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: 92 (2001)

Heft: 10

Artikel: Resultate von Tests an neueren Photovoltaik-Wechselrichtungen für Netzverbundanlagen

Autor: Häberlin, Heinrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855710

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: 29.11.2025

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

Resultate von Tests an neueren Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen

Der Autor gibt einen Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Tests an neueren auf dem Schweizer Markt präsenten Wechselrichtern für Netzverbundanlagen. Bei den Wechselrichtern wurden DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, Oberschwingungsströme, EMV-Verhalten, Selbstlauf, Rundsteuersignalempfindlichkeit, Einschaltleistung, Nennspannungsbereich und Betrieb bei Leistungsüberangebot untersucht.

Einführung

Die HTA Burgdorf (vormals ISB) führt seit 1988 Tests von Wechselrichtern für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen im Leistungsbereich 0,1 kW bis 30 kW durch. Spezielles Gewicht wird dabei auf Geräte gelegt, die von Herstellern aus der Schweiz stammen oder auf Geräte, welche in der Schweiz vermutlich eine bedeutende Marktpräsenz aufweisen werden. Bei allen Wechselrichtern wurden DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, Oberschwingungsströme, EMV-Verhalten, Selbstlauf, Rundsteuersignalempfindlichkeit, Einschaltleistung, Nennspannungsbereich und Betrieb bei Leistungsüberangebot untersucht. Im Rahmen mehrerer Langzeit-Messprojekte registriert die HTA Burgdorf zudem seit vielen Jahren den Energieertrag und die Zuverlässigkeit von über 40 PV-Anlagen mit etwas älteren, bereits früher (1990–1996) getesteten Wechselrichtern [1, 2, 3, 6, 7]. Daraus können auch Daten über die Langzeit-Zuverlässigkeit von Wechselrichtern gewonnen werden.

Die seit 1993 in Betrieb stehende Testanlage von 60 kW_p [10] wurde in den letzten Jahren weiter ausgebaut. Es steht nun auch ein Solargenerator-Simulator mit $U_{OC} \leq 750$ V, $I_{SC} \leq 40$ A und $P_{max} \leq 25$ kW zur Verfügung. Damit können Tests von Wechselrichtern in Zukunft viel rascher durchgeführt werden. Ferner wurde eine Netznachbildung für EMV-Messungen auf der DC-Seite entwickelt und ein Teststand für Inselwechselrichter bis 3,5 kW aufgebaut.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse der in den Jahren 1996 bis 2000 an der HTA Burgdorf durchgeführten Tests an neueren Wechselrichtern für Netzverbundanlagen. Er stellt somit eine Fortsetzung der in [1, 2, 3] publizierten Testergebnisse dar.

Adresse des Autors
Prof. Dr. *Heinrich Häberlin*
Berner Fachhochschule
Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Burgdorf
Labor für Photovoltaik
Jlcoweg 1
3400 Burgdorf

E-Mail: heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch

Wichtigste Testergebnisse

In Tabelle I sind die wichtigsten Daten und Testergebnisse der getesteten Geräte dargestellt. Der in dieser Tabelle angegebene europäische Wirkungsgrad wurde nach folgender Formel berechnet (Indexwert = Prozent der Nennleistung, Beispiel: η_5 = Wirkungsgrad bei 5% der Nennleistung):

$$\eta = 0{,}03\eta_5 + 0{,}06\eta_{10} + 0{,}13\eta_{20} + 0{,}1\eta_{30} + 0{,}48\eta_{50} + 0{,}2\eta_{100}$$

Wirkungsgrad

Generell zeigte sich, dass die getesteten Netzwechselrichter im Laufe der Zeit deutliche Fortschritte gemacht haben. Während der europäische Wirkungsgrad bei Wechselrichtern von 1,5 kW bis 3,3 kW aus den Jahren 1988 bis 1990 im Bereich 85,5–90% lag, stieg er Mitte der 90er Jahre für Geräte mit galvanischer Trennung zwischen Gleichstrom- und Wechselstromseite auf Werte von 90 bis 92%. Mittlere und grössere Wechselrichter ohne galvanische Trennung erreichen heute gar Werte im Bereich von 92,5 bis 94,4%. Auch bei den seit 1995 aufgekommenen Modulwechselrichtern (100–200 W) liegt der europäische Wirkungsgrad aller getesteten Geräte (trotz ihrer zum Teil recht kleinen Nennleistung) über 90%.

