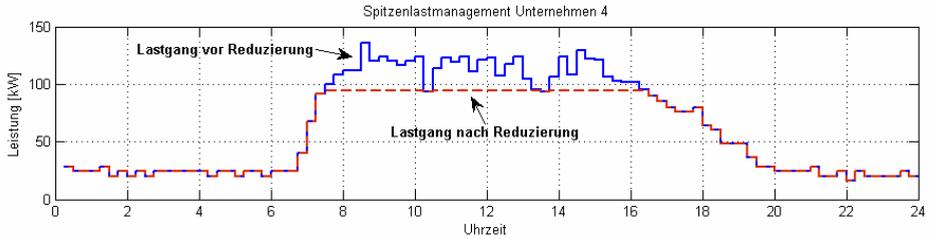


Abbildung 1: Wirkleistungsaufnahme (15-Minuten-Mittelwerte) eines Industriebetriebes und durch Multi-PV mögliches Spitzenlastmanagement am Tag der Maximallast /STETZ 2008/

2.3 Blindleistungskompensation am Anschlusspunkt des Industrienetzes

Im Allgemeinen müssen bestimmte Vorgaben im Hinblick auf den Verschiebungsfaktor am Anschlusspunkt des Industrienetzes gegenüber dem Energielieferanten eingehalten werden, wenn der sonst notwendige Blindleistungsbezug nicht in Rechnung gestellt werden soll. Blindleistungskompensationsanlagen werden deshalb in nahezu allen Industrienetzen eingesetzt. Entsprechend der Belastung des Industrienetzes, z.B. abhängig vom Schichtbetrieb oder Auslastung der Produktionsanlagen, arbeiten diese Kompensationsanlagen meistens nicht unter voller Auslastung. Dies ist auch in Abbildung 2 zu sehen, in der der gemessene Kompensationsblindleistungsverlauf eines Industrienetzes dargestellt ist.

Bei bekanntem Blindleistungskompensationsbedarf und Kenntnis des PV-Einstrahlungsprofils kann diese Blindleistungskompensation durch den multifunktionalen PV-Stromrichter teilweise übernommen oder sogar ganz ersetzt werden. Detaillierte Betrachtungen hierzu sind in /BRAUN 2007/ durchgeführt worden, welche insbesondere die wirtschaftlichen Aspekte näher beleuchten.

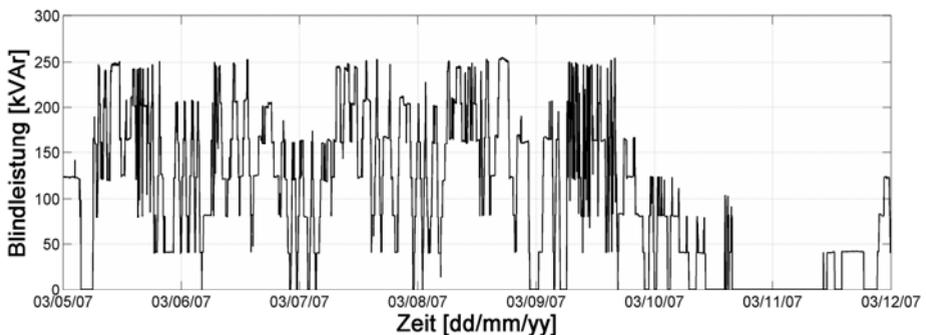


Abbildung 2: Gemessene kompensierte Blindleistung in einem Teil eines Industrienetz während eines Zeitraums einer Woche



2.4 Wirtschaftliche Bewertung der Einsatzmöglichkeiten

Umfangreiche und detaillierte Untersuchungen über den wirtschaftlichen Einsatz und die optimale Funktionskombination wurden. Der Ergebnisüberblick in /BRAUN 2008/ zeigt, dass die wirtschaftlich interessanteste Funktionskombination aus drei Elementen besteht:

1. Einspeisung von PV-Energie,
2. Verbesserung der lokalen Versorgungsqualität (durch Verbesserung der Spannungsqualität und Einsatz der USV-Funktionalität) und
3. Einsatz von Spitzenlastmanagement.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass die Wirtschaftlichkeit des Multi-PV Systems mit der genannten Funktionskombination grundlegend von dem unternehmensindividuellen Lastprofil abhängig ist. Wenn jedoch die Batteriegröße für das jeweilige Unternehmen optimiert wird, zeigt sich für die untersuchten drei Unternehmen, dass die Investitionen in die zusätzlichen Funktionen wirtschaftlich äußerst interessant sind.

3 Multifunktionale PV-Stromrichter

Die Nutzung eines herkömmlichen PV-Stromrichters für einen multifunktionalen Einsatz erfordert Ergänzungen im Hard- und Softwarebereich. Diese Änderungen werden nachfolgend vorgestellt.

3.1 Konzept des multifunktionalen PV-Stromrichter

In Abbildung 3 ist der Aufbau des multifunktionalen PV-Stromrichters gezeigt. Die zentrale Komponente ist ein PV-Stromrichter. Zusätzliche Komponenten sind eine Batterie mit Anbindung an den Gleichspannungszwischenkreis über einen DC-DC-Wandler, eine überbrückbare Entkopplungsinduktivität und ein schneller Netzschalter.

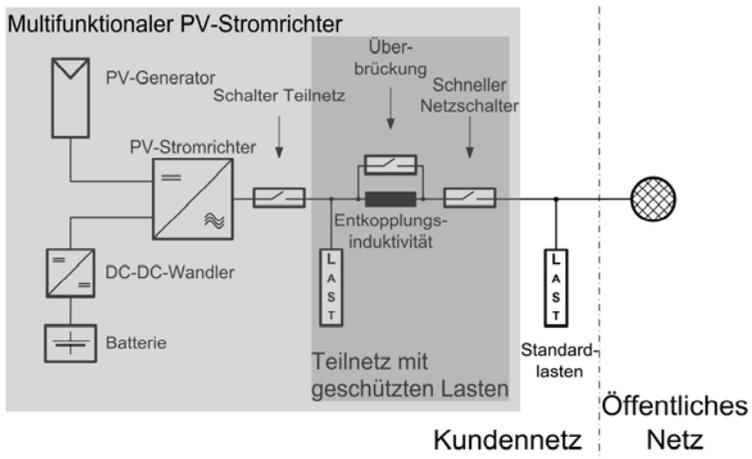


Abbildung 3: Systemeinbindung des multifunktionalen PV-Stromrichters



Sensible Lasten können in einem geschützten Teilnetz versorgt werden, welches durch eine Entkopplungsinduktivität vom restlichen Netz entkoppelt ist, wodurch eine lokal verbesserte Versorgungsqualität für die Lasten im Teilnetz gewährleistet wird. Dieses Teilnetz wird zusätzlich durch einen schnellen Netzschalter bei Netzausfällen geschützt. Beim Auftreten von Netzfehlern werden die Lasten im Teilnetz aus der Batterie versorgt, zusätzliche PV-Einstrahlung kann die nominale Betriebszeit im Inselnetz, gegeben durch die Batteriekapazität, verlängern.

