

# Eigenschaften von transformatorlosen Photovoltaikwechselrichtern

Michael Patt, Oelmaier Industrieelektronik, 88416 Ochsenhausen, Deutschland, michael.patt@oelmaier-elektronik.de

## Kurzfassung / Abstract

Es wird auf die Unterschiede von trafobehafteten und traflosen Wechselrichtern und die daraus resultierenden, wesentlichen Merkmale eingegangen. Die kapazitiven Umladeströme, hervorgerufen durch die im Solargenerator befindlichen Kapazitäten machen eine bipolare Taktung bei der H-Brücke oder eine andere Topologie notwendig. Daraus resultieren auch unterschiedliche Belastungen in den passiven Bauelementen. Hier wird im Wesentlichen auf die Zwischenkreisströme eingegangen.

Keywords: Unterschiede zwischen traflosen und trafobehafteten Wechselrichtern. Umladeströme durch Kapazitäten des Solargenerators H-Brücke mit bipolarer Taktung, Belastung passiver Bauelemente

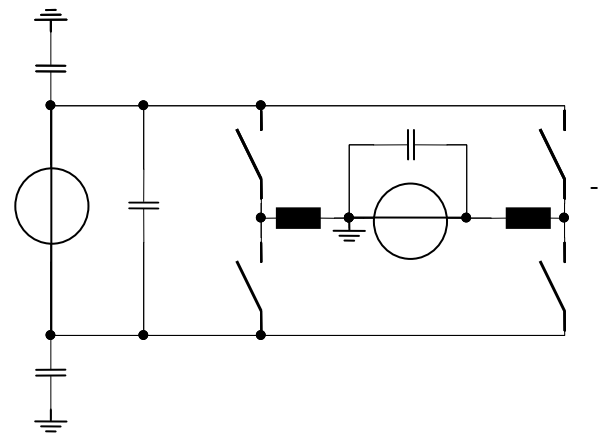
## 1 Einführung

Photovoltaikwechselrichter dienen der Einspeisung der Solarenergie in das Netz der Energieversorgungsunternehmen. Die PV-Wechselrichter sind fast immer vom Spannungseinprägenden Typ. Ein bedeutender Kostenfaktor ist der Transformator, der in niederfrequenter oder mittelfrequenter Bauweise ausgeführt sein kann und zur Verlustleistungserhöhung beiträgt. Wenn keine Potenzialtrennung gefordert ist, dann kann auf den Trafo verzichtet werden. Der Trafo kann aber zur Spannungsanpassung dienen, oder er kann erforderlich sein, wenn Solargeneratormodulhersteller vorschreiben den negativen Pol des Solargenerators zu erden. Stromeinprägende WR sind nur dreiphasig sinnvoll einsetzbar [1]. Einzelne, unabhängige einphasige Wechselrichter sind bis zu einer Leistung von 5kW erhältlich. Werden die Wechselrichter für Netzdienstleistungen, z.B. Blindleistungskompensation verwendet, dann weichen die Belastungen der passiven Bauelemente von denen mit Wirkleistungseinspeisung ab.

Ein zweiter Kostenfaktor ist der Zwischenkreiskondensator (ZK-) in den verschiedenen Topologien. Um eine lange Lebensdauer gewährleisten zu können ist die Kenntnis der ZK-Ströme notwendig. Im ersten Teil wird der ZK-Strom in der H-Brücke, und in den nächsten Teilen wird auf WR-Halbbrücken eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse der Betrachtungen verglichen.

### 1.1 Spannungseinprägende H-Brücken-WR

Die Erdkapazitäten des großflächigen Solargenerators bilden mit den beiden Ausgangsdrosseln eine kompensierende Parallelschaltung, wenn bipolare Taktungsart angewendet wird. Die Eliminierung des Trafos kann bei Vollbrückenschaltungen erfolgen, wenn bipolare Taktung angewandt wird, oder wenn der Freilauf unabhängig vom Solargenerator erfolgt. Als Beispiele seien hier der HERIC und der H5 genannt.



