Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 23

Artikel: Wechselrichter für Photovoltaikanlagen mit Netzverbund

Autor: Schönholzer, E. T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904113

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Wechselrichter für Photovoltaikanlagen mit Netzverbund

E.T. Schönholzer

In den folgenden Ausführungen werden die verschiedenen Wechselrichterschaltungen, die zur Umwandlung von Solarzellengleichstrom in Netzwechselstrom geeignet sind, übersichtsmässig vorgestellt. Ihre wesentlichsten Eigenschaften werden beschrieben und verglichen. Es wird auf verschiedene Punkte eingegangen, die bei Netzverbund von besonderer Wichtigkeit sind: Netzsicherheit, Geräteschutz, Oberschwingungen. Ausserdem werden Wirkungsgrad und Kosten kurz betrachtet.

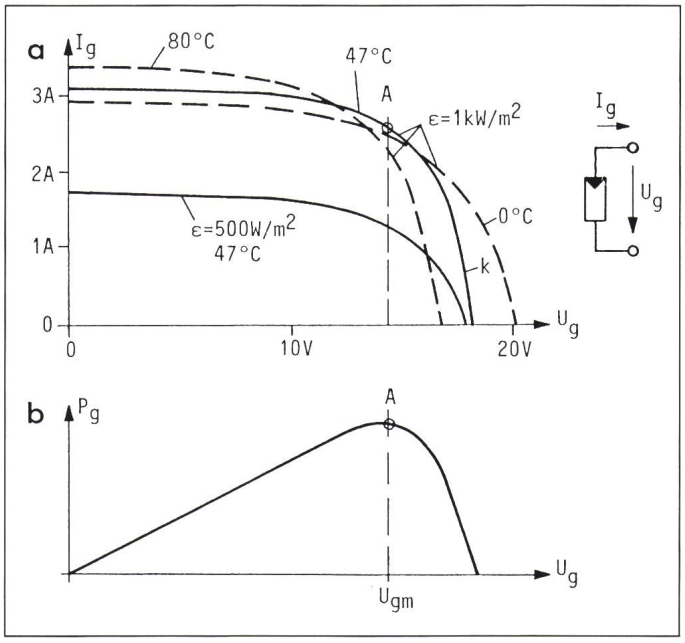
L'exposé présente succinctement les différents circuits onduleurs utilisables pour la conversion en courant alternatif du courant continu produit par cellules solaires. Leurs principales propriétés sont décrites et comparées. On discute certains points d'une importance particulière dans le cas d'interconnexions avec le réseau: sûreté du réseau, protection des appareils, harmoniques. Puis suit une brève considération du rendement et des coûts.

Adresse des Autors
Emil T. Schönholzer, dipl. El.-Ing. MSEE, Professor am Neu-Technikum Buchs (HTL), 9470 Buchs.

1. Einführung

Trotzdem Solarzellen immer noch recht teuer sind, existieren heute weltweit viele Photovoltaikanlagen. Die meisten arbeiten an abgeschiedenen Orten im Inselbetrieb (Satelliten, Relaissender, Alphütten usw.). Sie ersetzen dort das nicht zugreifbare Landesnetz. Daneben vermehrt sich jedoch auch stetig die Zahl von Anlagen, die als Kleinkraftwerke in das Netz einspeisen. Neue Entwicklungen bei den Solarzellen lassen signifikant fallende Kosten erwarten, was deren Ausbreitung beschleunigen wird. Zurzeit handelt es sich allerdings vorwiegend um Installationen kleiner Leistung, die oft von Solarzellen gespeist werden, welche auf Hausdächern montiert sind. Daneben gibt es aber auch eine ganze Zahl von beachtlicher Grösse, wie z.B. das Solarkraftwerk Carrisa Plains in Kalifornien mit einer Gesamtleistung von 6,5 MW. Auch in der Schweiz existieren Anlagen in kleinerem Umfang [1]. Dass solche für die Ergänzung der Energieversorgung in der Schweiz eine gewisse Bedeutung bekommen können, wurde bereits aufgezeigt [2; 3].

Solarzellen erlauben bekanntlich das direkte Umwandeln der Sonnenstrahlung in elektrischen Gleichstrom. Wirkungsgrade von etwas über 10% sind heute üblich, experimentelle Zellen erreichen bereits über 20%. Unter Solarmodul versteht man eine Anordnung von meist etwa 35 in Reihe geschalteten und zweckmässig verpackten Solarzellen. Figur 1 zeigt die typischen Kennlinien eines solchen Moduls. Die höchste Leistung kann im Arbeitspunkt A entnommen werden, wo das Produkt $P_g = U_g \cdot I_g$ maximal ist. Der Verlauf ist temperaturabhängig, so dass sich der optimale Arbeitspunkt verschieben kann. Solche Module werden, in Reihen- und Parallelschaltungen zusammengefasst, zu einem Solargenerator konfiguriert.



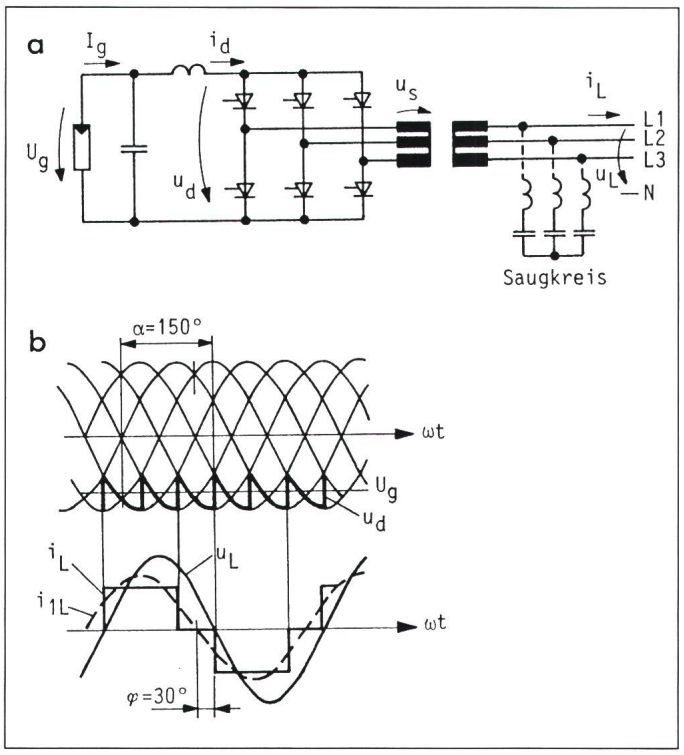
Figur 1
Typische Kennlinien eines Solarmoduls
a. Gleichstrom I_g in Funktion der Gleichspannung U_g. Man beachte den Einfluss der Strahlungsintensität ε und der Zellentemperatur.
b. Leistungsverlauf für die Kurve k. Der Maximalwert wird bei der Spannung U_{gm} erreicht.

