

String-Technik in der Photovoltaik

Stand der Entwicklung und Ausblick

G. Cramer, B. Engel, F. Greizer,
J. Laschinski, M. Meinhardt, M. Victor

Die String-Technik hat vor zehn Jahren den Aufbau von netzgekoppelten PV-Anlagen revolutioniert. Die Kosten wurden seitdem gesenkt und der Wirkungsgrad wesentlich erhöht. Die bisherige Entwicklung und die aktuellen Trends bei String-Wechselrichtern werden im Folgenden erläutert.

Der String-Wechselrichter (Bild 1) speist als Bestandteil modularer Systemtechnik für PV-Anlagen jeweils die Energie eines Strings aus PV-Modulen in das Niederspannungsnetz ein. Die Vorteile gegenüber PV-Anlagen mit zentralem Wechselrichter, der an parallel geschaltete PV-Module angeschlossen wird, sind vielfältig:

- Kostenreduzierung durch vereinfachte Installation (keine Parallelschaltung der PV-Module im freien Feld, Parallelschaltung der Wechselrichter auf der AC-Seite),
- erhöhter Energieertrag aufgrund der Reduzierung von Verlusten infolge von Mismatching der PV-Module,
- erhöhter Energieertrag aufgrund von lokalem MPP-Tracking,
- erhöhte Betriebssicherheit von PV-Systemen,
- erhöhte Verfügbarkeit aufgrund von optimaler Überwachung des PV-Systems,
- modulare Erweiterbarkeit des PV-Systems.

Konventionelle PV-Systemkonzepte

Zu den drei wichtigsten Konzepten netzgekoppelter PV-Systeme gehören:

- Anlagenorientiertes PV-Systemkonzept (Zentralwechselrichter),
- Modulorientiertes PV-Systemkonzept (String-Wechselrichter, Multi-String-Wechselrichter),

Günther Cramer, Bernd Engel, Frank Greizer, Joachim Laschinski, Mike Meinhardt, Matthias Victor;

SMA Technologie AG, Niestetal



Bild 1: Erster String-Wechselrichter Sunny Boy 700 aus dem Jahre 1995

- Modulintegriertes PV-Systemkonzept (modulintegrierter Wechselrichter).
- Bild 2** zeigt die Hauptmerkmale der verschiedenen PV-Systemkonzepte. Hierzu zählen u.a. die allgemeine Systemstruktur, Sicherheit, Kosten, Betriebsverhalten, Systemaspekte (z.B. Überwachung, Wartungsfähigkeit usw.). Dabei steht jeder Wechselrichter für seine eigene PV-Systemphilosophie.

Entwicklung der String-Wechselrichter

Der Wechselrichter in String-Technik wurde basierend auf den Prinzipien der modularen Systemtechnik entwickelt. 1995 wurden die ersten in Serie gefertigten String-Wechselrichter auf den Markt gebracht (Bild 1).

Darauf folgte die Entwicklung des traflosen String-Wechselrichters. Das Streben nach immer höheren Wirkungsgraden führte 1998 zu dieser Entwicklung. Es wurde nun ein Wirkungsgrad von 96% erzielt und ein vergleichbarer Grad an Sicherheit wie bei Wechselrichtern mit galvanischer Trennung erreicht.

Nach wie vor sind in vielen Ländern Wechselrichter mit galvanischer Trennung vorgeschrieben, so dass auch bei diesen Gerätetypen durch innovative Technologien weitere Fortschritte erzielt wurden. Die Markteinführung des »Sunny Boy 3000« mit einem maximalen Wirkungsgrad von >95% im Jahr 2001 zeigte, dass Wechselrichter mit Netzfrequenz-Transformator auf keinen Fall veraltet sind, sondern dem neuesten Stand der Technik entsprechen.

