

Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen: Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Beseitigung

H. Häberlin und H.R. Röthlisberger, Ingenieurschule Burgdorf, CH-3400 Burgdorf

ZUSAMMENFASSUNG

Das Herzstück und zugleich das kritische Element einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage ist der Wechselrichter. Der Betrieb solcher Wechselrichter kann andere elektrische und elektronische Geräte in der Umgebung durch Ueberspannungen oder Oberschwingungen im Netz oder abgestrahlte Störungen beeinträchtigen. Umgekehrt kann der ordnungsgemässe Wechselrichterbetrieb durch Ereignisse im Netz (Ueberspannungen, Rundsteuersignale usw.) gestört werden. Diese Probleme müssen bei der Integration netzgekoppelter Photovoltaikanlagen in Gebäuden beachtet und gelöst werden.

Zunächst wird ein kurzer Ueberblick über die Untersuchungen der ISB an handelsüblichen Wechselrichtern von 1,5kW bis 3kW vermittelt. Aus diesen Arbeiten und aus den Betriebserfahrungen bei anderen Anlagen lassen sich Schlüsse über die wichtigsten bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen auftretenden Probleme ziehen. Anschliessend werden einige Massnahmen vorgeschlagen, welche die meisten dieser Probleme entschärfen oder eliminieren dürften.

ABSTRACT

Inverters are the most critical element in line-connected PV-installations. Operation of PV-inverters can affect normal line operation and disturb other electronic equipment. On the other hand unusual line conditions (e.g. overvoltages, telecontrol signals) can cause inverter defects. In this paper there is a brief summary of the inverter tests carried out at Burgdorf Polytechnic. Main problems encountered during these tests and during operation of some other PV-installations are discussed. Finally a few recommendations to avoid most of these problems are presented.

1. WICHTIGSTE ERGEBNISSE DER BISHERIGEN WECHSELRICHTERTESTS

In diesem Abschnitt können aus Platzgründen nur Beispiele von besonders interessanten Messergebnissen dargestellt werden. Sie dienen hauptsächlich zur Illustration der möglichen Probleme. Für umfassendere Darstellungen der Messergebnisse muss auf frühere [1] oder zukünftige Publikationen verwiesen werden. Bisher wurden die beiden selbstgeführten 3kW-Wechselrichter SI-3000 und SOLCON eingehend untersucht. Kurz getestet wurden der netzgeführte 1,5kW-Wechselrichter EGIR10 sowie der selbstgeführte 1,5kW-Wechselrichter PV-WR-1500. Alle untersuchten Geräte sind einphasig.

1.1 Wirkungsgrad der untersuchten Wechselrichter

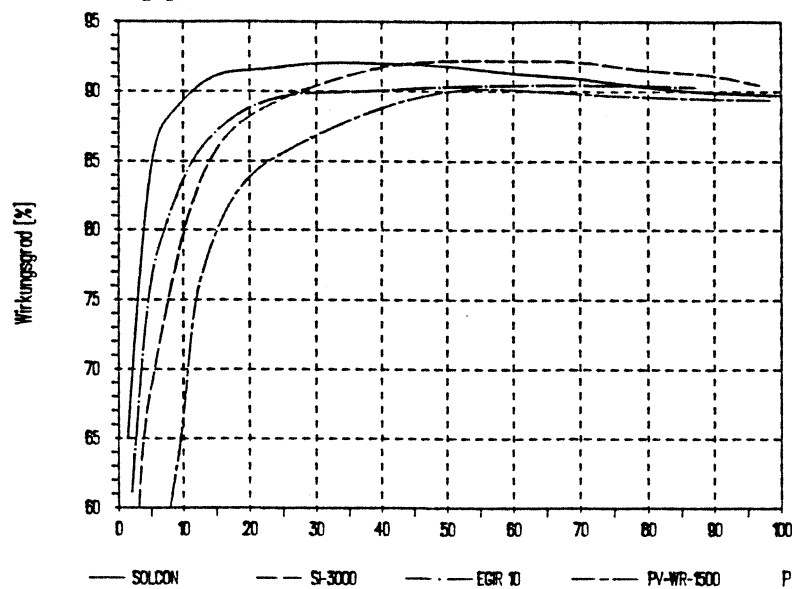


Bild 1: Wirkungsgrad in Funktion der normierten (auf Nennleistung bezogen) Gleichstromleistung (SI-3000 und SOLCON: 3kW, EGIR 10 und PV-WR-1500: 1,5kW)