Zur Koppelung mit dem Landesnetz ist die Umformung des Gleichstromes in 50-Hz-Wechselstrom nötig. Dazu wird ein Wechselrichter (engl. Inverter) eingesetzt. Dieser beinhaltet eine leistungselektronische Schaltung, welche die Umwandlung mittels Thyristoren oder Transistoren, Kondensatoren, Drosselspulen, Transformatoren und Widerständen, also mit statischen Mitteln, bewerkstelligt. Es besteht eine Vielfalt von möglichen Anordnungen, auf die nachstehend eingegangen wird.

Die eigentliche Wechselrichterschaltung ist als Teil des Energiewandlersystems aufzufassen, das gesamthaft folgende wichtigste Aufgaben zu erfüllen hat:

- Umformung von Gleich- in Wechselstrom
- Anpassung der Spannung und des Leistungsflusses
- Ein-/Ausschalt-Steuerung
- Maximalleistungssteuerung (Maximum Power Tracking).

In Anlehnung an den üblichen Sprachgebrauch wird im folgenden unter Wechselrichter (WR) auch das gesamte Energiewandlersystem verstanden.



Figur 2
Sechspulsiger netzkommutierter Wechselrichter

a. Schaltschema. Zur Reduktion der Oberschwingungen im Netzstrom sind bei grösseren Leistungen Saugkreise üblich.

b. Typische Wellenformen (ohne Saugkreis).

2. Grundschaltungen von Wechselrichtern

Es wird davon ausgegangen, dass bei den meisten Photovoltaikanlagen in der Schweiz ein *dreiphasiger Anschluss* möglich ist. Dies ist für Leistungen oberhalb ewa 3 kW aus verständlichen Gründen vorzuziehen. Ausserdem wird angenommen, dass eine *galvanische Trennung* der Solarmodule vom Netz auch bei Niederspannungsanschluss (3×380 V) erforderlich ist. Es ist beachtenswert, dass die Situation für Kleinanlagen in den USA anders liegt. Dort ist nämlich das Niederspannungsnetz einphasig aufgebaut (2×115 V mit Mittelanzapfung, 60 Hz), und Wechselrichter ohne galvanische Trennung sind denkbar [4].

Um den Rahmen dieses Artikels nicht zu sprengen, sind die Schaltungsbeschreibungen kurz gehalten. Der interessierte Leser findet detailliertere Angaben in der leistungselektronischen Fachliteratur [5; 6; 7].

2.1 Der netzkommutierte Wechselrichter

Figur 2a zeigt den netzkommutierten Stromrichter in der einfachen Grundschaltung mit dreiphasiger Brücke. Diese Schaltung ist aus dem Bereiche der elektronischen Gleichstromantriebe sehr bekannt. Die Thyristoren werden durch Zündimpulse zum Leiten gebracht, wobei jeweils gleichzeitig der vorher leitende durch einen vom Netz erzeugten Kommutierungsstrom abgeschaltet wird. In jeder Periode finden sechs solche Kommutierungen statt, und man bezeichnet diese Schaltung daher auch als sechspulsigen Stromrichter. Das Spannungsverhältnis kann durch Phasenanschnittsteuerung variiert werden. Es gilt $U_d/U_s = 2{,}35 \cos\alpha$. Im Steuerwinkelbereich $90° > \alpha > 180°$ ist der Leistungsfluss von der Gleichstrom- auf die Wechselstromseite gerichtet, was für die vorliegende Anwendung nötig ist. Der Stromrichter wird in diesem Bereiche zum netzkommutierten Wechselrichter.

Die Wellenformen der Figur 2b gelten für einen Steuerwinkel $\alpha = 150°$, etwa typisch für den Einsatz in einer Photovoltaikanlage. Die Drosselspule im Gleichstromkreis hat die Funktion, den Strom i_d weitgehend zu glätten. Man spricht daher auch von einem Wechselrichter mit *Stromspeisung*. Der Solargenerator ist zudem mit einem Kondensator überbrückt, damit die übrigbleibende Welligkeit nicht zu einer periodischen Veränderung der Spannung u_g führt.

Die besonderen Stärken dieser Schaltung sind:

- Einfach, robust und erprobt
- Einfaches Steuern des Leistungsflusses
- Sehr kleine Neigung zum Selbstlauf. Das Netz wird zum Kommutieren benötigt; der WR schaltet daher bei Netzunterbrüchen recht zuverlässig ab.

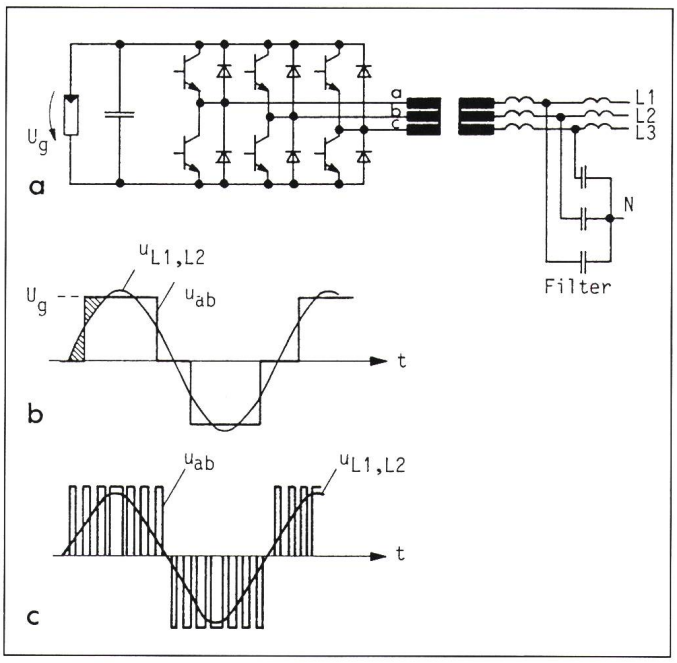
Aus den Wellenformen lassen sich aber auch verschiedene Schwächen erkennen:

- Der Netzstrom ist nicht sinusförmig. Er enthält Teilschwingungen der Ordnungszahlen $k = 1, 5, 7, 11, 13, ...$, mit den relativen Amplituden $1/k$. Die dominierende fünfte Oberschwingung beträgt daher 20% der Grundschwingung.
- Der Strom ist nicht in Phase mit der Netzspannung. Der Leistungsfaktor ist daher <1, induktiv. In gewissen Anwendungen kann die Verschiebung bis 50° erreichen.