**Bild 1:** Solarwechselrichterersatzschaltung mit Erdkapazitäten und Filterbauelementen  $L_p$  und  $C_p$

Wie in Bild 1 zu sehen ist, besteht er Leistungsteil eines PV-Wechselrichters aus einem Filter an der AC-Seite, der WR-Brücke und dem Eingangsfilter, bestehend aus einer großen Kapazität. Die maximale Grundschiwingung der Wechselrichterausgangsspannung ist durch die Zwischenkreisspannung und den maximalen Aussteuergrad  $a_{max}$  begrenzt. Aus Bild 2 erkennt man die notwendige Größe der Grundschiwingung der Wechselrichterausgangsspannung. Mit der maximal möglichen Aussteuerung  $a_{max}$  ergibt sich dann die minimale der PV-Spannung unter Vernachlässigung der Ventildurchlaßspannungen und der ohmschen Anteile zu:

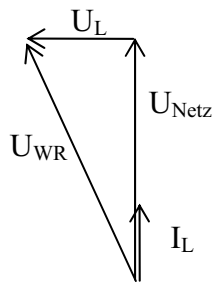
$$U_{PV} > \frac{\sqrt{2}}{a_{max}} \cdot \left| (I_L + U_{Netz} \cdot j \cdot \omega \cdot C_P) \cdot j \cdot \omega \cdot L_P + U_{Netz} \right|$$

mit

$$a := \frac{U_{Netz} \sqrt{2}}{U_{PV}}$$

Die gebräuchlichen Werte für die Filterbauelemente liegen bei traflosen Wechselrichtern mit bipolarer Taktungsart (Taktfrequenz  $f_t=18\text{kHz}$ ) bei  $L=4\text{-}8\text{mH}$  und  $C=5\mu\text{F}$ . Dar-

aus ergibt sich eine Grundschwingungsphasenverschiebung zwischen Wechselrichterausgangsspannung und -strom von ca. 10-20°, was im Bild 2 zu sehen ist.



**Bild 2** Grundschwingungszeigerbild für  $I_{CP} \gg I_{Netz}$

### 1.1.1 Berechnung des Zwischenkreiskondensatorstromes

Zuerst wird bei der Berechnung der ZK-Ströme angenommen, dass die Kondensatoren unendlich groß sind. Somit erfolgt keine Rückwirkung des Kondensatorstromes auf die -Spannung. Weiterhin kann wegen der Leitungslänge zwischen dem ZK-Kondensator und PV-Generator angenommen werden, dass nur niederfrequente Stromober-schwingungen in der Zuleitung vorhanden sind. Der AC-Strom sei rein sinusförmig. Aus dem niederfrequenten Strom kann dann anschließend eine Spannungsschwankung ermittelt, die wiederum eine Schwankung des Stromes aus dem PV-Generator zur Folge hat. Die Ströme sind auf den Scheitelwert des sinusförmigen Laststromes normiert.

Die Augenblickswerte der Leistungen an der Eingangsseite und Ausgangsseite sind bei einem speicher- und verlustfreien Wechselrichter stets gleich groß:

$$p_e(t) = p_a(t)$$

Aus der daraus gebildeten, mit zweifacher Netzfrequenz schwingenden Augenblicksleistung, kann der PV-Strom ermittelt werden, welcher aus Mittelwert  $i_{PV}$  und mit doppelter Netzfrequenz schwingende Wechselanteil  $i_{PV-}(t)$  besteht.

$$p_a(t) = E \cdot (i_{dAV} + i_{RMS}) = u_p(t) \cdot i_p(t)$$

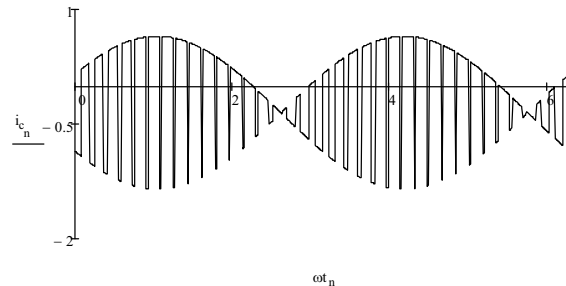
Mit dem Augenblickswert des PV-Stromes und der Summe der Ströme in den oberen Schaltelementen ist es nun möglich, den ZK-Strom zu berechnen.

Der ZK-Kondensator hat Einfluss auf die entnehmbare Leistung der PV-Module, da diese eine nichtlineare Strom- und Spannungskennlinie besitzen. Der Strom mit doppelter, und ggf. einfacher Netzfrequenz bewirkt eine Leistungspendelung um den MPP-Punkt herum [2]. Deshalb

wird der ZK-Kondensator so dimensioniert, dass eine maximale Spannungsschwankung von 2% um den Mittelwert der PV-Spannung stattfindet. Diese Spannungsschwankung hat im ungünstigsten Fall, d.h. bei kleinstmöglicher PV-Spannung eine Stromschwankung von ca. 10% zur Folge.