Die in der Praxis am meisten interessierende Grösse ist der Wechselrichter-Wirkungsgrad. Bild 1 zeigt die von uns gemessenen Wirkungsgradkurven in Funktion der normierten (auf Nennleistung bezogenen) Gleichstromleistung. Der SOLCON hat den besten Teillastwirkungsgrad, der SI-3000 den besten Wirkungsgrad bei grösseren Leistungen. Beim PV-WR-1500 ist der Teillastwirkungsgrad am schlechtesten, dagegen ist nach Messungen des Oeko-zentrums Langenbruck das Maximum-Power-Tracking sehr gut.

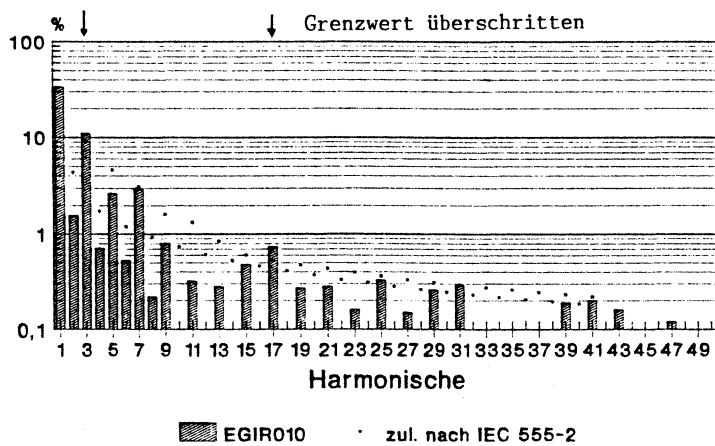


Bild 2: Stromüberschwingungen des EGIR 10 bei $P_{ac} = 1\text{kW}$ (bezogen auf 25A)

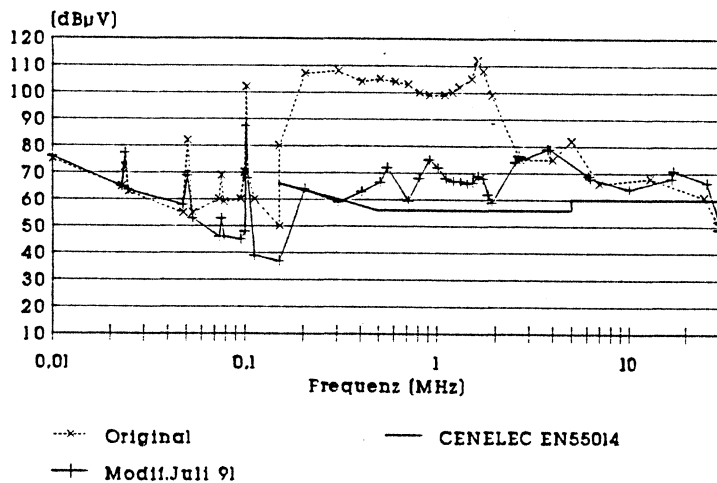


Bild 3: Funkstörspannungen des SOLCON 3000 auf der AC-Seite vor und nach der Modifikation vom Juli 91

