Neue EMV – Messverfahren für Wechselrichter

J. Kirchhof, Yichuan Zhang
Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Königstor 59, D-34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-254, Fax: (0561) 7294-200
E-Mail: info@optinos.de
Internet: http://www.optinos.de; http://www.iset.uni-kassel.de

1 Einleitung

Für PV-Wechselrichter existiert keine EMV-Produktnorm. EMV-Prüfungen müssen daher entsprechend der Fachgrundnormen für die Anwendungsbereiche Industrie (EN 61000-6-2, EN 61000-6-4) oder Wohnbereich und Leichtindustrie (EN 61000-6-1, EN 61000-6-3) durchgeführt werden. In diesen Querschnittsnormen finden die besonderen Anforderungen von PV-Wechselrichtern jedoch keine Berücksichtigung. Insbesondere die aktuelle Version der EN 61000-6-3:2007 belegt diesen Missstand, da dort eine Änderung für die Messung der DC-seitigen Störaussendung eingeführt wurde, die mit vielen trafolosen Wechselrichtern inkompatibel ist [1]. Untersuchungen des Fraunhofer IWES haben außerdem ergeben, dass das Störaussendungs- und Störfestigkeitsverhalten im Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 150 kHz einer Regulierung bedarf, da in der Praxis gravierende EMV-Störfälle bei bestimmten Wechselrichtern in Verbindung mit speziellen elektronischen Elektrizitätszählern aufgetreten sind. Das IWES arbeitet an Lösungsverfahren, um den störungsfreien Betrieb von Wechselrichtern und Elektrizitätszählern zu ermöglichen.

2 DC-seitige Netznachbildung

In der aktuellen EN 61000-6-3:2007 wird für EMV-Störaussendungstests auf der DC-Seite zwingend die Verwendung einer 50 Ohm / 50 µH Netznachbildung vorgeschrieben. Diese Netznachbildungen weisen je Prüflingsleitung eine Erdkapazität von bis zu 12 µF auf. Bei vielen trafolosen Wechselrichter-Konzepten stellt sich während des Betriebs an der DC-Seite ein recht hoher Gleichtakt-Wechselspannungsanteil ein [2] [3], der in Verbindung mit den Erdkapazitäten der DC-Netznachbildung zu unzulässig hohen kapazitiven Ableitströmen führt. Dies verursacht eine Überlastung des Wechselrichters und führt damit zu unrealistischen EMV-Störaussendungen [4], die unter realistischen Betriebsbedingungen des Wechselrichters nicht auftreten. In früheren Ausgaben der EN 61000-6-3 waren 150-Ohm Netznachbildungen zulässig, welche mit niedrigen Erdkapazitäten ausgestattet waren [5]. Das IWES hat diesen Missstand erkannt und die Problematik in nationale und internationale Normungs-

gremien eingespeist. Auf nationaler Ebene wurde hierfür der DKE AK 767.11.13 „EMV von DC/AC-Wechselrichtern zur Einspeisung von Energie aus Photovoltaik (PV) Generatoren und Brennstoffzellen in das Niederspannungsnetz“ ins Leben gerufen. Auf internationaler Ebene ist die Gründung des Maintenance Team „CISPR/B/WG1/GCPC“ innerhalb von IEC/CISPR erfolgt. Ziel dieser Normungsaktivitäten ist es, ein DC-seitiges Störaussendungs-Prüfverfahren für PV-Wechselrichter festzulegen und in der IEC/CISPR 11 einzubinden. Im IWES werden neben den bekannten Netznachbildungen auch neue Topologien mit definierter Wandlung der Störspannungen zwischen Gleichtakt zu Gegentakt überprüft.

