

Photovoltaik-Inverter in Dreipunktwechselrichter-Technologie

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Nuß

Fakultät Elektrotechnik
und Informationstechnik (E+I)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel. 0781 205-309
E-Mail: uwe.nuss@hs-offenburg.de



1960: Geboren am 13.06. in Pforzheim
1980–1985: Studium der Elektrotechnik an der Universität Karlsruhe (TH)
1985–1994: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe, 1989 Promotion, 1994 Habilitation
1994–2003: Industrietätigkeit bei der Struckmeier GmbH (ab 2001: Wittur GmbH), ab 1995 stellvertretender Entwicklungsleiter
Seit 2003: Professor für elektrische Antriebstechnik, Leistungselektronik, Regelungstechnik sowie Grundlagenfächer an der Hochschule Offenburg
Seit 2006: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Offenburg
Seit März 2011: Dekan der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

1.7 Photovoltaik-Inverter in Dreipunktwechselrichter-Technologie

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Nuß

Abstract

In this paper a photovoltaic (PV) inverter is described which is built-up using a neutral point clamped three level technology. The inverter was developed in co-operation with a PV-inverter manufacturer and a semiconductor manufacturer. The main focus of the project was to investigate the applicability of special semiconductor power modules for three level inverters as well as the development of control concepts, including fault-ride-through questions, for that inverter type.

Einleitung

In den letzten Jahren ist die Photovoltaik, beflügelt durch das Erneuerbare Energiengesetz – zumindest so lang es noch eine hinreichend lukrative Einspeisevergütung gab –, zu einem immer bedeutenderen Applikationsfeld der Leistungselektronik geworden. Im Fokus des Interesses steht dabei der Photovoltaik-Wechselrichter, der den in den Solarmodulen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom oder Drehstrom umwandelt und ins Netz einspeist.

Standardmäßig wird für einen dreiphasigen Photovoltaik-Wechselrichter eine Drehstrombrückenschaltung gewählt (Zweipunktwechselrichter) [1, 2]. Sie kommt mit der kleinst möglichen Anzahl von Leistungstransistoren und Leistungsdioden zur Erzeugung einer nahezu sinusförmigen Stromkurvenform aus und schien damit lange Zeit die kostengünstigste Schaltungsvariante zu sein.

Alternativ dazu kann im Leistungsteil auch eine erweiterte Drehstrombrückenschaltung eingesetzt werden [1 – 4].

Diese im Prinzip schon seit über 30 Jahren bekannte Schaltungsart (vgl. [4]), die zumindest beim Einsatz im Niederspannungsnetz mehr als doppelt so viele Leistungshalbleiterbauelemente wie der Zweipunktwechselrichter umfasst, wird in jüngster Zeit auch für den industriellen Einsatz zunehmend interessanter, weil inzwischen Leistungshalbleiterbauelemente auf dem Markt angeboten werden, mit denen sich Dreipunktwechselrichter einfach und relativ kostengünstig aufbauen lassen. Denn der Vorteil eines Dreipunktwechselrichters besteht darin, dass pro Phase drei anstatt nur zwei Spannungsstufen am Ausgang des Wechselrichters zur Verfügung stehen. Damit wird bei gleicher Schaltfrequenz und gleicher Auslegung der Netzankopplung (Netzfilter) des Photovoltaik-

Wechselrichters die Netzstromwelligkeit deutlich reduziert.

Alternativ lässt sich bei gleicher Stromwelligkeit und Schaltfrequenz das Netzfilter wesentlich kleiner auslegen, was zu einer deutlichen Ersparnis im Anschaffungspreis und im Platzbedarf der Photovoltaikanlage führt. Auch können beim Dreipunktwechselrichter bei Anwendungen im Niederspannungsbereich Leistungshalbleiterbauelemente mit deutlich geringerer Sperrspannungsfähigkeit als solche beim Zweipunktwechselrichter eingesetzt werden. Dadurch ergeben sich geringere Schaltverluste und ein geringerer Preis pro Leistungstransistor.