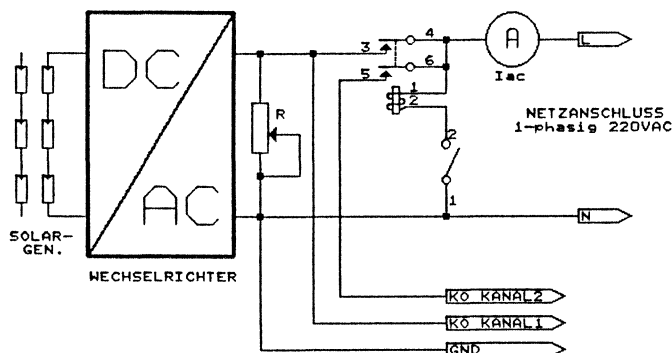


Bild 4: Schaltung zur Provokation des Selbstlaufs einphasig

1.2 Oberschwingungen

Bei den drei selbstgeführten Wechselrichtern dürften die Oberschwingungen im Betrieb kaum Probleme verursachen. SOLCON und PV-WR-1500 halten auch bei grossen Leistungen die Grenzwerte der Norm SEV3601.2 resp. EN60555 ein und können somit problemlos überall installiert werden. Der SI-3000 überschreitet bei grossen Leistungen diese Grenzwerte teilweise ganz leicht, unterschreitet aber bei unserer Testanlage immer noch die Werte der Norm SEV3600.1 [1]. Am meisten Oberschwingungen verursacht erwartungsgemäss der netzgeführte Wechselrichter EGIR10. Er überschreitet bereits bei $P_{ac} = 1\text{kW}$ die Grenzwerte der Norm SEV3601.2 resp. EN60555 (Bild 2).

1.3 Funkstörspannungen

Mit Ausnahme des PV-WR-1500 produzieren die bisher untersuchten Wechselrichter auf der Wechselstromseite zu starke hochfrequente Funkstörspannungen, die den Radioempfang in der Umgebung beeinträchtigen. Die stärksten Störungen verursachen ältere Versionen des SOLCON (Bild 3).

Im Juli 91 wurde bei unserem SOLCON durch den Hersteller eine Modifikation vorgenommen, die eine markante Reduktion der Störungen auf der Wechselstromseite zur Folge hatte (Bild 3). Weitere Angaben (u.a. auch über den SI-3000) sind in [1] zu finden. Auf der Gleichstromseite weisen alle untersuchten Wechselrichter noch zu starke hochfrequente Störspannungen auf.

1.4 Selbstlauf nach einem Netzausfall

Sowohl beim SI-3000 als auch beim SOLCON konnte der Hersteller die ursprünglich vorhandene Neigung zum Selbstlauf beim Betrieb mit angepasster Last (Bild 4) durch eine Softwaremodifikation beseitigen. Der PV-WR-1500 kann bei einphasigem Anschluss in der Testschaltung nach Bild 4 für lange Zeit einen nach den Vorschriften des ESTI [2] unzulässigen Inselbetrieb aufrechterhalten (Bild 5). Wird dieser an sich einphasige Wechselrichter aber gemäss den Empfehlungen des Herstellers dreiphasig angeschlossen, so tritt dank eines eingebauten Symmetrieüberwachungsrelais sowohl bei einphasigen als auch bei dreiphasigen Netzausfällen kein unzulässig langer Selbstlauf mehr auf.

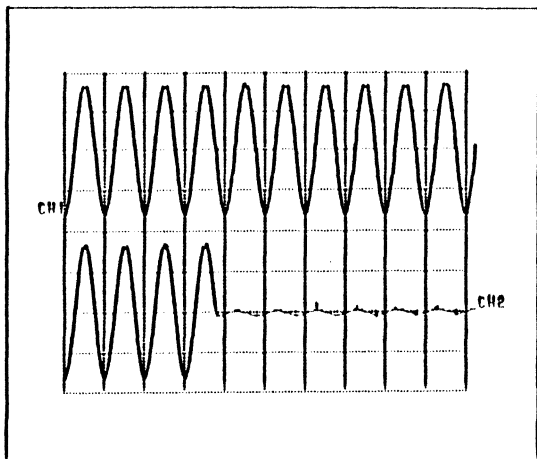


Bild 5: Selbstlauf des PV-WR-1500 bei einphasigem Anschluss

1.5 Wechselrichterausfälle

Beim SI-3000 traten in 15 Monaten 4 Ausfälle mit Hardwaredefekt auf, die fast alle durch das am Ort unserer Testanlage auftretende BKW-Rundsteuersignal mit $f = 317\text{Hz}$ verursacht wurden [1].

