

Topologische Ansätze für Wechselrichter in netzgekoppelten Photovoltaikanlagen

Topological Approaches for Grid-Connected Photovoltaic Inverters

Prof. Dr. Peter Zacharias, Institut für Solare Energieversorgungstechnik e. V., Kassel, Germany
peter.zacharias@uni-kassel.de

Kurzfassung / Abstract

Die Nutzung solarer Strahlungsenergie ist als Markt mit sehr hohem Wachstum Treiber für eine Vielzahl von Innovationen geworden. Der vorliegende schriftliche Beitrag gibt eine Übersicht über die Anforderungen von der Netzseite und seitens des Photovoltaikgenerators an die leistungselektronischen Wandler und fasst die Prinzipien der Lösungsansätze in Schemata zusammen. Eine Ergänzung dieses Konzentrats ist gegeben durch die beim Konferenzveranstalter per Internet verfügbaren Grafiken und ausführliche Literaturangaben des Konferenzbeitrags. Neben der Systematisierung der bisherigen Lösungen und der Fokussierung auf wesentliche Unterschiede in den Lösungen wird auch eine Methodik zur Bewertung von Schaltungstopologien vorgestellt.

Summary / Abstract

The use of solar energy is a market with very high growth rates driver for many innovations. The presented paper gives an overview about necessary requirements from the grid and the PV generator side to power electronic converters. It summarizes the principles of conversion. A complementary information to this paper is given by the conference organizer, which opens all the presented diagrams and pictures in the internet. A method for evaluation of topologies is being presented beside a systematic approach to classify the topologies presented at the market or in literature.

1 Einleitung

Der lichtelektrische Effekt ermöglicht es, in praktisch nur einem Umwandlungsschritt aus eingestrahelter Solarenergie die universell weiter verwendbare elektrische Energie bereit zu stellen. Jedoch liegt diese elektrische Energie zunächst in einer Qualität vor, die abseits der für gewöhnliche Geräte und Anlagen gesetzten Standards ist. Diese Standards mit photovoltaischen Solaranlagen zu erreichen und eine Eingliederung dieser Anlagen in bestehende Energieversorgungssysteme zu ermöglichen, ist zentrale Aufgabe der Forschung und Entwicklung zur Systemtechnik für PV-Anlagen. Die Mehrzahl aller Anwendungen beruht auf der Nutzung von Wechselstrom. Daher kommt dem Wechselrichter eine sehr hohe Bedeutung zu.

2 Netzseitige Anforderungen an PV-Wechselrichter

Man kann die grundsätzlichen gestalterischen Aufgaben an die Systemtechnik des leistungselektronischen Wandlers für einen netzgekoppelten Betrieb wie folgt zusammenfassen:

- Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom bei maximalem Wirkungsgrad und maximalem Leistungsfaktor $\lambda=P/S$ sowie $\cos\phi=1$,
- Elektromagnetische Verträglichkeit des Gesamtsystems,
- Robustheit gegenüber Netzfehlern, insbesondere transienten Überspannungen,

- Entkopplung des weiten Eingangsspannungsbereichs auf der DC-Generatorseite von der engen Netztoleranz,
 - automatische Erkennung von Netzabschaltungen mit selbsttätiger Netztrennung,
 - hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer (>20 Jahre Design-Lebensdauer),
 - geringe Investitions- und Wartungskosten.
- Neben diesen grundsätzlichen Aufgaben bekommen solche zunehmende Bedeutung, die geeignet sind, einen zusätzlichen Vorteil zu generieren, wie z. B.:
- Injektion von Blindleistung zur Regelung der Netzspannung auf der Mittelspannungsebene sowie zur Netzstützung bei Fehlern (*fault ride through*),
 - Sicherung der Energiequalität von lokalen Verbrauchern durch aktive Filterung der Oberschwingungen etc.,
 - Inselnetzfähigkeit zur Bereitstellung einer Notstromversorgung.

Insbesondere die Netzstützung im Fehlerfall ist mittlerweile angesichts einer in Deutschland installierten Leistung von ca. 3GWp zu einer wichtigen technischen Forderung der Energieversorger und Netzbetreiber geworden [1].

3 Wandlerstrukturen zur Erfüllung der netzseitigen Anforderungen

Zu Beginn der netzgekoppelten Photovoltaik ging es vor allem darum, die mit hohen Investitionskosten bereitge-

stellte elektrische Energie mit höchstem Wirkungsgrad und hohem totalen Leistungsfaktor bei $\cos\varphi=1$ in das Netz einzuspeisen. Dies führte in der Entwicklung auf Spezialtopologien mit hohem Wirkungsgrad, die oft nicht blindleistungsfähig sind. Die oben genannten, mittlerweile von Energieversorgungsunternehmen gestellten Forderungen nach Blindleistungsinjektion im Bedarfsfall führen dazu, dass derartige Wandlertopologien auf kleine System-Nennleistungen beschränkt bleiben werden. Nachfolgend sollen daher in diesem Kapitel die grundsätzlichen topologischen Ansätze getrennt nach blindleistungsfähig und nicht-blindleistungsfähig dargestellt werden.