Bei den trafolosen Geräten werden heute Spitzenwirkungsgrade zwischen 93,3% und 95,5% erreicht. Bei verschiedenen Wechselrichtern konnten die Hersteller den Wirkungsgrad neuerer Geräte im Vergleich zu den Vorgängermodellen deutlich steigern. Bild 1 zeigt eine Verbesserung des Wirkungsgrades von gegen 2% bei einem Top Class 4000 Grid III im Vergleich zu einem Top Class 4000 Grid II.

Der Wirkungsgrad ist bei manchen Geräten von der Betriebsspannung ab-

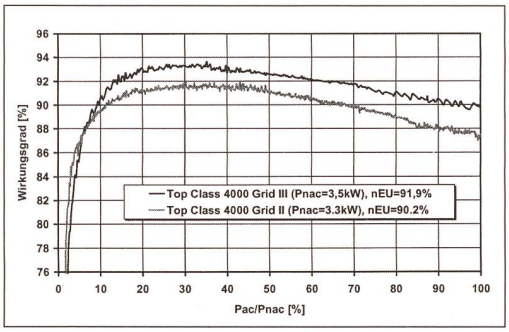


Bild 1 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung) Wechselstromleistung des Wechselrichters Top Class 4000 Grid III im Vergleich zu seinem Vorgänger Top Class 4000 Grid II.

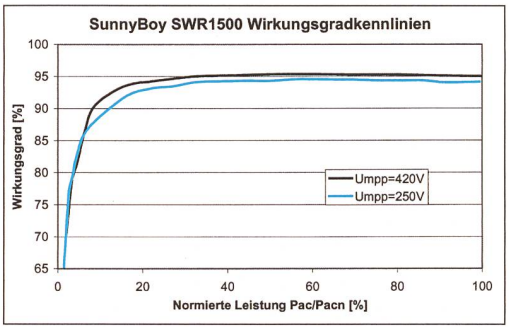


Bild 2 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung 1,5 kW_{AC}) Wechselstromleistung des einphasigen, trafolosen Wechselrichters SunnyBoy SWR1500. Wegen der grösseren Kupferverluste sinkt der Wirkungsgrad bei kleineren DC-Spannungen.

Typ	Test-jahr	S_N (kVA)	U_{DC} (typ.) (V)	Europ. η (%)	Trafo	Strom-Harm. (0,1 – 2) kHz)	EMV AC	EMV DC	RSS-Empf.	Insel-be-trieb
Edisun 200	95/96	0,18	64	90,7	HF 2)	++	++	0 1)	++	++
Sunrise 2000	96	2,0	160	89,3	NF	0	++	+	0	++
SWR 700	96	0,7	160	90,8	NF	0	0 3)	++	+	++
TC Grid III 2500	96	2,25	96	91,5	NF	+	+ 3)	++	++	++
TC Grid III 4000	96	3,5	96	91,9	NF	+	+ 3)	++	++	++
Top Class Spark	98/99	1,35	180	90,6	NF	++	+ 3)	++	++	++
OK4E-100	98/99	0,1	32	90,3	HF	++	+	- - 1)	++	0
Solcolino	99/00	0,2	64	90,6	HF 2)	++	0	- - 1)	++	++
Convert 4000	99/00	3,8	550	92,5	ohne 2)	++	+ 3)	++	++	++
SWR1500	99/00	1,5	400	94,4	ohne 2)	++	+ 3)	++	++	++
Convert 2000	01	1,8	300	94.2	ohne 2)	++	+	+	++	++

++ sehr gut, Grenzwerte weit unterschritten
+ gut, Grenzwerte eingehalten
0 genügend, Grenzwerte beinahe eingehalten
- ungenügend, Grenzwerte überschritten
- - schlecht, Grenzwerte massiv überschritten

1) genügt für Modul-WR (kleine Verdrahtung)
2) ohne galvanische Trennung DC-AC
3) leichte Grenzwertüberschreitung < 300 kHz

(TC = Top Class)

Tabelle I Überblick über die wichtigsten Daten und Testresultate der an der HTA Burgdorf von 1996 bis 2000 getesteten Netzwechselrichter (Fortsetzung zur Tabelle in [3]).

hängig. Bild 2 (SWR1500), Bild 3 (Convert 2000) und Bild 4 (Convert 4000) zeigen diese Abhängigkeit bei einigen neueren Geräten.