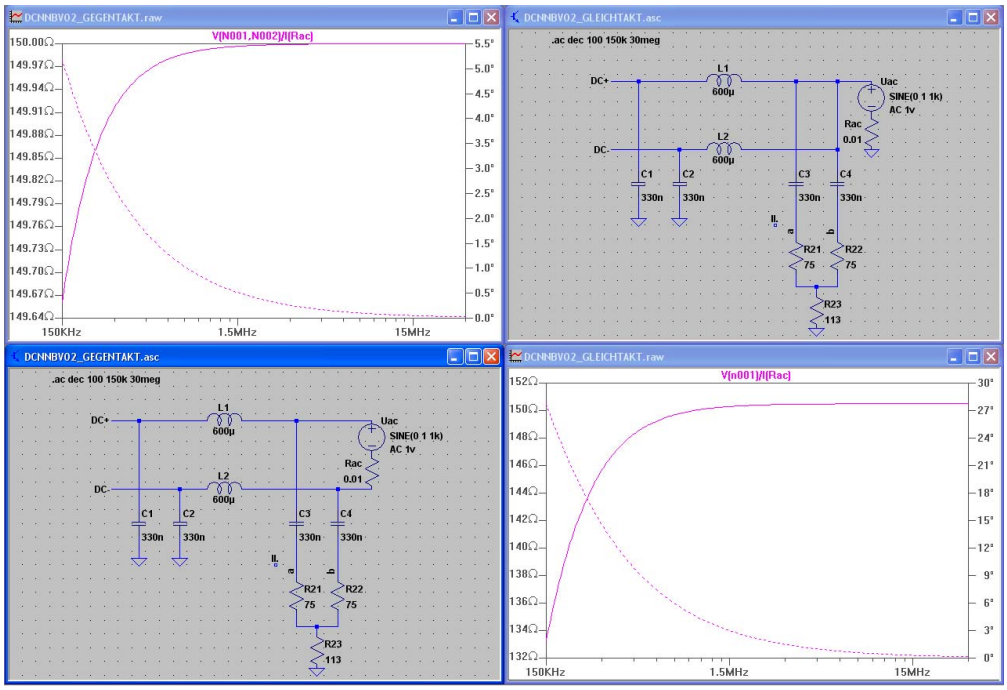


Bild 1: Simulationsergebnis von einem einfachen T-Netzwerk. Links: Gegentaktimpedanz, rechts: Gleichtaktimpedanz. R21/R22 können auch durch einen Übertrager mit Mittelanzapfung ersetzt werden.

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt zurzeit bei drei verschiedenen Netzwerk-Topologien. Dies sind ein T-Netzwerk, ein einfaches V-Netzwerk und ein Delta-Netzwerk, mit denen zukünftig DC-seitige Gleich- bzw. Gegentaktstörungen gemessen werden könnten. Jede dieser Topologien weist spezifische Eigenschaften auf. Beispielsweise kann die Impedanz des einfachen V-Netzwerks für Gleich- und Gegentakt in keinem Fall gleiche Werte aufweisen. Für den Gleichtakt-Fall wäre für jeden Zweig der Netznachbildung die doppelte Ziel-Impedanz und für den Gegentakt-Fall die Hälfte der Ziel-Impedanz notwendig. Dagegen haben die T-Netzwerke und Delta-Netzwerke dieses Problem nicht. Hier kann Gleich- und Gegentaktimpedanz unabhängig voneinander festgelegt werden.

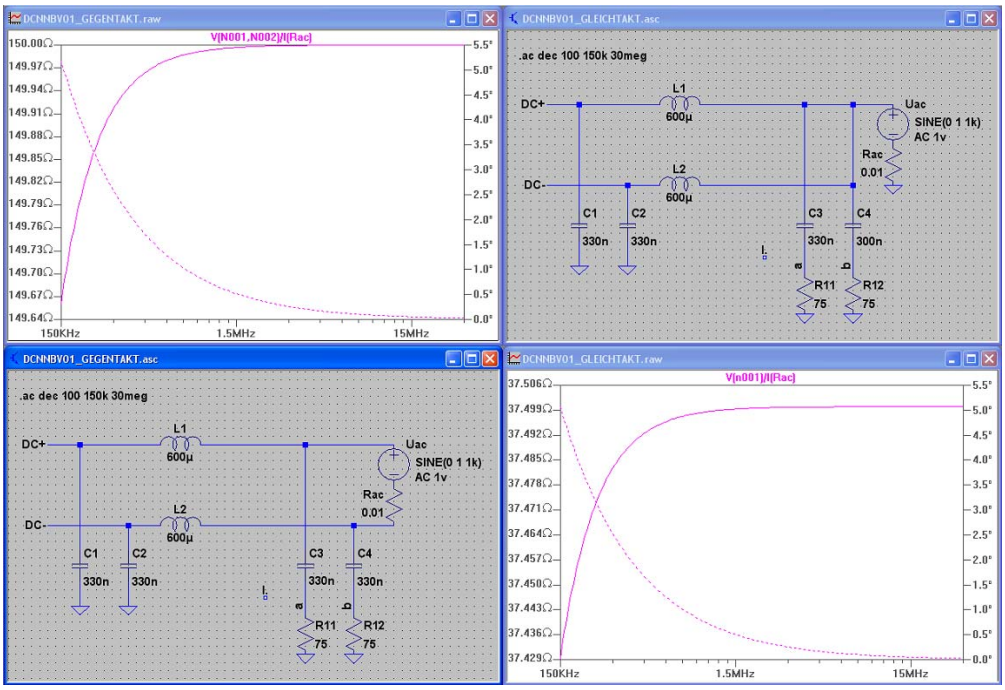


Bild 2: Simulationsergebnis eines einfachen V-Netzwerks. Links: Gegentaktimpedanz, rechts: Gleichtaktimpedanz. Mit gleichen Widerstandswerten ist die Gegentaktimpedanz viermal größer als die Gleichtaktimpedanz.