Beim SOLCON wurden in 17 Monaten 4 Ausfälle mit Hardwaredefekt registriert, die durch niederfrequente Ueberspannungen ausgelöst wurden. Bild 6 zeigt einen solchen Ausfall am 6.4.91, der durch eine bei starker Einstrahlung und schwacher Netzbelastung auftretende 50Hz-Ueberspannung (ca. 242V) am Anschlusspunkt ausgelöst wurde. Bild 7 zeigt einen Ausfall am 18.5.91 unter ähnlichen Bedingungen, bei dem die 50Hz-Netzspannung nur 240V betrug, das um 1200 auftretende BKW-Rundsteuersignal jedoch die Gesamtspannung kurzzeitig so anhub, dass ein Defekt auftrat.

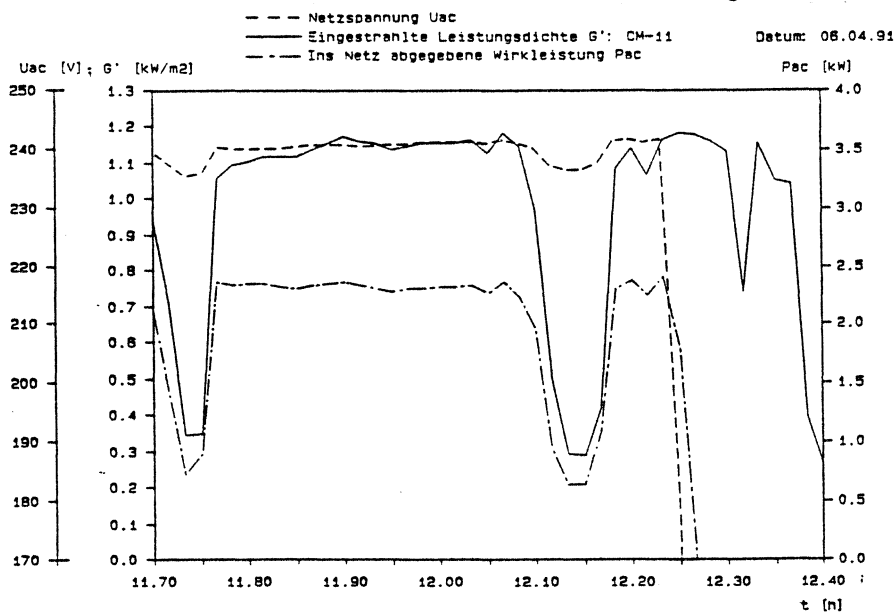


Bild 6: SOLCON-Ausfall am 6.4.91 durch 50Hz-Ueberspannung

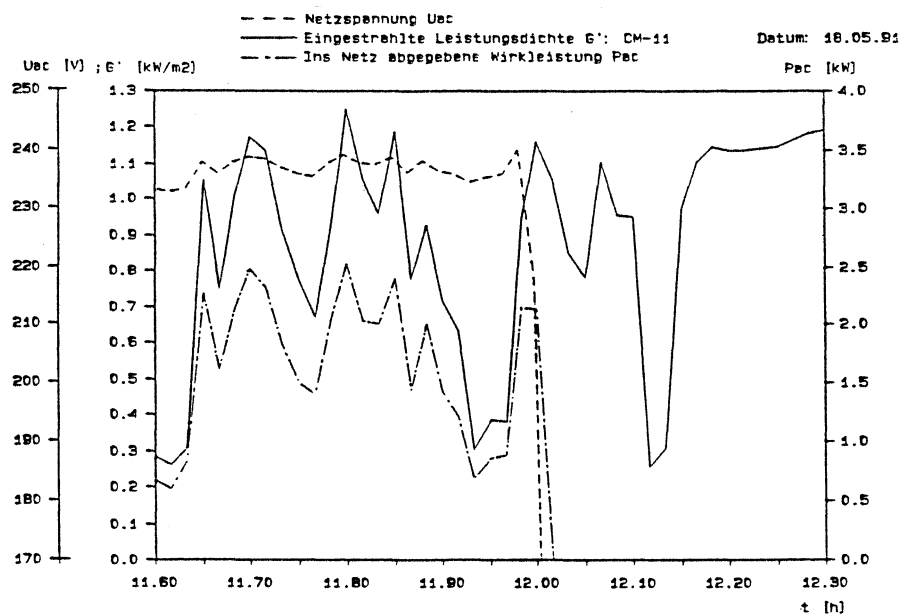


Bild 7: SOLCON-Ausfall am 18.5.91 durch hohe 50Hz-Spannung und BKW-Rundsteuersignal

Durch eine Schaltungsänderung Ende Mai 91 konnte dieses Problem entschärft werden. Nach dieser Aenderung vorgenommene forcierte Tests mit leicht erhöhter Netzspannung am 31.5.91 zeigten einwandfreie Funktion trotz Rundsteuersignalen bis zu Spannungen von 247V. Bei noch höheren Spannungen (248V bis 253V) schaltete das Gerät im allgemeinen aus und startete erneut nach dem Unterschreiten einer Spannung von ca. 242V. Nur wenn bei ca. 248V