

Leistungselektronik für Solargeneratoren

Grundlagen und Markttrends

Mit der steigenden Nachfrage nach Windenergie- und Photovoltaikanlagen wächst auch der Bedarf an leistungselektronischen Komponenten wie Wechselrichtern und Frequenzumrichtern. Der Beitrag befasst sich zunächst mit den wichtigsten Halbleitern und ihrem Aufbau zu funktionsfähigen Schaltungen. Dann werden beispielhaft einige aktuelle Produkte in ihren Einsatzgebieten vorgestellt.

1 Leistungselektronische Bauelemente

Die Bezeichnung Elektronik steht einmal für elektrische Schaltkreise und -elemente sowie für Funktionen, die der Signal- und Datenverarbeitung dienen, beispielsweise in PC, Haushalts- und Fernsehgeräten. Die Dimensionen der Bauteile und die elektrische Leistung sind dabei relativ gering, weshalb sich für diesen Bereich der Begriff Mikroelektronik durchgesetzt hat. Im Gegensatz dazu steht der Bereich der Leistungselektronik, in dem mit Schaltungen und Bauteilen hoher Leistung elektrische Ströme und Spannungen umgeformt, gesteuert oder geschaltet werden.

Zu den wichtigsten Bauteilen einer leistungselektronischen Schaltung gehören Dioden, Thyristoren, bipolare Transistoren und Feldeffekt-Transistoren. Die Bezeichnungen stehen oft als Oberbegriffe für eine ausgedehnte Reihe von elektronischen Schaltelementen. Neben diesen „elektrischen Ventilen“ zählen zu einem Schaltkreis aber auch Induktivitäten wie Drosseln und Ausgangsfilter. Sie sind beispielsweise in jedem Wechselrichter zu finden.

1.1 Dioden

Eine Diode besteht aus einem dotierten Halbleiterkristall. Je nach Polung der Betriebsspannung ist sie leitend oder nicht leitend; sie lässt den Strom also nur in einer Richtung passieren, während sie ihn in der entgegengesetzten Richtung sperrt. Diese Eigenschaft macht die Diode zu einem Bauelement, das Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln kann. Wichtige Aussagen zu ihren elektrischen Werten liefert die Diodenkennlinie (Bild 1), die sich dem Datenblatt des Herstellers entnehmen lässt. Da ihre Schaltfunktion nicht gesteuert werden kann, wird sie auch als „ungesteuerter Gleichrichter“ bezeichnet.

1.2 Thyristoren

Ein Thyristor hat mindestens drei pn-Übergänge (Bild 2) und – im Gegensatz zur Diode – einen Steuereingang (Gate). Er wird deshalb auch als „steuerbarer Gleichrichter“ bezeichnet. Im Grundzustand ist er sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung gesperrt.

In Durchlassrichtung leitend wird er dann, wenn das Gate einen Strom- beziehungsweise einen Zündimpuls erhält. In Sperrrichtung sperrt der Thyristor den Strom wie eine normale Diode. Ist er einmal durchgeschaltet, bleibt der Stromfluss auch dann noch erhalten, wenn am Steueranschluss keine Spannung mehr anliegt. Der Stromfluss kann nur durch eine entsprechende Absenkung beziehungsweise Umpolung der über den Lastanschlüssen anliegenden Spannung unterbrochen werden. Dann kommt der Laststrom von selbst zum Erliegen, der Thyristor sperrt wieder und kann nur durch einen neuen Zündimpuls erneut durchgeschaltet werden. Der Thyristor wirkt damit wie ein Schalter.

Thyristoren waren lange Zeit die wichtigsten steuerbaren Bauelemente der Leistungselektronik, bis Leistungstransistoren ihre Bedeutung etwas zurückdrängten. Zu finden sind sie heute fast nur noch in Stromrichtern hoher Leistung. Thyristoren gibt es für Spannungen bis etwa 5 kV und für Ströme bis etwa 3 kA. Ihre Schaltfrequenz liegt meist unter 1 kHz. Die Bezeichnung Thyristor ist der Oberbegriff für mehrere Arten dieser Halbleiterelemente. Aus dieser Kategorie wäre unter anderen noch der Triac zu nennen, der vom Prinzip her eine Antiparallelschaltung zweier Thyristoren darstellt. Damit wird es möglich, beide Halbwellen einer Wechselspannung zu steuern. Mögliche Anwendungen sind Licht- und Drehzahlsteuerungen.