3.1 PV-Wechselrichter ohne Blindleistungsfähigkeit

Hier ist die Grundaufgabe die exklusive Injektion von Wirkleistung. Dies kann erreicht werden durch die Verwendung von unidirektionalen DC/DC-Wandlern, die mit Polaritätswenderschaltungen kombiniert werden (Bild 1). Ein weiterer Weg besteht in der Strukturumschaltung solcher Wandler zur Erzielung verschiedener Polaritäten der Ausgangsspannung.

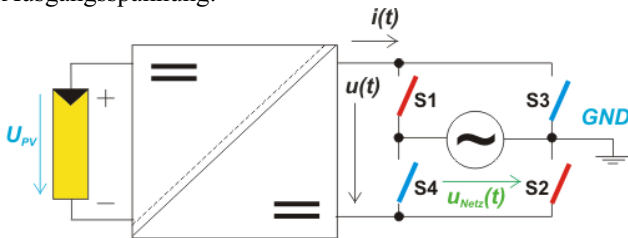


Bild 1 Topologie für ausschließlich $\cos\varphi=1$ mit einem uni-direktionalen DC/DC-Wandler + Polwender

Um die netzseitigen Filter und insbesondere deren kapazitive Komponenten klein zu halten, werden bevorzugt hier DC/DC-Wandler mit kontinuierlichem Ausgangsstrom eingesetzt [3,14]. Dies gilt ebenso für die Topologien, die durch innere Umschaltung der Struktur ohne eine zusätzliche Polwende-Stufe in Kettenschaltung als bipolare DC/DC-Wandlerstufen für die Netzeinspeisung entwickelt wurden [4]. Darüber hinaus sind Topologien dieser Kategorie bekannt und in Anwendung, die aus DC/DC-Wandlern mit intermittierendem Ausgangsstrom beruhen [5]. Um die Netzurückwirkungen in den vorgegebenen Grenzen zu halten, ist hierbei eine Kapazität parallel zum Ausgang erforderlich. Diese ist unvermindert auch bei geringer Teillast wirksam und verschlechtert den Leistungsfaktor des Wechselrichters bzw. verursacht durch die Blindleistung zusätzliche Verluste. Um diese Wirkungen gering zu halten, sind zur Verkleinerung der Kapazität hohe Schaltfrequenzen erforderlich. Dies jedoch begrenzt die erreichbaren Wirkungsgrade ebenfalls auf Werte unterhalb anderer topologischer Ansätze. Ein weiterer Aspekt ist die nötige Robustheit gegenüber transienten Überspannungen des Netzes. Die meisten Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis weisen hier eine inherente Unempfindlichkeit auf, indem eine Spannungsbegrenzung der Halbleiter-

elemente durch Clamping am Zwischenkreis erfolgt. Dies ist in der Regel bei Ansätzen nach Bild 1 nicht der Fall.

3.2 PV-Wechselrichter mit Blindleistungsfähigkeit

Blindleistungsfähigkeit heißt, dass die momentane Energieflussrichtung des Wechselrichters wechseln kann. Der einfachste Ansatz hierfür erfolgt über unipolare DC/DC-Wandler, die einen bi-direktionalen Stromfluss zulassen. Wenn dann in einer Brückenschaltung mit einem kapazitiven Spannungsteiler für die DC-Spannung auf das Netz eingespeist wird, hat man allgemein eine Topologie mit bipolarer (Differenz-) Ausgangsspannung und beliebig einstellbarer Stromrichtung (Bild 2).

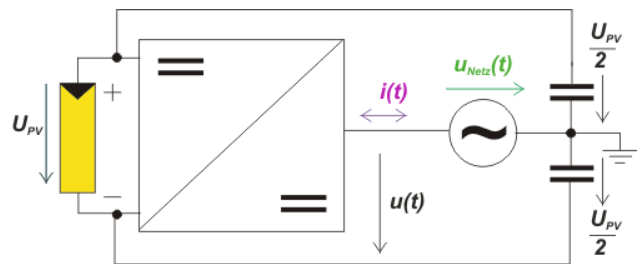


Bild 2 Topologie für $\cos\varphi=-1\dots+1$ mit einem bi-direktionalen DC/DC-Wandler + geteiltem Zwischenkreis