gerade auch noch ein Rundsteuersignal auftrat, geriet das Gerät in einen irregulären Betriebszustand mit Leistungsschwankungen auf kleinem Niveau, aus dem nur ein manueller Neustart herausführte. Beim forcierten Test des PV-WR-1500 mit hohen Betriebsspannungen traten keine Defekte auf. Das Gerät funktionierte bis zu Spannungen von ca. 252V einwandfrei.

1.6 Geräusentwicklung im Betrieb

Beim SOLCON und PV-WR-1500 treten kaum störende, beim SI-3000 und EGIR10 jedoch ziemlich laute Geräusche auf. Diese Geräte sollten nur in unbewohnten Räumen (Keller, Estrich usw.) betrieben werden.

2. AUFTRETENDE PROBLEME UND MOEGLICHE GEGENMASSNAHMEN BEIM NETZVERBUNDBETRIEB VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN

In diesem Kapitel werden nur die wichtigsten Probleme behandelt, die an praktisch realisierten Anlagen bereits zu Schwierigkeiten geführt haben. Eine umfassendere Behandlung dieses Themas findet man in [3]. Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen sind kleine Kraftwerke, die ihre Energie ins Netz eines Elektrizitätswerkes einspeisen. Sie dürfen den normalen Betrieb des Netzes nicht beeinträchtigen und benötigen deshalb immer eine Anschlussbewilligung des entsprechenden Elektrizitätswerkes.

