

Entstörung von PV-Anlagen mit dreiphasiger Einspeisung

Volker Keddig, Stefan Weber, Berlin

Die Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen wächst in Deutschland und Europa insbesondere aufgrund der Förderung durch die verschiedenen Energie-Einspeise-Gesetze beträchtlich. Dabei konnte auch die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Anlagen in den letzten Jahren deutlich verbessert werden. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die notwendigen Entstörmaßnahmen, die beispielsweise den Anzeigen gegen Anlagenbetreiber durch Funkamateure bei der Bundesnetzagentur vorbeugen.

1 Bedeutung der EMV und mögliche Störungsursachen

PV-Anlagen zur Energieerzeugung sind innovative technische Systeme. Das Solarmodul ist das entscheidende Bauteil, um aus der Sonnenstrahlung einen Gleichstrom zu erzeugen. Herz des Systems ist aber der Wechselrichter, der diesen Gleichstrom umwandelt in Wechselstrom, und somit die Netzeinspeisung überhaupt möglich macht. Diese technisch hochwertigen Systeme müssen zuverlässig arbeiten. Äußerst wichtig für den zuverlässigen Betrieb ist die Einhaltung der **EMV-Normen** zur Erreichung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Es ist aber nicht selbstverständlich, dass eine PV-Anlage alle Bedingungen für eine saubere Verträglichkeit erfüllt. Der **Wechselrichter** arbeitet mit einer leistungselektronischen Steuerung, die den Gleichstrom in die gewünschte Netzfrequenz von 50 Hz umwandelt. Die Umwandlung des Gleichstroms in einen Wechselstrom geschieht mittels Pulsbreitenmodulation durch **IGBTs**, die elektronischen Leistungsschalter, in hocheffizienter Weise.

Aufgrund der schnellen Schaltvorgänge erzeugen diese IGBTs **hochfrequente Anteile**, die auf den Stromleitungen im PV-System vagabundieren, in Richtung Solarmodul und in Richtung Netz. Von den Leitungen werden elektromagnetische Felder abgestrahlt. Gelangen diese Störungen in das öffentliche Stromnetz, können diese Impulse zu Ausfällen anderer technischer Geräte, die an diesem Netz angeschlossen sind, führen. Für eine wirksame, aber auch wirtschaftliche EMV-Entstörung müssen die passiven Bauelemente auf die Besonderheiten der verschiedenen Systeme angepasst sein. Das kann nur von Experten gemacht werden. Die Wechselrichter werden in einem EMV-Messlabor ana-

lysiert, ihre Störpegel gemessen und die geeigneten passiven EMV-Filter abgestimmt.

1.1 Filtermaßnahmen im Systemüberblick

Die Anforderungen der Netzbetreiber an dezentrale Energieerzeuger steigen stetig an. So beginnt die Auflistung der Systemkomponenten einer Photovoltaikanlage (Bild 1) auf der **AC-Seite** mit einer Schalteinrichtung, um den Wechselrichter ans Netz zu schalten. Dabei muss die übergeordnete Steuerung einen Netzausfall erkennen und die Anlage auch zuverlässig wieder abschalten können. Die Filtermaßnahmen **Netzdrössel** und **Sinusfilter**, häufig auch LCL-Filter genannt, dienen der Unterdrückung der taktfrequenten Anteile der erzeugten Leiter-Leiter-Spannung. Die **Funkentstörung** im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz wird durch ein **EMV-Netzfilter** gewährleistet. Die **DC-Seite** des Systems besteht aus einem Energie-Zwischenspeicher, einer Einrichtung zur MPP-Regelung und bei kleineren Anlagen

einem Hochsetzsteller, um das für die Rückspeisung nötige Spannungsniveau zu erreichen. Es wird ein **DC-EMV-Filter** eingesetzt, um zu verhindern, dass leitungsgebundene Störungen auf die Stromleitungen zwischen Solarmodulen und Wechselrichter gelangen. Er wirkt als Portal, das nur geringfügige Störungen passieren lässt.