Kooperationsprojekt mit Industriepartnern

In einem öffentlich geförderten Kooperationsprojekt, das Mitarbeiter des Labors für elektrische Antriebe und Leis-

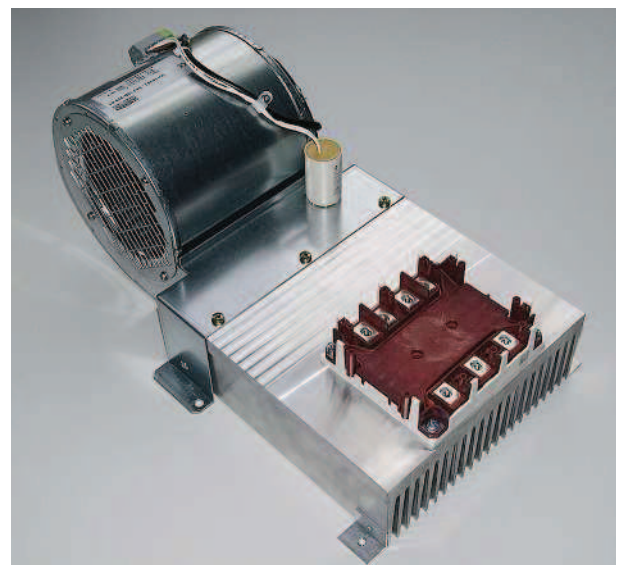


Abb. 1.7-1: Phasenbaustein des Dreipunktwechselrichters mit Leistungshalbleitermodul, Kühlkörper und Lüfter (ohne Ansteuerung)

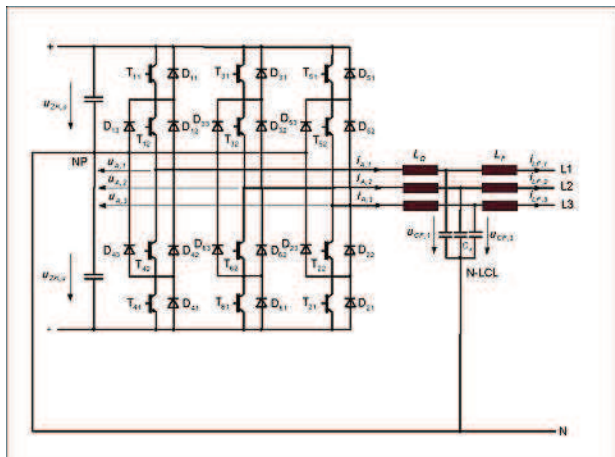


Abb. 1.7-2: Prinzipschaltbild der zugrundeliegenden Photovoltaikwechselrichteranordnung in Dreipunkttechnologie

tungselektronik gemeinsam mit einem mittelständischen Photovoltaik-Wechselrichter-Hersteller durchgeführt haben und wofür ein bekannter Hersteller von Leistungshalbleiterbauelementen Leistungstransistormodule für maximale Ausgangsströme von 250 A kostenlos zur Verfügung gestellt hat, wird die Eignung der bereitgestellten Bauelemente für den Einsatz in einem Dreipunktwechselrichter untersucht. Die Abbildung 1.7-1 zeigt ein derartiges Leistungshalbleitermodul für eine Phase, montiert auf einem lüfterbestückten Kühlkörper.

Das für die Untersuchungen gewählte Schaltungskonzept ist in Abbildung 1.7-2 dargestellt.

Der Dreipunktwechselrichter ist über ein dreiphasiges LCL-Filter mit dem Drehstromnetz verbunden. Die wechselrichterseitigen Induktivitäten des LCL-Filters begrenzen hierbei die Änderungsgeschwindigkeit der Wechselrichterausgangsströme und somit deren Welligkeit. Die Kondensatoren im LCL-Filter sind für die verbleibenden Oberschwingungen der Wechselrichterausgangsströme eine sehr niederohmige Reaktanz, wodurch das Eindringen dieser Oberschwingungen ins Netz erschwert wird. Um diese Erschwernis noch zu erhöhen und um zugleich zu vermeiden, dass Oberschwingungen, die in den Netzspannungen bereits enthalten sind, über die Kondensatoren des LCL-Filters abfließen und demzufolge das LCL-Filter überlasten könnten, enthält das LCL-Filter noch die netzseitigen Induktivitäten. Der Sternpunkt des LCL-Filters ist sowohl mit dem Neutralpunkt NP des Wechselrichters als auch mit

dem Sternpunkt des Netzes verbunden. Das hat zum einen den Vorteil, dass bei Bedarf auch Ströme mit gleichphasigen Anteilen zwischen dem Wechselrichter und dem Netz ausgetauscht werden können. Zum anderen werden dadurch Potentialsprünge am Solargenerator bzw. am Zwischenkreis des Wechselrichters vermieden und dadurch unerwünschte Umladeströme der parasitären Kapazitäten des Solargenerators gegen Erde unterbunden.