Im einfachsten Fall liefert dieser Ansatz einen Spannungswechselrichter in Halbbrückenschaltung (2-Punkt). Da hier die Halbleiterelemente und magnetischen Bauteile mit hohen Spannungsdifferenzen beaufschlagt werden, liegt der Einsatz von Wandlern in 3-Punktschaltung nahe. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten, die auch praktisch genutzt werden [z. B.6, 7, 8]. Der Scheitelwert der Netzspannung muss bei dieser Umsetzung des topologischen Ansatzes immer kleiner als die halbe DC-Eingangsspannung sein. Dies schränkt den Einsatzbereich ein. Daher wurde nach Möglichkeiten gesucht, Wechselrichter mit bi-direktionalen DC/DC-Wandlern mit hoch-/tiefsetzendem Verhalten für die Netzeinspeisung zu entwickeln [9]. Gleiches Ziel verfolgt auch die in [10] vorgestellte, auf einem Impedanznetzwerk beruhende Lösung. Das hoch-/tiefsetzende Verhalten wird in allen Fällen mit einer weiteren Erhöhung der Spannungsbelastung der Schalter. Allgemein führen Wechselrichter in Halbbrückenschaltung bei 1-phasigen Anwendungen zu relativ hohen Spannungsbelastungen der Schalter, da die Spannung im Arbeitspunkt (*MPP*, *maximum power point*) des Generators mindestens das Doppelte des Scheitelwerts der Netzspannung betragen muss.

Abhilfe schafft hier der Einsatz von 2 bi-direktionalen DC/DC-Wandlern in Brückenschaltung (Bild 3). Dies ist sowohl bei Spannungs-, Strom- als auch Impedanzzwischenkreis möglich und führt generell zu einer Halbierung der Spannungsbelastung der Schalter im Vergleich zur Halbbrückenvariante. Die Verwendung von Wechselrichterschaltungen mit Strom-Zwischenkreis führt auf intermittierende Ströme im Ausgang des Wechselrichters und so-

mit zur Notwendigkeit eines kapazitiv dominierten Filters mit den bereit genannten Nachteilen. Vorteilhaft kann jedoch das hoch-/tiefsetzende Verhalten bei nur einer Wandlerstufe und geringen Aufwendungen für Messung und Steuerung sein.

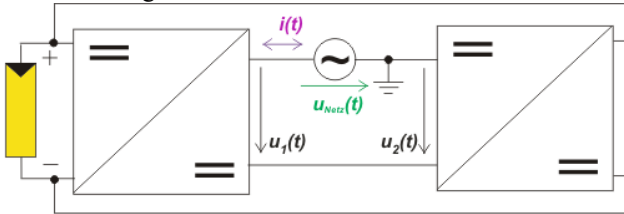


Bild 3 Topologie für $\cos\varphi=-1\dots+1$ mit zwei bidirektionalen DC/DC-Wandlern in Brückenschaltung

4 Generatorseitige Anforderungen an PV-Wechselrichter

Durch den modularen Aufbau der Photovoltaikgeneratoren aus Zellen mit $U_{MPP}\sim 0,5V$ und typischen Nennströmen $I_{MPP}\sim 3..15A$ und die unterschiedlichen Installationsgegebenheiten auf Gebäuden ergibt sich eine große Gestaltungsvielfalt für Anlagen selbst bei Standard-Test-Bedingungen (*standard test conditions, STC*, heißt u. a.: $1000W/m^2$, $25^\circ C$, terrestrisches Solarspektrum). Aber auch bei einem fertig dimensionierten Solargenerator erhält man durch hohe Temperaturkoeffizienten im Bereich $-0,3\dots 0,5\%/K$ einen weiten Ausgangsspannungsbereich. Bei einer Nutzungstemperatur von $-25^\circ C\dots +85^\circ C$ ergibt sich somit u. U. ein Betriebsspannungsbereich gegenüber STC von $+25\%$ bis -30% .

Hinzu kommen Variationen des Betriebsspannungsbereichs auf der Gleichstromseite, die aus der unterschiedlichen Form der Belastungskennlinien des Photovoltaikgenerators herrühren (Bild 5). Da als maximale Gleichspannung (Leerlauf) für den PV-Generator $1000V$ auch bei niedrigen Temperaturen nicht überschritten werden sollte, ergibt sich in der Regel die Forderung nach Wechselrichtertopologien mit hoch- und tiefsetzendem Verhalten (zurzeit wird in Deutschland eine Anhebung der zulässigen PV-Leerlaufspannung auf $1500V$ diskutiert.)