Ausserdem kippt der WR bei Netzeinbrüchen oder zu grossen Steuerwinkeln und schliesst dabei die Gleichspannungsseite kurz. Das ist hier nicht sehr bedeutend, da der Solargenerator nach der Entladung des Kondensators den Kurzschlussstrom begrenzt.

2.2 Der selbstkommutierte Wechselrichter

Figur 3a zeigt die Grundschaltung, die ebenfalls aus dem Bereich der elektronischen Antriebe bekannt ist. Sie wird dort zur Frequenzsteuerung von Wechselstrommotoren verwendet (Frequenzumrichter). Der Kondensa-



Figur 3
Dreiphasiger selbstkommutierter Wechselrichter

a. Schaltschema

b. Vergleich zwischen Netz- und Wechselrichterspannung bei Sechsschrittsteuerung. Die grossen Abweichungen (schraffierte Spannungszeitflächen) führen zu wesentlicher Netzstromverzerrung.

c. Vergleich zwischen Netz- und Wechselrichterspannung bei Sinus-Pulsweitenmodulation. Bei grosser Pulszahl wird der Netzstrom fast sinusförmig. Die hochfrequenten Oberschwingungen werden mit dem Filter leicht eliminiert.

tor hält die Spannung des Solargenerators trotz welliger Stromentnahme konstant, er speist direkt den WR. Man bezeichnet dies daher als *Spannungsspeisung*. Die Brückenschaltung ist mit Transistoren ausgerüstet, da deren Abschaltung durch die Ansteuerung geschehen muss. Die Kommutierung wird also intern durchgeführt, er ist *selbstkommutierend*. Natürlich können statt der gezeigten Bipolar-Transistoren auch FET-Transistoren oder, besonders bei grösseren Leistungen, abschaltbare Thyristoren (GTO) verwendet werden. Dagegen sind zwangskommutierte Thyristorschaltungen heute nicht mehr üblich.

In der einfachen Form der Sechsschrittsteuerung entsteht eine Wellenform der Ausgangsspannung nach Figur 3b. Da die aufgeprägte Spannung sehr schlecht mit der Sinusform des Netzes übereinstimmt, würde dies ohne zusätzliche Drosselspulen in den Wechselstromleitungen zu sehr grossen Stromoberschwingungen führen. Nun ist es aber möglich, durch *Pulsweitenmodulation* (PWM) die typischen Wellenformen nach Figur 3c zu erzeugen. Es lässt sich zeigen, dass auf diese Weise alle Oberschwingungen bis zur *n*-ten eliminiert werden können, wobei *n* die Anzahl der Pulse pro Halbperiode bedeutet. Diese Zahl ist typisch >10, wird nach oben jedoch durch die steigenden Schaltverluste eingeschränkt. Die übrigbleibenden Oberschwingungen lassen sich durch *LC*-Filter in den Netzleitungen leicht reduzieren. Ausserdem kann durch Variieren der Breite der einzelnen Pulse der Effektivwert der Grundschwingung eingestellt werden, was zur Anpassung an die Netzspannung und zur Steuerung des Leistungsflusses nötig ist.

Verglichen mit dem netzkommutierten WR zeigen sich folgende Stärken:

- Oberschwingungen lassen sich leichter eliminieren, und ein angenähert sinusförmiger Stromverlauf ist ohne grosse Zusatzfilter möglich.
- Der Netzstrom liegt in Phase mit der Spannung und der Leistungsfaktor daher bei 1.

Als Schwächen sind anzuführen:

- Bedeutend kompliziertere Steuerung
- Transistoren sind weniger robust und teurer als Thyristoren.
- Selbstlauf bei Netzunterbrüchen muss unterbunden werden. Diese Schaltung ist deshalb speziell für Betrieb im Inselnetz geeignet, und wird dort oft angewendet.

3. Variationen der Grundschaltungen

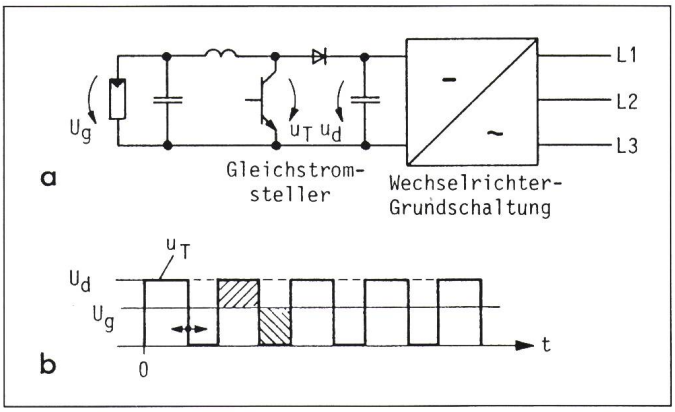
Gleichstromsteller

Wegen der Temperaturschwankungen kann die Spannung U_g im optimalen Arbeitspunkt bis etwa ±10% variieren. Schwankungen im gleichen Rahmen treten bekanntlich auch bei der Netzspannung auf. Daraus resultieren unter ungünstigen Umständen bei netzkommutierten WR relativ grosse Steuerwinkel und entsprechend kleine Leistungsfaktoren. Dies kann durch Vorschalten eines Gleichstromstellers (engl. Chopper) vermieden werden. Figur 4a zeigt einen Aufwärtssteller, der erlaubt, die Ausgangsspannung U_d im Bereiche $U_d > U_g$ zu steuern. Damit ist es möglich, den WR bei einem günstigen, konstanten Steuerwinkel (z.B. 160°) zu fahren und den Leistungsfluss mit dem Gleichstromsteller zu steuern. Dadurch ergibt sich eine wesentliche Verbesserung des mittleren Leistungsfaktors.