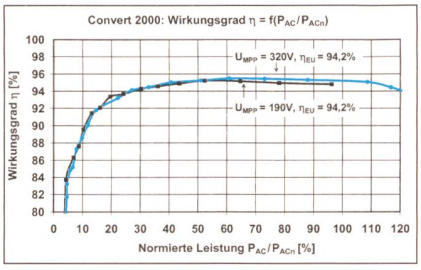


Bild 3 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung 1,8 kW_{AC}) Wechselstromleistung beim neuen trafolosen Wechselrichter Convert 2000. Wegen der grösseren Kupferverluste sinkt der Wirkungsgrad auch bei diesem Gerät bei kleineren DC-Spannungen, die Abhängigkeit ist aber relativ gering.

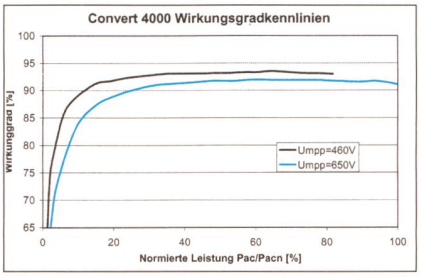


Bild 4 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung 3,8 kW_{AC}) Wechselstromleistung des einphasigen, trafolosen Wechselrichters Convert 4000. Bei höheren DC-Spannungen sinkt der Wirkungsgrad als Folge von grösseren kapazitiven Schaltungsverlusten. Es ist in der Praxis somit günstiger, das Gerät bei nicht allzu hohen Spannungen zu betreiben.

Oberschwingungen

Alle getesteten Wechselrichter sind selbstgeführt mit hochfrequenter Pulsbreitenmodulation. Deshalb sollten die Oberschwingungsströme im praktischen Betrieb keine Probleme verursachen, wenn die Netzimpedanz nicht ungewöhnlich hoch ist.

Beim SWR700 und beim Sunrise 2000 lagen die Oberschwingsströme bei Nennleistung bei einigen höheren Harmonischen knapp über den Grenzwerten. Bei allen anderen getestetem Geräten lagen die gemessenen Oberschwingungsströme dagegen unter den Grenzwerten von EN61000-3-2 (früher EN60555-2).

Bei vielen parallel geschalteten String- und Modulwechselrichtern genügt die Einhaltung der EN61000-3-2 durch jeden Wechselrichter nicht, um das Auftreten von Oberschwingungsproblemen sicher auszuschliessen. In diesem Fall sollte die gesamte Anlage (n Wechselrichter parallel) die entsprechenden Grenzwerte einhalten.

Selbstlauf bei angepasster Last nach Netzausfall

Selbstgeführte Wechselrichter haben prinzipiell eine gewisse Tendenz zum Selbstlauf nach einem Netzausfall. Dies muss aus Sicherheitsgründen vermieden werden. Die Selbstlauftests wurden mit der in [3] beschriebenen Schaltung durchgeführt.

Beim *Selbstlauftest mit angepasster Last* nach der aktuellen Schweizer Vorschrift hatte nur der Modulwechselrichter OKE4-100 ein sporadisches Selbstlaufproblem bei genau angepasster Last. Dies ist nicht weiter verwunderlich, denn in Holland wird dieser Problematik nicht die gleiche Bedeutung beigemessen wie etwa in Deutschland. Da bei Tests mit bis zu 18 parallelen Wechselrichtern an einer Phase keine erhöhte Neigung zum Selbstlauf festgestellt wurde [4], kann aufgrund der sehr kleinen Leistung dieses Wechselrichters sicher festgehalten werde, dass eine Inselbildung in der Praxis trotzdem äusserst unwahrscheinlich ist. Alle anderen Wechselrichter schalteten innerhalb der vorgeschriebenen Zeit von 5 s problemlos ab.