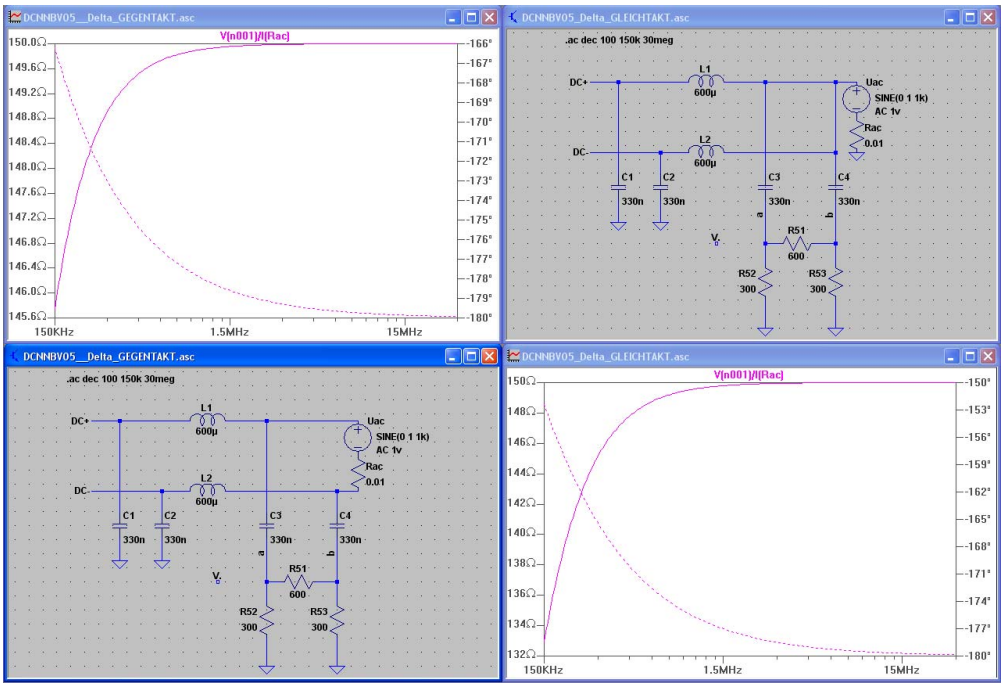


Bild 3: Simulationsergebnis eines einfachen Delta-Netzwerks. Links: Gegentaktimpedanz, rechts: Gleichtaktimpedanz.

Hinzu kommt, dass mit dem V-Netzwerk jeweils die Störspannung einer einzelnen Leitung gegen Bezugsmasse erfasst wird. Andererseits bieten Delta- und T-Netzwerke die Möglichkeit, gezielt nur den asymmetischen, oder symmetrischen An-

teil zu erfassen. Letzteres erfordert allerdings den Einsatz eines zusätzlichen Übertragers innerhalb des Netzwerkes.

3 AC-seitige Netznachbildung

Vorort-Untersuchungen und Labormessungen des Fraunhofer IWES haben ergeben, dass manche elektronischen Elektrizitätszähler unzulässig hohe Messfehler im Bereich von 18 % aufweisen, wenn sie in Verbindung mit bestimmten Wechselrichtern an einem niederohmigen Netzanschlusspunkt betrieben werden [6]. Ursache ist einerseits eine zu geringe Störfestigkeit der Elektrizitätszähler, aber andererseits auch eine zu große Störaussendung der betroffenen Wechselrichter. Die beobachtete Störung lässt sich auf den Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 150 kHz einschränken. In diesem bisher ungenügend regulierten Frequenzbereich existieren weder ausreichend definierte Störfestigkeits-Prüfverfahren, noch entsprechend geeignete Störaussendungs-Testvorschriften. Seitens der Störfestigkeit von Elektrizitätszählern wurde vom IWES bereits ein neues Prüfverfahren mit realistischer Nachbildung der zu erwartenden Störungen vorgestellt [7].