Auch beim selbstkommutierten WR lässt sich dieser Gleichstromsteller nützlich einsetzen [8]. Das Steuern der Ausgangsspannung mittels PWM ist nämlich bei der Dreiphasen-Brückenschaltung wegen der gegenseitigen Beeinflussung der Zweige nicht einfach. Es kann aber eine fest programmierte Wellenform, optimiert für minimalen Oberschwingungsgehalt, verwendet werden. Das Steuern des Leistungsflusses fällt dann ebenfalls dem Gleichstromsteller zu.

Hochfrequenz-Zwischenkreis

Die bis jetzt behandelten Schaltungen verwenden zur galvanischen Trennung des Solargenerators vom Netz



Figur 4
Wechselrichter mit vorgeschaltetem Gleichstromsteller

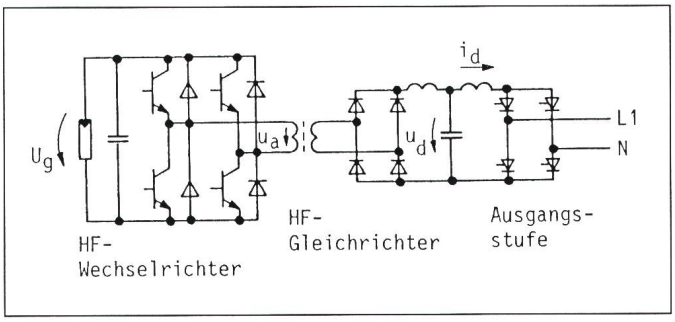
a. Schaltschema. Der Wechseltrichter dient zur Spannungsanpassung und zur Steuerung des Leistungsflusses.

b. Die Spannungswellenform zeigt, wie der Mittelwert von U_d durch PWM eingestellt werden kann.

einen Leistungstransformator, der für 50 Hz ausgelegt ist. Bei kleineren Anlagen betragen jedoch die Trafoverluste bis zu 5%. Besonders die Magnetisierungsverluste verursachen eine deutliche Verminderung des Wirkungsgrades der Anlage bei Teillast. Vollast kann aber nur bei optimalen Einstrahlungsbedingungen, also nicht sehr oft gefahren werden. Daher ist ein guter Wirkungsgrad bei kleinerer Last von grosser Bedeutung, und ein Reduzieren der Trafoverluste ist sehr erstrebenswert.

Eine Möglichkeit liefert die Verwendung eines *Hochfrequenz-Zwischenkreises,* wie er in Figur 5 gezeigt ist. Der selbstkommutierte HF-Wechselrichter erzeugt eine einfache Rechteckwelle, die dem HF-Transformator zugeführt wird. Dieser trennt das Netz und den Ausgangs-WR vom Solargenerator. Frequenzen von einigen kHz bis einigen 10 kHz werden verwendet, was erlaubt, den Transformator entsprechend klein und verlustarm zu gestalten. Natürlich wird gleichzeitig Material und Gewicht gespart. Allerdings ist der leistungselektronische Aufwand bedeutend grösser (drei Umformungsstufen statt der einen in den Grundschaltungen). Damit wachsen die Verluste in den Halbleitern. Trotzdem zeigt sich, dass bei kleinen Wechselrichtern der Gesamtwirkungsgrad eher besser ist. Natürlich kann der HF-Wechselrichter durch einfache Pulsweitenmodulation auch zur Steuerung des Leistungsflusses herangezogen werden, so dass der Netz-WR mit fixer Steuerung und den oben beschriebenen Vorteilen betrieben werden kann. Weiter ist zu erwähnen, dass die HF-Stufe oft als Resonanz-WR ausgebildet wird, was einen Betrieb bei kleineren Schaltverlusten oder höherer Schaltfrequenz erlaubt [9].

Figur 6
Wechselrichter für einphasigen Anschluss mit Sinusmodulation im HF-Wechselrichter
Der Strom i_d besteht aus fast reinen Sinushalbwellen, die durch die Ausgangsstufe zu einer Sinuswelle zusammengefügt werden.



Der Ersatz des Netztransformators durch einen HF-Transformator ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn der Anschluss an das Niederspannungsnetz erfolgt. Bei grösseren Anlagen, im Bereiche von einigen 100 kW und darüber, wird der Anschluss an das Mittelspannungsnetz erforderlich sein. Da der Netz-WR nicht leicht für solche Spannungen gebaut werden kann, zwingt sich der Netztransformator dann ohnehin auf.

Systeme mit HF-Zwischenkreis würde man besser als Umrichter bezeichnen, beinhalten sie doch bis zu drei Leistungswandlerstufen. Die Bezeichnung Wechselrichter ist aber auch hier üblicher. Die Gesamtfunktion ist nach wie vor das Umwandeln von Gleichstrom in Wechselstrom.

4. Zwei spezielle Schaltungen

Neben den beschriebenen Anordnungen gibt es selbstverständlich eine Vielfalt von weiteren Möglichkeiten. Auf zwei bedeutende Schaltungen soll noch kurz eingegangen werden.

HF-Zwischenkreis mit Strommodulierung

Figur 6 zeigt das Schaltbild. Man erkennt, dass es sich dabei um einen Wechselrichter mit HF-Zwischenkreis und netzkommutierter Ausgangsstufe handelt, wie er bereits prinzipiell beschrieben wurde. Es liegen jedoch zwei wesentliche Änderungen vor: Die Ausgangsstufe ist einphasig, und der HF-WR dient zur sinusförmigen Modulation des Stromes i_d, der der Ausgangsstufe zugeführt wird.