2 Stand der Normung zur Störaussendung

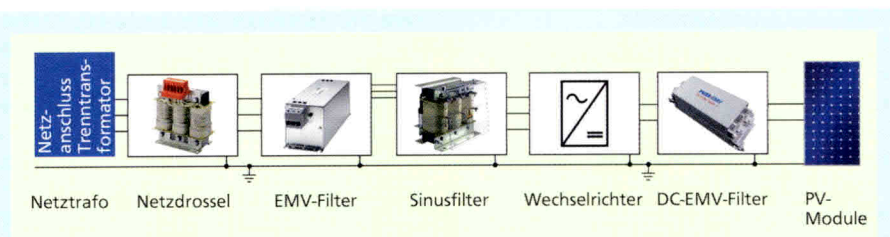
2.1 Auf der AC-Seite

Über die elektromagnetische Verträglichkeit mit Funkstörungen auf der Netzseite von Photovoltaikanlagen herrscht weitgehend Konsens. Es kommen die EMV-Fachgrundnormen für die Störaussendung im Wohnbereich **EN 61000-6-3** und im Industriebereich **EN 61000-6-4** zur Anwendung. Im Frequenzbereich der leitungsgebundenen Störungen von **150 kHz bis 30 MHz** sind die bekannten **Grenzwerte der Klassen B und A** an der Netznachbildung einzuhalten.

Insbesondere durch die neue Einspeiserichtlinie der Energieversorger im deutschsprachigen Raum sind auch die Bedingungen für Netzurückwirkungen im Bereich der Netzfrequenz **bis 2 kHz** wohldefiniert. Hier kommt bei kleinen einphasigen Wechselrichtern die **EN 61000-3-12** zur Anwendung.

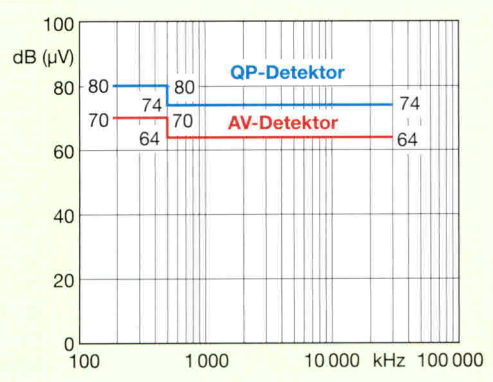
2.2 Empfehlung für die DC-Seite

Um die Grenzwerte für abgestrahlte Störaussendungen einzuhalten hat es sich bewährt, auch auf der DC-Seite die Grenzwerte für zusätzliche Anschlüsse aus **Tabelle 1 der EN 55014-1** einzuhalten (Bild 2). Diese Grenzwerte haben auch in der Antriebstechnik für den Betrieb mit ungeschirmten Motorleitungen Akzeptanz gefunden und sind



1 Filtermaßnahmen eines elektromagnetisch verträglichen dreiphasigen PV-Wechselrichters

2 Grenzwerte für die Störspannung im Frequenzbereich 148,5 kHz bis 30 MHz der Tabelle 1 aus EN 55014-1



Autoren
 Dipl.-Ing. Volker Keddig, Geschäftsführender Gesellschafter;
 Dr. Stefan Weber, Technischer Leiter, Fuss-EMV GmbH Berlin.

als **Tabelle 16 in der EN 61800-3** festgelegt. Wir erwarten, dass diese Grenzwerte auch in die Produktnorm für Photovoltaikanlagen mit der einfachen Messung mit einem Tastkopf nach CISPR16 Einzug halten. Eine eigens zu definierende Impedanz-Nachbildung für PV-Generatoren ist aus unserer Sicht nicht erforderlich, um die elektromagnetische Verträglichkeit zu gewährleisten.

2.3 Handlungsbedarf

Ein Problem für die EMV-Auslegung ist der Frequenzbereich zwischen **2 und 150 kHz**. In diesem Bereich liegen die Arbeitsfrequenzen der Wechselrichter von 4 bis 16 kHz. Der Filteraufwand, um die taktfrequenten Anteile von Strom und Spannung auf der Netzseite vollständig zu unterdrücken, ist enorm. Es gibt kein genormtes Messverfahren und keine Grenzwerte für diesen Bereich, sodass der Entwickler zunächst keinen Anhaltspunkt hat, welche Restrippel als verträglich eingestuft werden können.

3 Gleich- und Gegentaktstörungen

Der 2-Punkt-Wechselrichter erzeugt prinzipbedingt nicht nur eine **Störspannung zwischen den Leitern** (Gegentakt, Differential-Mode), sondern auch **gegen Erde** wird der Mittelpunkt am Wechselrichteranschluss mit Taktfrequenz um die gesamte Zwischenkreisspannung umgeladen (Gleichtakt, Common-Mode). Beide Störungen befinden sich auf dem Niveau der Zwischenkreisspannung und müssen – auch in Industrieumgebungen – gefiltert werden. Dabei steigen die Störungen grundsätzlich mit steigender Zwischenkreisspannung und Taktfrequenz. Auf der anderen Seite sind höhere

Frequenzen durch passive Tiefpassfilter einfacher zu bedämpfen als niedrigere Frequenzen. Daher ist der Aufwand für die Funkentstörung (>150 kHz) wesentlich geringer, als der Aufwand zur Filterung der Taktfrequenz.