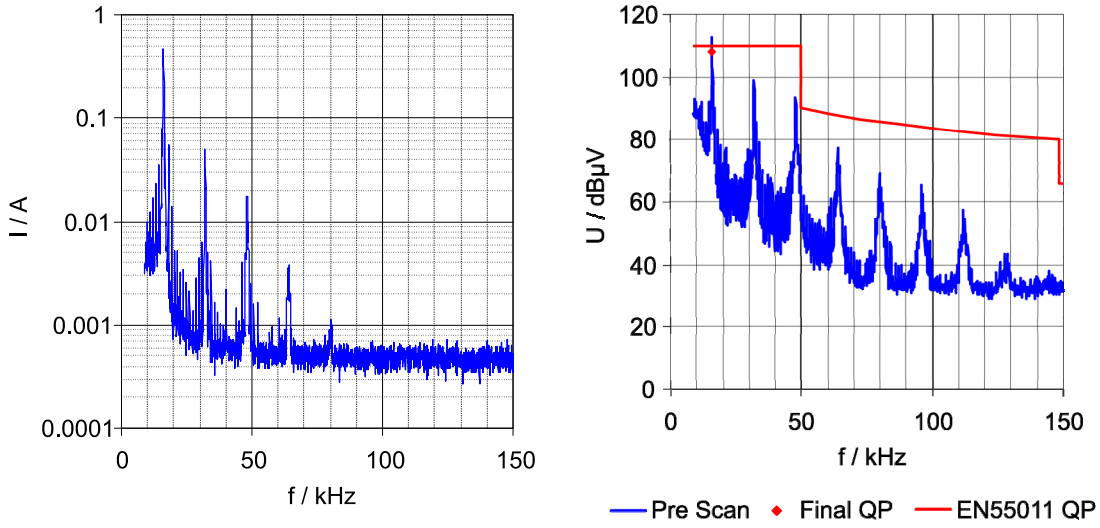


Bild 3: Links: Vorortmessung des Störstroms eines PV-Wechselrichters, der einen elektronischen Elektrizitätszähler nachweislich beeinflusst hat. Rechts: Normgerechte EMV-Prüfung des gleichen Wechselrichters an der CISPR16-Netznachbildung.

Von den zur Zeit normativ festgelegten Störaussendungs-Messverfahren für leitungsgebundene Störungen zwischen 3 kHz bzw. 9 kHz und 150 kHz soll zunächst die Prüfvorschrift für Induktionskochfelder gemäß EN 55011 betrachtet werden. Induktionskochfelder arbeiten ähnlich wie PV-Wechselrichter mit getakteter Leistungselektronik und weisen eine Taktfrequenz im Bereich einiger Kilohertz sowie eine Nennleistung im Bereich einiger Kilowatt auf. Daher treten dort Störemissionen auf,

die vergleichbar sind mit den Störemissionen von PV-Wechselrichtern, obwohl ein anderer Verwendungszweck des jeweiligen Gerätes vorliegt. Eine Anwendung der Induktionskochfeld-Grenzwerte auf PV-Wechselrichter erscheint daher zunächst möglich.

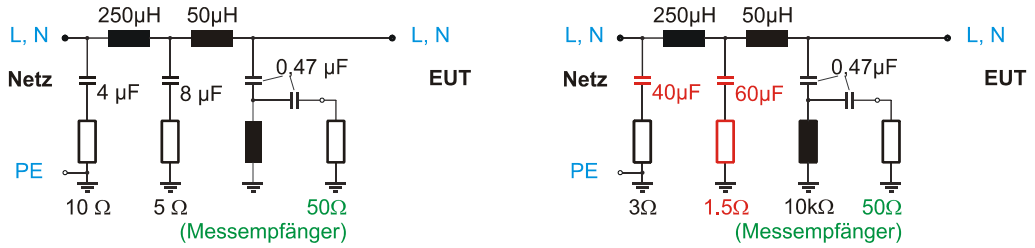


Bild 4: Links: CISPR16 Netznachbildung für Messungen gemäß EN 55011. Rechts: EN 50065 Netznachbildung für Frequenzen zwischen 3 kHz und 9 kHz.

In diesem Prüfverfahren wird eine AC-Netznachbildung (50 Ohm parallel zu 50 µH + 5 Ohm, siehe Bild 4 links), verwendet, welche in dem betreffenden Frequenzbereich eine Gegentaktimpedanz zwischen 10 Ohm und 100 Ohm aufweist (Bild 5, CISPR AMN). Bei dieser hohen Netzimpedanz kommen die in der realen Anlage schädlichen Gegentakt-Störströme des Wechselrichters nicht zustande, wenn der Wechselrichter eine Spannungsquellencharakteristik für das Taktsignal besitzt.