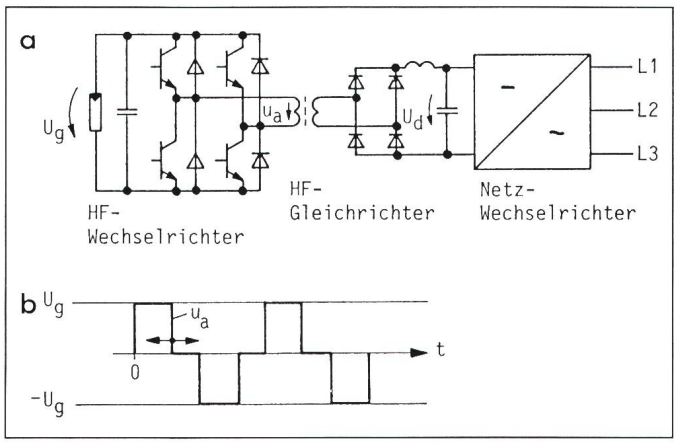
Durch diese Massnahmen wird erreicht, dass der Netzstrom nahezu sinusförmig und frei von Oberschwingungen ist [10]. Jedoch kann damit nur ein einphasiger Sinusstrom erzeugt werden. Wird ein dreiphasiger Anschluss gewünscht, so müssen drei solche Schaltungen angewendet werden, was entsprechend kompliziert und teuer ist.

Im Prinzip ist es auch möglich, den Gleichstromsteller in Figur 4 mit Sinusmodulation zu betreiben und den Ausgang dem Zweck entsprechend auf eine einphasige Brückenschaltung zu reduzieren [11]. Allerdings ist dann weiterhin ein Netztransformator zur galvanischen Trennung nötig.

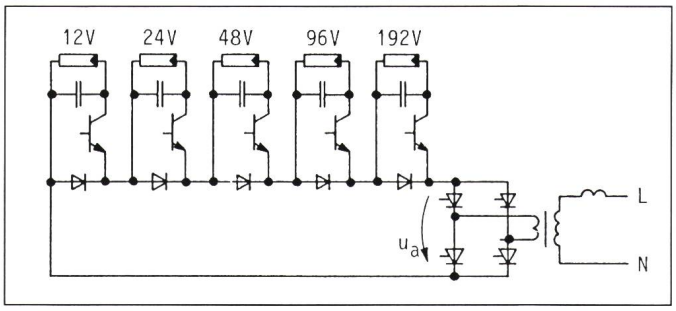
Spannungssynthese durch unterteilten Solargenerator

Das Prinzip ist aus Figur 7 ersichtlich, die eine Anordnung für einphasigen Betrieb zeigt [12]. Dabei wird die Modularität des Solargenerators ausgenützt. Die einzelnen Teile erzeugen Spannungen, die in einer Zweier-Potenzreihe liegen. Durch zeitlich gestuftes Zusammenschalten mittels der Transistoren wird angenähert eine Sinushalbwelle erzeugt. Die Thyristorbrücke am Ausgang kehrt für jede zweite Halbwelle die Polarität um, so dass eine Sinusspannung mit nur etwa 5% Oberschwingungsgehalt entsteht. Die Netzdrossel schliesslich sorgt dafür, dass die resultierende Verzerrung des Netzstromes im Rahmen bleibt.

In dieser einfachsten Form weist die Schaltung einen sehr guten Wirkungsgrad auf, weil alle Schalter niederfrequent arbeiten. Es existieren aber auch einige Nachteile:



Figur 5
Wechselrichter mit HF-Zwischenkreis
Hier kann die galvanische Trennung zum Netz mit einem viel kleineren Transformator durchgeführt werden.
a. Schaltschema
b. Spannungsverlauf am HF-Wechselrichter. Die Frequenz liegt typisch im kHz-Bereich. Durch PWM kann U_d und damit der Leistungsfluss gesteuert werden.



Figur 7
Wechselrichter mit Spannungssynthese
Durch Kombinieren der fünf Modulspannungen wird angenähert eine Sinushalbwelle u_a erzeugt.

- Die Anzahl Module für jede Stufe muss sorgfältig abgestimmt sein.
- Die Verdrahtung erfordert 10 Leitungen statt der üblichen 2.
- Das Potential der einzelnen Module verschiebt sich beim Schalten, so dass die Transistoren auch die kapazitiven Umladeströme beherrschen müssen.
- Maximalleistungs-Steuerung erfordert zusätzliche Mittel.

5. Probleme des Netzverbundes

Photovoltaikanlagen mit Netzverbund sind kleine «Kraftwerke». Der Abnehmer der Energie ist i.a. ein lokales Elektrizitätswerk, das auch für die Erteilung einer Anschlussbewilligung zuständig ist. Dabei treten Trariffragen auf, die hier nicht weiter behandelt werden.

Auch Fragen der Stromqualität und der Sicherheit stellen sich. Im folgenden soll auf einige der wesentlichsten Punkte eingegangen werden.

5.1 Oberschwingungen und Leistungsfaktor

Wechselrichter erzeugen Verzerrungen im Netzstrom. Diese lassen sich, wie schon aus den vorherigen Beschreibungen ersichtlich ist, durch zusätzliche Schaltungsmassnahmen reduzieren. Dabei stehen verschiedene Mittel zur Verfügung.

Passive Filter

Bei sechspulsigen netzkommutierten Wechselrichtern können die unteren Teilschwingungen, wie etwa die dominierende 5. und 7., durch Saugkreise (Fig. 2) reduziert werden. Allerdings sind diese bei kleinen Leistungen (<10 kW) wegen des schlechten Gütefaktors nicht so wirkungsvoll wie bei grossen Anlagen. Auch besteht immer die Gefahr, dass sie durch andere Oberschwingungsquellen am Netz angeregt und überlastet werden.

Neutralisieren von Oberschwingungen

Zwei sechpulsige netzkommutierte Wechselrichter können um 30° verschoben betrieben werden. Dies geschieht durch entsprechende Zuordnung der beiden Netztransformatoren, z.B. der eine mit Schaltgruppe Yy, der andere mit Dy. Dadurch verbessert sich der Netzstrom. Die unterste Teilschwingung ist nunmehr die 11., mit einem Anteil von 9% der Grundschwingung.

Wechselrichter dieser Art werden in grossem Umfange bei Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsanlagen (HGÜ) im MW-Bereich eingesetzt. Dabei wird das Prinzip meistens auf vierundzwanzigpulsigen Betrieb erweitert.