Die früheren Photovoltaikgeneratoren wurden über einen Transformator isoliert vom Netz betrieben, was zusätzliche Verluste im Transformator und damit geringere Wirkungsgrade zur Folge hatte ($-1\dots -1,5\%$). Bei einer typischen Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren bei einem typischen jährlichen Ertrag von $800\dots 900kWh/kWp$ führt dies zu einem deutlichen Minderertrag. Daher wurden zunehmend Wechselrichter ohne isolierenden Transformator auf den Markt gebracht. Weil der Ausgangsstrom ins Netz bei diesen Wechselrichtern über Pulsweiten-Modulation (PWM) geregelt wird, sind bei diesen Anlagen neben Netzrückwirkungen auch Wirkungen auf die Umgebung möglich.

Dies soll Bild 5 verdeutlichen. Schematisch dargestellt ist ein Pulswechselrichter in Brückenschaltung, dessen Gleichspannungszwischenkreis mit dem PV-Generator verbunden ist. Je nach gewähltem Pulsmuster für die

Schalter kann dies mehr oder weniger starke Potential-sprünge am FV-Generator zu Folge haben. Die parasitären Kapazitäten des Generators werden dabei umgeladen, so dass hochfrequente Ableitströme in die Umgebung die Folge sind.

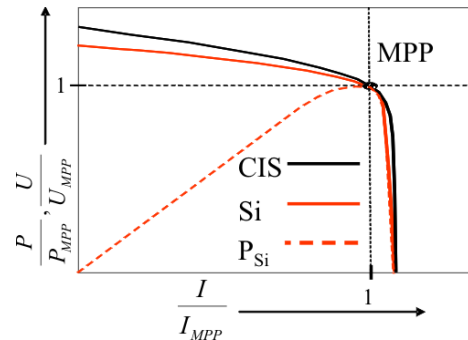


Bild 4 Beispiele für normierte Kennlinien von photovoltaischen Generatoren aus poly-Si [11] und CIS [12]

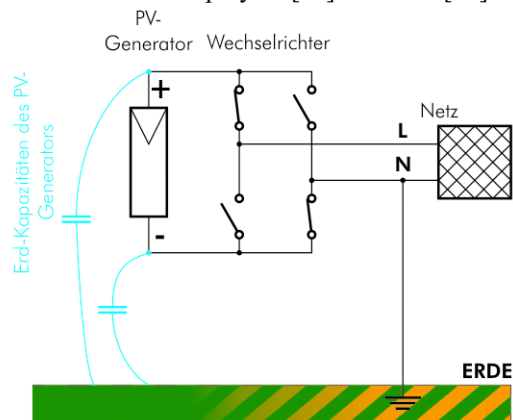


Bild 5 Stark vereinfachtes Schema zur Veranschaulichung der Wirkung der Erd-Kapazitäten des PV-Generators [13]

Je nach Generataraufbau, Aufständigung und Oberflächenbenetzung mit Wasser können die parasitären Kapazitäten relativ groß sein ($2\dots 100nF/kWp$, bei Dünnschichtmodulen bis $1\mu F/kWp$ [13]), so dass erhebliche HF-Ableitströme in die Konstruktion fließen können. Beim Einfügen eines Transformators liegen die Koppelkapazitäten der Wicklungen in Serie mit den parasitären Kapazitäten des Generators und mindern so die Ableitströme. Es ist jedoch auch möglich, die Ableitströme durch den Einsatz geeigneter Topologien und Pulsmuster zu minimieren oder zu eliminieren. Flankierend werden häufig Filter zwischen PV-Generator und Wechselrichtertopologie eingesetzt. Diese Filter haben auch die Aufgabe, die Leistungselektronik vor atmosphärisch verursachten Überspannungen seitens des Generators zu schützen.

In einigen Ländern ist durch die Anschlussregeln für das öffentliche Netz die Erdung des PV-Generators gefordert. Hinzu kommt noch z. B. in den USA die Forderung nach einer permanenten Überwachung dieser Erdung [15,16]. Außerdem gerieten seit der deutlichen Zunahme des Einsatzes von photovoltaischen Dünnschichtmodulen die Degradationseigenschaften dieser Module, die sich zum Teil offensichtlich von den kristallinen Siliziummodulen unterscheiden [17], auch in den Fokus des Interesses bei der

Entwicklung leistungselektronischer Energiewandler. Es ist offensichtlich so, dass bei PV-Modulen unterschiedlichen Aufbaus je nach Potential der DC-Anschlüsse ein unterschiedliches Degradationsverhalten zu beobachten ist. Bei Energiewandlern mit isolierendem Transformator führt dies zu keinen besonderen Problemen. Bei den hocheffizienten Wechselrichteranordnungen ohne Transformator kann ein größeres Problem entstehen, wenn eine Erdung des PV-Generators gefordert wird und diese auch noch hinsichtlich der Polarität der Anschlüsse frei wählbar sein soll. Hier ist eine neue treibende Kraft zur Entwicklung entsprechender Topologien entstanden.