1.3 Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)

GTO sind Vierschicht-Halbleiterbauelemente mit unsymmetrischer Dotierung. Diese Gatestruktur erlaubt es, den Thyristor durch einen negativen Gateimpuls aus dem leitenden wieder in den sperrenden Zustand zurückzusetzen. Dazu ist allerdings ein Abschaltstrom notwendig, der bis zu 30 % des Laststroms beträgt. Die Anwendung von GTO-Thyristoren ist kompliziert und bleibt deshalb gewöhnlich auf größere Leistungen beschränkt. Zu finden sind GTO beispielsweise in den Umrichteranlagen des ICE.

1.4 Bipolare Transistoren

Bipolare Transistoren haben eine npn- (Bild 2) oder pnp-Schichtenfolge und sind meis-

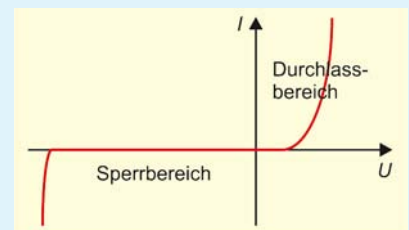
tens aus Silizium gefertigt. Die mittlere Schicht ist sehr dünn im Vergleich zu den beiden anderen. Bipolare Transistoren werden in der Leistungselektronik praktisch immer im Schaltbetrieb eingesetzt, das heißt, sie sind entweder ganz durchgeschaltet oder gesperrt. Ein „linearer Betrieb“ kommt allenfalls bei sehr kleinen Leistungen in Frage. Sie benötigen eine relativ hohe Ansteuerleistung, denn während der gesamten „Leitdauer“ muss ein Basisstrom geliefert werden, der beachtlich ist. Dieser Nachteil lässt sich durch den Einsatz von MOSFET und IGBT, die dieses Problem nicht kennen, umgehen.

1.5 Metalloxyde Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

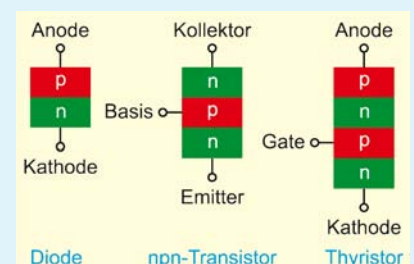
Der MOSFET besteht aus einem p-leitenden Kristall, dem Substrat, in das zwei n-leitende Inseln eindotiert sind. Der Kristall ist mit Siliziumdioxid (SiO_2) als Isolierschicht abgedeckt, wobei die n-leitenden Inseln jedoch frei bleiben und mit nach außen geführten Kontakten versehen sind. Auf dem Siliziumdioxid ist eine Aluminiumschicht als Gate-Elektrode aufgedampft. Der MOSFET wird nicht durch einen Strom an der Basis, sondern durch eine Spannung am Gate angesteuert, praktisch leistungslos. Er ist sehr schnell; es sind Schaltfrequenzen bis 1 MHz möglich. MOSFET für große Spannungen haben verhältnismäßig große Durchlasswiderstände (Verluste!). Sie werden deshalb vorzugsweise bei kleineren Spannungen (<400 V) und hohen Schaltfrequenzen eingesetzt.

1.6 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Der IGBT hat eine isolierte Gateelektrode und vereint in sich die Vorteile des Bipolartransis-



1 Schematische Darstellung der Diodenkennlinie



2 Schichtfolgen bei Diode, npn-Transistor und Thyristor

tors (gutes Durchlassverhalten, hohe Sperrspannung) mit denen eines Feldeffekttransistors (fast leistungslose Ansteuerung). IGBT werden insbesondere bei großen Leistungen mit nicht allzu großen Schaltfrequenzen eingesetzt (3 bis 100 kHz). Sie haben in der Antriebstechnik in den letzten Jahren eine große Verbreitung gefunden. Wechselrichter zum Betrieb von Asynchron- und Synchronmaschinen im Leistungsbereich von wenigen 100 W bis in den MW-Bereich werden heute fast ausschließlich mit IGBT realisiert.