Die netzseitigen Ausgangsströme des Dreipunktwechselrichters werden in Abbildung 1.7-2 mit $i_{A,1}$, $i_{A,2}$ und $i_{A,3}$ sowie die Wechselrichterausgangsspannungen – bezogen auf den Punkt NP – mit $u_{A,1}$, $u_{A,2}$ und $u_{A,3}$ bezeichnet. Die Spannung an den oberen Zwischenkreiskondensatoren wird $u_{ZK,o}$ und diejenige an den unteren Zwischenkreiskondensatoren wird $u_{ZK,u}$ genannt. Die Gesamtzwischenkreisspannung u_{ZK} setzt sich aus der Summe der beiden Teilspannungen zusammen. Die Spannungen an den LCL-Filterkondensatoren werden dagegen mit $u_{CF,1}$, $u_{CF,2}$ und $u_{CF,3}$ bezeichnet.

Neben der Untersuchung der Eignung der verwendeten Leistungshalbleitermodule war ein weiteres Anliegen des Kooperationsprojekts die Entwicklung einer zweckmäßigen Strategie, die es erlaubt, den Dreipunktwechselrichter auch dann am Netz zu betreiben, wenn Netzfehler auftreten. Der Hintergrund dieses Wunschs ist die zunehmende Forderung der Elektrizitätsversorger, alle leistungsstarken Einspeiseeinrichtungen an der Netzstabilisierung zu beteiligen. Gerade aufgrund der steigenden dezentralen Energieeinspeisung durch Winde-

nergieanlagen und Photovoltaikkraftwerke ist hier dringender Handlungsbedarf geboten. Während bei Windenergieanlagen diese Forderung schon seit einiger Zeit in entsprechenden Richtlinien fixiert ist, befindet sich die Photovoltaikbranche in dieser Hinsicht gerade im Umbruch. Hier ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf noch beträchtlich.

Prinzipielle Funktionsweise eines Dreipunktwechselrichters

Kennzeichnend für den zugrunde gelegten, in Abbildung 1.7-2 schematisch dargestellten Dreipunktwechselrichter, ist neben der üblichen Reihenschaltung von jeweils zwei Leistungstransistoren und -dioden, dass der Mittenabgriff zwischen den in Reihe geschalteten Leistungshalbleiterbauelementen über sogenannte Klemm-Dioden zu dem Mittenabgriff NP der Zwischenkreiskondensatoren geführt wird. Bei entsprechenden Schaltzuständen der Leistungstransistoren wird das Potenzial des Punkts NP über Dioden auf die Ausgangsklemmen geführt (clamped), weshalb die gezeigte Schaltungstopologie auch als NPC-Dreipunktwechselrichter (neutral point clamped three level inverter) bezeichnet wird. Es können drei Ausgangsspannungswerte pro Phase ($u_{ZK,o}$, 0, $-u_{ZK,u}$) erzeugt und durch geschickte Auswahl und Dauer der jeweiligen Schaltzustände die Ausgangsströme gezielt beeinflusst werden.

Ansteuerung der Dreipunktwechselrichtertransistoren, Pulsweitenmodulation und netzspannungsorientierte Stromregelung

Um die Leistungstransistoren des Dreipunktwechselrichters so anzusteuern, dass am Wechselrichterausgang Spannungen erzeugt werden, die innerhalb eines jeden Schaltintervalls mit vorgegebenen, üblicherweise vom Stromregler bereitgestellten Steuerspannungen übereinstimmen, wurde während der Projektlaufzeit ein Konzept erstellt und umgesetzt, das sowohl die einzelnen Leistungstransistoren vor Zerstörung (insbesondere durch Überspannungen und Überstrom) schützt, als auch für die korrekte Umsetzung der vorgegebenen Steuerspannungen mithilfe von Pulsweitenmodulatoren sorgt. Die dabei entwickelte Hardware wurde so aufgebaut, dass damit der Dreipunktwechselrichter in Verbindung mit einer hochschulseitig