Dies wird durch die beiden in Bild 3 dargestellten Messungen bestätigt, bei denen der betroffene Wechselrichter die leitungsgebundenen EMV-Störspannungsgrenzwerte der DIN EN 55011 für Induktionskochfelder an der Netznachbildung einhält. An der hochohmigen Netznachbildung wird ein Störspannungspegel von etwa 110 dBµV gemessen, was einem Spannungswert von ca. 0,3V entspricht. Bei einer Impedanz von ca. 5 Ohm gegen Erde entspricht dies einem maximalen Störstrom des Wechselrichters von etwa 60 mA bei der Taktfrequenz-Grundschwingung. Der gleiche Wechselrichter weist am niederohmigen Netzanschlusspunkt in der PV-Anlage mit gestörtem Zähler einen sehr viel größeren Störstrom in der Größenordnung von ca. 0,5A auf, also fast den 10-fachen Wert im Vergleich zur normgerechten EMV-Messung gemäß EN 55011. Eine Einhaltung dieser Norm durch den Wechselrichter ist daher keine Garantie für einen störungsfreien Betrieb der PV-Anlage.

Eine weitere Norm, welche Störaussendungsgrenzwerte und Prüfverfahren im Frequenzbereich der Wechselrichter-Taktfrequenz vorschreibt, ist die EN 50065-1. Diese Norm wurde für EMV-Messungen von Geräten mit Powerline Kommunikation im Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 150 kHz geschaffen. In ihr wird für den Frequenzbereich unterhalb von 9 kHz eine modifizierte Netznachbildung vorgeschrieben (Bild 4, rechts), die den Impedanzverlauf der CISPR16 Netznachbildung bis herab zu 3 kHz extrapoliert (Bild 5, EN 50065 AMN).

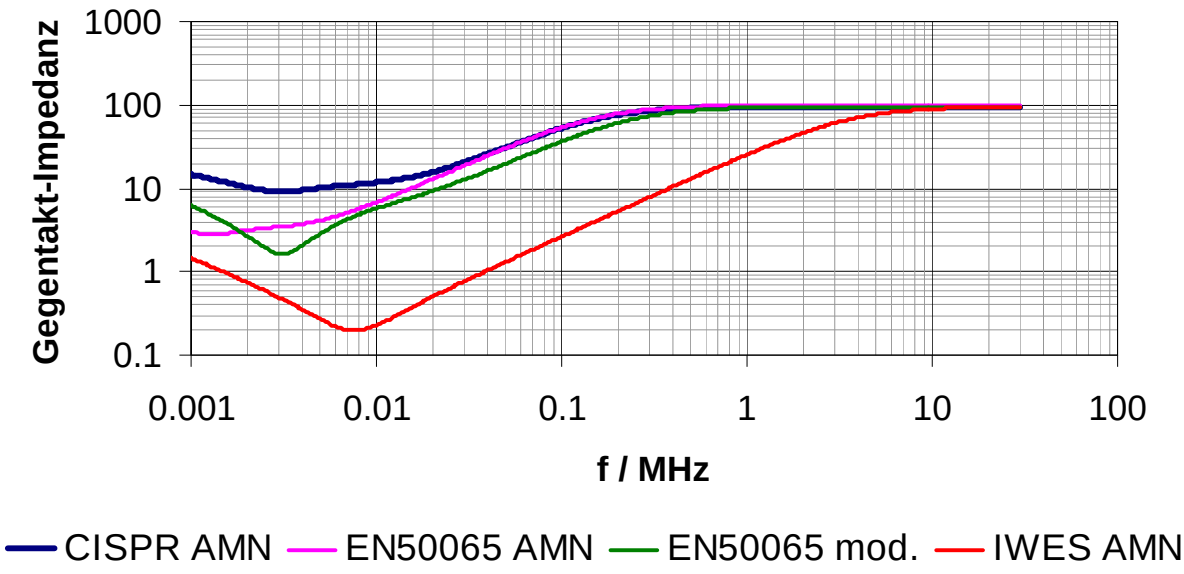


Bild 5: Gegentakt-Netzimpedanz an verschiedenen EMV-Netznachbildungen. Bisher üblich ist die CISPR16-Netznachbildung.