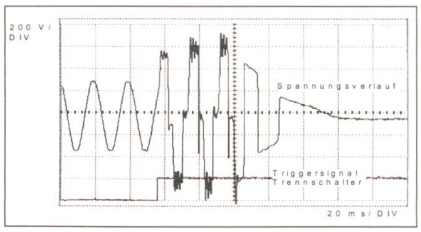


Bild 5 Spannungsverlauf des SWR700 bei Leerlaufabschaltung (ohne parallele Last). Die maximal auftretende Amplitude beträgt rund 760 V.

Verhalten bei Netzunterbruch ohne parallele Last

Bei Unterbruch der Verbindung zum Netz (ohne parallele Last) kann bei einem SWR700 während mehrerer Perioden eine Ausgangsspannung von bis zu 760 V auftreten (Bild 5). Das ist mehr als das 2,3-fache der normalen Amplitude. Sind parallel dazu Verbraucher kleiner Leistung angeschlossen, können sie durch solche Überspannungen zerstört werden. Beim SWR1500, einem neueren Gerät des gleichen Herstellers, ist dieser Effekt deutlich weniger ausgeprägt. Auch andere Wechselrichter zeigen bei entsprechenden Versuchen oft ein ähnliches Verhalten, allerdings mit deutlich kleineren Amplituden (z. B. 400 V).

Empfindlichkeit gegen Rundsteuersignale

Alle Wechselrichter wurden mit einem Rundsteuersignal-Simulator mit simulierten Rundsteuersignalen verschiedener Frequenzen getestet. Obwohl hohe Spannungen (bis zu 18 V) verwendet wurden, traten *bei keinem Gerät irgendwelche Wechselrichter-Defekte* auf. Viele Wechselrichter zeigten überhaupt keine Fehlfunktionen infolge dieser Rundsteuersignale. Wechselrichter mit permanenter Netzimpedanzüberwachung mit ENS sind allerdings meist etwas heikler. Der Sunrise 2000 war etwas empfindlicher auf Rundsteuersignale als die meisten anderen Geräte und schaltete schon bei tieferen Pegeln ab, ohne irgendwelche Defekte zu erleiden. Nach einiger Zeit nahm

er jedoch jeweils den normalen Betrieb wieder auf. Rundsteuersignale stellen somit für moderne Wechselrichter in der Regel kein Problem mehr dar.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Wie aus Tabelle I hervorgeht, ist das EMV-Verhalten neuerer Wechselrichter von erfahrenen Herstellern meist ziemlich gut. Probleme bereitet manchen Herstellern wegen der heute doch recht hohen PWM-Frequenzen von einigen 10 kHz noch der Bereich 150–300 kHz (vermutlich weniger aus technischen als aus wirtschaftlichen Gründen). Nachdem sich die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass auch auf der Gleichstromseite geeignete Massnahmen erforderlich sind, hat sich in den letzten Jahren die Situation auch auf der DC-Seite wesentlich verbessert. Bei neueren Wechselrichtern liegen die HF-Störspannungen nun meist deutlich unter den massgebenden Normen (z.B. EN55014). Sie liegen sogar oft noch unter dem von der Projektgruppe des EU-Projektes PV-EMI (JOR3 CT98 0217, Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) für den Bereich über 500 kHz vorgeschlagenen neuen Grenzwert von 64 dBµV [12]. Bei Modulwechselrichtern ist aufgrund der geringeren Grösse des Solargenerators und der damit verbundenen kleineren Abstrahlung auf der Gleichstromseite nicht der gleiche Entstöraufwand erforderlich wie bei grösseren Geräten.

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

An einigen Wechselrichtern wurde auch versucht, das Maximum Power Point Tracking zu beurteilen. Am besten ist dies mit einem Solargenerator-Simulator möglich. Allerdings war der 1995 beschaffte Solargenerator-Simulator von 10 kW nicht allzu häufig voll funktionsfähig, zeigte oft gewisse Stabilitätsprobleme und erwies sich in den letzten Jahren als recht unzuverlässig, so dass ab 1998 eigene Solargenerator-Simulatoren entwickelt wurden (siehe auch Kapitel «Der neue 25-kW-Solargenerator-Simulator»). Deshalb konnten das Maximum-Power-Tracking-Verhalten bisher nur bei einigen wenigen Geräten genau untersucht werden.