1.7 Induktivitäten

Induktivitäten werden in leistungselektronischen Schaltungen in vielfältiger Weise eingesetzt, beispielsweise als Drosseln für Hochsetzsteller und Ausgangsfilter. In einem solchen Anwendungsfall speichern sie mit jedem Schaltzyklus Energie und geben sie in den Schaltphasen wieder ab, dienen also als Energiespeicher. Sie werden deshalb auch als Speicherdrosseln bezeichnet. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass der Energiespeichereffekt eine regelmäßige Stromänderung in der Drossel voraussetzt. Diese Stromwelligkeit wird als Stromripple bezeichnet und üblicherweise als Spitze-Spitze-Wert angegeben, oft auch in Prozent zu einem Gleichstrom in der Drossel. Der Stromripple erzeugt Verluste und macht die Speicherdrosseln besonders kritisch bezüglich der entstehenden Verlustleistung und damit des Wirkungsgrads der Schaltung.

2 Grundsaltungen mit Transistoren und Dioden

Die folgenden Absätze beschäftigen sich mit der grundsätzlichen Funktionsweise einfacher Schaltungen, die sich mithilfe von Leistungstransistoren und -dioden aufbauen lassen.

2.1 Gleichstromsteller

Ein Gleichstromsteller (DC/DC-Converter) ist eine Schaltung, die an ihrem Ausgang eine variable Gleichspannung zur Verfügung stellt, mit der sich dann elektrische Geräte betreiben lassen. Er besteht im Prinzip aus einem elektronischen Schalter (meist ein IGBT), einer Spule und einer Diode. Am Ausgang liegt kein reiner Gleichstrom vor, da ein Gleichstromsteller den Eingangsstrom ständig ein- und wieder ausschaltet. Gleichstromsteller

lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Tiefsetzsteller und Hochsetzsteller. Eine Kombination aus beiden führt zum Vierquadrantensteller.

Tiefsetzsteller. Die einfachste Gleichstromstellerschaltung ist der Tiefsetzsteller (Buck-Converter, Bild ③). Wie der Name schon andeutet, ist dabei das Potential am Ausgang niedriger als das am Eingang. Der Mittelwert der Ausgangsspannung wird durch Pulsbetrieb (periodisches Ein- und Ausschalten) des Transistors erreicht.

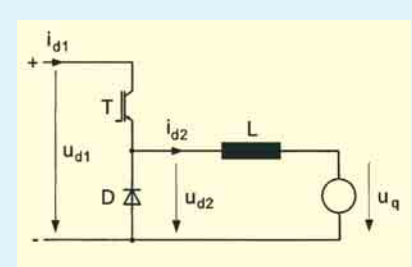
Hochsetzsteller. Während beim Tiefsetzsteller der Leistungsfluss vom höheren Eingangszum niedrigeren Ausgangspotential gerichtet ist, nimmt er beim Hochsetzsteller (Boost-Converter, Bild ④) genau den entgegengesetzten Weg. Auch hier wird der gewünschte Mittelwert der Ausgangsspannung durch periodisches Ein- und Ausschalten des Transistors eingestellt. Die Umkehrung des Leistungsflusses wird durch eine geänderte Anordnung der Diode und des Transistors bewirkt.

Vierquadrantengleichstromsteller. Prinzipbedingt kann bei einem Gleichstromsteller der Strom nur in eine Richtung fließen. Kombiniert man nun einen Tief- mit einem Hochsetzsteller, erhält man einen Zweiquadrantensteller, bei dem nicht nur Strom von der Quelle zum Verbraucher, sondern in Gegenrichtung auch vom Verbraucher zurück zur Quelle fließen kann. Diese Kombination lässt sich so erweitern, dass ein Vierquadrantensteller entsteht. Er nennt sich so, weil mit ihm ein Betrieb in allen vier Quadranten der Ausgangsstrom-/Ausgangsspannungs-Kennlinie möglich ist.