5 Wandlerstrukturen zur Erfüllung der generatorseitigen Anforderungen

Die hier behandelten Problemlösungen beziehen sich auf die Begrenzung bzw. Vermeidung der HF-Ableitströme des PV-Generators sowie die Problematik der Erdung. Offensichtlich lassen sich Ableitströme über den Rahmen des PV-Generators praktisch vermeiden, wenn man die Potentiale seiner DC-Anschlüsse festlegt. Die in [4,5] vorgestellten Lösungen gehen diesen Weg. Es handelt sich dabei um Topologien mit tiefsetzendem bzw. hoch-/tiefsetzendem Übertragungsverhalten. Durch einen hinreichend großen Pufferkondensator wird die Spannung am Ausgang des PV-Generators trotz der fluktuierenden Leistungsabgabe beim einphasigen Anschluss praktisch konstant gehalten, so dass Ableitströme über die parasitären Erdkapazitäten des Generators sich nicht einstellen können. Die Potenzialverhältnisse zeigt exemplarisch Bild 6.

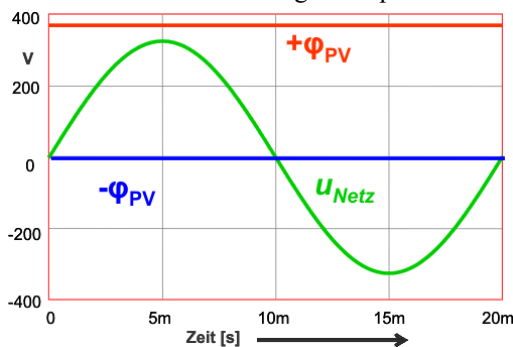


Bild 6 Potenzialverhältnisse bei den Topologien nach [4,5] im netzgekoppelten Betrieb

Eine weitere Möglichkeit besteht in der symmetrischen Fixierung der Potentiale der DC-Anschlüsse des PV-Generators entsprechend dem in Bild 2 gezeigten Wandler-typ. Wird dem DC/AC-Converter ein DC/DC-Wandler vorgeschaltet um die Eingangsspannungsschwankungen auszugleichen, kann die Symmetrie der Anschlusspotentiale verloren gehen. Nach bisherigen Erkenntnissen hat diese jedoch keinen besonderen technischen Wert. Eine Symmetrie sichert lediglich eine minimale Spannungsdifferenz des PV-Generators gegenüber Erdpotential. Bild 7 zeigt die entsprechenden Verhältnisse. Die Ladeströme der Erdkapazitäten des PV-Generators werden praktisch nur

durch die Rest-„Brumm“-Spannung der Zwischenkreiskapazitäten bestimmt.

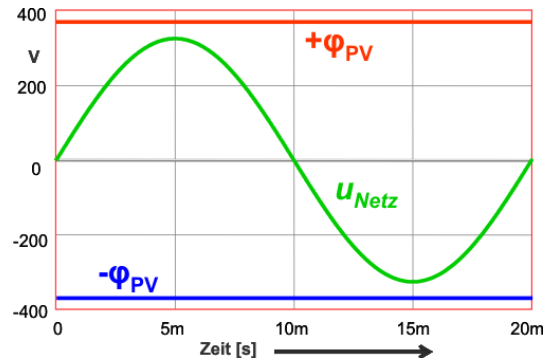


Bild 7 Potenzialverhältnisse bei den Topologien nach Bild 2 im netzgekoppelten Betrieb

Die Lösungsvariante nach Bild 7 hat den Nachteil, dass die Zuordnung des PV-Generators zu einem Vorzugspotenzial gegenüber Erde nicht gegeben ist. Hier kann man durch die in Bild 8 gezeigte Schaltungstopologie mit einem bipolaren DC/DC-Wandler Abhilfe schaffen. Das Spannungsniveau des Zwischenkreises wird gleichzeitig von der PV-Generatorspannung entkoppelt und so der Eingangsspannungsbereich erweitert. Für die Ausführung derartiger bi-polarer Wandler sind verschiedene Lösungen erarbeitet worden [6,14,20]. Es gibt darunter transformatorlose Varianten, die sowohl eine Erdung des positiven als auch des negativen Generatoranschlusses ermöglichen.

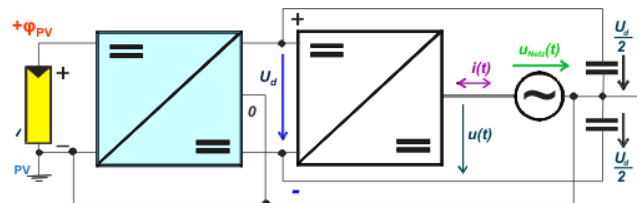


Bild 8 Einseitige Erdung des PV-Generators durch Einfügen eines DC/DC-Wandlers mit bi-polarem Ausgang

Betrachtet Brückenschaltungen zur einphasigen Netzeinspeisung von Strom, so erhält man bei vollständig symmetrischem Aufbau (z. B. auch 2 Glättungs-drosseln in den beiden Ausgängen) und symmetrischer Taktung einen Zustand, der Potentialsprünge am PV-Generator vermeidet (Bild 9).