Der Impedanzverlauf der CISPR16 Netznachbildung wurde zu einer Zeit festgelegt, als im Niederspannungsnetz nahezu alle Verbraucher entweder mit einem 50-Hz-Trafo ausgestattet waren, oder eine reine Widerstandslast darstellten (Lampen, Heizgeräte) oder einen direkt mit dem Netz verbundenen Wechselstrom-Motor enthielten (Haushaltsgeräte und Werkzeuge). Im heutigen Niederspannungs-Netz weist der größte Teil der elektrischen Betriebsmittel am Netzeingang halbleiterbestückte Stromrichter und umfangreiche EMV-Filter mit zum Teil großen X-Kondensatoren auf (z.B. Schaltnetzteile). Dieser Trend wird durch den Ersatz konventioneller Glühlampen durch Energiesparlampen mit internem elektronischem Vorschaltgerät sowie durch den Einsatz von aktiven PFC-Schaltungen (Active Power Factor Correction) im Netzteil von elektrischen Betriebsmitteln fortgesetzt. Als Folge hiervon sind heutige Niederspannungsnetze im Bereich oberhalb der Netzfrequenz deutlich niederohmiger und kapazitiver zwischen L und N, als zu der Zeit, in der die Normimpedanz der AC-Netznachbildung festgelegt wurde.

Um bei Spannungsquellen-Charakteristik der Störquelle einen nennenswerten Störstrom zu erreichen, wäre eine Gegentakt-Impedanz der Netznachbildung zwischen 0,1 Ohm und 1 Ohm wünschenswert, zumindest für die Frequenzen, bei denen die Wechselrichter-Taktfrequenz liegt.

In der EN 50065 wird dies ansatzweise berücksichtigt, indem für informative Messungen ein zusätzliches Modifizierungsnetzwerk zur konventionellen AC-Netznachbildung parallel geschaltet wird. Dies führt zu einem realistischeren und niederohmigen Verlauf der Impedanz (siehe Bild 6 links sowie Bild 5 EN 50065 mod.).

Dieser Ansatz wurde im IWES-Vorschlag weiter verfolgt. Durch Verwendung von niederohmigeren Komponenten (Bild 6 rechts) gelingt es, einen Impedanzverlauf gemäß Bild 5 (IWES-AMN) zu erzielen. Damit der 50-Hz-Strom durch dieses Modifizierungsnetzwerk reduziert wird, kann mit Hilfe der zum 100 µF Kondensator parallel geschalteten Induktivität von 40 mH die Schaltung mit einem 55 Hz Parallelschwingkreis ergänzt werden. Bei der Dimensionierung der Bauelemente sind die um die Kreisgüte erhöhten Schwingkreisströme zu berücksichtigen. Die Güte sollte so eingestellt werden, dass bei 50 Hz und 60 Hz eine vergleichbare Reduzierung des netzseitig aufgenommenen Stroms erfolgt.

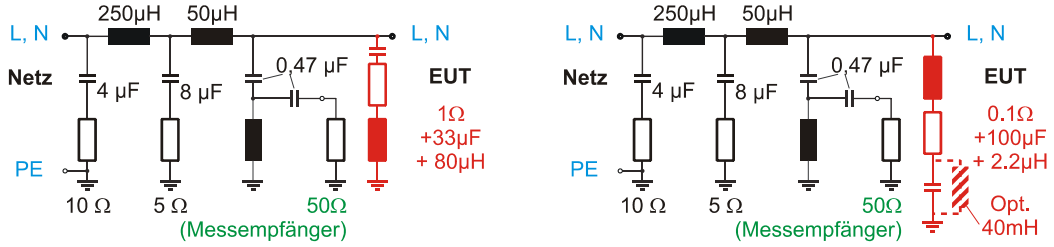


Bild 6 Links: Modifizierte CISPR Netznachbildung gemäß EN 50065 mit realistischem Impedanzverlauf (informativ). Rechts: IWES Vorschlag für eine modifizierte CISPR Netznachbildung.