Abhängig von der Betriebsart und dem Regelungskonzept wird die Entkopplungsinduktivität überbrückt oder genutzt. Tabelle 2 fasst die möglichen Betriebsarten zusammen und zeigt dass nicht alle Betriebsarten miteinander kombinierbar sind, wodurch sich Einschränkungen im multifunktionalen Betrieb ergeben.

Tabelle 2: Übersicht der möglichen Betriebsarten in Abhängigkeit der Systemkonfiguration

Betriebsarten	Mit Entkopplungsinduktivität	Ohne Entkopplungsinduktivität
Einspeisung PV-Energie	Ja	Ja
Lokale Spannungsqualitätsverbesserung	Ja	Nein
USV/NEA - Funktionalität	Ja	Ja/Nein ¹
Bereitstellung Regelenergie	Ja	Ja
Spitzenlastmanagement	Ja	Ja
Blindleistungsbereitstellung / -kompensation ²	Nein	Ja
Oberschwungungskompensation ²	Nein	Ja

¹ Abhängig von der gewünschten USV-Klassifikation

² Am Netzanschlusspunkt



3.2 Hardware des Labormusters und der Testumgebung

Ein Labormuster des in Abbildung 3 dargestellten Systems wurde durch SMA und ISET im Test- und Experimentierzentrum DeMoTec aufgebaut. PV-Wechselrichter mit Entkopplungsinduktivität, schnellem Netzschalter und DC-DC-Steller sind in Abbildung 4 links und der Batterieverbund in Abbildung 4 rechts zu sehen.

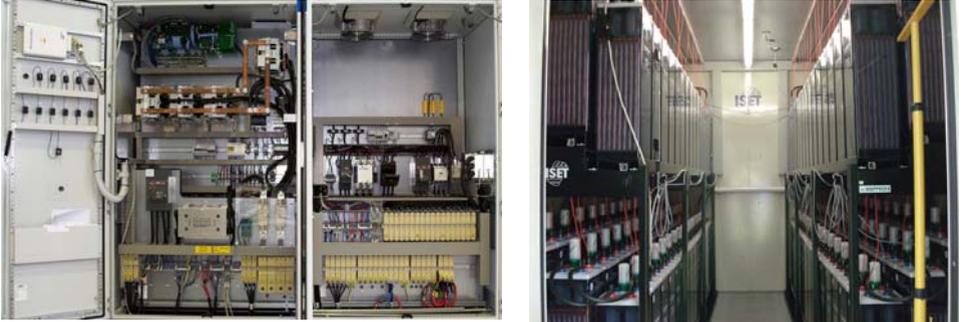


Abbildung 4: Labormuster des multifunktionalen PV-Stromrichters (links) und Batteriecontainer (rechts)

Abbildung 5 zeigt die Komponenten zum Test des Labormusters und des Prototyps in der DeMoTec einen 100 kW_p PV-Simulator und einen 3x30 kVA Netzsimulator.

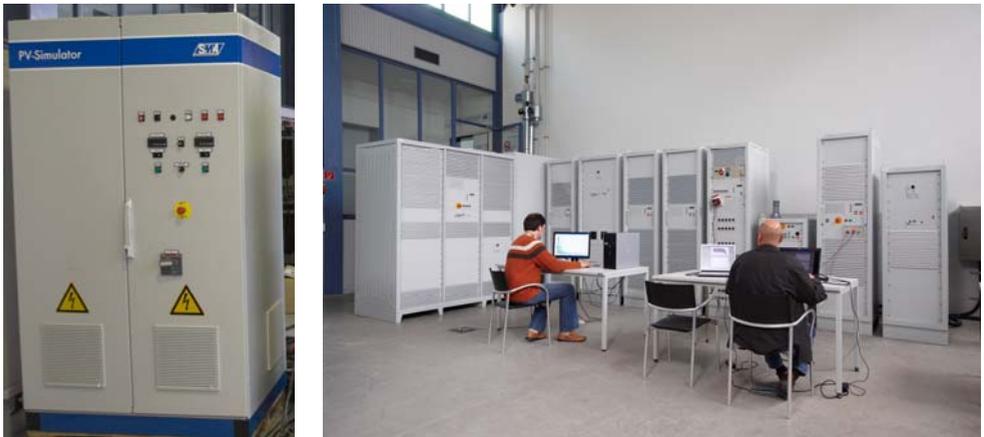


Abbildung 5: 100 kW_p PV-Simulator (links); Spitzenberger & Spies Netzsimulator 3x30 kVA für die Nachbildung eines gestörten Netzverhaltens (rechts)

Tabelle 3 fasst die wesentlichen elektrischen Eigenschaften der verwendeten Geräte zusammen.

Tabelle 3: Elektrische Eigenschaften des Testsystems in der DeMoTec

Labormuster Multi-PV-Wechselrichter	100 kVA
Entkopplungsinduktivität	konfigurierbar, 0.3 mH ... 1.8 mH
Batterie	384 V, 800 Ah (C_{10})
PV-Simulator	100 kW _p
Netzsimulator	3x30 kVA

3.3 Regelung des Labormusters

In diesem Abschnitt wird das Regelungskonzept für das Labormuster bei Nutzung der Entkopplungsinduktivität (vgl. Tabelle 2) vorgestellt /JAHN 2007/.

In Niederspannungsnetzen ist der ohmsche Widerstandsbelag deutlich größer als der induktive. Es gilt $R/X > 1$. Durch die zusätzlich eingebrachte Entkopplungsinduktivität wird dieses Verhältnis verkleinert, der Wechselrichter ist mit dem Netz über eine Induktivität gekoppelt (Abbildung 6). Ein Austausch von Wirkleistung erfolgt nun aufgrund einer Phasenverschiebung δ zwischen den Spannungsquellen, ein Blindleistungsaustausch resultiert aus einer Differenz der Spannungsamplituden U_{WR} und U_{Netz} .