Der Trend zu immer höheren Anlageneleistungen erforderte ein neues Wechselrichterkonzept, das es ermöglicht, die String-Technik auch oberhalb der 3-kW-Leistungsklasse beizubehalten. Dazu wurde 2002 die Multi-String-Technik auf dem Markt etabliert. Nun war es möglich, Strings mit unterschiedlicher Modulzahl oder Himmelsausrichtung und verschiedenen Modultypen bei gleichzeitig maximalem Energieertrag, mit nur einem Wechselrichter zu betreiben. Drei separate Eingänge mit jeweils einem eigenen MPP-Tracker sorgen für eine optimale

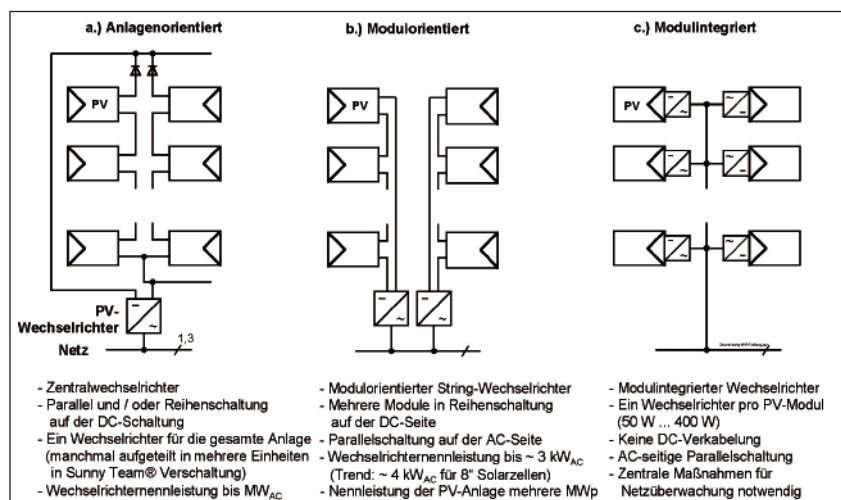
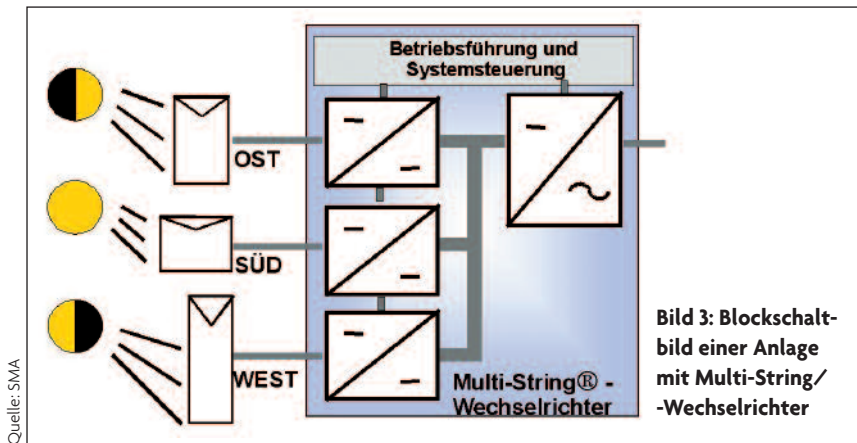


Bild 2: Vergleich von PV-Systemkonzepten



Anpassung des Multi-String-Wechselrichters an die einzelnen Strings (Bild 3). Mit der Zusammenführung der String- und der Master-Slave-Technik durch die sog. Team-Verschaltung wurde 2002 auch ein verbesserter Teillastwirkungsgrad erreicht. Durch die Vermeidung von Mismatching im Bereich größerer Leistungen gegenüber der klassischen Master-Slave-Technik werden höhere Energieerträge erzielt (Bild 4).

