

Solarmodule mit integriertem Wechselrichter

Systemtechnik netzparalleler Photovoltaik-Anlagen

Ein leistungsmäßig sehr großer Anteil der Photovoltaik (PV)-Anlagen in Europa arbeitet im Netzparallelbetrieb. Das dichte Stromnetz und der geregelte Zugang zum Netz haben bewirkt, dass sich diese Technologie an der Schwelle zu einem Massenmarkt befindet. Im Verlauf der sehr dynamischen Entwicklung haben sich unterschiedliche Anlagentypen entwickelt (Abb. 1):

Anlagen mit zentralem Wechselrichter (A) markieren den Ursprung dieser Technologie. Hier werden zunächst die photovoltaischen Module zu Strängen in Reihe geschaltet. Der erzeugte Strom ergibt sich aus einer Parallelschaltung der Stränge. Die Leistung des PV-Generators wird von einem Wechselrichter ins Netz eingespeist. Diese Technologie kommt bei großen Anlagen, die über einen PV-Generator mit sehr homogener Bestrahlung verfügen, zum Einsatz. Das Stringkonzept (B) verwendet einen Wechselrichter pro Strang und ermöglicht bereits eine flexiblere Anlagenplanung. Unterschiedlich ausgerichtete Generatoren können ohne Fehlanpassung betrieben werden. Eine konsequente Fortsetzung der modularen Struktur des PV-Generators in der Energieaufbereitung stellt der modulintegrierte Stromrichter dar (C). Die Ausrüstung jedes einzelnen Moduls mit einem Kleinwechselrichter bietet einige Vorteile bei Planung und Betrieb der Anlage:

- energetisch optimierter Betrieb von Einzelmodulen (Fassadenanwendung)
- einfache und flexible Anlagenplanung
- spätere Erweiterungen der Anlage sind möglich
- Kleinstanlagen zum günstigen Einstieg in die PV-Technik
- geringere Einbußen bei Teilausfällen
- Diagnosesystem einfach zu implementieren
- Standardisiertes Bauelement für hohe Stückzahlen
- günstige Auslegung der Leistungselektronik durch geringere Variabilität der Eingangsspannung

Nachteilig sind das im Vergleich zu größeren Wechselrichtern ungünstige Preis-Leistungsverhältnis und der geringere Wirkungsgrad. Die Modulintegration führt zu einer hohen Temperaturbelastung der Bauelemente und kann sich negativ auf die Lebensdauer der Wechselrichter auswirken. Der Aufwand (Bauelemente, Eigenversorgung) für Regelung und Betriebsführung ist nahezu unabhängig von der elektrischen Leistung und erhöht bei kleinen Systemen die spezifischen Kosten. Bereits seit einiger Zeit wird intensiv an diesen Problemen gearbeitet und Modulstromrichter sind schon auf dem Markt verfügbar. Der Durchbruch dieser Technologie ist aber noch nicht erreicht.

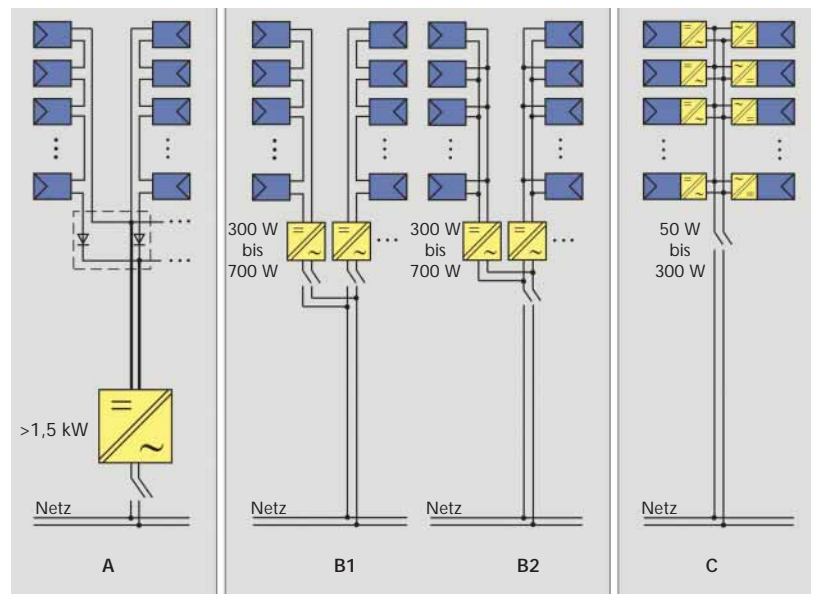


Abbildung 1
Netzparallele PV-Anlagen mit Zentralwechselrichter (A), Stringwechselrichter (B1, B2) und Modulstromrichter (C)