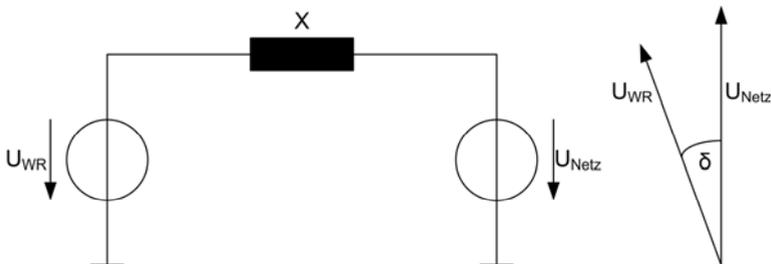


Abbildung 6: Ersatzschaltbild von über eine ideale Induktivität gekoppelter Spannungsquellen (links), Spannungszeigerdiagramm (rechts)

Abbildung 7 zeigt die verwendete Regelstruktur für die Netzeinspeisung von PV-Energie. Es wird die Amplitude der Teilnetzspannungen sowie die Phasenlage der Teilnetzspannungen im Vergleich zu den Netzspannungen geregelt. Die Spannungsmesswerte des Teilnetzes werden in dq-Koordinaten transformiert, daraus erfolgt eine Betragsbildung. Dieser Wert wird mit einem vorgegebenen Sollwert für die Amplitude der Teilnetzspannung verglichen. Die Abweichung wird einem PI-Regler zugeführt. Treten in den Netzspannungen Spannungsänderungen auf, wird der Einfluss dieser auf Lasten im geschützten Teilnetz durch die Regelung kompensiert bzw. gemindert. Dies ist jedoch mit einem Blindleistungsaustausch zwischen Wechselrichter und Netz ver-



bunden. Die Menge der Blindleistung Q ist dabei von verschiedenen Parametern abhängig. Neben der Größe der Entkopplungsinduktivität spielen dabei die Lastverhältnisse im Teilnetz, die Einspeisung von PV-Energie durch den Wechselrichter sowie die Netzspannung eine Rolle. Es gilt:

$$Q = f(P_{MPV}, S_{Last}, \cos(\varphi_{Last}), L_{Ent}, U_{Netz}) \quad (1)$$

Die Einspeisung von Wirkleistung erfolgt durch die Regelung der Phasenlage. Aus dem Vergleich zwischen Soll- und Istwert der Zwischenkreisspannung wird mit einem PI-Regler ein Stellsignal für die Phasendifferenz zwischen Teilnetz und Netz erzeugt. Durch Vorgabe des Sollwerts der Zwischenkreisspannung durch einen MPP-Regler wird die Einspeisung maximaler PV-Energie ermöglicht.

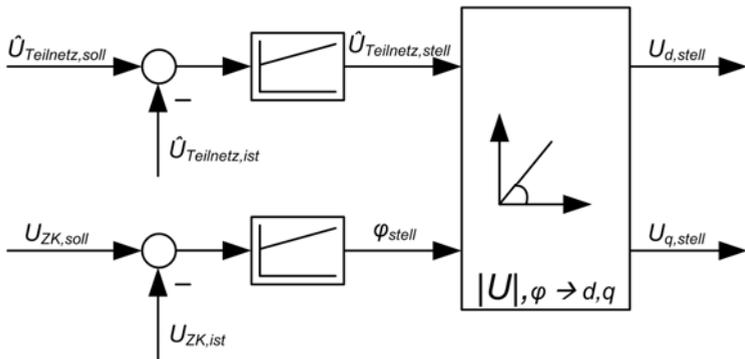


Abbildung 7: Regelung der Teilnetzspannung und der Zwischenkreisspannung für induktiv entkoppelte Teilnetze

Neben dem Ausgleich von Spannungsänderungen des Hauptnetzes (siehe Abschnitt 4.1) können durch den Einsatz der Entkopplungsinduktivität vorhandene Oberschwingungsanteile der Netzspannungen gemindert werden (siehe Abschnitt 4.2), um eine lokale Verbesserung der Spannungsqualität im Teilnetz zu erreichen.

Die Implementierung der Regelung für das Labormuster wird mit Hilfe eines Rapid-Control-Prototyping-Systems (MicroAutoBox von dSPACE) bewerkstelligt. Dabei wird der Ansatz einer modellbasierten Regelungsentwicklung auf Grundlage von Matlab™/Simulink™ verfolgt. Nähere Information hierzu sind in /GEIBEL 2007/ gegeben.

4 Testergebnisse des Labormusters

Im Folgenden werden einige Testergebnisse für die Betriebsart der lokalen Spannungsqualitätsverbesserung gegeben. Hierzu wird das Verhalten des multifunktionalen PV-Stromrichters bezüglich Spannungsänderungen und der Reduktion von Oberschwingungsspannungen untersucht.

4.1 Spannungsänderungen

Mit Hilfe des Labormusters und der Möglichkeit des Tests verschiedener Entkopplungsinduktivitäten werden sowohl quasistationäre als auch dynamische Netzspannungsänderungen untersucht. Auf Spannungsänderungen wird, je nach Einbruchtiefe und -dauer entweder durch Einspeisung von zusätzlicher Blindleistung oder durch eine Umschaltung in den USV-Betrieb reagiert.

4.1.1 Quasistationäre Spannungsänderungen

Zur Beurteilung der Auswirkung von quasistationären Spannungsänderungen werden die Effektivwerte der dreiphasigen Netzspannung in den Grenzen der EN 50160 ($230V_{\text{eff}} \pm 10\%$), zwischen $207 V_{\text{eff}}$ und $253 V_{\text{eff}}$, verändert (durchgezogene Linie in Abbildung 8, Leiter L1). Die Messung der dreiphasigen Teilnetzspannungen, d.h. die Spannungen an den geschützten Lasten zeigt, dass diese konstant auf dem vorgegebenen Sollwert von $230 V_{\text{eff}}$ gehalten werden können (gestrichelte Linie in Abbildung 8, Leiter L1).

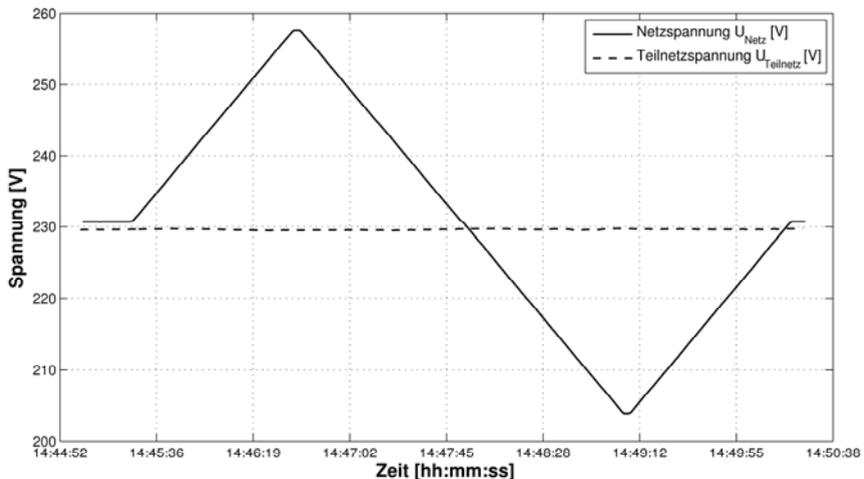


Abbildung 8: Bei Variation der Netzspannung in den Grenzen der EN 50160 ($230V_{\text{eff}} \pm 10\%$), kann die Teilnetzspannung konstant bei $230 V_{\text{eff}}$ gehalten werden. Messwerte für Leiter 1.