## 1.2 ZK-Strom bei trafolosen WR mit bipolarer Taktung

Die bipolare Taktung ermöglicht nur Arbeits- und Rückarbeitsbereich, d.h. der Wechselrichterinterne Blindleistungsfluss ist hier hoch. Im Bild 3 ist der fehlende Freilaufstrom erkennbar, weil zu keiner Zeit der ZK-Strom konstant ist.



**Bild 3** Zwischenkreiskondensatorstrom bei bipolarer Taktung

Der Effektivwert ist hier unabhängig von der Aussteuerung und vom Grundschwingungsphasenwinkel und beträgt

$$I_C := \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Der Effektivwertanteil mit doppelter Netzfrequenz ist nur von der Aussteuerung abhängig und unabhängig vom Grundschwingungsphasenwinkel. Er beträgt:

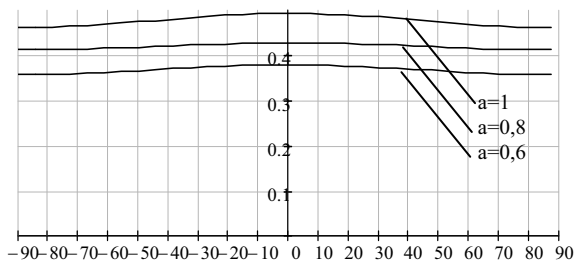
$$I_{C2} := \frac{a}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

## 1.3 ZK-Kondensatorstrom bei trafolosen WR mit unipolarer Taktung

Bei der unipolaren Taktungsart, wie beim H5 und Heric und Trafowechselrichtern gibt es neben Arbeits- und Rückarbeitsbereich auch den Freilaufbereich. Während dem Freilaufbereich ist der ZK-Kondensatorstrom Null. Der Wechselrichterinterne Blindleistungsfluss ist kleiner. Durch das zusätzlich mögliche Potenzial Null kann die Induktivität im Ausgangsfilter, bei gleichem Stromrippel, im Gegensatz zur bipolaren Taktung mit dem halben Wert ausgelegt werden. Die Verluste in der Induktivität und die Bauleistung sind näherungsweise halb so groß [3].

Wie in Bild 4 zu erkennen ist, ist der Effektivwertstrom bei unipolarer Taktungsart nahezu unabhängig vom Grundschwingungsphasenwinkel, er wird jedoch mit stei-

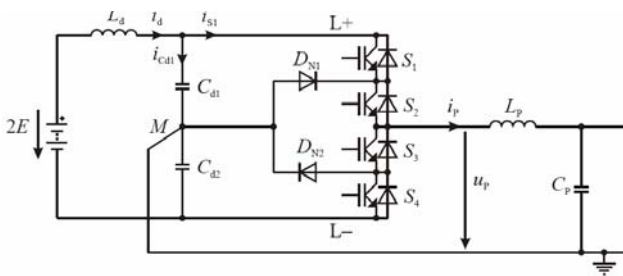
gender Aussteuerung  $a$  größer und erreicht sein Maximum bei  $0^\circ$ .



**Bild 4** Normierter Effektivwert des ZK-Kondensatorstromes in Abhängigkeit des Grundswingungsphasenwinkels und mit der Aussteuerung  $a$  als Parameter.

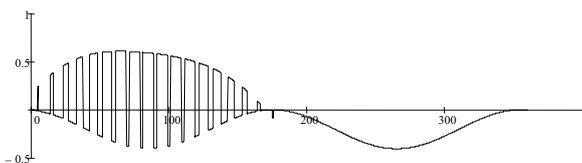
## 2 ZK-Strom im NPC-PV-Wechselrichter

In der Neutral-Point-Clamped-Schaltung (NPC-) sind vier Schaltelemente in Reihe geschaltet, was in Bild 5 zu erkennen ist. Zwei zusätzliche Dioden verbinden den Ausgang mit dem Mittelpunkt des ZK-Kondensators. Hier teilt sich die PV-Spannung symmetrisch auf die Erdkapazitäten auf, da diese nun hart parallel zum Teil-ZK-Kondensator liegen.