Schaltungsarten netzparalleler selbstgeführter Wechselrichter

Ein breiter Einsatz des Modulstromrichters erfordert eine wesentliche Senkung der leistungsspezifischen Kosten. Ein neues Konzept ist erforderlich, da auch die „großen“ Wechselrichter ständig weiterentwickelt werden und hier weiterhin sinkende Kosten erwartet werden. Da die Kosten für die Leistungselektronik stark

Michael Viotto
ISET
mviotto@iset.uni-kassel.de

Dr. Erwin Lotter
ZSW
erwin.lotter@zsw-bw.de

Raymund Schäffler
Würth Solar GmbH
raymund.schaeffler@we-online.de

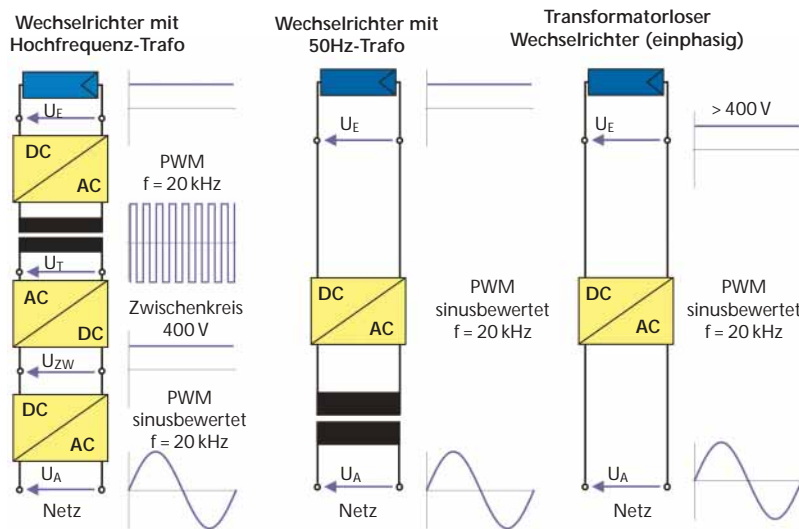
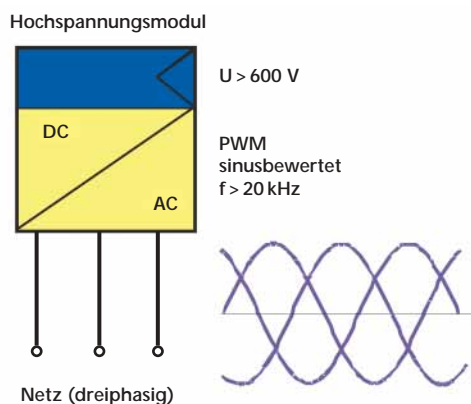


Abbildung 2
Schaltungsarten netzparalleler Wechselrichter

von der Schaltungsart abhängen, bietet es sich an, hier nach Verbesserungsmöglichkeiten zu suchen (Abb. 2).

Aufgrund der niedrigen Modulspannungen wird bisher eine hochsetzende Leistungselektronik zur Anpassung an die Netzspannung benötigt. Diese Schaltung muss sowohl die niedrigste zu erwartende Betriebsspannung auf über 350 V transformieren als auch der Leerlaufspannung des Moduls standhalten. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Spannungen ist entscheidend für den Wirkungsgrad und die Kosten des Stromrichters. Eine häufig eingesetzte Schaltungsart für diesen Spannungsbereich besteht aus einer von Leistungstransistoren (MOS-FET) gebildeten einphasigen Wechselrichterbrücke mit einem nachgeschalteten Netztrafo, der sowohl die Spannungsanpassung als auch die galvanische Trennung von Modul und Netz sicherstellt.

Abbildung 3
Dreiphasiger Modulstromrichter



Diese Technologie ist erprobt und gilt als sehr zuverlässig. Das hohe Gewicht und die Baugröße des Netztrafos erschweren aber den Einsatz als Modulstromrichter.