Kostenreduzierung von PV-Wechselrichtern

Das größte Hindernis bei der Verbreitung der netzgekoppelten photovoltaischen Energienutzung sind die hohen Investitionskosten für PV-Module und PV-Systemtechnik. Der Einsatz von String-Wechselrichtern ist mit einer Kostenreduzierung der Systemtechnik in dreierlei Hinsicht verbunden:

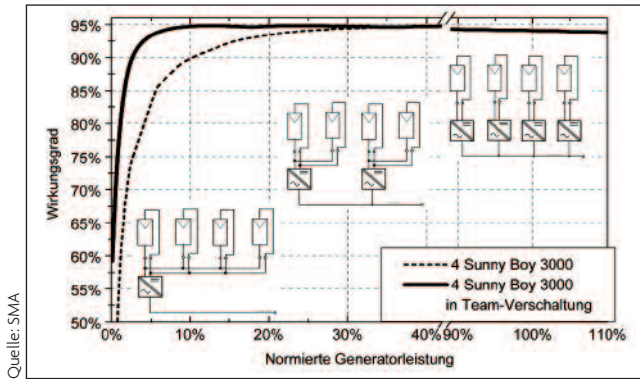
- Die Benutzung der String-Technik führt zu einer Reduzierung der Installations- und allgemeinen PV-Systemkosten.
- String-Wechselrichter sind kostengünstiger als Zentralwechselrichter mit der gleichen Nennleistung.
- Die Weiterentwicklung der String-Wechselrichter-Technik hat in den letzten zehn Jahren dazu geführt, dass das Preisniveau seit 1995 um mehr als 50 % gesunken ist (Bild 5).

Die Reduzierung der spezifischen Kosten WR ist unter anderem auf die folgenden Faktoren zurückzuführen [6]:

- Erhöhung der Produktionsmengen,
- Tendenz zu größeren Wechselrichtereinheiten,
- Erhöhung des Integrationsgrades,
- Einsatz neuester Fertigungstechniken.

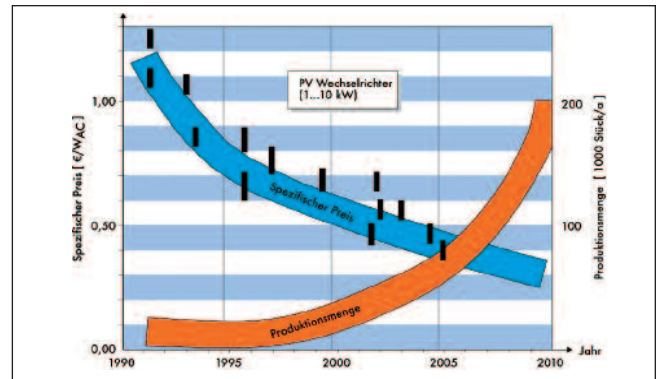
Stand der Entwicklung

Bei String-Wechselrichtern mit Transformator wird heute ein maximaler Wirkungsgrad von bis zu 95,6 % erreicht (Bild 6). Durch die Entwicklung eines robusten Aluminium-Druckgussgehäuses



Quelle: SMA

Bild 4: Wirkungsgradvergleich einer Wechselrichtergruppe mit und ohne »Team-Verschaltung«



Quelle: SMA

Bild 5: Entwicklung der spezifischen Kosten und Produktionsmengen von PV-Wechselrichtern

konnten die Material- sowie auch die Fertigungskosten reduziert werden.

Um die Vorteile der String-Technik nutzen zu können, müssen WR nahe am PV-Generator installiert werden. Eine der wichtigsten Anforderungen an String-Wechselrichter ist daher, dass sie für die Außenmontage und hohe Umgebungstemperaturen geeignet sind. Somit ist mindestens Schutzklasse IP54 erforderlich. Gleichzeitig ist eine ausrei-

chende Kühlung notwendig, um die Temperatur der Wechselrichter-Komponenten zu minimieren und so eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren zu erreichen. Für die Temperaturregelung werden ein in zwei Kammern geteiltes Gehäuse und ein temperatur- und drehzahl geregelter Lüfter eingesetzt.