4 Taktfrequente Störgrößen im Netz

Der größte Teil der im Systemüberblick aufgeführten Filtermaßnahmen dient der Filterung der Taktfrequenz und ihrer ganzzahligen Vielfachen. Während der Aufwand für die Funkentstörung durch ein EMV-Netzfilter noch überschaubar ist, bestimmen die **Taktfrequenzfilter** maßgeblich Größe und Kosten des Systems.

Den größten Kostenanteil bei den passiven Bauelementen hat der **Trenntrafo** zur galvanisch getrennten Netzeinspeisung, weshalb trafolose Systeme auf der Wunschliste der Anlagenbetreiber ganz oben stehen. Arbeitet man mit einer PV-Anlage auf ein IT-Netz, das über einen Trenntrafo an das Verteilnetz angeschlossen wird, so hat dies den großen Vorteil, dass die taktfrequenten Gleichtaktstörungen (Common-Mode) durch den Trenntrafo entkoppelt werden. Bei trafolosen Systemen muss das Filter- und Erdungskonzept deshalb die Gleichtaktstörungen berücksichtigen, was bedeutenden Mehraufwand erfordern kann. Auf Platz zwei der großen und teuren Filterbauteile steht die **Sinusfilterdrossel**, die direkt am Wechselrichteranschluss angeschlossen ist. Da der spannungsgespeiste Pulswechselrichter auf eine Induktivität arbeiten muss, um einen sinusförmigen Strom erzeugen zu können, ist diese Induktivität immer erforderlich. In Industrieumgebungen sind rückspisefähige Lösungen möglich (und üblich),

die mit dieser einen Induktivität als Filtermaßnahme für die Taktfrequenz auskommen.

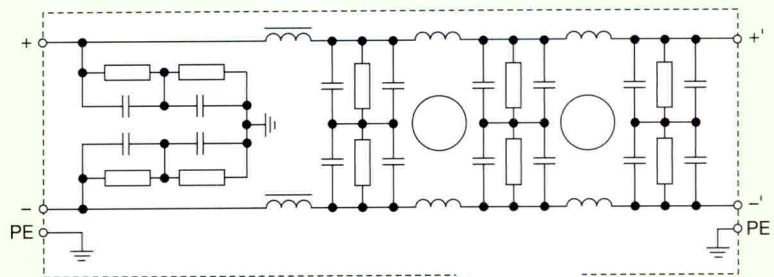
Für PV-Anlagen gelten höhere Anforderungen an die Spannungsqualität, sodass immer eine Kondensatorbeschaltung (Sinusfilter) und eventuell eine weitere Netzdrossel erforderlich ist. Zu vernünftigen Ergebnissen kommt man je nach Taktfrequenz mit einer **Gesamt-Verdrosselung** von $U_k = 8\%$ bis 16% .

5 Funkstörungen auf der Gleichstromseite

Eine Besonderheit von PV-Anlagen ist die **enorme Ausdehnung der DC-Seite** des Systems. Die Solarmodule erstrecken sich über viele Quadratmeter, gar Hektar Fläche. Hunderte von Metern Leitung werden in der Regel **ungeschirmt** verlegt, um die einzelnen Stränge anzuschließen.

Dabei wirken nicht nur ungeschirmte Leitungen als Antennen für hochfrequente Funkstörungen, sondern auch die Solarmodule selbst. Dies führte dazu, dass sieben von acht gängigen Anlagen im Jahr 2000 als nicht verträglich eingestuft werden mußten [4]. Dabei kommt es nicht nur zu Anzeigen durch Funkamateure bei der Bundesnetzagentur gegen Betreiber kleiner PV-Anlagen in Wohngebieten, sondern auch zu handfesten EMV-Problemen bei Bewohnern und Gewerbe in der Nähe größerer Anlagen.