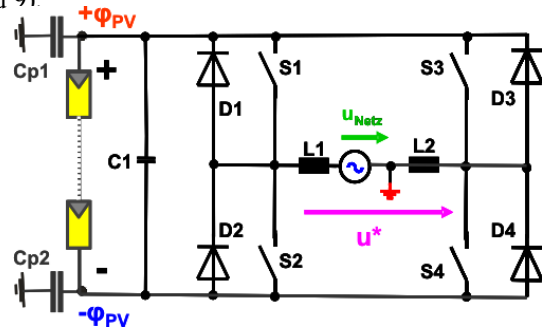


Bild 9 Schaltschema für einen symmetrischen Brückenwechselrichter (B2I) mit „schwimmendem“ Spannungszwischenkreis

Bei einem derartigen „schwimmenden“ Spannungszwischenkreis werden die (parasitären) Kapazitäten des PV-Generators C_{p1} und C_{p2} gegen Erde während der verschiedenen Schaltzustände geladen und entladen und speichern die aufgenommene Ladung ähnlich wie in einer Abtast-Halte-Schaltung. Die Ladeströme von C_{p1} und C_{p2} lassen sich leicht durch stromkompensierte Drosseln in den DC-Leitungen von C_1 zum PV-Generator begrenzen. Für die Potenziale der DC-Anschlüsse lässt sich feststellen (Bild 10):

$$+ \varphi_{PV} = 0,5(u_{Netz} + U_{PV})$$

$$- \varphi_{PV} = 0,5(u_{Netz} - U_{PV})$$

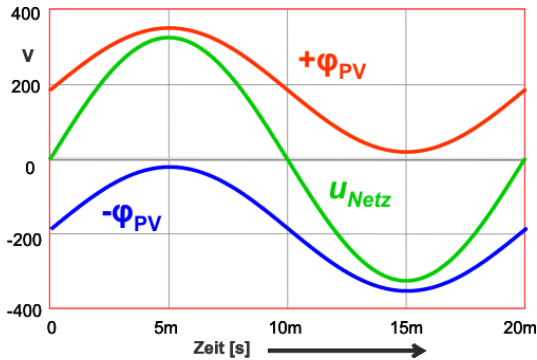


Bild 10 Potenzialverhältnisse an einem symmetrischen Brückenwechselrichter (B2I) mit „schwimmendem“ Spannungszwischenkreis

Dies funktioniert jedoch nur bei symmetrischer Ansteuerung der Schalterpaare $S1\&S4$ sowie $S2\&S3$. Gerade bei $\cos\varphi=1$ wäre jedoch auch eine unsymmetrische Taktung für den Wirkungsgrad von Vorteil, da dann die Schaltverluste nur eines Schalters wirksam werden.

Um auch in diesem Fall ein Verhalten wie in Bild 10 zu erreichen, erfolgt die hochfrequente Taktung derart, dass der PV-Generator während einer Netz-Halbperiode symmetrisch und synchron von 2 Schaltern beim Ausschalten vom Netz getrennt wird. Der interne Freilauf und die Polarität der Ausgangsspannung werden in der restlichen Wechselrichterschaltung sichergestellt. Dadurch teilt sich die Kommutierungsspannung auf 2 in Serie liegende Schalter auf, so dass die Schaltverluste denen eines einzigen Schalters entsprechen. Wie bei der symmetrischen Taktung der einfachen B2I werden die Erdkapazitäten beim Schließen der beiden HF-getakteten Schalter ähnlich einer *Sample&Hold* Schaltung nachgeladen, so dass sich der bereits in Bild 9 gezeigte Potenzialverlauf ergibt. Zu diesem allgemeinen Prinzip wurden bislang 2 Schaltungstopologien veröffentlicht und genutzt (HERIC[®] [18], Bild 11; H5[®] [19]). Sie führten zu den Produkten mit den bislang höchsten Wirkungsgraden. In Bild 11 erfolgt die HF-Taktung paarweise über die Schalter $S1\&S2$ bzw. $S3\&S4$, während in Abhängigkeit von der Ausgangspolarität der innere Freilauf der Schaltung mit $S5$ bzw. $S6$ umgeschaltet wird. In Bild 12 wird die HF-Taktung durch die Paare

$S2\&S5$ oder $S4\&S5$ ausgeführt, während der Freilauf über $S1$ und $S3$ gesteuert wird.