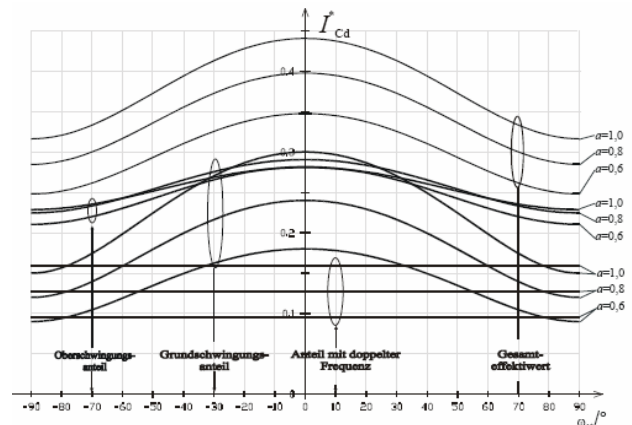
**Bild 5** Schaltung des NPC-PV-Wechselrichters

Wenn die Ausgangsklemme des Wechselrichters mit  $L+$  verbunden werden soll, müssen die beiden oberen Schaltelemente  $S_1$  und  $S_2$  eingeschaltet werden. Bei Freilauf werden die mittleren eingeschaltet und bei negativer Ausgangsspannung die beiden unteren. Die gesamte Gleichspannung teilt sich auf jeweils zwei Schaltelemente auf. Die Stromwärmeverluste in den Halbleitern sind durch die Aufteilung auch kleiner, der Stromfluss in einem Bauelement findet nur in einer halben Netzperiode statt, was Bild 6 deutlich macht.



**Bild 6** Strom im oberen ZK-Kondensator im NPC-Inverter

Eine höhere Schaltfrequenz ist im Gegensatz zur H-Schaltung auch zu erreichen. Nachteilig ist die hohe ZK-Spannung, die einen Spartrafo oder eine Hochsetzer erforderlich machen.

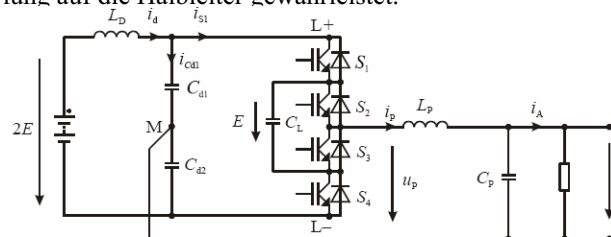


**Bild 7** Normierter Effektivwert des ZK-Kondensatorstromes in Abhängigkeit des Grundswingungsphasenwinkels und mit der Aussteuerung  $a$  als Parameter

Der maximale Strom im ZK-Kondensator tritt, wie in Bild 7 dargestellt, bei hoher Aussteuerung und geringem Phasenwinkel auf. Im ZK-Kondensator des NPC-WR fließt neben dem Anteil mit doppelter Netzfrequenz auch Strom mit einfacher Netzfrequenz, dessen Maximum mit 0,3 bei kleiner Phasenverschiebung liegt. Der Strom mit einfacher Netzfrequenz ist bei der Auslegung des ZK-Kondensators zu berücksichtigen. Der Anteil mit doppelter Frequenz ist hier auch unabhängig vom Phasenwinkel und steigt mit der Aussteuerung auf 0,17 an.

## 3 Dreipunkt-Wechselrichter nach Meynhardt und Foch

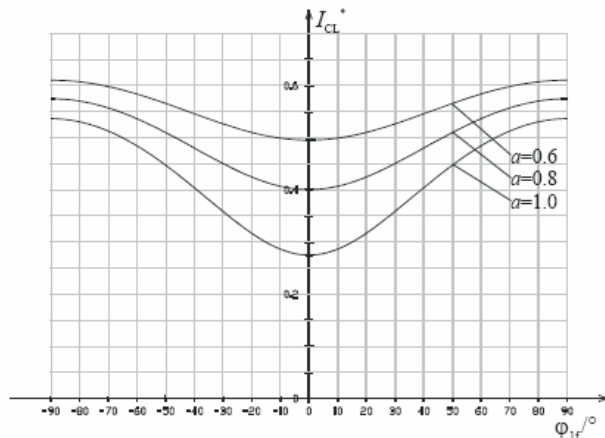
Eine weitere Schaltung für Wechselrichter mit unipolarer Taktung ist der Imbricated-Cell-Inverter (ICI) [4]. Die Nullarbeitsdioden des NPC-Wechselrichters sind durch einen Kondensator ersetzt worden. Unter der Annahme, dass der Clamp-Kondensator  $C_L$  mit der halben ZK-Spannung geladen ist wird eine gleiche Spannungaufteilung auf die Halbleiter gewährleistet.