Entsprechend dem vorgestellten Prinzip der induktiven Entkopplung hat die Spannungsdifferenz zwischen den Netzspannungen und den Teilnetzspannungen einen Blindleistungsfluss zur Folge. Abbildung 9 zeigt die gemessene dreiphasige Blindleistung des PV-Wechselrichters der sich für verschiedene Größen der Entkopplungsinduktivität (0.6 mH bis 1.8 mH) bei einer Einspeisung von 25 kW Wirkleistung des PV-Stromrichters und einer Teilnetzlast von 50 kW einstellt.

Für kleinere Entkopplungsinduktivitäten ist bei gleichen Netzspannungen eine größere Blindleistung erforderlich, um die Teilnetzspannung auf dem vorgegebenen Sollwert zu halten. Insbesondere für Induktivitäten kleiner 1,2 mH ist eine deutliche Zunahme der erforderlichen Blindleistung zu erkennen.

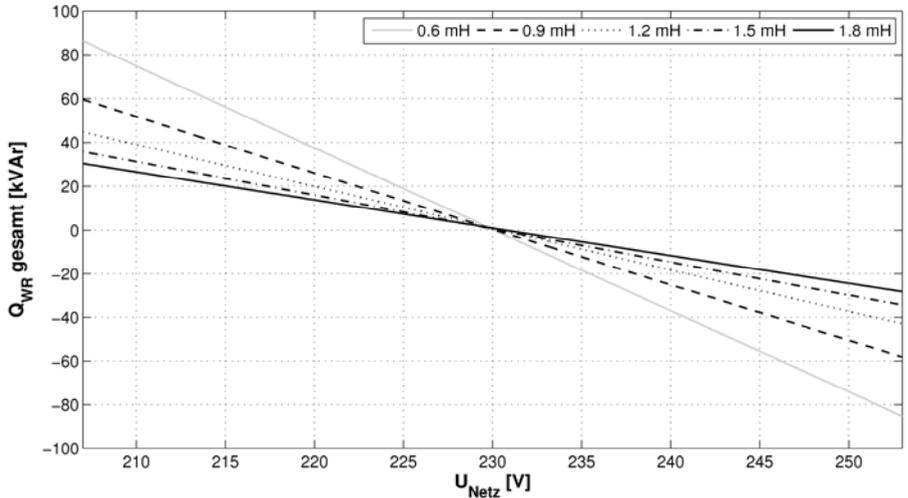


Abbildung 9: Gemessener dreiphasiger Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von der Netzspannung und der Entkopplungsinduktivität. Parameter: 25 kW Wirkleistungseinspeisung durch den PV-Stromrichter, Teilnetzlast von 50 kW. Einspeisung kapazitiver Blindleistung für $Q > 0$.

Entsprechend Gleichung (1) haben neben der Entkopplungsinduktivität auch noch die Parameter der Wirkleistungseinspeisung des PV-Stromrichters und der Scheinleistung der geschützten Lasten einen Einfluss auf die benötigte Blindleistung. In Abbildung 10 ist bei einer konstanten Wirkleistungseinspeisung des PV-Stromrichters von 25 kW und verschiedenen Lastbedingungen der geschützten Lasten sowie einer Entkopplungsinduktivität von 1,2 mH der gemessene Blindleistungsbedarf angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Austausch von Wirkleistung zwischen Netz und Teilnetz eine Verschiebung der Blindleistungskennlinie erfolgt.

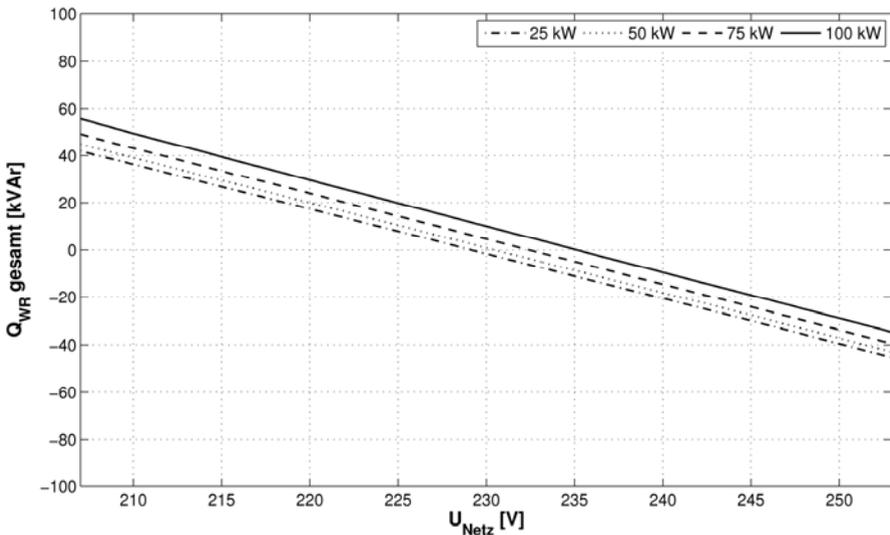


Abbildung 10: Gemessener dreiphasiger Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von der Netzspannung und der Teilnetzlast. Parameter: 25 kW Wirkleistungseinspeisung durch den PV-Stromrichter; Entkopplungsinduktivität von 1,2 mH. Einspeisung kapazitiver Blindleistung für $Q > 0$.

Die Messungen zeigen, dass bei quasistationären Änderungen der Spannungen des Netzes die Teilnetzspannungen für die sensiblen Lasten auf einem vorgegebenen Sollwert konstant gehalten werden können. Dabei sind die Parameter der Teilnetzlast, Wirkleistungseinspeisung des PV-Stromrichters und der Entkopplungsinduktivitäten variiert worden. Bei vergleichbaren Spannungsverhältnissen des Netzes wird der zusätzliche Blindleistungsbedarf wesentlich durch die Größe der Entkopplungsinduktivität beeinflusst. Aufgrund der zusätzlich benötigten Blindleistung wird die maximal mögliche dauerhafte Einspeisung von Wirkleistung des PV-Stromrichters gemindert. Dadurch kann es zu einer Beschränkung der Einspeisung von PV-Leistung kommen. Durch die Auswahl einer möglichst großen Entkopplungsinduktivität kann die Wirkleistungsreduktion klein gehalten werden, jedoch treten dabei auch höhere ohmsche Verluste in der Entkopplungsinduktivität auf. Für die letztendliche Auswahl der Größe für die Entkopplungsinduktivität muss entsprechend den oben aufgeführten Punkten eine optimale Abwägung erfolgen.