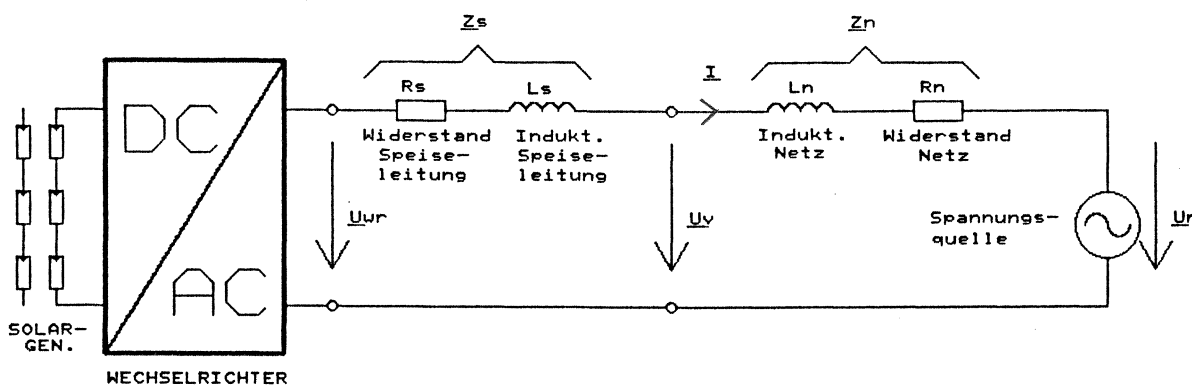


Bild 8: Prinzipschaltung einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage

Bild 8 zeigt die Prinzipschaltung einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage, bei der das Netz am Verknüpfungspunkt durch eine Ersatzquelle U_n in Serie mit der Quellenimpedanz Z_n (R_n in Serie mit L_n) dargestellt ist.

Damit Leistung ins Netz abgegeben werden kann, muss die Spannung U_{wr} immer etwas grösser als die Leerlaufspannung U_n des Netzes sein.

Die Spannung U_v am Verknüpfungspunkt ist zwar kleiner als U_{wr} , aber immer noch etwas höher als U_n . U_v darf die obere Toleranzgrenze der Netzspannung (gegenwärtig 230V +6%, also 244V) nicht überschreiten, und die Oberschwingungsspannungen dürfen die Grenzwerte der SEV-Norm 3600 nicht überschreiten, damit keine Störungen bei anderen Verbrauchern auftreten.

2.1 Oberschwingungen

Wechselrichter erzeugen je nach Schaltungsprinzip mehr oder weniger grosse Verzerrungen des Netzstromes, d.h. dieser enthält neben der 50Hz-Grundschiwingung auch Oberschwingungen. Netzgeführte Wechselrichter erzeugen nicht nur relativ starke Oberschwingungsströme, sondern benötigen auch eine gewisse Blindleistung, die bei grösseren Anlagen kompensiert werden muss. Je höher die Frequenz des Oberschwingungsstromes und je grösser die Induktivität L_n (gemäss Bild 8) ist, desto grösser ist die auf der entsprechenden Frequenz entstehende Oberschwingungsspannung. Enthält die Netzspannung zu viele Oberschwingungen, können benachbarte Verbraucher gestört werden.

Falls die erzeugten Oberschwingungsströme relativ klein, d.h. kleiner als die in der Norm SEV3601.2 resp. EN60555 angegebenen Grenzwerte, darf man das Gerät überall anschliessen. Andernfalls muss man genauere Untersuchungen und Berechnungen anstellen, um sicherzustellen, dass die Oberschwingungsspannungsbeiträge gemäss SEV3600.1 nicht überschritten werden. Da L_n sich im wesentlichen aus der auf die Sekundärseite reduzierten Streuinduktivität des Mittelspannungstrafos und der Induktivität der Verbindungsleitung zwischen Trafo und Verknüpfungspunkt zusammensetzt, ist es günstig, wenn der Trafo eher gross und die Verbindungsleitung nicht allzu lang, wenn möglich verkabelt und von nicht zu geringem Querschnitt ist.

Geringe Probleme entstehen somit, wenn ein selbstgeführter Wechselrichter in einem verkabelten Netz mit einer separaten Anschlussleitung direkt an die Hauptverteilung eines Gebäudes angeschlossen wird, an der auf Grund der vorhandenen Netzanspeisung eine Leistung zur Verfügung steht, die gross ist im Vergleich zur Nennleistung des Wechselrichters. Probleme sind dagegen zu erwarten, wenn ein netzgeführter Wechselrichter in einem Gebäude am Ende einer langen Niederspannungs-Freileitung angeschlossen wird, wo die vom Netz beziehbare Leistung vergleichbar ist mit der Nennleistung des Wechselrichters.