**Bild 8** ICI-PV-WR

Der Vorteil der Schaltung, die in Bild 8 gezeigt wird, liegt beim modularen und kompakten Aufbau. Es ist möglich

über zwei Schaltkombinationen den Freilauf zu schalten. Der Clamp-Kondensator wird dann in Reihe der Plus oder Minusklemme geschaltet. Mit der Kenntnis des Laststromvorzeichens kann so die Spannung am Clamp-Kondensator stabilisiert werden.

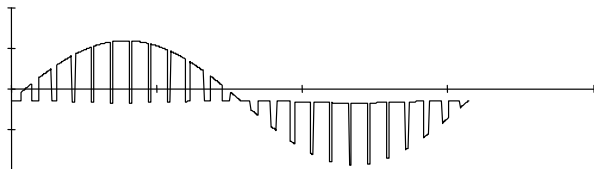


**Bild 9** Normierter Effektivwert des ZK-Kondensatorstromes in Abhängigkeit des Grundswingungsphasenwinkels und mit der Aussteuerung  $\alpha$  als Parameter

Das Minimum des Kondensatorstromes tritt hier bei kleinem Phasenwinkel auf, wie in Bild 9 zu sehen ist, und steigt mit sinkender Aussteuerung an. Der 50Hz Anteil ist unabhängig und beträgt die Hälfte des Netzstromes, also 0,5.

#### 4 ZK-Strom im 2L-VSI-PV-WR

Im Zweipunkt-Halbbrückenwechselrichter, (2L-VSI-) wie er z.B. von der Firma Conergy eingesetzt wird, werden nur zwei Leistungshalbleiter benötigt. Die Ausgangsspannung hat nur zwei Spannungsebenen und der Laststrom wird immer abwechselnd von einer Diode und einem Transistor geführt. Bei dieser Schaltung ist kein Freilauf möglich, die Leistungsbauelemente müssen die gesamte ZK-Spannung sperren. Durch die hochsperrenden Bauelemente sind hier nur geringere Schaltfrequenzen möglich.



**Bild 10** ZK-Kondensatorstrom im 2L-VSI

In Bild 10 ist der zeitliche Verlauf des ZK-Stromes vom ICI und der des 2LVSI zu sehen.

## 5 Zusammenfassung

PV-Wechselrichter werden Weltweit eingesetzt. Neben dem normalen Einpeisebetrieb werden Netzdienstleistungen, wie Blindleistungskompensation diskutiert.

Bei den Dreipunktwechselrichtern, sowie bei den H-Brückenschaltungen kann die Filterdrossel aufgrund der feineren Stufung der Ausgangsspannung kleiner ausgelegt werden. Durch die kleineren Ventilspannungen kann eine höhere Taktfrequenz erreicht werden, die dann nochmals eine kleinere Drossel zulässt.

Der ZK-Kondensator stellt einen hohen Kostenanteil dar und hat auf die Gesamtlebensdauer des Wechselrichters einen hohen Einfluss. Trotz des geteilten Zwischenkreises unterscheiden sich die Ströme in den Kondensatoren nur wenig. Jedoch muss bei Halbbrückenwechselrichtern mit mehr Kapazität durch den Stromanteil mit einfacher Netzfrequenz gerechnet werden. Der Strom mit einfacher Netzfrequenz ist bei dem NPC am geringsten, weil dort durch die Nullarbeitsdioden ein Anteil dieses Stromes fließt. Für niederfrequente Ströme müssen große Kapazitäten verwendet werden, deshalb wird die Schaltung aus Bild 5 interessant.

Den geringsten Schaltungsaufwand erfordert der 2L-VSI, jedoch entsteht durch den gegen den Mittelpunkt der in Reihe geschalteten Teil-ZK-Kondensatoren halbe Laststrom und durch die große Ausgangsdrossel ein wesentlicher Bauelementeaufwand.

## 6 Literatur

- [1] Henze, N.; Engler, A.; Zacharias P.: Photovoltaic module with integrated power conversion and interconnection system the European project PV-MIPS. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden, Germany, 04-08 Sept. 2006
- [2] Hinz, H.: Spannungseinprägender, einphasiger Dreipunkt-Wechselrichter für den transformatorlosen Netzparallelbetrieb von Photovoltaikanlagen. Dissertation Darmstadt, Shaker-Verlag 2000
- [3] Patt, M.: Wechselrichter für transformatorlose USV Anlagen. Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg. Fortschritt Berichte Reihe 21 Nr. 330 VDI Verlag Düsseldorf 2002
- [4] Foch, H.; Meynard; T.A.: Multi Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage Source Inverters. 23rd Power Electronics Specialist Conference (PESC), Toledo 1992, pp. 397-403