vorher bereits vorhandenen Reglerkarte betrieben werden konnte. Auf dieser Grundlage wurde anschließend eine Stromregelung entworfen und implementiert, mit deren Hilfe in jeder Phase gezielt vorgegebene Ströme ins Netz eingepreßt werden können. Dabei war eine besondere Herausforderung, dass die Stromregelung in einem rotierenden Koordinatensystem erfolgen sollte, obwohl damit zu rechnen ist, unsymmetrische Ströme sowie Ströme mit gleichphasigen Anteilen ins Netz einzuspeisen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass für Regelungszwecke die gleichen Grundelemente verwendet werden können wie bei der Regelung von Gleichgrößen, obwohl die zu regelnden Signale 50 Hz-Wechselgrößen sind. Das hierbei eingesetzte Verfahren der virtuellen Komplementärphasen wurde vom Autor entwickelt [5] und zunächst nur mithilfe von Simulationsstudien verifiziert. Im beschriebenen Kooperationsprojekt bot sich nun die Möglichkeit, dieses Verfahren in einem Feldtest zu erproben.

Beim Verfahren der virtuellen Komplementärphasen werden die drei Strangströme weitgehend unabhängig voneinander geregelt. Um dennoch die Vorteile einer Regelung ausnutzen zu können, die in einem rotierenden Koordinatensystem arbeitet, wird jeder in das rotierende Koordinatensystem zu transformierende Stranggröße (indiziert mit α) eine sogenannte virtuelle Komplementärphasengröße (indiziert mit β) zugeordnet. Im stationären Zustand eilt sie der ursprünglichen Phasengröße bei gleicher Amplitude um 90° nach. Dadurch werden vergleichbare Größen wie bei Drehstrommaschinen in einem feststehenden orthogonalen α - β -Koordinatensystem erzeugt. Sie werden nun in ein rotierendes d-q-Koordinatensystem transformiert und dort geregelt.

Zur Erzeugung der um jeweils 90° verschobenen Wechselrichter Ausgangsströme enthält jede Phase ein virtuelles Komplementärphasenmodell, in dem dieselben Differentialgleichungen als Rechenalgorithmus nachgebildet werden, die auch die reale Regelstrecke, d. h. das LCL-Filter, beschreiben. Diese Komplementärmodelle werden mit den im Stromregler durch Rücktransformation aus den rotierenden Koordinatensystemen gewonnenen Stellgrößen $u_{St,i,\beta}$ sowie mit den komplementären Filter-

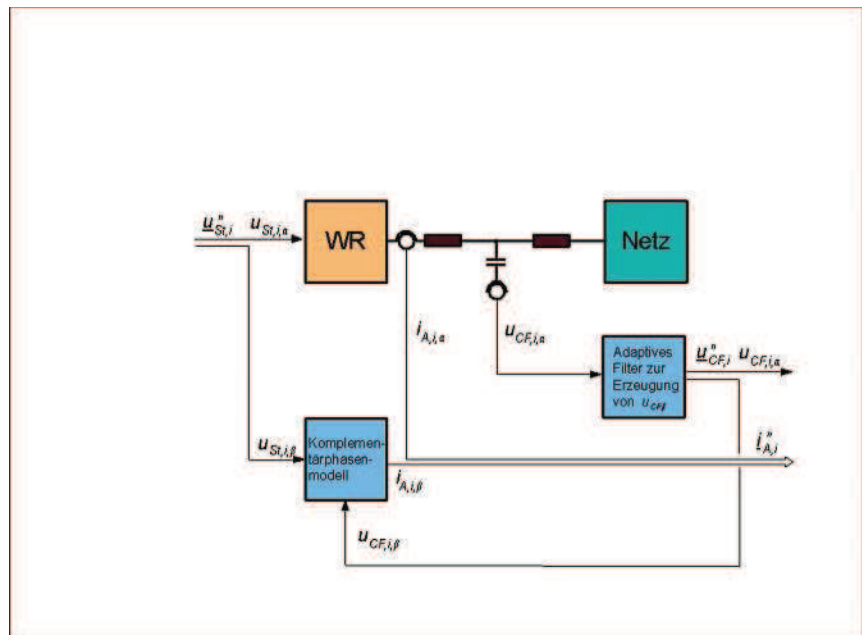


Abb. 1.7-3: Blockschaltbild der Funktionseinheiten zur Erzeugung der komplementären Ausgangsströme