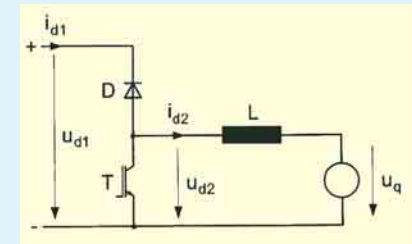
2.2 Wechselrichter

Unter einem Wechselrichter ist eine Schaltungsanordnung zu verstehen, die einen Gleichspannungskreis mit einem Wechselbeziehungsweise Drehstromkreis koppelt und bei der ein Leistungsfluss von der Gleich- zur Wechselspannungsseite möglich ist. Je nach Betriebsart unterscheidet man zwischen Wechselrichtern in Wechselstrombrücken- und solchen in Drehstrombrückenschaltung.

Wird beispielsweise der Vierquadrantengleichstromsteller ausgangsseitig an ein Wechselspannungsnetz angeschlossen, funktioniert er als Wechselrichter; man spricht dann von einem Wechselrichter in Wechselstrombrückenschaltung. Ein typischer Anwendungsfall für eine solche Wechselrichterschaltung wäre die Ankopplung eines Solargenerators an das lokale Netz, wobei der Schaltungsauf-



③ Prinzipschaltbild eines Tiefsetzstellers



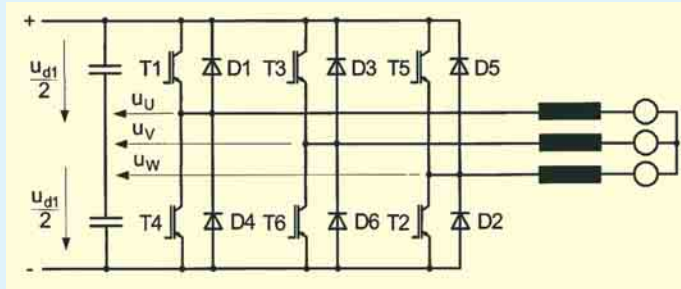
④ Prinzipschaltbild eines Hochsetzstellers

bau dann allerdings noch um einen Hochsetzsteller ergänzt werden würde.

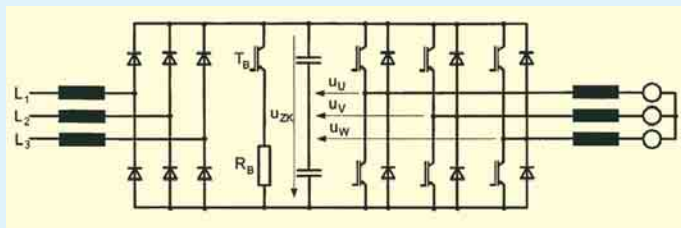
Erweitert man nun die Wechselrichterschaltung um ein Brückenweigpaar, erhält man einen Wechselrichter in Drehstrombrückenschaltung (Bild ⑤). Die Ausgangsspannungen u_u , u_v und u_w beziehen sich auf einen virtuellen Punkt zwischen dem oberen und dem unteren Kondensator an der Gleichspannungseinspeisung.

2.3 Frequenzumrichter

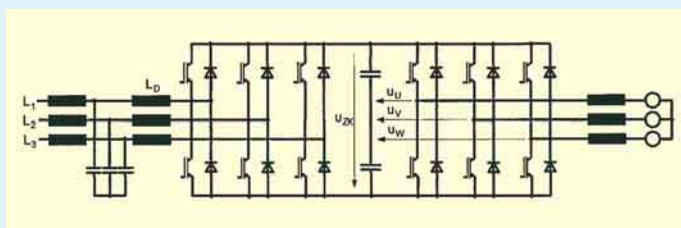
Das öffentliche Drehspannungsnetz hat in der Regel eine annähernd konstante Spannung und eine Frequenz von ziemlich genau 50 Hz. Es gibt aber zahlreiche Anwendungen, bei denen eine Drehspannung mit variabler Amplitude und variabler Frequenz benötigt wird. In solchen Fällen helfen Frequenzumrichter weiter. Beim einfachen Standardfrequenzumrichter ist wegen der ausschließlichen Verwendung von Dioden in der Einspeiseschaltung, dem Eingangsstromrichter, ein Leistungsfluss nur vom Netz zur Ausgangsseite möglich (Bild ⑥). Der Eingangsstromrichter ist über einen so genannten Zwischenkreis mit dem Ausgangsstromrichter verbunden. Energie, die möglicherweise vom Ausgang in den Zwischenkreis zurückgespeist wird, muss als Wärme abgeführt werden.