Ein Beispiel für den ersten, problemlosen Fall ist der Anschluss eines 3kW-Wechselrichters vom Typ SOLCON oder SI-3000 an die Hauptverteilung eines Einfamilienhauses mit einer Gebäudehauptsicherung von $\geq 40A$, einem kurzem Anschlusskabel zu einem starken Netzzuleitungskabel in der Erschliessungsstrasse und nicht zu grosser Distanz vom speisenden Transformator.

Ein Beispiel für den zweiten Fall, der ohne spezielle Oberwellenfilter Probleme verursachen dürfte, ist der Anschluss eines netzgeführten dreiphasigen Wechselrichters von etwa 30kW in einem alleinstehenden Bauernhaus, das über eine lange Niederspannungs-Freileitung angespeist wird und eine Gebäudehauptsicherung von nur 60A aufweist.

2.2 Spannungsanhebung auf der Speiseleitung

In der Schweiz beträgt die normale Spannung im Niederspannungsnetz heute 230V/400V (+6%, -10%). Liegt die Netzspannung in diesem Bereich, funktionieren angeschlossene Verbraucher ohne Probleme.

Bei einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage kann bei voller Leistung die Spannung am Netzanschlusspunkt ohne weiteres um einige Volt ansteigen. Dies kann man mit theoretischen Ueberlegungen anhand von Bild 8 (Spannungsabfall von I an Z_s und Z_n), aber auch durch praktische Messungen an realisierten Anlagen (z.B. der 3kW-Experimentieranlage SOLAB3 der Ingenieurschule Burgdorf [1]) leicht zeigen. Durch diesen nicht vermeidbaren Spannungsanstieg darf die Funktion des Wechselrichters nicht beeinträchtigt werden. Ein gut konzipierter Photovoltaikwechselrichter für Netzverbundbetrieb sollte deshalb eine um einige Prozent höhere obere Spannungstoleranz aufweisen als das Netz selbst; seine zulässige Betriebsspannung U_{wr} sollte also für die heutigen Verhältnisse in der Schweiz etwa 230V/400V (+10%, -10%) betragen. Die Spannung U_v am Verknüpfungspunkt mit dem Netz ist natürlich kleiner und darf maximal die obere Toleranzgrenze der Netzspannung erreichen (gegenwärtig 244V).

Die Grösse der entstehenden Ueberspannung lässt sich durch eine zweckmässige Installation verringern. Durch eine separate Wechselrichterspeiseleitung mit ausreichendem Querschnitt direkt ab Hauptverteilung des Hauses kann R_s klein gehalten werden. Eine Hausanschlussleitung mit genügendem Querschnitt reduziert R_n , was sich ebenfalls günstig auswirkt.

2.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Bei mehreren bisher realisierten Photovoltaikanlagen ist es bisher neben Störungen des Radioempfangs (besonders auf Lang-, Mittel- und Kurzwellen) auch zu Störungen anderer elektronischer Geräte gekommen. Da Solargeneratoren mit einer Leistung von einigen kW zusammen mit ihrer recht ausgedehnten Verkabelung ausgedehnte strahlungsfähige Gebilde darstellen und da Photovoltaikanlagen vom Morgen bis zum Abend dauernd im Betrieb sind, sollten in Gebäuden eingesetzte Photovoltaik-Wechselrichter auf der Gleich- und Wechselstromseite mindestens die Grenzwerte von CENELEC EN55014 oder noch besser von VDE871B einhalten. Falls die obigen Grenzwerte nicht eingehalten werden, müssen die hochfrequenten Störspannungen durch unmittelbar beim Wechselrichter angebrachte, grossflächig mit seinem Gehäuse verbundene, externe Netzfilter (notfalls auf der Gleich- und Wechselstromseite) weiter reduziert werden.