spannungen $u_{CF,i,\beta}$ gespeist ($i=1, 2, 3$). Zur Veranschaulichung dieser Vorgehensweise zeigt die Abbildung 1.7-3 das Blockschaltbild der an der Erzeugung der Komplementärgrößen beteiligten Funktionseinheiten. Zur einfacheren Darstellung sind darin die α - und β -Komponenten der jeweiligen Größen als Raumvektor zusammengefasst. Mithilfe der um 90° gegenüber den Eingangsgrößen verschobenen Ausgangsgrößen des Komplementärphasenmodells kann nun, wie bereits erwähnt, ähnlich wie bei Drehstromantrieben eine Transformation der sinusähnlichen Größen in ein rotierendes Bezugssystem durchgeführt werden. Die Orientierungsgrößen, die die Lage des rotierenden Koordinatensystems festlegen, basieren zweckmäßigerweise auf Spannungsraumzeigern. Anhand derartiger Spannungsraumzeiger können die Wechselrichter Ausgangsstromraumzeiger in Anteile aufgespalten werden, die parallel zum jeweiligen Spannungsraumzeiger liegen, und in Anteile, die senkrecht darauf stehen [5, 6]. Als Orientierungsgrößen kommen hierbei die α - und β -Komponenten der Anschlusspunktspannungsraumzeiger $\underline{u}_{PCC,i}$ ($i = 1, \dots, 3$) oder der Filterkondensatorspannungsraumzeiger $\underline{u}_{CF,i}$ in Frage. Im Projekt wurden beide Varianten getestet. Nennenswerte Unterschiede konnten nicht festgestellt werden. Ein Überblick über die netzsynchrone, phasenbezo-

gene Ausgangsstromregelungsstruktur zeigt die Abbildung 1.7-4. Darin werden als Orientierungsgrößen die Anschlusspunktspannungen $u_{PCC,1}$, $u_{PCC,2}$ und $u_{PCC,3}$ herangezogen. Die in jeder Phase auftretenden Ausgangsstromregler sind als Zustandsregler konfiguriert. Ihre Struktur und Parametrierung ist in [5] ausführlich beschrieben.

Die Abbildung 1.7-5 zeigt schließlich beispielhaft einen typischen Stromverlauf in der Phase 1, wie er im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik mit den dort vorhandenen Möglichkeiten in Bezug auf die Netzeinspeisung erzielt werden konnte. Vorgegeben wurde hierbei ein Wirkstrom mit einer Amplitude von 20 A. Der tatsächlich sich einstellende Phasenstrom ist in Abbildung 1.7-5 gelb markiert. Die Netzanschlusspunktspannung ist blau dargestellt. Aufgrund der rechteckpulsförmigen Ausgangsspannungen des Wechselrichters sowie wegen Oberschwingungen in den Netzspannungen selbst und aufgrund von Totzeiteffekten weichen die Netzströme noch merklich von der Sinusform ab. Eine geplante Verdoppelung der Abtastfrequenz der Stromsignale sowie die Ausschöpfung weiterer Optimierungspotenziale könnte hier noch eine Verbesserung ergeben. Der Betrieb der Leistungshalbleitermodule mit ihren Nenndaten ist im Labor des Kooperationspartners geplant. Die