⑤ Prinzip-schaltbild eines Wechselrichters in Drehstrombrückenschaltung



⑥ Prinzip-schaltbild eines Standardfrequenzumrichters



⑦ Prinzip-schaltbild eines netzrückspeisefähigen Standardfrequenzumrichters einschließlich LCL-Filter

Im Gegensatz zum Standardfrequenzumrichter ermöglicht ein netzrückspeisefähiger Frequenzumrichter einen Leistungsfluss von der Ausgangsseite ins Netz. Man findet ihn häufig bei dreiphasig ans Netz angeschlossenen regenerativen Energiesystemen (Bild ⑦).

3 Komponenten für die Photovoltaik

Die zuvor beschriebenen leistungselektronischen Bauteile kommen seit jeher dort zum Einsatz, wo elektrische Ströme und Spannungen umgeformt, gesteuert oder geschaltet werden müssen, beispielsweise in Antriebssystemen, Energieerzeugungsanlagen und Gleichstromübertragungsnetzen (HGÜ-Netze). Im Bereich der Erneuerbaren Energien erleben sie in jüngster Zeit einen Boom. Dafür wurden bekannte Wechsel- und Frequenzumrichter-konzepte sowie Laderegler häufig neu konzipiert und so den speziellen Anforderungen von Windenergieanlagen und Solargeneratoren angepasst.

3.1 Laderegler

In Inselanlagen – in PV-Anlagen also, die nicht in das öffentliche Stromnetz einspeisen – zählen Ladegeräte als Bindeglieder zwischen Solargenerator, Batterie und Verbraucher zu den wichtigsten Komponenten. Sie müssen die eingesetzten Akkumulatoren optimal laden, sicher gegen Überspannung und Tiefentladung schützen und dem Betreiber einen schnellen Überblick über den Zustand des

Systems geben. Der Markt bietet unterschiedliche Geräte, die sich in Bezug auf Funktion, Schaltanordnung und Preis unterscheiden.

Serien-, Shunt- und Hybridregler. Wie die Bezeichnungen schon andeuten, sind bei Solar-Laderegler unterschiedliche Schaltungen und Funktionen möglich. Serienregler unterbrechen bei Erreichen der Ladeschlussspannung den PV-Strom und schalten ihn später, nach Abfall der Batteriespannung, entsprechend der eingestellten Schaltschwelle wieder zu. Shuntregler regeln den Ladevorgang kontinuierlich. Kurz vor Erreichen der Ladeschlussspannung bricht der Regler den Ladestrom ab, der nicht benötigte Strom wird im Modul in Wärme umgewandelt. Die Batterien werden schonend und schnell geladen.

Eine Weiterentwicklung der Shuntregler sind die so genannten Hybridregler, die mit einem integrierten Schaltkreis ausgerüstet sind. Ein selbstlernender Algorithmus erkennt den genauen Ladezustand der Batterie und passt den Ladevorgang an Kapazität, Spannung und Alter der Batterie an. Dieses neuartige Hybridstellglied hat erheblich bessere Wirkungsgrade als Serien- oder Shuntregler.

MPP-Laderegler. Anlagenbedingt bestimmt die jeweilige Akkuspannung den Arbeitspunkt auf der Strom-Spannungs-Kennlinie der PV-Anlage, die aus diesem Grunde dann oft nicht im MPP arbeitet (MPP: Maximum Power Point; zeigt den Ort auf der Kennlinie, wo die elektrische Leistung einer Solarzelle am größten ist). Die daraus resultierenden Leistungsverluste können je nach Akkuspannung, Einstrahlung und Temperatur 10 bis 40 % betragen. Sie las-

sen sich durch so genanntes „MPP-Tracking“ vermeiden. Dabei wird die Leistungsentnahme so geregelt, dass der Solargenerator ständig am „Maximum Power Point“ betrieben wird. Als Beispiel mag hier der MPP-Laderegler Controla Maxi Power von Würth Solergy dienen. Er ist für kleine netzunabhängige Anlagen mit einer Leistung von maximal 100 W konzipiert. Mithilfe einer automatischen Spannungsanpassung lässt sich eine 12-V-Solarbatterie mit einem 24-V-Modul laden.