2.4 Wechselrichterdefekte

Bei genügendem Schutz gegen transiente Ueberspannungen (Varistoren an allen Anschlussleitungen auf der Gleich- und Wechselstromseite) sind die bisher in der Praxis festgestellten Defekte meist entweder auf niederfrequente Ueberspannungen und/oder Rundsteuersignale zurückzuführen. Abhilfe bringen die in Kap. 2.2 behandelten Massnahmen zur Reduktion von U_{wr} und die Verwendung rundsteuersignalfester Wechselrichter.

3. TIPS ZUR VERMEIDUNG VON WECHSELRICHTERPROBLEMEN

1. Nur Wechselrichter mit nachgewiesener Immunität gegen Rundsteuersignale verwenden.
2. Nur Wechselrichter verwenden, die auf der Netzseite einen Betriebsspannungsbereich von mindestens 230V +/-10% resp. 400V +/-10% haben.
3. Wenn möglich Wechselrichter verwenden, welche die Norm SEV 3601.2 resp. EN60555 einhalten.
4. Wenn möglich Wechselrichter verwenden, welche die EMV-Normen CENELEC EN55014, VDE875 oder sogar VDE871B auf der Gleich- und Wechselstromseite erfüllen. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte entsprechende Seite mit zusätzlichem Filter (i.a. Netzfilter) ausrüsten.
5. Wechselrichter mit einer separaten, möglichst niederohmigen Kabelleitung (Spannungsabfall max. ca. 1% der Netzspannung) direkt mit der Hauptverteilung des Gebäudes verbinden. Diese Hauptverteilung soll für eine Stromstärke abgesichert sein, die wesentlich grösser ist als die maximale Stromstärke des Wechselrichters (z.B. um mindestens den Faktor 3).
6. Wechselrichter mit Leistungen, die grösser als einige 10kW sind, mit einer separaten, möglichst niederohmigen Kabelleitung (Spannungsabfall max. ca. 2%) direkt mit der Trafostation verbinden. Die Trafoleistung soll wesentlich grösser sein als die maximal auftretende Wechselrichterleistung (z.B. um mindestens den Faktor 3).
7. Netzgeführte Wechselrichter möglichst nur in verkabelten Netzen verwenden. Die Leistung des Trafos, an den die Anlage angeschlossen ist, sollte mindestens um etwa den Faktor 5 grösser sein als die Leistung der PV-Anlage. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, müssen bei den kritischen Harmonischen Saugkreise vorgesehen werden. Genauere Angaben siehe SEV-Normen 3600 resp. 3601.
8. Grössere Wechselrichter (> 100kW) mit separatem Trafo direkt ans Mittelspannungsnetz anschliessen.

Diese Empfehlungen stellen lediglich persönliche Vorschläge der Verfasser dar. Sie sind auf Grund der Analyse von Problemen bei der eigenen und bei fremden Anlagen entstanden. Die Verfasser sind überzeugt, dass ihre Beachtung viele der heute beobachteten Wechselrichterprobleme eliminiert. Es kann jedoch keine Garantie irgendwelcher Art für ihre Richtigkeit oder Vollständigkeit gegeben werden. Ebensowenig kann garantiert werden, dass bei Einhaltung dieser Empfehlungen keine Probleme mehr auftreten.

Literatur:

- [1] H. Häberlin, H.P. Nyffeler und D. Renevey: "Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest". SEV-Bulletin 10/90, S. 49 ff.
- [2] Eidg. Starkstrominspektorat: "Provisorische Sicherheitsvorschrift für photovoltaische Energieerzeugungsanlagen", Ausgabe Juni 90.
- [3] H. Häberlin: "Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz". AT-Verlag, Aarau, 1991.

Dieses Projekt wurde unterstützt von:

- Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)
- Bernische Kraftwerke AG (BKW)
- Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB)
- Industrielle Betriebe Burgdorf (IBB)