4.1.2 Dynamische Spannungsänderungen

Die Auswirkung kurzzeitiger Spannungseinbrüche auf die geschützten Lasten im Teilnetz kann durch die Entkopplungsinduktivität gemindert werden. Bei Spannungseinbrüchen mit geringen Einbruchtiefen, die Restspannung des Netzes liegt über 80%, kann die Regelung durch Einspeisung von zusätzlicher Blindleistung den Einbruch der Spannung im Teilnetz reduzieren. Liegt die Restspannung des Einbruchs unter 80% erfolgt die Umschaltung in den USV-Betrieb.



Für die Betrachtung von Spannungseinbrüchen größer 80% Restspannung werden beispielhaft Netzspannungseinbrüche mit einer Restspannung von 85% der Nennspannung und mit einer Dauer von 70 ms bzw. 100 ms untersucht. Der Zeitpunkt des Spannungseinbruchs wird bei einer Phasenlage von 0° und 90° der Spannung des Leiters 1 der Netzspannung durchgeführt. Es werden ein-, zwei- und dreiphasige Einbrüche betrachtet.

In Abbildung 11 ist der transiente Verlauf der Netzspannung und der Spannung an der geschützten Teilnetzlast des Leiters 1 bei einem dreiphasigen Spannungseinbruch auf 85% der Nennspannung mit einer Dauer von 100 ms dargestellt. Der Einbruch erfolgt bei einer Phasenlage von 90° des Leiters L1. Die Last nimmt 100 kW Wirkleistung auf, der Wechselrichter speist 50 kW ein.

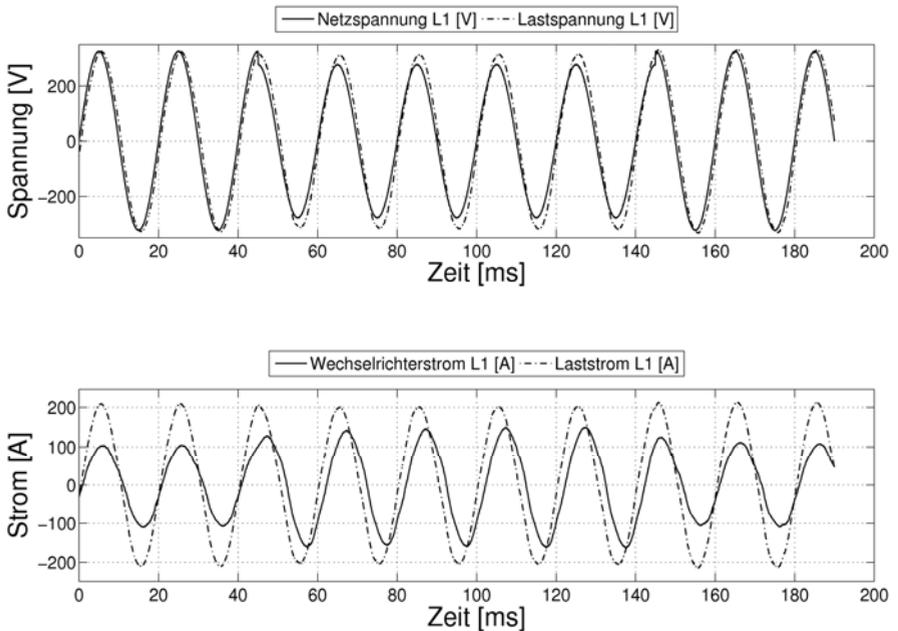


Abbildung 11: Transienter Verlauf der Spannungen und Ströme während eines Netzspannungseinbruchs. Parameter: 85% Restspannung, Dauer des Einbruchs von 100ms, Entkoppelungsinduktivität von 1,8 mH, Wirkleistungseinspeisung des PV-Stromrichters von 50 kW und Teilnetzlast von 100 kW.

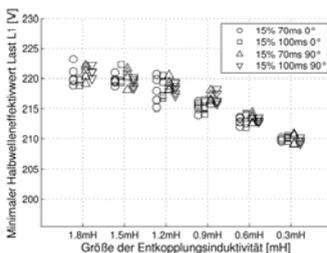
Deutlich sichtbar kann die Spannung an der Last nicht auf Nennspannung gehalten werden, allerdings wird der Einbruch im Vergleich zur Einbruchtiefe der Netzspannung stark gemindert. Der Spannungseffektivwert an der Last unterschreitet während dieses Netzeinbruchs (auf $195,5 V_{\text{eff}}$) nicht den Wert von $220 V_{\text{eff}}$. Die Regelung versucht im weiteren Verlauf eine Rückführung der Teilnetzspannung auf den vorgegebenen Sollwert durch eine erhöhte Blindleistungseinspeisung, jedoch wird dieser während der Zeitdauer des Einbruchs von 100 ms nicht erreicht. Die Einspeisung des zusätzlichen Blindstroms zum bereits vorhandenen Wirkstrom kann deutlich an der

Phasenverschiebung des Wechselrichterstroms im Vergleich zum Laststrom während des Spannungseinbruchs erkannt werden.

Zur genaueren Untersuchung der Auswirkung von Spannungseinbrüchen bei unterschiedlichen Entkopplungsinduktivitäten werden im Folgenden Ergebnisse gezeigt, bei denen der minimale Halbwelleneffektivwert während verschiedener Arten von Spannungseinbrüchen bestimmt wird. Dabei werden außerdem noch verschiedenen Wirkleistungseinspeisungen des Wechselrichters (25 kW, 50 kW und 75 kW) und verschiedene Lastverhältnisse (50 kW und 100 kW) der geschützten Lasten mit einbezogen. Diese sind in den Abbildungen jedoch nicht unterschiedlich gekennzeichnet. Die Abbildungen 12-15 zeigen das Verhalten der jeweils von den Spannungseinbrüchen betroffenen Leiterspannung; Abbildung 12 für einphasige, Abbildung 13 für zweiphasige und Abbildung 14 für dreiphasige Einbrüche.

Den Diagrammen kann entnommen werden, dass bei kleineren Entkopplungsinduktivitäten unabhängig von der Art des Spannungseinbruchs die Restspannung an der geschützten Last sinkt. Es wird ein minimaler Einbruch auf $205 V_{\text{eff}}$ bei einer Entkopplungsinduktivität von $0,3 \text{ mH}$ gemessen. Die Unterschiede der minimalen Halbwelleneffektivwerte zwischen den Induktivitäten mit $1,8 \text{ mH}$, $1,5 \text{ mH}$ und $1,2 \text{ mH}$ sind gering, es können mit diesen Induktivitäten unabhängig von der Art des Spannungseinbruch mindestens $215 V_{\text{eff}}$ Restspannung im Teilnetz erreicht werden.