3.2 Solarwechselrichter

Grundlegende Aufgabe eines modernen Solarwechselrichters ist es, den vom Solargenerator erzeugten Gleichstrom in einen netzkonformen Wechselstrom umzuformen. Weitere Funktionen sind die Anpassung des Arbeitspunktes des Wechselrichters an den MPP des Solargenerators (MPP-Tracking) sowie die Betriebsdatenerfassung und -signalisierung. Außerdem ist er in der Regel ausgestattet mit diversen Überwachungs- und Schutzeinrichtungen wie beispielsweise Verpolungs-, Überspannungs- und Überlastschutz.

Thyristorwechselrichter transformieren den Gleichstrom von Solargeneratoren mithilfe von Brückenschaltungen in einen Wechselstrom, der allerdings stark von der Sinusform abweicht. Das führt zu hohen Oberschwingungsanteilen, die dann aufwändig wieder herausgefiltert werden müssen. Dabei gilt: Je höher die Pulszahl der Brückenschaltung, desto geringer ist der Oberschwingungsanteil und somit der Filteraufwand. Thyristorwechselrichter sind aus wenigen Komponenten zusammengesetzt und deshalb relativ preisgünstig. Sie arbeiten zuverlässig, sind weitgehend unempfindlich gegenüber hochfrequenten Störungen und erreichen einen Wirkungsgrad von 94 bis 97 %. Eingesetzt werden sie vor allem in größeren PV-Anlagen. Thyristorwechselrichter kleinerer Leistung (< 5 kW) werden nur noch von wenigen Herstellern angeboten.

Wechselrichter mit NF-Transformator. Sowohl bei selbstgeführten als auch bei netzgeführten Wechselrichtern werden häufig 50-Hz-Transformatoren verwendet. Durch den Einfluss des magnetischen Feldes des Transformators ist der Gleichstromkreis vom Wechselstromkreis galvanisch getrennt. Das bringt einige Vorteile: Die Elektroinstallation kann in Schutzkleinspannung ausgeführt werden, der Potentialausgleich des Generatorgestells kann entfallen, die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) wird verbessert. Es müssen aber auch Nachteile in Kauf genommen werden: Der Transformator verursacht Leistungsverluste; Baugröße, Gewicht und Preis steigen. Die Herstellerangaben zum Wirkungsgrad reichen von 91 bis 95 %.

Die Wechselrichter der Sunny-Boy-Serie (Bild ⑧) der Firma SMA Technology AG sind sowohl für kleine Solargeneratoren von 400 W_p bis 6000 W_p als auch für Großanlagen im MW-Bereich geeignet. Ähnliche Geräte haben aber auch alle anderen namhaften Hersteller im



8 Sunny Boy SB 3800

Foto: SMA



9 Solar Inverter 10000, HERIC-Wechselrichter von Sunways

Foto: Ferit Kuyas



10 IPG 5000 vision

Foto: Conergy

Programm. Der Pesos 2300T von Pairan ist zusätzlich mit einem Hochsetzsteller ausgerüstet. Auch dreiphasige Systeme werden angeboten, wie beispielsweise der SINVERTsolar von Siemens oder der Gridfit von Exendis. Dreiphasen-Wechselrichter bieten Wirkungsgrade zwischen 94 und 97 %.

Wechselrichter mit HF-Transformator. HF-Transformatoren zeichnen sich im Vergleich zu NF-Transformatoren durch geringere Verluste, kleinere Baugröße, niedrigeres Gewicht und geringere Kosten aus. Dem steht ein höherer Schaltungsaufwand gegenüber, sodass kaum ein Preisunterschied auszumachen ist. Auch bei diesen Wechselrichtern bleibt der Solargenerator potentialfrei. Etwas nachteilig bemerkbar machen sich der große Bauteileaufwand und die Verluste des HF-Transformators.