Ein Mass für die Güte der vom Wechselrichter erreichten Anpassung an den Punkt maximaler Leistung des Solargenerators (MPP) ist der MPPT-Wirkungsgrad oder Anpassungsgrad η_{MPPT}.

Durch Messung der maximalen Leistung P_{MPP} des Generators und anschliessende Messung der DC-Leistung P_{WR}, die der Wechselrichter während einer gewissen Messzeit t_M dem Generator entnimmt, kann der statische MPP-Tracking-Wirkungsgrad nach untenstehender Formel berechnet werden.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_M} p_{WR}(t)dt}{P_{MPP} \cdot t_M}$$

Im Bereich ab 10% Nennleistung lag der statische MPPT-Wirkungsgrad bei den meisten gemessenen Wechselrichtern über 97%, bei Leistungen grösser als 30% Nennleistung sogar über 99%. Somit tritt durch das MPP-Tracking im statischen Fall kein nennenswerter Ertragsverlust auf. In Bild 10 ist als Beispiel der statische MPPT-Wirkungsgrad des neuen Wechselrichters Convert 2000 dargestellt. Sehr schön zu sehen ist auch die Begrenzung bei zu grossem Leistungsangebot, wo der Wechselrichter zur Strombegrenzung aus dem MPP fährt.

Die Qualität des MPP-Trackings eines Wechselrichters kann auch sehr schön anhand der so genannten Wolkendiagramme beurteilt werden, bei denen während einer gewissen Zeit die in einem bestimmten zeitlichen Abstand abgetasteten Arbeitspunkte P_{DC} in Funktion von U_{DC} auf der DC-Seite dargestellt werden.

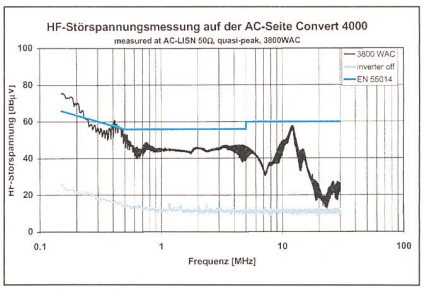


Bild 6 HF-Störspannungen, welche ein Convert 4000 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014. ***Die Grenzwerte werden bei ≈ 400 kHz angeritzt und für f < 250 kHz etwas überschritten.*** **Beim SWR1500 (aus Platzgründen hier nicht gezeigt) ist der Verlauf ähnlich.**

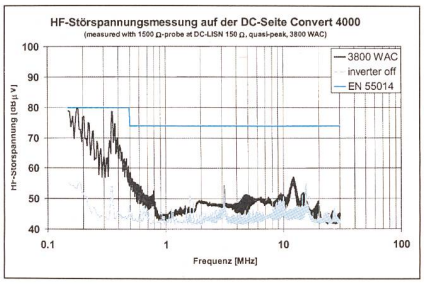


Bild 7 HF-Störspannungen, welche ein Convert 4000 auf der DC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014. ***Die Grenzwerte werden für f > 400 kHz deutlich unterschritten.*** **Beim SWR1500 (aus Platzgründen hier nicht gezeigt) ist der Verlauf ähnlich.**

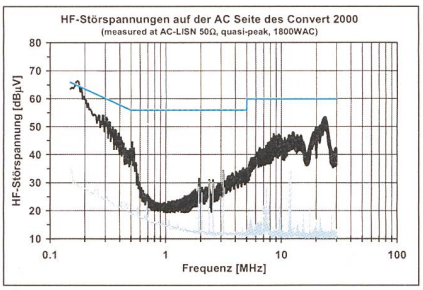


Bild 8 HF-Störspannungen, welche ein Convert 2000 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014. ***Die Grenzwerte werden nur bei ≈ 170 kHz ganz leicht angeritzt.***

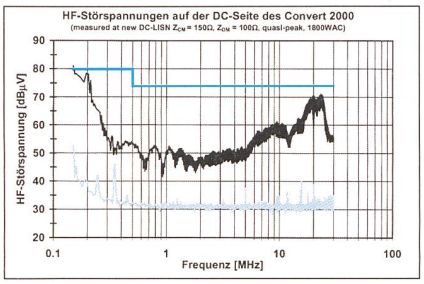


Bild 9 HF-Störspannungen, welche ein Convert 2000 auf der DC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014. ***Die Grenzwerte werden bei fast allen Frequenzen deutlich unterschritten.***