Soll für die geschützten Teilnetzlasten höchstens eine Spannungsabweichung von $\pm 10\%$ zugelassen werden, so kann dies mit einer Entkopplungsinduktivität von $0,6 \text{ mH}$ für die untersuchten Arten von Spannungseinbrüchen erreicht werden. Für eine abschließende Auswahl der Entkopplungsinduktivität muss noch das Verhalten bei der Umschaltung in den USV-Betrieb berücksichtigt werden. Messungen hierfür werden in Abschnitt 5 gezeigt.



Erklärung der Legende für Abbildung 12-15:

15% 70ms 0° entspricht einem Einbruch der Netzspannung um 15% für 70ms bei 0° Phasenlage des Leiters L1 etc.

Abbildung 12: Minimale gemessene Halbwelleneffektivwerte des Leiters 1 der Teilnetzlast bei einem Spannungseinbruch in Leiter 1 des Netzes auf 85% ($195,5 V_{\text{eff}}$).

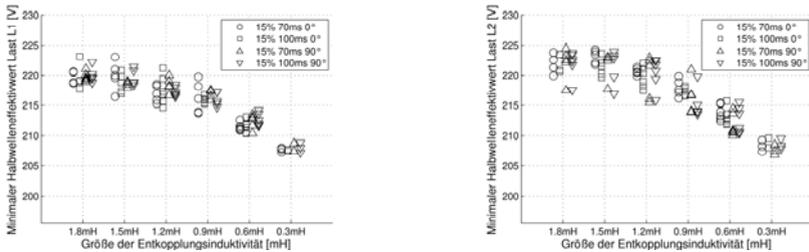


Abbildung 13: Minimale gemessene Halbwelleneffektivwerte der Leiter 1 und 2 der Teilnetzlast bei einem Spannungseinbruch in Leiter 1 und 2 des Netzes auf 85% ($195,5 V_{eff}$).

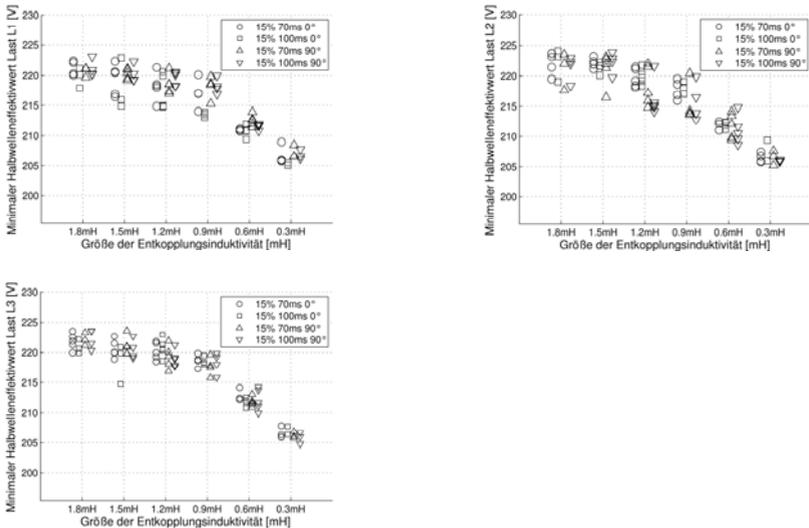


Abbildung 14: Minimale gemessene Halbwelleneffektivwerte der Leiter 1 bis 3 der geschützten Teilnetzlast bei dreiphasigen Spannungseinbrüchen des Netzes auf 85% ($195,5 V_{eff}$).

4.2 Reduktion von Oberschwingungen

Durch Netzrückwirkungen von Produktionsanlagen können Industrienetze erhöhte Oberschwingungsspannungspegel enthalten. Dies äußert sich vor allem in Oberschwingungen ungerader Ordnung (3., 5., 7., 11. ...).

Der multifunktionale PV-Stromrichter ist in der Lage eine Spannung mit geringer Oberschwingungsbelastung bereitzustellen. Der Wechselrichter mit den geschützten Lasten ist durch die Induktivität von der mit starken Oberschwingungen belasteten Netzspannung entkoppelt. Dadurch kann der Oberschwingungsspannungspegel an den geschützten Lasten reduziert werden. Abbildung 15 zeigt ausgesuchte Oberschwingungsspannungspegel, bezogen auf die Grundschnit-

gung bei einer ohmschen Last von 100 kW im geschützten Teilnetz, einer Wirkleistungseinspeisung von 50 kW des PV-Stromrichters und bei Verwendung verschiedenen Entkopplungsinduktivitäten. Diese werden mit dem jeweiligen bezogenen Oberschwingungsspannungspegel des Hauptnetzes verglichen. Außerdem ist der aus den aufgelisteten Oberschwingungen berechnete THD-Wert als Vergleichsmöglichkeit angegeben.

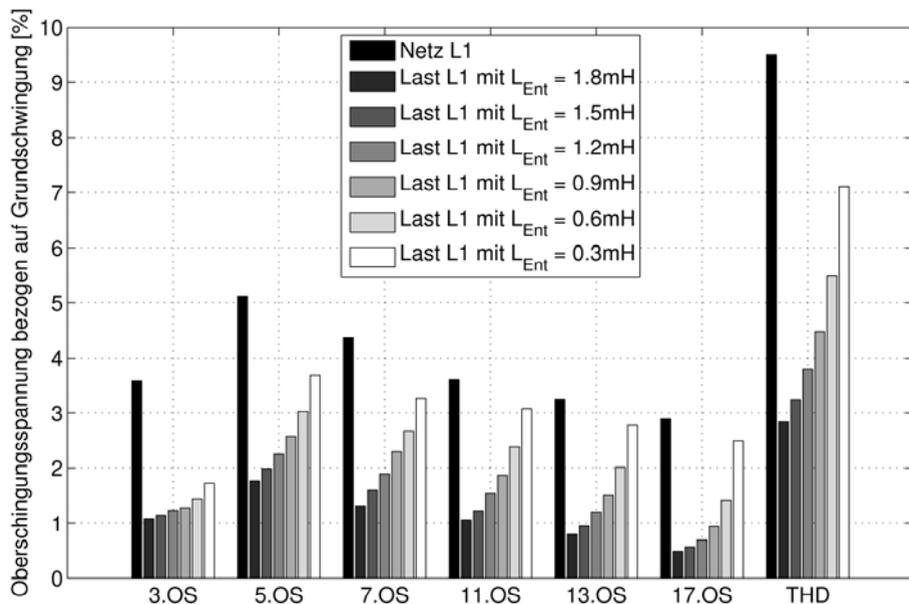


Abbildung 15: Gemessene Oberschwingungsspannungen der 3., 5., 7., 11., 13., 17. Ordnung sowie der berechnete THD-Wert bezogen auf die jeweilige Grundschiwingung von Leiter 1 der Teilnetz- und Netzspannung bei verschiedenen Entkopplungsinduktivitäten. Parameter: Teilnetzlast 100 kW, Wirkleistungseinspeisung PV-Stromrichter 50 kW