Tafel 1 Vergleich von Wechselrichtern mit und ohne Transformator

	mit Transformator	ohne Transformator
Merkmale	Eingangs- und Ausgangsspannung sind galvanisch getrennt; weite Verbreitung; Einsatz meist als Zentralgerät	Solargeneratorspannung muss deutlich über Scheitelwert der Netzspannung liegen, ansonsten Einsatz von DC/DC-Hochsetzern erforderlich; Einsatz meist als Strang- und Modulwechselrichter
Vorteile	Schutzkleinspannung möglich; gute EMV; langjährig im Einsatz; Solargenerator ist potentialfrei	höherer Wirkungsgrad (bei Geräten ohne DC/DC-Wandler); geringeres Gewicht und geringere Baugröße
Nachteile	Trafoverluste; höheres Gewicht und höhere Baugröße	Einsatz von RCD-Fehlerstromschutzschaltern erforderlich; Schwankung des Arbeitspunktes; Installation nach Schutzklasse II vorgeschrieben; verminderte EMV

Die Wechselrichter IG 15/20/30/40 von Fronius können nach Wahl kombiniert werden. Ihr HF-Trafo ist extrem klein; ein so genanntes Phase-Shift-Verfahren minimiert zusätzlich Schaltverluste. Sie sind gedacht für PV-Leistungen von 2000 bis 6700 W. Wechselrichter mit mehreren HF-Transformatoren bieten unter anderen PowerLynx, Kyocera und Photowatt. Weitere Varianten sind Wechselrichter mit HF-Transformatoren und zusätzlichem Tiefsetzsteller oder zusätzlichem Hochsetzsteller (von Delta Energy Systems, Solectria, Tene-sol), Flyback-Converter (Sunmaster von Mastervolt) und Wechselrichter mit HF-Transformator und Vollbrücke (Pesos PVI 250T von Pairan).

Trafolose Wechselrichter. Im Bemühen, die Verluste eines Wechselrichters noch weiter zu minimieren, setzt man im kleinen Leistungsbereich häufig Wechselrichter ohne Transformator ein. Sie haben dann einen größeren Wirkungsgrad (95 bis 97 %) bei gleichzeitig günstigeren Anschaffungskosten. Die Vorteile werden erkauft mit Einbußen bei der elektromagnetischen Verträglichkeit und mit einer gewissen Schwankung des Arbeitspunktes. Außerdem sind bestimmte Normen und Vorschriften zu beachten: Für den Wechselrichter wird ein allstromsensitiver Fehlerstromschutzschalter gefordert; die Elektroinstallation ist durchgängig in Schutzklasse II durchzuführen; spannungsführende Teile sind abzudecken. Auch in diesem Produktsegment gibt es ein umfangreiches Angebot vonseiten der Hersteller. Für direkt einspeisende Wechselrichter ohne Trafo empfehlen sich Kaco (Powador), Solarfabrik (convert 2700), Solutronic (Sol-Plus 30/50), Sputnik (Solar Max 4000) oder Würth Solergy WE 5000. Die Firma Sunways wirbt für ihre patentgeschützten „HERIC“-Wechselrichter (Bild 9). Trafolose Wechselrichter mit Hochsetzstellern bieten Conergy (IPG-Serie mit „Balanced Mode Technology“, Bild 10) und Solarfabrik (convert 6T). Siemens verspricht für seinen SITOP solar eine mithilfe des so genannten Flying-Conductor-Prinzips stark verbesserte EMV. Auch der Potentialausgleich kann entfallen.

Entwicklungstendenzen. Allgemein ist zu sagen, dass die Entwicklung weiter in Richtung höhere Leistungen, höhere Taktfrequenzen, höhere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer zeigt. Diese Ziele sollen erreicht werden mit transformatorlosen Konzepten und Verwendung leistungsfähigerer Schnitt-

stellen, aktiver Kühlung und komplett digitalisierter Regelung.

Literatur

- [1] Elektronik Grundlagen. In: www.elektronik-kompendium.de. Juli 2006.
- [2] Heene, R.: Induktive Bauelemente für die Leistungselektronik. In: Leistungselektronik für erneuerbare Energiesysteme. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Regensburg 2006.
- [3] Nuß, U.: Leistungselektronische Grundlagen. In: Leistungselektronik für erneuerbare Energiesysteme. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Regensburg 2006.
- [4] Burger, B.: Leistungselektronik für die Photovoltaik. In: Leistungselektronik für erneuerbare Energiesysteme. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Regensburg 2006.
- [5] DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Landesverband Berlin Brandenburg e.V. (Hrsg.): Photovoltaische Anlagen. Berlin 2005.
- [6] Wrede, H.: Leistungselektronik für die Windenergie. In: Leistungselektronik für erneuerbare Energiesysteme. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Regensburg 2006.