Bild 7 zeigt die Funktionsweise des »Opti-Cool«-Kühlsystems. Die Grundidee für die Entwicklung des Kühlsystem

war die Unterbringung der Wechselrichterkomponenten in verschiedenen Kammern.

Dabei werden die Komponenten mit der größten Wärmeentwicklung (d.h. Drosseln, Transformator, Kühlkörper der Leistungshalbleiter) getrennt von der hochempfindlichen Elektronik in einer nach Schutzart IP54 abgedichteten Kammer mit forcierter Lüftung untergebracht. Die Elektronik wird dadurch

Quelle: SMA

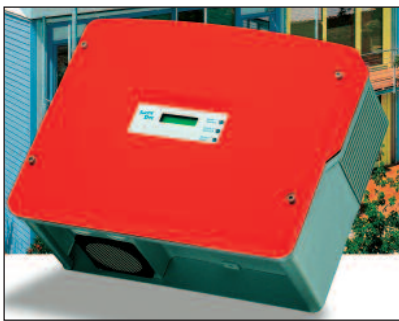


Bild 6: String-Wechselrichter mit Transformator erreichen 95,6% Wirkungsgrad

weniger wärmebelastet und befindet sich im wasserdichten Bereich (IP65).

Die Verwendung von Lüftern zur Kühlung innerhalb von Wechselrichtern ist nicht neu. Neu ist jedoch die Kombination aus Konvektionskühlung und forcierter Kühlung. Da die Trennung zwischen den Kammern gleichzeitig als Kühlkörper fungiert, ist ein Betrieb des Lüfters erst dann erforderlich, wenn die Umgebungstemperatur oder die Belastung des Wechselrichters einen bestimmten Wert überschreitet. Ein Lüfterloser Betrieb des Wechselrichters bei Nennleistung ist so teilweise möglich. Ergebnis ist eine niedrigere Lüfterbetriebszeit und damit eine berechnete MTBF (Mean Time Between Failures) des Lüfters von mehr als 50 Jahren.

Neben dem Einsatz neuester Materialien bei den Komponenten sind Innovationen bei den Schaltungstopologien ein wichtiger Ansatzpunkt zur Wirkungsgradbesserung.

Durch den Einsatz der »H5-Topologie« für transformatorlose Wechselrichter ist es möglich, den Wechselrichter im mittleren Leistungsbereich <10kW mit einem maximalen Wirkungsgrad von 98% als Serienprodukt anzubieten.

Trends in der Entwicklung

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklungsbereiche für String-Wechselrichter sind verschiedene Faktoren von Bedeutung. Für jeden Bereich werden im Folgenden die entsprechenden Entwicklungsansätze aufgeführt.

Preis

In der Vergangenheit hat die Einführung der String-Technik auf Systemebene bereits zu einer erheblichen Kostenreduzierung geführt. Um hier weiter voran zu kommen, ist eines der vorrangigen Ziele von Forschung und Entwicklung, eine Kostenreduzierung bei den einzelnen PV-Komponenten zu erreichen.

Wirkungsgrad

Eine Steigerung des Energieertrags und damit eine verbesserte Wirtschaftlichkeit insbesondere von Solarstromanlagen kann nur durch einen höheren Wirkungsgrad des Wechselrichters oder ein optimiertes Systemverhalten erreicht werden.

Betriebssicherheit

Eine weitere Verbesserung der Rentabilität geht mit einer erhöhten Betriebssicherheit der PV-Systemkomponenten einher. Darüber hinaus können die Wartungs- und Servicekosten durch Minimierung der Ausfallzeiten des PV-Systems aufgrund des Einsatzes modernster Anlagenüberwachungssysteme (z.B. Internet, GSM, Bluetooth) reduziert werden.

Zusätzliche Features

PV-Systemkomponenten werden zukünftig Produkteigenschaften aufweisen, die für den Endkunden einen erheblichen Zusatznutzen bieten. Hierzu gehört beispielsweise die Möglichkeit, netzgekoppelte PV-Systeme als Backup bei einem AC-Stromausfall nutzen zu können oder als aktive Filter zur Verbesserung der Netzspannungsqualität einzusetzen.