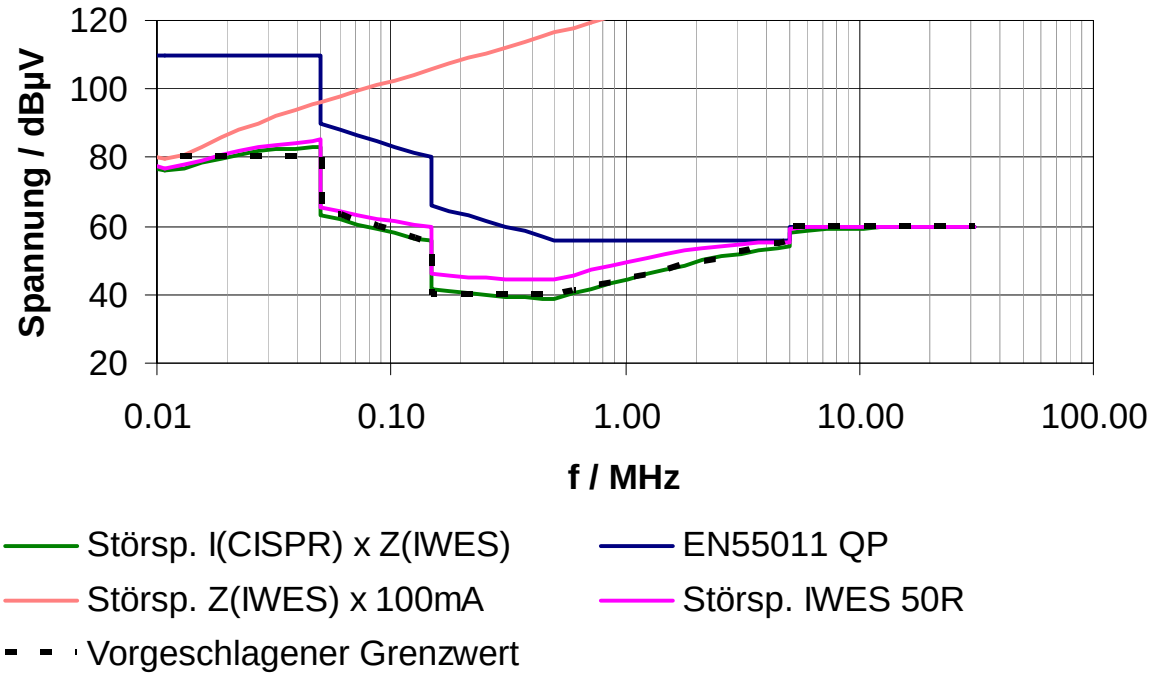


Bild 7: Grenzwertermittlung für IWES Netznachbildung.

Die beschriebenen Netzwerke bewirken, dass auch bei Frequenzen oberhalb von 150 kHz die Normimpedanz der Netznachbildung beeinflusst wird. Daher kann die modifizierte Netznachbildung oberhalb von 150 kHz nicht für normgerechte EMV-

Prüfungen verwendet werden. Eine manuelle Umschaltung der Impedanz könnte der Vermeidung dieses Defizits dienen. Da für die IWES-Netznachbildung eigene Grenzwerte festgelegt werden müssen, bietet es sich an, auch im Bereich oberhalb von 150 kHz Grenzwerte anzuwenden, die von den bekannten Grenzwerten der EN 55011 / CISPR 11 abgeleitet sind. Bei den neuen Grenzwerten sollten sowohl Störquellen mit Stromquellencharakteristik, als auch solche mit Spannungsquellen-Charakteristik sinnvoll bezüglich ihres Störpotenzials bewertet werden. Und zwar in der Art, dass zukünftig Störungen zwischen Zählern und Wechselrichtern in niederohmigen Netzen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können, wenn bei den Zählern eine akzeptable Störfestigkeit gemäß des IWES-Verfahrens vorliegt.

Auf Basis von Simulationen und Berechnungen wurden im IWES neue Grenzwerte für die Verwendung der modifizierten CISPR Netznachbildung erarbeitet (Bild 7, vorgeschlagener Grenzwert). Zur Herleitung des Grenzwertes wurden drei Fälle betrachtet. Einerseits sollte das Störverhalten einer idealen Stromquelle (Innenwiderstand = unendlich) untersucht werden. Als zweiter Fall wurde die Quellenspannung einer Spannungsquelle mit 50-Ohm-Innenwiderstand berechnet, wobei zwischen dem Innenwiderstand und der Netznachbildung jeweils eine Spannungsteilung auftritt. Im dritten Fall wurde die Spannung einer idealen Spannungsquelle berechnet, welche in der IWES-Netznachbildung einen maximalen Störstrom von 100 mA bewirkt. Die Ergebnisse für diese drei Fälle sind in Bild 7 dargestellt. Der Fall einer Spannungsquelle für 100 mA (Kurve „Störsp. Z(IWES) x 100 mA“) liefert einen beispielhaften Maximalwert für die Störspannung an der IWES-Netznachbildung der nicht überschritten werden darf, wenn elektronische Elektrizitätszähler eine entsprechende Störfestigkeit aufweisen. Wenn die Störquelle ein ideales Stromquellenverhalten aufweisen würde, so müsste die Störquelle an der IWES-Netznachbildung den Spannungspegel-Verlauf von Kurve „Störsp I(ZISPR) x Z(IWES)“ aufweisen. Um bei einer Vergleichsmessung an der klassischen CISPR-Netznachbildung ebenfalls die Grenzwerte einhalten zu können. Als weiterer Fall wurde eine Störquelle mit Quellenspannung und 50-Ohm Innenwiderstand berechnet. In diesem Fall tritt sowohl an der CISPR-Netznachbildung als auch an der IWES-Netznachbildung eine Spannungsteilung zwischen Störquellen-Innenwiderstand und Netznachbildungs-Impedanz statt. Bei der Kurve „Störsp- IWES 50R“ würde die gleiche Störquelle auch die Grenzwerte an der CISPR-Netznachbildung einhalten.