Durch eine größere Entkopplungsinduktivität wird der Oberschwingungsspannungspegel an der geschützten Teilnetzlast besser reduziert. Die maximale Reduktion wird bei einer Induktivität von 1,8 mH erreicht. Dabei hat die Spannung an der geschützten Last nur noch 30% des Oberschwingungsspannungspegels des Netzes. Mit 0,6 mH kann die Belastung immerhin noch auf 57% reduziert werden, bei 0,3 mH enthält die Lastspannung noch 75% der Oberschwingungsanteile des Netzes. Entsprechend der Norm DIN EN 61000-2-4 ist eine Verbesserung von Klasse 3 (maximaler THD-Wert 10%) auf Klasse 2 (maximaler THD-Wert 8%) hinsichtlich des THD-Wertes möglich.



4.3 Zusammenfassung der Testergebnisse

Die Messergebnisse zeigen, dass durch den multifunktionalen PV-Wechselrichter Spannungsänderungen und Oberschwingungen für geschützte Lasten im Teilnetz ausgeglichen, gemindert oder reduziert werden können. Des Weiteren wird durch den Test der unterschiedlichen Entkopplungsinduktivitäten gezeigt, dass die Größe der Induktivität das Verhalten des multifunktionalen Stromrichters wie folgt beeinflusst:

- Verbesserung der lokalen Spannungsqualität → größere Induktivität
- Verbesserung der Spannungsstützung → größere Induktivität
- Reduktion des Blindleistungsbedarfs aus WR → größere Induktivität
- Reduktion der ohmschen Verluste → kleinere Induktivität
- Reduktion der Blindleistungskompensation am Netzanschlusspunkt → keine Induktivität

Die optimale Auslegung der Induktivität muss deshalb unter Abwägung der angestrebten Ziele erfolgen.

5 Testergebnisse und Testphase des Prototypen

Bei der Entwicklung des MultiPV Prototypen ist besonderes Augenmerk auf das Verhalten bei Netzfehlern, insbesondere klemmennahen Kurzschlüssen gelegt worden. Normalerweise unterliegen in das öffentliche Netz einspeisende Photovoltaikwechselrichter Richtlinien, die das Verhalten bei Netzfehlern vorgeben (z.B. VDE 0126 1-1). Soll der Wechselrichter zusätzlich noch Netzersatzfunktionen übernehmen oder bestenfalls sogar als USV-Anlage agieren, sind die in diesen Richtlinien zu erfüllenden Abschaltzeiten nicht kurz genug, um angeschlossene sensitive Verbraucher vor Ausfällen zu schützen. Weiterhin sollte der Wechselrichter bei Kurzschlüssen oder Spannungseinbrüchen nicht durch zu hohe Strombelastungen abschalten. Nur auf diese Weise kann nach erfolgter Trennung vom öffentlichen Netz der Netzersatzbetrieb aufgenommen werden.

5.1 Verhalten des multifunktionalen PV-Stromrichters bei Netzfehlern

Zu diesem Zweck ist die Hardware mit einer speziellen Schaltung zur Strombegrenzung ausgestattet worden. Diese verhindert auch bei einem sehr niederohmigen Kurzschluss die Störung der Hardware. Zusätzlich wird ein Signal generiert, welches zur schnellen Auslösung der Netztrennung genutzt werden kann.

Abbildung 16 zeigt das Verhalten des Wechselrichters bei einem klemmennahen Kurzschluss im externen Netz ohne Verwendung der Entkopplungsinduktivität. Trotz der geringen Schaltfrequenz von 3 kHz, die einen sehr guten Wirkungsgrad des Gesamtsystems ermöglicht, begrenzt die Schaltung den Strom zuverlässig auf etwa $420 A_{\text{eff}}$. Die Auslösezeit von ca. 17 ms ist auf die Öff-

nungszeit des vorgespannten, mechanischen Leistungsschalter zurückzuführen. Durch den Einsatz von schnelleren Schaltern könnte der Spannungseinbruch an der zu schützenden Last weiter reduziert werden. Leistungselektronische Schalter würden hier einen deutlichen Vorteil bieten, der allerdings teuer mit Einbußen beim Wirkungsgrad im Einspeisebetrieb erkauft werden müsste.

Die zunächst nicht sinusförmige Spannungsform nach der Netztrennung wird durch die Sättigung des Multi-PV Transformators verursacht. Dieser ist einem Sunny Central 100 entliehen und hat für einen Inselnetzwechselrichter in extremen Situationen wie einem Netzkurzschluss keine ausreichende Sättigungsreserve. Dem Sunny Central verhilft er allerdings im Einspeisebetrieb zu einem hervorragenden Spitzenwirkungsgrad von 97,6 %. Eine Anpassung des Transformators an die speziellen Anforderungen für Inselnetze sollte zu einem verbesserten Sättigungsverhalten führen.

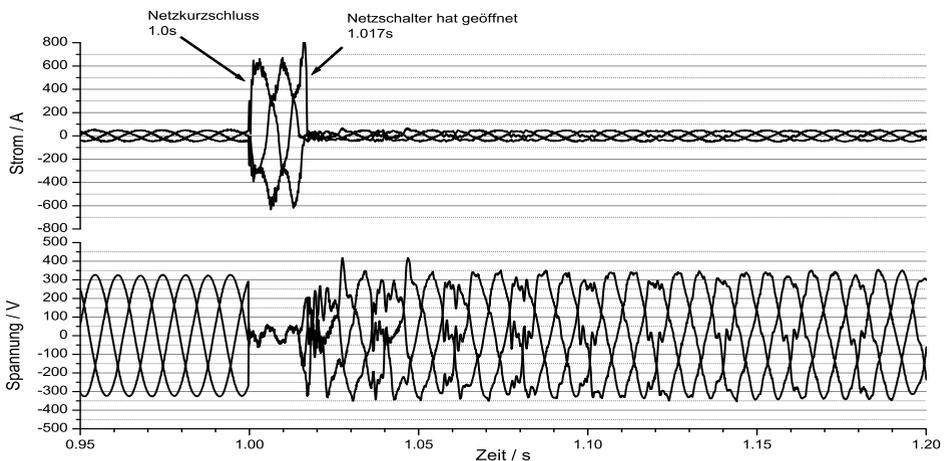


Abbildung 16: Klemmennaher Kurzschluss im externen Netz

5.2 Verhalten des multifunktionalen PV-Stromrichters bei Netzersatzbetrieb

Im Netzersatzbetrieb ist ebenso wie im Netzparallelbetrieb ein robustes Verhalten bei Kurzschlüssen von besonderer Bedeutung. Der Multi-PV Prototyp ist für den Netzersatzbetrieb mit einer Kurzschlussregelung ausgestattet, die den stationären Kurzschlussstrom begrenzt und erst bei einem durch nachgeschaltete Sicherungsorgane nicht löschbaren Kurzschluss mit Fehler abschaltet. Abbildung 17 zeigt einen Kurzschlussversuch, bei dem die Regelung auf folgende Werte eingestellt wurde:

- Transienter Kurzschlussstrom: 400 A_{eff}
- Stationärer Kurzschlussstrom: 300 A_{eff}
- Kurzschluss wird zum Zeitpunkt 1,0 s geschaltet und nach 1,9 s geklärt.