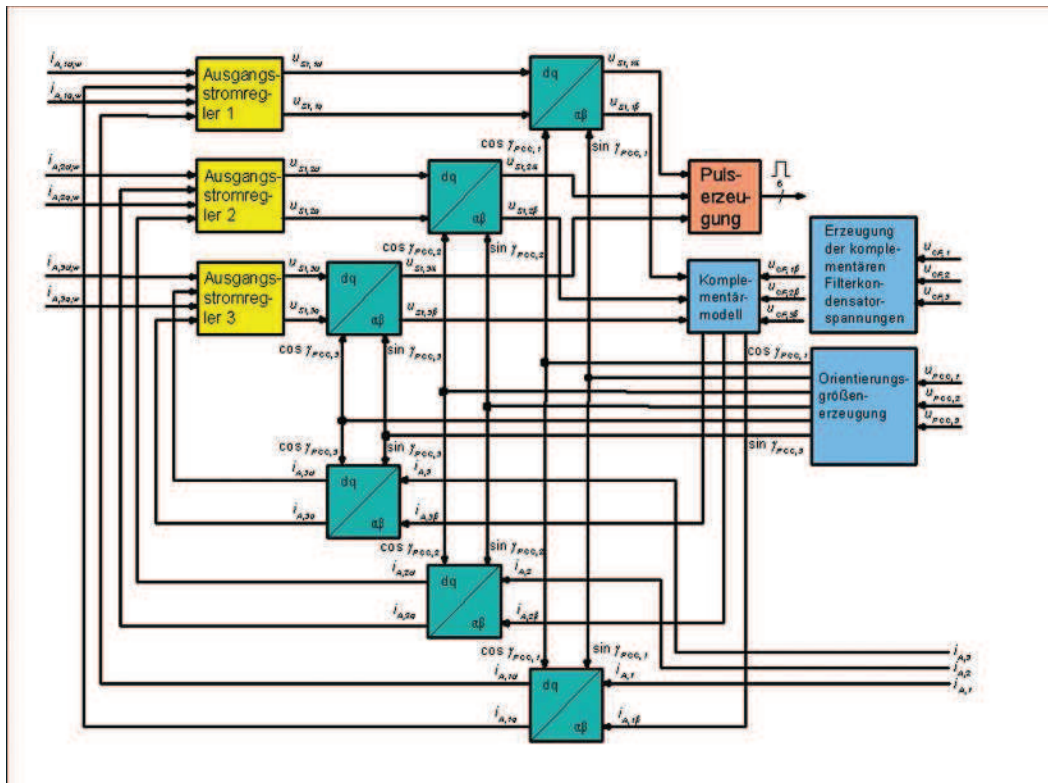


Abb. 1.7-4: Blockschaltbild der netzsynchronen, phasenbezogenen Ausgangsstromregelung eines Dreipunktnetzwechselrichters mit LCL-Filterankopplung an das Netz

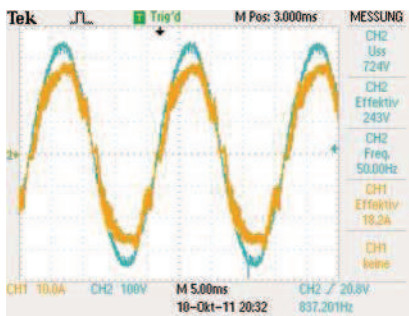


Abb. 1.7-5: Typischer Zeitverlauf des Ausgangsstroms der Phase 1 des Dreipunktwechselrichters (gelbe Kurve) sowie der zugehörigen Anschlusspunktspannung (blaue Kurve)

Funktionsfähigkeit des Konzepts der virtuellen Komplementärphasen konnte mit dem vorhandenen Labormodell aber bereits bestätigt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im beschriebenen Kooperationsprojekt konnten bisher die Ansteuerung des Dreipunktwechselrichters sowie die netzspannungsorientierte Ausgangsstromregelung implementiert werden. Die Integration weiterer Regelkreise wie des Zwischenkreisspannungsregelkreises konnte noch nicht abgeschlossen werden. Auch stehen Untersuchungen zum Verhalten des Systems bei symmetrischen und unsymmetrischen Netzfehlern noch aus. Schließlich ist das Verhalten des im Labor aufgebauten Wechselrichters noch für höhere Ausgangsströme zu testen.

Das beschriebene Projekt wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert. Der Autor dankt der AiF für die gewährte finanzielle Unterstützung.

Referenzen/References

- [1] Schröder, D.: Leistungselektronische Schaltungen. 2. Auflage. ISBN 978-3-540-69300-0. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [2] Specovius, J.: Grundkurs Leistungselektronik, 4. Auflage. ISBN 978-3-8348-1307-7. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2010
- [3] Kouro, S.; Malinowski, M.; Gopakumar, K.; Pou, J.; Franquelo, L.; Wu, B.; Rodriguez, J.; Pérez, M.; Leon, J.: Recent Advances and Industrial Ap-

plications of Multilevel Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (2010), S. 2553 – 2580

- [4] Nabae, A.; Takahashi, I.; Akagi, H.: A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications 17 (1981), S. 518 – 523
- [5] Nuß, U.: Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe. ISBN 978-3-8007-3218-0. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag 2010
- [6] Nuß, U.: Feedback Control Systems for Power Electronics. Tagungsband OTTI-Seminar Power Electronics for Photovoltaics, S. 291 – 328, München, 06./07.06.11