Eine deutliche Reduktion bei Baugröße und Gewicht lässt sich durch den Einsatz einer leistungselektronischen Schaltung mit Hochfrequenztrafo erzielen. Diese Schaltungen bestehen aus einem Gleichspannungswandler, der auf einen internen Zwischenkreis von ca. 400 V speist, und einer nachgeschalteten Wechselrichterbrücke, die meistens aus preiswerten IGBT¹ besteht. Der Hochfrequenzübertrager ist deutlich kleiner und leichter als der Netztrafo. Ein Nachteil dieser Schaltungen ist der höhere Schaltungsaufwand durch den zusätzlichen Gleichspannungswandler. Doch insgesamt ermöglicht der Fortschritt auf dem Gebiet der leistungselektronischen Bauelemente heute die Konstruktion von Stromrichtern mit derartigen Hochfrequenztrafos. Diese Stromrichter übertreffen die Geräte mit Netztrafo beim Wirkungsgrad und sie sind auch zu konkurrenzfähigen Kosten produzierbar.

Die bei größeren PV-Anlagen häufig eingesetzten traflosen Geräte benötigen eine Gleichspannung von mindestens 400 V und kommen daher nach dem bisherigen Stand der Technik für einen Modulstromrichter nicht in Frage.

Wechselrichter mit Hochspannungsmodul

Inzwischen ermöglicht der Fortschritt sowohl in der Dünnschichttechnik als auch in der Leistungselektronik die Realisierung trafloser Modulstromrichter. Hier bietet sich eine Möglichkeit, die leistungsspezifischen Kosten durch kostengünstige Schaltungsarten deutlich zu reduzieren. Die zugrunde liegende Idee ist die Kombination eines direkt gekoppelten Wechselrichters mit einem Hochspannungs-Dünnschichtmodul (Abb. 3). Ein trafloser Wechselrichter ist deutlich kleiner, leichter und preiswerter als ein Gerät mit galvanischer Trennung. Abb. 4 zeigt das Einspar-

¹ IGBT = Isolated Gate Bipolar Transistor

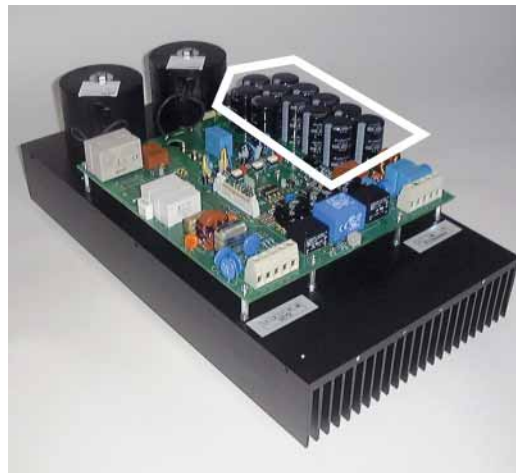
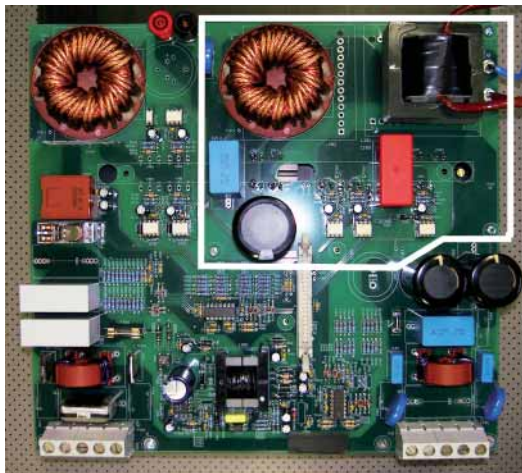


Abbildung 4 (links)
Weiß markierter Bereich: Einsparung durch transformatorlose Leistungselektronik am Beispiel eines Wechselrichters mit Hochfrequenztrafo und einer Nennleistung von 1,5 kW

Abbildung 5 (rechts)
Weiß markierter Bereich: Einsparung des Eingangskondensators durch dreiphasige Einspeisung am Beispiel eines Wechselrichters mit einer Nennleistung von 5,6 kW

potenzial durch diese Technologie. Ein trafoloses Gerät benötigt nur circa die Hälfte der Bauelemente. Darüber entfallen hier die teuren Bauteile wie Transformator, MOS-FET und Drossel des Spannungswandlers. Die weiterhin benötigten IGBT der Wechselrichterbrücke sind dagegen vergleichsweise preiswert.