Bild 11 zeigt ein derartiges, mit dem neuen Solargenerator-Simulator von 25 kW aufgenommenes Wolkendiagramm, bei dem der Wechselrichter einen sehr hohen η_{MPPT}-Wert erreichte. Bild 12 zeigt demgegenüber ein Wolkendiagramm eines noch nicht voll ausgereiften Prototyps eines neuen Wechselrichters, der noch gewisse Probleme mit dem MPP-Tracking hat und der bei dieser Messung nur einen relativ schlechten Wert für η_{MPPT} erreichte.

Bei bewölkten Tagen mit stark schwankender Einstrahlung variiert P_{MPP} entsprechend der Einstrahlung. An solchen Tagen ist auch das dynamische Maximum Power Point Tracking wichtig. Man kann den dynamischen η_{MPPT}-Wir-

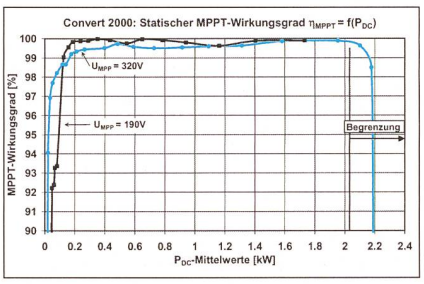


Bild 10 Statischer MPPT-Wirkungsgrad η_{MPPT} in Funktion der maximalen Generatorleistung beim neuen Wechselrichter Convert 2000. Bitte beachten: Der Massstab ist stark gedehnt!

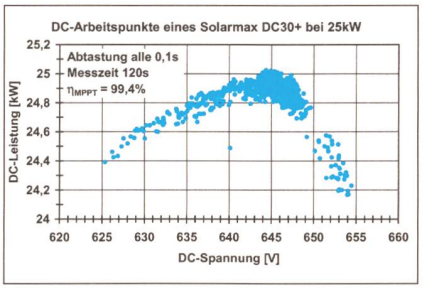


Bild 11 Wolkendiagramm eines Solarmax DC30+ im Testbetrieb mit dem neuen 25-kW-Solargenerator-Simulator gemäss Bild 13. Der gemessene Wert von η_{MPPT} liegt bei 99,4%, d.h. dieser Wechselrichter zeigt ein sehr gutes MPP-Tracking-Verhalten.

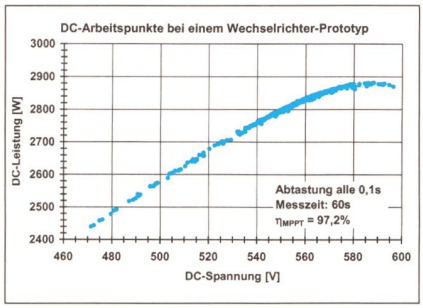


Bild 12 Wolkendiagramm des Prototyps eines neuen Wechselrichters beim Test mit dem neuen Solargenerator-Simulator. Es ist klar zu erkennen, dass das Gerät noch ein sporadisches Problem mit dem Auffinden des MPP hat.

kungsgrad dadurch gewinnen, dass im Nenner der angegebenen Gleichung das Produkt $P_{MPP} \cdot t_M$ durch das bestimmte Integral über $p_{MPP}(t)$ während der Zeit t_M ersetzt wird. Es ist vorgesehen, die verwendete Messsoftware in nächster Zeit so auszubauen, dass auch der dynamische η_{MPPT}-Wirkungsgrad gemessen werden kann.

Der neue 25-kW-Solargenerator-Simulator der HTA Burgdorf

In den letzten Jahren wurden die Wechselrichter-Messungen oft mit der Speisung ab dem alten 10-kW-Solargenerator-Simulator (600 V/47 A/10 kW) durchgeführt. Weil in den letzten drei Jahren die Pannen und Defekte immer häufiger auftraten und die Unterstützung des Herstellers nicht mehr gewährleistet war, wurde im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten sowie einem von der Berner Fachhochschule finanzierten Kompetenzaufbauprojekt ein grosser linearer Solargenerator-Simulator (750 V, 40 A, 25 kW) entwickelt und gebaut (Bild 13). Im Rahmen einer Diplomarbeit im Wintersemester 2000/2001 wurde mit diesem Gerät eine computergesteuerte automatische Messung der wichtigsten Grössen von Netzwechselrichtern realisiert, was zukünftige Tests weiter vereinfachen und beschleunigen wird.