Anhand dieser Störspannungs-Verläufe wurde ein Grenzwert-Vorschlag für die IWES-Netznachbildung erstellt. Hierbei sollte der ungünstige Fall einer Störquelle mit Stromquellencharakteristik mit den Anforderungen von Zählern im unteren Frequenzbereich kombiniert werden. Der von den klassischen Netznachbildungen ab-

weichende Verlauf kommt zustande, weil die Impedanz der IWES-Netznachbildung über einen weiten Frequenzbereich eine linear mit dem Logarithmus der Frequenz ansteigende Charakteristik hat und erst oberhalb von 5 MHz in den ebenen Bereich übergeht, welcher auch bei der klassischen CISPR-Nachbildung vorhanden ist.
Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen Prototypen der Netzwerke aufgebaut und an realen Wechselrichtern erprobt werden. Ziel ist es, ein Prüfverfahren zu entwickeln, welches das Störpotenzial von Wechselrichtern und vergleichbaren Geräten realistisch bewertet und dennoch nur für kritische Geräte eine Verschärfung der Anforderungen darstellt.

4 Zusammenfassung und Perspektiven

Untersuchungen des ISET haben ergeben, dass in der EMV-Normung von PV-Wechselrichtern sowohl AC-seitig als auch DC-seitig Defizite bestehen. Das IWES will diese Defizite durch Untersuchungen und Vorschläge für neue Netznachbildungen sowie neue oder modifizierte Testverfahren klären. Im Einzelnen stellt die DC-seitige EMV-Netznachbildung mit geringer Erdkapazität einen Untersuchungsschwerpunkt dar. Neben bekannten Entwürfen werden auch die Eigenschaften spezieller Topologien geklärt. Die Modifikation der bisher üblichen AC-seitigen Netznachbildung für Störaussendungsmessungen an PV-Wechselrichtern im bisher ungenügend regulierten Frequenzbereich der Taktfrequenz wird ebenfalls im IWES untersucht. Derartige Modifikationen sind beispielsweise auch in der Norm EN 50065 für Powerline-Kommunikation definiert, jedoch erfordern Wechselrichter andere Modifikationen. Ziel ist es, die Untersuchungsergebnisse in die zuständigen Normungsgremien einzuspeisen und auf diese Weise den Betrieb und die Netzintegration von PV-Anlagen beliebiger Topologien zu vereinheitlichen und Defizite beim Zusammenspiel verschiedener Komponenten und Geräte von vorn herein auszuräumen. Hierbei sei besonders auf die bereits veröffentlichten Störbeeinflussungen zwischen Wechselrichtern und elektronischen Elektrizitätszählern verwiesen.
Die Untersuchungen fanden innerhalb des Forschungsprojekts OPTINOS (Untersuchungen und Optimierung von Prüf- sowie Testprozeduren zur Qualitätssicherung und Normenharmonisierung an Photovoltaik-Stromrichtern) statt. Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit sowie durch die beteiligten Industriepartner. Förderkennzeichen 0327576. Der Autor ist verantwortlich für den Inhalt der Veröffentlichung.

5 Literatur:

[1] Kirchhof et. al. „Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Wechselrichtern“, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008

[2] Kirchhof et. al.: „Wechselrichterwechselwirkungen - Testergebnisse aus dem Forschungsprojekt SIDENA“, 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2004

[3] Schmidt et. al.: „Gefährdungspotential transformatorloser Wechselrichter - Fakten und Gerüchte“, 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2003

[4] Kirchhof et. al.: „Sicherheitsaspekte bei Einsatz und Prüfung von transformatorlosen Wechselrichtern – Ergebnisse aus dem Projekt SIDENA“, 21. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2006

[5] Häberlin: “New DC-LISN for EMC measurements on the DC side of PV Systems: Realisation and first Measurements at Inverters”, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, München, 2001

[6] Kirchhof et. al. „Results of the OPTINOS project – Deficits and unsureness in test procedures of photovoltaic inverters”, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 2009

[7] Kirchhof, Klein: „ EMV - Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Zähler“, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009