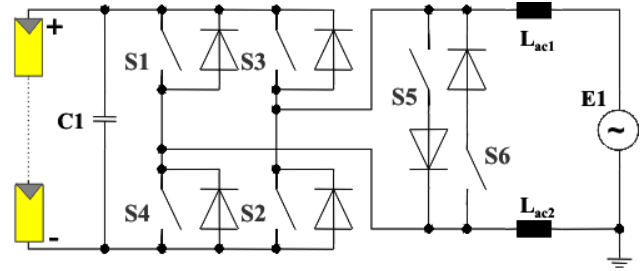


Bild 11 Aufbau der HERIC[®]-Topologie [18]

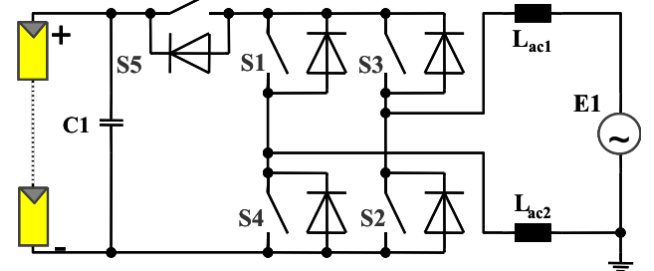


Bild 12 Aufbau der H5[®]-Topologie [19]

6 Gütekriterien zur Einschätzung von Topologien zur Energie-wandlung

Gewöhnlich lässt sich eine Aufgabe zur elektrischen Leistungsumformung durch verschiedene Topologien lösen. Daher ist es sinnvoll, Methoden für den Vergleich verschiedener Topologien zu entwickeln. Ohne einen Musteraufbau lassen sich Wirkungsgrad, Herstellungskosten etc. nur schwer vergleichen. Aber es gibt Indikatoren, die mit einem gewissen Unsicherheitsbereich Vergleiche zulassen. Dies sind z. B. Anzahl der HF und LF Schalter, Ordnung des zu regelnden Systems, Spannungsbelastung der Schalter, Scheinleistung passiver Bauelemente, Energieinhalt von Speichern etc.. Ein weiterer Ansatz zum Vergleich von Schaltungstopologien gerade im Bereich der Wandler für Energieversorgungssysteme ist der Vergleich der Leitungs- und Schaltverluste von Topologien für gleiche Nenn-Leistung. In [14] wurde dafür eine Vorgehensweise vorgestellt. Indem man die Belastungswerte für die aktiven Schalter und Dioden auf charakteristische Größen normiert, erhält man aussagekräftige Vergleichsparameter, die ein Maß für die zu erwartenden Verluste sind. Ein solcher Indikator lässt sich z. B. aus der quadratischen Summe der effektiven Ströme aller Halbleiterelemente bilden, die man dann auf den Eingangs- oder Ausgangsstrom normiert. Ist die Bemessungsspannung nicht für alle Elemente gleich, kann man diesen Einfluss durch eine Wichtung der Ströme berücksichtigen. Im Allgemeinen steigt der spezifische Widerstand von Chips mindestens proportional zu ihrer Bemessungsspannung. Gleiches gilt für die Schaltverluste. Diese sind proportional zum Produkt aus geschaltetem Strom und Kommutierungsspannung, was auf die Ausgangsleistung normiert werden kann. Eine

Wichtung entsprechend unterschiedlicher Bemessungsspannungen ist auch hier möglich. Bild 13 zeigt einen Vergleich der symmetrisch getakteten Brückenschaltung B2I mit den für die transformatorlose Netzeinspeisung entwickelten Topologien HERIC und H5. Der Berechnung liegen bei der Wichtung die Annahmen zu Grunde, dass sowohl der spezifische Chipwiderstand als auch die spezifischen Schaltverluste proportional zur Nennspannung der Schalter steigen. Bild 13 zeigt die Ergebnisse der Kennzahlberechnung für den Fall, dass alle Schalter die gleiche Bemessungsspannung haben.

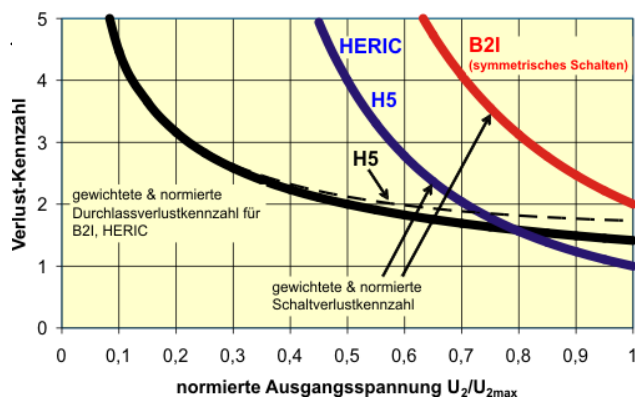


Bild 13 Theoretischer Vergleich der Topologien B2I, HERIC[®] und H5[®]

Es wird aus der grafischen Darstellung deutlich, dass unter diesen Bedingungen hinsichtlich der Durchlassverluste alle 3 Schaltungen identisch abschneiden. Hinsichtlich der Schaltverluste hat wegen der besonderen statischen Spannungsaufteilung die H5-Topologie eindeutige Vorteile.