Aktive Filter

Wie bereits beschrieben, kann bei selbstkommutierten Wechselrichtern durch PWM ein angenähert sinusförmiger Strom erzeugt werden. Man bezeichnet dies als aktive Filterung. Die übrigbleibenden Oberschwingungen höherer Ordnung können durch passive Tiefpassfilter (Fig. 3a) ohne viel Aufwand eliminiert werden.

Aktive Filterung benötigt einen grösseren Aufwand an leistungselektronischen Elementen und an Steuerung, spart aber anderseits magnetische Komponenten und damit auch Gewicht. Sie wird durch schnelle Halbleiterschalter, wie Schalttransistoren, insbesondere FETs, begünstigt. Grosse WR arbeiten aber mit den robusten, kostengünstigeren und für höhere Schaltleistung erhältlichen Thyristoren und GTOs. Es kann daher gesagt werden, dass zurzeit Aktivfilter vor allem bei Kleinanlagen realisiert werden.

Bei hohen Schaltgeschwindigkeiten und Schaltfrequenzen besteht die Gefahr von Radiostörungen. Dieser muss durch geeignete Abschirmungen und HF-Filter entgegengewirkt werden.

Netzkommutierte WR arbeiten mit Phasenanschnittsteuerung. Diese führt zwangsläufig zu einer Verschiebung des Netzstromes in bezug auf die Spannung. Der Leistungsfaktor liegt in praktischen Anwendungen im Bereiche von etwa 0,7 bis 0,85. Das mag bei kleinen Anlagen unbedeutend sein, ruft aber bei grösseren Anlagen nach einer Korrektur. Ein konstanter Teil der benötigten kapazitiven Blindleistung kann direkt von den passiven Filtern aufgebracht werden. Eine exaktere Korrektur kann durch aktive VAR-Generatoren geschehen, wie sie auch bei HGÜ-Anlagen eingesetzt werden.

Zukünftig werden wahrscheinlich auch GTOs mit An-/Abschnittsteuerung vermehrt zur direkten Leistungsfaktor-Verbesserung herangezogen.

Bezüglich Netzbeeinflussung sei hier noch auf die neuen Leitsätze des SEV verwiesen [13]. Eine zu strikte Eingrenzung der Oberschwingungen macht bei Kleinanlagen heute allerdings kaum technischen Sinn. Die Haushaltverbraucher mit Elektronik, wie Unterhaltungsgeräte, Mikrowellenofen, Computer sowie viele Haushalt-Elektromotoren, bedeuten eine viel ernsthaftere Gefahr für die Erhaltung eines sauberen Netzes [14].

5.2 Selbstlauf

Unter Selbstlauf (engl. Islanding) versteht man die Eigenheit eines WR, dass er nach Abschalten seines Netzzweiges vom Netzverbund dazu neigt, weiterzuarbeiten und so die Sicherheit zu stören. Dieses Problem existiert natürlich bei allen Kleinkraftwerken im Netzverbund. Die entsprechenden Weisungen des Starkstrominspektorats [15] sind zu beachten. Der Abschaltverzug soll auch unter ungünstigen Umständen nur wenige Sekunden betragen.

Alle beschriebenen selbstkommutierten WR sind vom Netz aus gesehen Spannungsquellen. Sie sind daher von Natur aus für Selbstlauf geeignet, was deren Einsatz im Inselbetrieb möglich macht. Im Netzverbund müssen entsprechende Massnahmen getroffen werden, um ein sicheres Abschalten bei Netzausfall zu gewährleisten. Dazu eignen sich besonders Frequenz- und Spannungsrelais.

Netzkommutierte WR sind Stromquellen. Sie benötigen das Netz zur Kommutierung. Ein Selbstlauf ist daher nur unter der sehr speziellen und unwahrscheinlichen Bedingung möglich, dass der abgetrennte Netzzweig

kapazitiv wirkt und im Verbrauch genau an den erzeugten Strom angepasst ist. Ein einfaches Spannungsrelais genügt daher zur Überwachung. Diese inhärente Abschaltsicherheit darf gerade bei kleinen Anlagen nicht unterschätzt werden, ist doch in diesen Fällen das langzeitige Überprüfen der Sicherheitseinrichtungen nicht leicht zu gewährleisten.

5.3 Kurzschlussströme

Durch die üblichen Kleinkraftwerke mit Synchrongeneratoren wird der lokale Kurzschlussstrom des Netzes erhöht. Dies trifft für Photovoltaikanlagen nicht zu. Die Solargeneratoren begrenzen den Kurzschlussstrom zum vornherein auf einen Wert, der nur wenig über dem Betriebsstrom liegt (Fig. 1). Da im WR nur eine unwesentliche Energiespeicherung stattfindet, trifft das auch für die Gesamtlage zu.

5.4 Netzisolation, Gleichstromeinspeisung

Es wurde davon ausgegangen, dass auch beim Anschluss an das Niederspannungsnetz (3×380 V) eine galvanische Trennung zwischen diesem und dem Solargenerator nötig ist. Das erlaubt ein Erden des Generators, was speziell bei Mittelpunkterdung die Spannungsgefahr reduziert. Selbstverständlich wird man sich bei ungeschützten Hausdach-Installationen ausserdem auf kleinere Generatorspannungen beschränken.

Das Erden des Generators dürfte auch aus Blitzschutzüberlegungen vernünftig sein. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass bei Direkteinschlägen die Solarzellen zerstört werden und u.U. Blitzableiter vorzusehen sind.

Ist ein Netztransformator vorhanden, so ist die Gefahr einer Gleichstromeinspeisung ins Netz von vornherein beseitigt. Liegt jedoch ein WR mit Isolation durch einen HF-Zwischenkreis vor, so ist im Falle eines WR-Fehlers im Prinzip das Einspeisen einer Gleichkomponente möglich. Dies muss dann durch ein Schutzrelais überwacht werden, das den WR nötigenfalls abstellt.

6. Schutz des Wechselrichters

Die Leistungselemente, insbesondere die Halbleiterschalter eines WR, müssen sowohl gegen Überspannung wie auch gegen Überstrom geschützt werden.