In den ersten 200 ms ist der Strom durch die Hardware begrenzt. Danach greift die softwaretechnische Begrenzung auf den stationären Kurzschlussstrom ein.

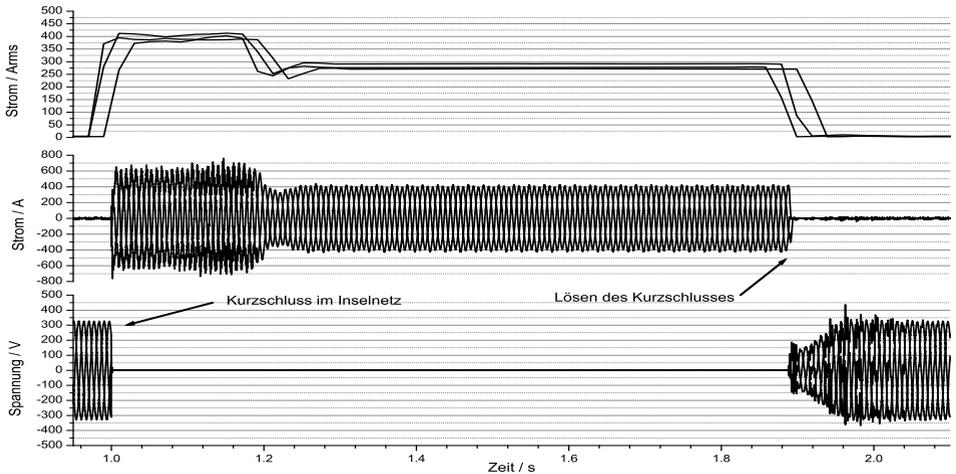


Abbildung 17: Klemmennaher Kurzschluss im Teilnetz bei Netzersatzbetrieb

5.3 Testphase

Im Herbst 2008 wird eine einjährige Testphase im Industrienetz der Firma Hübner gestartet. Auf dem Dach der Industriehalle (siehe Abbildung 18) ist eine 100 kW_p PV-Anlage installiert, deren Ertrag bisher mit einem Sunny Central eingespeist wird. Nach erfolgten Installationsarbeiten zur Integration des multifunktionalen PV-Stromrichter Konzepts in das vorhandene Industrienetz wird der Multi-PV den Einspeisebetrieb übernehmen. Die dabei verwendeten Zusatzfunktionen werden in Tabelle 4 dargestellt.



Abbildung 18: Industriebetrieb zum Test des Multi-PV Prototypen mit einer 100 kW_p-PV-Anlage

Tabelle 4: Vorgesehene Betriebsarten während der einjährigen Testphase

Testphase 1 (mit Entkopplungsinduktivität)	Testphase 2 (ohne Entkopplungsinduktivität)
PV-Einspeisung	PV-Einspeisung
Spitzenlastmanagement	Spitzenlastmanagement
USV-Funktionalität	NEA-Funktionalität
Lokale PQ-Verbesserung	Blindleistungseinspeisung

6 Ausblick

Die bisherigen Testergebnisse zeigen das PV-Stromrichter multifunktional einsetzbar sind. Mit Hilfe eines Labormusters wurde gezeigt, dass insbesondere eine lokale Spannungsqualitätsverbesserung möglich ist. Außerdem wurde die Eigenschaft einer USV-Bereitstellung durch PV-Stromrichter untersucht. Abschließend wurde auf die vorgesehenen Zusatzfunktionen für den Testbetrieb des Projektes Multi-PV eingegangen.

In der geplanten einjährigen Testphase in einem Industrienetz sollen die Laborergebnisse bestätigt, und weitere Erfahrungen aus dem realen Betrieb gesammelt werden. Ein nächster Schritt könnte die Skalierung dieser Zusatzfunktionen auf Stromrichter mit höheren Leistungen sein.



7 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) für die Förderung des FuE-Verbund-Projekts „Multifunktionale Photovoltaik-Stromrichter - Optimierung von Industrienetzen und öffentlichen Netzen“ (Förderkennzeichen 0329943). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

8 Literatur

- /BRAUN 2007/ M. Braun: „Reactive Power Supplied by PV-Inverters - Cost-Benefit-Analysis“, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, Italy, 3-7 September 2007
- /BRAUN 2008/ M. Braun, T. Stetz: Multifunctional Photovoltaic Inverters - Economic Potential of Grid-Connected Multifunctional PV-Battery-Systems in Industrial Environments, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spanien, 1.-4. September 2008
- /EPRI/ Electric Power Research Institute: Power Quality Applications Guide for Architects and Engineers
- /GEIBEL 2007/ D. Geibel et al.: Simulation model based control development approach for a multifunctional PV-inverter, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Dänemark, September 2007
- /HECK 2004/ T. Heck: Beschreibung der Elektroenergiequalität an der Schnittstelle zwischen Elektroenergieversorgungsnetz und Elektroenergieabnehmer, Dissertation an der TU Ilmenau, 2004
- /JAHN 2007/ J. Jahn: Energiekonditionierung in Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Integration verteilter Energieerzeuger in schwachen Netzausläufern, Dissertation, Universität Kassel, ISBN 978-3-89958-377-9
- /MULTI-PV/ Multi-PV Konsortium: <http://www.multi-pv.de>
- /NORM1/ Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, Deutsche Fassung EN 50160:2007, Beuth Verlag
- /NORM2/ Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen, EN 61000-2-2:2002



/NORM3/

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-4: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen, EN 61000-2-4:2002

/REEKERS 2006/

J. Reekers et al.: Multifunktionale Photovoltaik-Wechselrichter - Optimierung von Industrienetzen und öffentlichen Netzen, Kasseler Symposium Energieversorgungstechnik 2006, Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V., 2006

/STETZ 2008/

T. Stetz: Optimiertes Spitzenlastmanagement für multifunktionale Photovoltaik-Wechselrichter, Diplomarbeit durchgeführt am ISET, Hochschule Darmstadt, März 2008