Eine weitere Optimierung von Preis und Zuverlässigkeit ergibt sich durch eine dreiphasige Netzeinspeisung. In diesem Fall kann der Eingangskondensator, der bei einphasigen Geräten die Leistungswelligkeit übernimmt, deutlich kleiner ausgelegt werden oder ganz entfallen (Abb. 5). Dieses Bauelement hat einen wesentlichen Anteil am Preis des Wechselrichters und darüber hinaus eine begrenzte Lebensdauer bei erhöhten Betriebstemperaturen. Ein Verzicht auf diesen Kondensator führt also auch zu einer längeren Lebensdauer des Wechselrichters. Direkte Kopplung und dreiphasiger Betrieb ermöglichen in Kombination einen sehr viel kleineren, preiswerteren und zuverlässigeren Wechselrichter. Abb. 6 zeigt das gesamte Optimierungspotenzial beim Einsatz dieser Technologie.

Technologie eines Hochspannungsmoduls

Voraussetzung für den Einsatz dieses im letzten Kapitel beschriebenen Modulstromrichters ist die Verfügbarkeit von Solarmodulen mit hohen Ausgangsspannungen. Für eine dreiphasige Netzeinspeisung wird eine Spannung des

Moduls von ca. 600 V benötigt. Die maximale Fläche für ein Modul mit integriertem Stromrichter sollte wegen der Handhabbarkeit 2 m² nicht übersteigen. Eine Reihenschaltung von ca. 1000 Zellen auf einer Fläche von maximal 2 m² ist aber wirtschaftlich mit poly- oder monokristallinen Silicium-Solarzellen nicht durchführbar. Hier bieten sich Dünnschichttechnologien an, die über eine Strukturierung des Moduls kleinere Zellen ermöglichen. Die Anzahl der in Reihe zu schaltenden Solarzellen hängt von der eingesetzten Art der Dünnschichtsolarzellen ab (Tab. 1).

Material	U _{OC} [mV]	Wirkungsgrad [%]	Quelle
Cu(In,Ga)Se ₂	690	19,2	NREL
Cu(In,Ga)S ₂	895	10,1	HMI
CuGaSe ₂	894	8,4	IPE
Cu(In,Al)Se ₂	763	7,8	IEC
CuInS ₂	742	12,2	IPE
a-Si (unstab.)	887	12,7	Univ. Osaka
CdTe	845	16,5	NREL

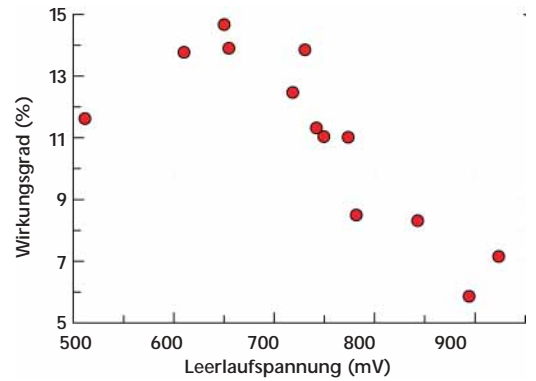
Tabelle 1
Vergleich einiger Dünnschichtsolarzellen
U_{OC} = Leerlaufspannung

Jede Strukturierung des Moduls reduziert die aktive Fläche und damit den elektrischen Ertrag. Eine hohe Zellenspannung ist daher anzustreben, um die aktive Fläche möglichst groß werden zu lassen. Eine Möglichkeit ist die Erhöhung des Galliumsgehalts der Solarzelle (Abb. 7). Der mit steigender Leerlaufspannung sinkende Wirkungsgrad begrenzt die Wirksamkeit dieser Maßnahme. Hier ist sorgfältig zwischen dem Mehrertrag aufgrund der vergrößerten aktiven Fläche und den Wirkungsgradeinbußen durch die Erhöhung des Galliumgehalts abzuwägen.

Abbildung 6 (links)
Weiß markierter Bereich: Einsparung des Eingangskondensators durch dreiphasige Einspeisung am Beispiel eines Wechselrichters mit einer Nennleistung von 5,6 kW