Wechselrichter-Zuverlässigkeit

Die bereits in [3] erwähnte Überwachung der Langzeit-Zuverlässigkeit von Wechselrichtern konnte im Rahmen zweier weiterer Projekte fortgesetzt werden. Die Zuverlässigkeit der in den Langzeit-Monitoring-Projekten überwachten Wechselrichter entwickelte sich in den letzten Jahren weiterhin zufriedenstellend. Gegenüber den in [3] berichteten Werten hat sie bei den meisten Geräten noch etwas zugenommen. Mittlerweile werden bei fast allen erfassten Geräten weniger als 0,3 Hardwaredefekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr registriert. In den letzten Jahren lag der Mittelwert zwischen 0,09–0,16 Defekten pro Wechselrichter-Betriebsjahr. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die meisten dieser Geräte von erfahrenen Herstellern stammen. In letzter Zeit hat die Ausfallhäufigkeit wieder leicht steigende Tendenz, welche möglicherweise auf das steigende Alter der meisten Wechselrichter zurückzuführen ist.

Tabelle II zeigt die Aufschlüsselung der Ausfälle auf die verschiedenen Typen von Wechselrichtern. Man erkennt, dass zwischen den verschiedenen Wechselrichter-Typen beträchtliche Unterschiede bestehen. Ein besonders unzuverlässiges Gerät, das dauernd Ausfälle verursachte und die Zuverlässigkeitsstatistik deutlich verschlechterte, wurde 1998 nach dem 12. Defekt, der sich als relativ gravierend erwies, durch ein Gerät eines andern Herstellers ersetzt. Es ist möglich, dass auch bei anderen Gerätetypen nach einigen Jahren die Häufigkeit und die Schwere der Defekte ansteigen wird.

Wegen des besonders in Deutschland stark wachsenden PV-Marktes drängen aber auch neue Hersteller ohne die notwendige Erfahrung auf den Markt, deren Geräte unter Umständen nicht so ausgereift sind. Deshalb ist eine systematische Weiterführung der Tests von neuen Produkten und die Überwachung der Langzeitzuverlässigkeit an einer genügend grossen Anzahl von PV-Anlagen sicher angebracht. Auf Wunsch kann die HTA Burgdorf neue Wechselrichter vor der Markteinführung eingehend testen.

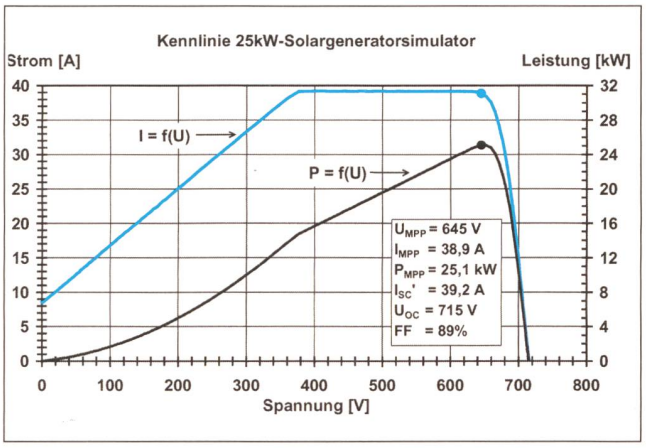


Bild 13 Kennlinie des neuen 25-kW-Solargenerator-Simulators bei Volllast mit einer Kennlinie mit relativ hohem Füllfaktor. Dank der linearen Regelung ist die Kennlinie sehr stabil und das dynamische Regelverhalten ausgezeichnet. Um die Endstufe nicht zu überlasten, wird bei Kennlinien mit Leerlaufspannungen über 350 V bei hohen Strömen und kleinen Spannungen der Strom reduziert (Foldback-Current-Limit). Da die Wechselrichter normalerweise im Bereich des MPP arbeiten, hat diese Eigenschaft keine Auswirkungen auf die Wechselrichter-Tests.