7 Ausblick und Zusammenfassung

Stimuliert durch eine hohe Wachstumsrate des PV-Marktes hat sich eine Vielzahl von schaltungstechnischen Ansätzen entwickelt, die einen hohen Wirkungsgrad bei der Einspeisung von Wirkleistung in das Verbundnetz ermöglichen [6, 14, 21]. So halbierten sich seit 1995 alle Jahre die Verluste kommerzieller Wechselrichter, so dass 2005 ein Wirkungsgrad von 98% eingestellt werden konnte [22]. Sinkende Kosten für PV-Generator und sinkende Einspeisevergütung wird die herausragende Stellung des Wirkungsgrads als technischer Zielparameter schwächen. In den Vordergrund werden Herstellungskosten und *life cycle costs* sowie die Fähigkeit zur Netzstützung treten. Auch dies ist bei einem hohen Wirkungsgrad von 98-99% eine große technische Herausforderung. Blindleistungsfähigkeit führt zu anderen Belastungen der Halbleiterelemente. Um über den gesamten Scheinleistungsbereich eines Wechselrichters niedrige Verluste zu garantieren, sind weiterhin neue schaltungstechnische Lösungen zu erwarten. Insbesondere Lösungen, die die Vorzüge von Si- und SiC-Bauelementen für die neuen Aufgaben vereinigen, sind zu erwarten.

8 Literatur

- [1] VDN: Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz 12. 9. 2007
- [2] Zacharias, P.: Wechselrichter für die Solartechnik. Symposium PV-Solarenergie. Staffelstein 2008
- [3] DE 42 43 206 A1, WO 2006/00652 A1, WO 2006/032694 A1, US 7 319 313 B2
- [4] DE 10 2005 046 379 A1, DE 10 2007 030 577.1, WO 2005/122371 A2, DE 197 32 218 C1, EP 1 950 876 A2
- [5] DE 196 42 522 C1, WO 03/0412248 A2
- [6] Burger, B.: Photovoltaic Inverters for Grid Connection. Power Electronics for Photovoltaics. Intersolar Conference Munich 2008
- [7] US 4 670 828
- [8] Calais, M.; Agelidis, V. G. and Meinhardt, M.; "Multilevel Converters Single-Phase Grid Converter for Photovoltaic System", J, Solar energy, Vol. 66, No. 5, pp. 325-335, 1999
- [9] Myrzik, J.: Topologische Untersuchungen zur Anwendung von tief-hochsetzenden Stellern für Wechselrichter. Dissertation. Kassel 2000
- [10] DE 10 2007 038 960.6
- [11] Kyocera, Datenblatt KC60
- [12] Wächter, R.; Powalla, M.: Pilotproduktion von CIS-Dünnschichtsolarmodulen: Status und TCO-Aspekte. FVS-Workshop 2002, Proceedings S. 126
- [13] Bendel, C. et al.: Sicherheitsaspekte bei dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen - SIDENA – Abschlussbericht BMU-Projekt FKZ 0329900C, Kassel 2006
- [14] Zacharias, P. (Herausgeber): Use of Electronic-Based Power Conversion for Distributed and Renewable Energy Sources. ISET 2008, Kassel
- [15] Real Decreto 1663/2000, de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión;
- [16] M. Earley et al., National Electrical Code Handbook, 10th Edition, National Fire Protection Association, USA, 2005, pp. 1022. - UL 1741 §31
- [17] H. Schmidt, B. Burger, K. Kiefer: "Welcher Wechselrichter für welche Modultechnologie?", 21. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, März 2006.
- [18] DE 10 22 192A1
- [19] DE 10 2004 030 912B3
- [20] DE 10 2007 028077.9, US 2007 0047277A1, EP Az. 070 15324.2
- [21] Li, Quan, Wolfs, P.: A Review of the Single Phase PV Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC link Configurations. IEEE Trans. on Power Electronics, V.23,3(2008), pp.1320
- [22] Meinhardt, M.: Vorlesungsskript. Uni Kassel
- [23] ISET: 99% Wandlerwirkungsgrad für Photovoltaikwechselrichter erreicht. Pressemitteilung ISET. März 2008