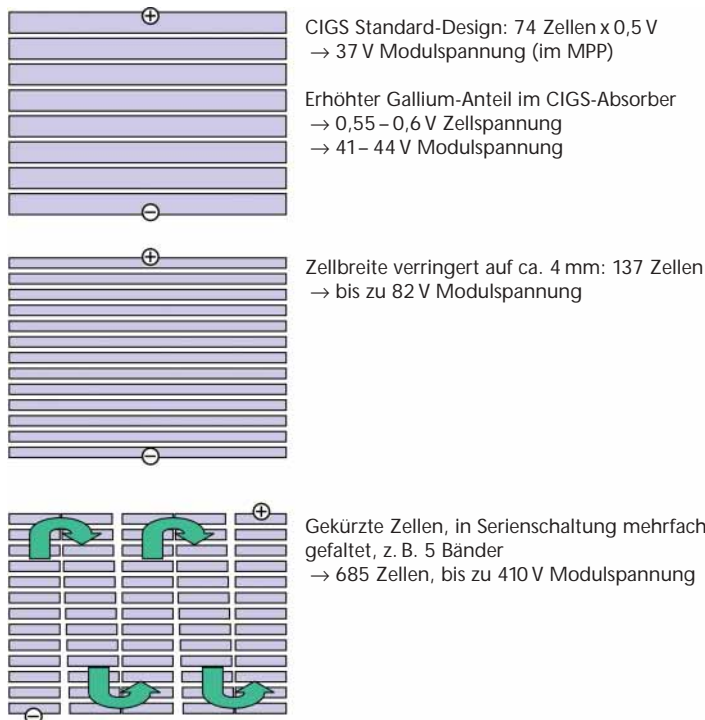
Abbildung 7 (rechts)
Veränderung des Wirkungsgrads von $Cu(In,Ga)Se_2$ -Solarzellen bei Erhöhung der Leerlaufspannung durch Erhöhen des Gallium-Gehalts im Absorber



Eine sehr effiziente Art der Spannungserhöhung ist die Strukturierung des Moduls in zwei Richtungen (Abb. 8). Bisher wurden Dünnschichtmodule in Streifen unterteilt. Durch eine Reihenschaltung vieler entsprechend schmaler Einzelzellen lässt sich eine hohe Ausgangsspannung erzeugen. Für die vorliegende Anwendung reicht diese Unterteilung in Streifen nicht aus. Bei einer Modullänge von 600 mm ergibt sich eine Zellenbreite von unter 1 mm mit einem erheblichen Verlust an aktiver Fläche. Eine weitere Strukturierung der Streifen wäre erforderlich. Die Abstände sind an die auftretenden hohen Spannungen zwischen den einzelnen Streifen anzupassen. Die geeignete Wahl des Gallium-

gehalts und eine neuartige Strukturierung bieten die Möglichkeit, Solarmodule mit einer Ausgangsspannung von 600 V herzustellen. Durch Kombination dieser Module mit einem optimierten direkt gekoppelten Wechselrichter entsteht ein neues Produkt, das gegenüber dem heutigen Stand der Technik eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich Kosten, Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit bietet.

Abbildung 8
Konstruktion eines CIS-Hochspannungsmoduls



Ausblick

Die Entwicklung eines kostengünstigen Solarmoduls mit integriertem Wechselrichter erfordert intensive Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachgebiete:

- Halbleitertechnologie
- Modulfertigung
- Leistungselektronik
- Architektur und Bauingenieurwesen
- Normung und Standardisierung

Im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens ist geplant, technische Lösungen zu diesem Thema zu erarbeiten und die Tragfähigkeit des Konzepts durch Tests in der Praxis zu erproben. Ziel ist ein Solarmodul mit integriertem Stromrichter, das durch die Kombination von hoher Modulspannung und moderner Schaltungstechnik eine Halbierung der Kosten für die Leistungselektronik ermöglicht und damit dieser Technologie den entscheidenden Impuls für eine breite Markteinführung geben kann.

Literatur

- Kleinkauf, W.: Photovoltaic Power Conditioning; 10th EPVSEC, Lisbon, Portugal, 1991
- Kleinkauf, W.; Sachau, J.; Hempel, H.: Developments in inverters for photovoltaic systems; 11th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Switzerland, 1992
- M. Viotto, H. Hempel und U. Krengel: Kleinwechselrichter zum Aufbau von modularen PV-Anlagen. In: 8. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1993
- R. Geipel, B. Größ, W. Kleinkauf, U. Krengel, T. Krieger und M. Viotto: Untersuchungen zur Entwicklung modulatorientierter Stromrichter für netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen. In: 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1995
- Reliability and accelerated life tests of the AC module mounted OKE4 inverter
H. Oldenkamp, I. J. de Jong, C. W. A. Baltus, S. A. M. Verhoeven, S. Elstgeest, 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D. C., 1996
- H. Oldenkamp, I. J. de Jong, Next generation of AC module inverters, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6–10 July 1998