Wichtig für die Entwicklung netzgekoppelter PV-Systeme wird jedoch die Integrierbarkeit in die Netzbetriebsverfahren öffentlicher Energieversorgungsunternehmen als eine Art »virtuelles Kraftwerk« sein.

Erhöhung der Nennleistung von String-Wechselrichtern

Durch die Einführung neuer Solarzellen-Fertigungstechnologien, die durch eine größere Fläche der Zelle zu höheren Ausgangsströmen der Solarmodule führt,

werden die zukünftigen String-Wechselrichter eine höhere AC-Nennleistung haben. Diese Leistungssteigerung wird zu einer weiteren Reduzierung der spezifischen Kosten der Wechselrichter führen.

Fazit

In den letzten 10 Jahren wurde die Entwicklung der systemtechnischen Komponenten einer Solarstromanlage durch eine Steigerung der Produktionskapazitäten und durch innovative Technologien bestimmt (z.B. reduzierte DC-Installation und lokales MPP-Tracking). Eine weitere Reduzierung der spezifischen Kosten der PV-Wechselrichter ist möglich.

Eine Verbreitung der photovoltaischen Energiesysteme erfordert eine weitere Reduzierung der spezifischen Kosten bei Erhaltung des heutigen hohen Standards der PV-Wechselrichter in Bezug auf Sicherheit, Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, elektromagnetische Kompatibilität und Funktionalität (z.B. Netzüberwachungsfunktionen).

Der andauernde Innovationsprozess ist eine wichtige Grundlage für die positive Entwicklung des europäischen PV-Marktes, da dieser den Weg für die notwendige Verbesserung des Preis-/Leistungsverhältnisses der PV-Systemtechnik ebnet.

Literatur

- [1] Kleinkauf, W.: Photovoltaic Power Conditioning/ Inverter Technology; 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference; Lissabon 1991
- [2] Cramer, G. and Greizer, F.: Vom netz-kommutierten Stromrichter zum Multi-String, Zeitschrift: Erneuerbare Energien, Nr. 2/2000, S. 10 – 12
- [3] Stiftung Warentest: Strom hausgemacht, Zeitschrift: Test, Stiftung Warentest, Berlin, Nr. 9, September 1999, S. 66 – 71
- [4] Meinhardt, M. et. al.: Multi-String Converter with Reduced Specific Costs and Enhanced Functionality, Zeitschrift: Solar Energy, Vol. 69 (2001), S. 217 – 227
- [5] Meinhardt, M., Greizer, F., Cramer, G.: Technische Innovationen im boomenden Markt der PV-Systemtechnik, 17. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 13. – 15. März 2002
- [6] Meinhardt, M. and Cramer, G.: Cost Reduction of PV Inverters – Targets, Pathways and Limits; 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, München 2001
- [7] Cramer, G. et. al.: String Technology – A Successful Standard of the PV System Technology for 10 Years now, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, Juni 2005

Quelle: SMA

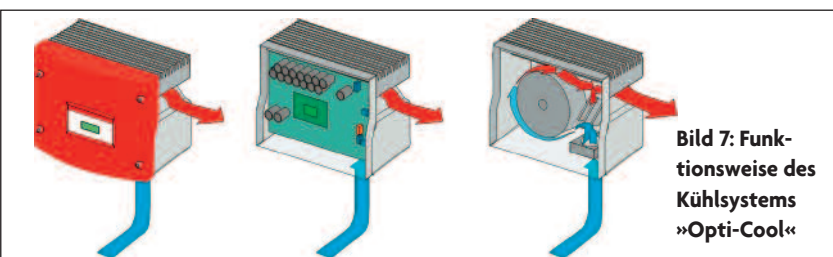


Bild 7: Funktionsweise des Kühlsystems »Opti-Cool«