Die DC-Seite der PV-Anlage ist als **Antenne** nicht nur eine Quelle von Funkstörungen, sie ist auch besonders „offen“ für Wirkungen von direkten und indirekten Blitzschlägen, was Maßnahmen des Blitzschutzes erfordert. In seiner Arbeit über kleine einphasige Wechselrichter für den Einsatz in Wohnumgebungen schreibt S. Schattner:



➊ **Beträchtlicher Filteraufwand:** rechts im Bild ein DC-Filter für PV-Wechselrichter mit 100 kW_p, oben eine Prinzipskizze der dreistufigen Schaltung des Filters



„Aus der Praxis ist bekannt, dass sich die PV-Wechselrichter-Hersteller schwer tun, auf der DC-Seite ihrer Wechselrichter im Bereich kleiner 500 kHz die AC-Grenzwerte einzuhalten. Hier sollten in jedem Fall Erleichterungen geschaffen werden.“ [3]

Schattner versucht deshalb, von den Grenzwerten für die Abstrahlungen über die typischen Impedanzen der DC-Seite von PV-Anlagen Grenzwerte für die DC-Seite abzuleiten. Diese müßten dann an einer speziellen Netznachbildung gemessen werden, um ein für die Photovoltaik genormtes und reproduzierbares Messverfahren abzuleiten.

Der **Filteraufwand auf der DC-Seite** ist in der Tat beträchtlich (Bild ➊), sodass die Grenzwerte der AC-Seite sicher nicht einfach auf die DC-Seite übertragen werden sollten. Aus unseren Erfahrungen ist es für die zuverlässige Vermeidung von EMV-Problemen aber völlig ausreichend, bestehende Verfahren, beispielsweise aus der Antriebstechnik (Tabelle 16 der EN61800-3) und die dort festgelegten Grenzwerte anzuwenden.

6 Zusammenfassung

Dass eine PV-Anlage nicht gründlich genug entstört ist, kann sich auf vielfältige Art und Weise bemerkbar machen. Beispielsweise hat das TV-Gerät auf dem Bildschirm ein Rauschen, ein Amateurfunker wird in seinem Frequenzband gestört, die elektromagnetischen Felder stören Signale auf Steuerleitungen oder gar auf Transpondern. Unangenehm kann es werden, wenn die von Störungen ihrer Anlage betroffenen Menschen die Bundesnetzagentur (BNetzA) anrufen und die Störungen anzeigen. Wenn die Überprüfungen der BNetzA die Störungen bestätigen, ist eine empfindliche Geldstrafe fällig. Eine zügige

Analyse ist also angebracht. Mit Netzanalysator und Störpegelmessempfänger können die Ursachen aufgespürt werden.

Photovoltaik-Anlagen erfordern ein erhebliches Maß an EMV-Filtertechnik auf der DC-Seite und auf der AC-Seite, um zuverlässig zu funktionieren und benachbarte Einrichtungen der Industrie, der Landwirtschaft und Wohnansiedlungen nicht negativ zu beeinflussen. Man kann zufrieden stellende EMV-Filterungen nur durch anlagenspezifische Auslegung der EMV-Filter und der LCL-Filterung erreichen. Die Auswahl von sogenannten Standard-Filtern aus Katalogen nach angegebenen Dämpfungswerten erfüllt diese Anforderungen meistens nur ungenügend.

Jeder Hersteller und Inverkehrbringer dieser PV-Anlagen ist gesetzlich verpflichtet, die CE-Konformität einzuhalten, das beinhaltet auch die Einhaltung des EMV-Gesetzes. Das EMV-Gesetz verweist auf die Einhaltung der zutreffenden EN (Europäische Norm) oder IPC (Harmonisierte Internationale Norm). Entwickler und Hersteller dieser Anlagentechnik sind gut beraten, wenn sie bereits in der Entwicklungsphase frühzeitig die Anforderungen an die EMV berücksichtigen.

Literatur

- [1] J. Kirchhof/G. Klein: „EMV-Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Zähler“, OTTI e.V. (Hrsg.): 24. Symposium „Photovoltaische Solarenergie“ Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) 2009 (Tagungsband), S. 64 bis 71.
- [2] S. W. Best: „Solarinverter – Auch die EMV muss stimmen“, Elektronik Industrie Heidelberg 02a/2008.
- [3] S. Schattner: „Die elektromagnetische Verträglichkeit und der Blitzschutz von Photovoltaik-Anlagen“, Dissertation, Karlsruhe 2001, S. 88.
- [4] S. Schattner, G. Bopp, T. Erge, R. Fischer, H. Häberlin, R. Venhuizen, B. Verhoeven: „PV-EMI - Developing Standard Test Procedures for the Electromagnetic Compatibility (EMC) of PV Components and Systems“. Proc. 16th EU PV Conf., Glasgow, United Kingdom, 2000. ■