Überspannungsschutz

Bei Wechselrichtern für den Anschluss an das 3×380-V-Netz müssen alle aktiven Teile den üblichen Prüfbedingungen standhalten. Thyristoren und Dioden, die der Netzspannung ausgesetzt sind, sollten für nicht weniger als zweifache normale Spitzenspannung ausgelegt sein. Die erforderlichen Mittel zum Absorbieren von Überspannungen, wie RC-Netzwerke, Varistoren usw., sind vorzusehen. Ein zuverlässiger Betrieb, von Extrembedingungen wie benachbartem Blitzschlag abgesehen, muss gewährleistet sein.

Überstromschutz

Die thermische Auslegung ist für die maximal zu erwartende Solargeneratorleistung bei der spezifizierten maximalen Umgebungstemperatur vorzusehen. Länger dauernde Überströme sind höchstens in einzelnen Zweigen der WR-Schaltung unter Fehlerbedingungen möglich. Ob sich ein weiterer Schutz aufdrängt, hängt im wesentlichen von der Grösse des Systems und dem Wert der geschützten Elemente ab. Bei kleinen Anlagen genügen Sicherungen. Bei grossen Anlagen muss aber besonders dem Abtrennen des Solargenerators das nötige Augenmerk geschenkt werden. Dieser stellt eine Gleichstromquelle dar, und das Unterbrechen des Stromes ist daher nicht immer trivial.

Treten im Netz Kurzschlüsse auf, so sollte der WR schnell abschalten, so dass keine Elemente gefährdet sind. Das ist bei netzkommutierten WR kein Problem, verdient aber bei selbstkommutierten Typen besondere Beachtung.

7. Steuerung

Bis anhin wurde vor allem von den leistungselektronischen Schaltungen gesprochen. Es soll nun aber auch kurz auf die typischen Aufgaben der Steuerung eingegangen werden. Vorab sind die Ansteuerung der Halbleiterschalter und das Synchronisieren mit dem Netz von zentraler Bedeutung. Der Aufwand für Sinusmodulation mittels PWM ist beträchtlich und erfordert oft einen Mikroprozessor. Im folgenden wird auf zwei für Solaranlagen besonders typische Aspekte eingegangen.

Ein/Aus-Steuerung

Bevor eine Photovoltaikanlage an das Netz geschaltet wird, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein:

- Die Netzspannung muss in einem bestimmten Fenster, z.B. ±10% der Nennspannung, liegen.
- Die Einstrahlung muss so gross sein, dass ein positiver Leistungsfluss zum Netz erwartet werden kann (mehr Leistung als zur Deckung der Verluste nötig). Dies wird meist durch Überwachen des Solargeneratorstromes in einem Vorlastwiderstand gemacht, der für eine bestimmte Zeit die Minimalbedingung überschreiten muss.

Das Abschalten soll durch folgende Bedingungen ausgelöst werden:

- Die Netzspannung bewegt sich ausserhalb des Fensters.
- Der Leistungsfluss ist während einer bestimmten Zeit negativ.
- Der WR arbeitet nicht richtig.
- Es wird Selbstlauf festgestellt.

Maximalleistungs-Steuerung

Darunter versteht man die Fähigkeit, den WR so zu steuern, dass für den Solargenerator immer der optimale Arbeitspunkt vorliegt (Maximum Power Tracking, MPT). Aus den Kennlinien der Figur 1 ist ersichtlich, dass dies näherungsweise erfüllt ist, falls die Spannung U_g konstant gehalten wird. Tatsächlich wird oft nur ein Spannungsregler angewendet und auf einen grösseren Aufwand verzichtet.

Eigentliches MPT benötigt eine spezielle Regelung, welche das Maximum der Leistungskurve ständig sucht. Ein mögliches Prinzipschema ist in Figur 8 gezeigt. Der unterlagerte Spannungsregelkreis sorgt dafür, dass die Ausgangssituation bereits günstig ist. Die Leistung P_g wird gemessen und festgehalten. Nun wird im MPT-Regler eine kleine Vergrösserung des Signals U_m* erzeugt und P_g anschliessend wieder gemessen. Wächst P_g an, so wird U_m* weiter vergrössert. Fällt P_g, so wird U_m* verkleinert. In beiden Fällen wird fortgefahren, bis das Maximum gefunden wird. Es stellt sich schliesslich ein Grenzzyklus um das Maximum ein.

Die MPT-Regelung benötigt eine sehr genaue Leistungserfassung, um auch bei kleinen Einstrahlungen zuverlässig zu arbeiten. Die Regelung selber muss nicht sehr schnell sein und wird oft einem Mikroprozessor übertragen.

8. Wirkungsgrad und wirtschaftliche Aspekte

Solargeneratoren sind zurzeit teuer. Es ist daher verständlich, dass vom Wechselrichter ein hoher Wirkungs-

grad erwartet wird, damit die anfallende Energie möglichst vollständig dem Netz zugeführt werden kann. Die Verluste des WR setzen sich etwa wie folgt zusammen:

- Leerlaufverluste für die Steuerelektronik
- Verluste des Trenntransformators
- Durchlassverluste der Leistungshalbleiter
- Schaltverluste in Leistungshalbleitern und Beschaltungen
- Verluste in Drosselspulen und Filtern

Offensichtlich ändert sich der Wirkungsgrad mit der Last. Bereits früher wurde darauf hingewiesen, dass ein Minimalisieren der Leerlaufverluste besonders wichtig ist, da die Anlage oft bei Teillast arbeitet. Höherer Wirkungsgrad bedeutet aber i.a. mehr Aufwand und daher höhere Kosten. Die folgende Tabelle wurde aus Daten von Studien der Sandia National Labs, USA, zusammengestellt. Es gelten als typische Werte:

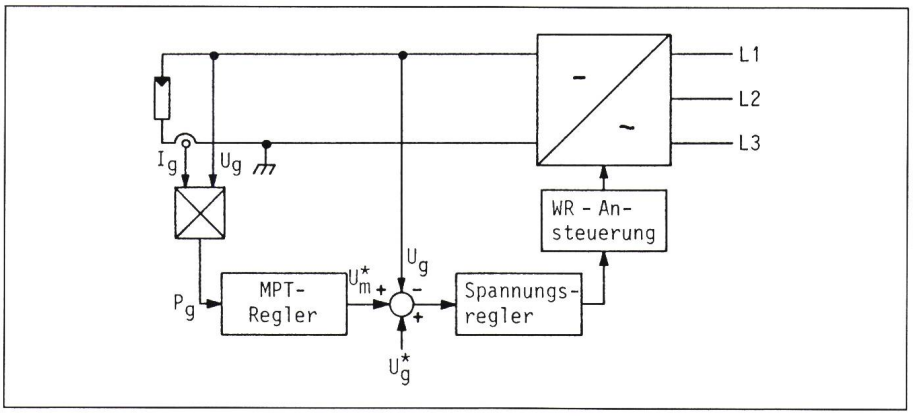
	Wirkungsgrad		
Nenn leistung	100% Last	60% Last	20% Last
3 kW	0,90	0,87	0,75
10 kW	0,92	0,89	0,80
100 kW	0,95	0,92	0,85

Die Preise für WR in Photovoltaikanlagen mit Netzverbund sind heute noch recht unsicher, weil keine grösseren Stückzahlen produziert werden. Die folgenden Schätzungen (Sandia-Studien) setzen grössere Produktionszahlen voraus:

Nennleistung	Kosten ($/kW)
3 kW, einphasig	600
10 kW, dreiphasig	300
100 kW, dreiphasig	150

Deutlich erkennt man den Einfluss der relativ grossen fixen Kosten der Steuerung, welche höhere Leistungen bevorzugen lassen. WR höherer Leistung weisen aber auch einen bedeutend besseren Wirkungsgrad auf, der einen wesentlichen Einfluss auf die Energieproduktionskosten der Gesamtanlage hat.

Rechnet man mit den heute üblichen $ 4000/kW$_p$ (W_p = Watt Spitzenleistung) für Solarmodule, gültig beim Einkauf in grösserer Quantität, so nehmen sich die Kosten für den WR noch bescheiden aus. Schenkt man aber den vorausgesagten Durchbrüchen für die Herstellung neuer Arten von Solargeneratoren Beachtung, so darf man auf zukünftige Preise in der Grössenordnung von $ 1000/kW$_p$ hoffen. Dazu kommen natürlich die Kosten für die Installation und gegebenenfalls für den Boden. Aus diesen Zahlen lässt sich schliessen, dass der Wechselrichter bei Kleinanlagen die Gesamtkosten weiterhin wesentlich beeinflussen kann, dagegen bei Grossanlagen weniger stark ins Gewicht fallen wird.



Figur 8 Wechselrichter mit Maximalleistungssteuerung (Maximum Power Tracking MPT)
Der innere Spannungsregelkreis liefert eine angenähert richtige Leistungssteuerung. Der MPT-Regler korrigiert U_g weiter, so dass immer im optimalen Arbeitspunkt (Fig. 1) gefahren wird.

9. Abschliessende Bemerkungen

Viele Schaltungen sind heute weitgehend ausgereift. Es sind zahlreiche Untersuchungen gemacht worden, insbesondere auch an staatlichen Instituten in den USA. Jedoch ist die Produktion heute noch zu klein und der Wettbewerb in den Anwendungen zu wenig fortgeschritten, um abschätzen zu können, welche Typen letzlich dominieren werden. Es ist aber zu hoffen, dass sich bei einem ausbreitenden Markt auch die schweizerische Elektronikindustrie, die in der Leistungselektronik international eine recht starke Position besitzt, bald aktiv an der Entwicklung und Fertigung solcher Geräte beteiligt.

Literatur

[1] *M. Camani, P. Ceppi* und *D. Iacobucci:* Die netzgekoppelte photovoltaische Anlage TISO 15. Bull. SEV/VSE 77(1986)6, S. 309...316.

[2] *M.G. Real:* Solarzellenanlagen: Abschätzung des Potentials in der Schweiz. Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft Nr. 34. Bern, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 1984.

[3] *R. Minder:* Photovoltaische Elektrizitätserzeugung in der Schweiz. Technische Rundschau -(1988)25, S. 78...81.

[4] *W.I. Bower, F.T. Schalles* and *T.S. Key:* Utility compatibility of nonisolated residential power conditioners. Nineteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 1987, p. 1122...1127.

[5] *K. Heumann:* Grundlagen der Leistungselektronik. 3. Auflage. Stuttgart, Teubner, 1985.

[6] *F. Zach:* Leistungselektronik. Bauelemente, Leistungskreise, Steuerungskreise, Beeinflussungen. 2. Auflage. Wien, Springer-Verlag, 1988.

[7] *R.G. Hoft:* Semiconductor power electronics. New York, Van Nostrand Reinhold, 1986.

[8] *M. Blatter* und *F. Wicki:* Universeller Solarzellen-Umrichter für 220V/380V mit hohem Wirkungsgrad. SEV-Informationstagung über Photovoltaische Energieumwandlung, 15. April 1982. Zürich, SEV, 1982; S. 47...58.

[9] *A.K.S. Bhat* and *S.B. Dewan:* A novel utility interfaced high-frequency link photovoltaic power conditioning system. IEEE Trans. Industrial Electronics 35(1988)1, p. 153...159.

[10] *B.K. Bose, P.M. Szczesny* and *R.L. Steigerwald:* Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system. IEEE Trans. Industry Applications 21(1985)5, p. 1182...1191.

[11] *R. Fürniss* u.a.: Ein photovoltaischer Generator im Netzbetrieb. Elektrizitätswirtschaft 85(1986)5, S. 175...178.

[12] *J. Schmid:* Photovoltaisches Kleinsystem im Netzverbund. SEV-Informationstagung über Photovoltaische Energieumwandlung, 15. April 1982. Zürich, SEV, 1982; S. 59...71.

[13] Begrenzung von Beeinflussungen in Stromversorgungsnetzen (Oberschwingungen und Spannungsänderungen. Teil 1: Bestimmungen. Teil 2: Erläuterungen und Berechnungen. Leitsätze des SEV. Empfehlungen des VSE. Publikationen des SEV 3600-1. 1987 3600-2. 1987.

[14] *J.W. Stevens* and *T.S. Key:* The utility interface - Can state-of-the-art power conditioners alleviate our concerns? Seventeenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 1984, p. 1168...1174.

[15] Parallelschaltung von Niederspannungs-Energieerzeugungsanlagen mit Stromversorgungsnetzen. STI-Nr. 219.1081 d/f. Zürich, Eidgenössisches Starkstrominspektorat, Oktober 1981.