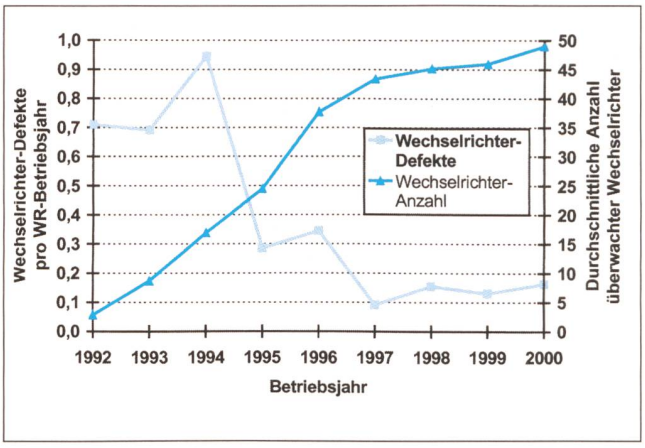


Bild 14 Wechselrichter-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr und durchschnittliche Anzahl von der HTA Burgdorf überwachter Wechselrichter. In den Jahren 1988–1991 traten oft 3 bis 4 Defekte pro Jahr auf. Die heutige Zuverlässigkeit ist um rund den Faktor 20, im Vergleich zu den Jahren 1992–1994 noch um etwa den Faktor 5 höher. Die Werte der ersten 9 Monate des Jahres 2000 wurden auf ein ganzes Jahr hochgerechnet.

Wechselrichter	Baujahr	Betriebsmonate	Anzahl Hardwaredefekte										Hardware-Defekte pro WR-Betriebsjahr									
			92	93	94	95	96	97	98	99	00	Total	92	93	94	95	96	97	98	99	00	Total
PVWR 1500	1992	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
PVWR 1800	1992	201	0	3	5	4	0					12	0,0	0,8	1,3	1,0	0,0					**0,7**
Solcon 3300	1991	150	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	**0,2**
Solcon 3400HE	1992	353	1	1	4	0	1	0	0	2	2	11	33,2	1,0	1,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,4	0,6	**0,4**
Solarmax S	1995	915				0	5	0	4	1	2	12				0,0	0,4	0,0	0,3	0,1	0,2	**0,2**
TopClass 1800	1993	83		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
TopClass 2500/4 Grid III	1996	51					0	0	0	0	0	0					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
TopClass 2500/6 Grid II	1994	152			0	0	1	1	0	0	0	2			0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	**0,2**
TopClass 2500/6 Grid III	1996	38					0	0	0	0	0	0					0,0	0,0	0,0		0,0	**0,0**
TopClass 3000	1992	145	1	2	1	1	1	0	0	0	0	6	1,9	1,3	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,5**
TopClass 4000/6 Grid II	1994	253			0	2	0	0	1	0	0	3			0,0	0,5	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	**0,1**
TopClass 4000/6 Grid III	1996	269					1	0	0	1	1	3					0,7	0,0	0,0	0,2	0,2	**0,1**
Solarmax 15	1995	65				0	0	0	0	0	0	0				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
SolarMax20	1994	126			1	0	0	0	0	0	0	1			1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,1**
SolarMaxDC30+	1998	21							0	0	0	0							0,0	0,0	0,0	**0,0**
EcoPower20	1994	57			5	0	3	2	2			12			5,6	0,0	3,0	2,0	2,3			**2,5**
EdiSun 200	1996	47					0	1	0	0	0	1					0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	**0,3**
Convert4000	1998	121							0	0	1	1							0,0	0,0	0,2	**0,1**
Total		**3023**	**2**	**6**	**16**	**7**	**13**	**4**	**7**	**6**	**6**	**67**	**0,71**	**0,69**	**0,95**	**0,29**	**0,34**	**0,09**	**0,15**	**0,13**	**0,16**	**0,27**

Tabelle II Ausfallstatistik der Wechselrichter aller von der HTA Burgdorf untersuchten Anlagen (Werte der ersten 9 Monate des Jahres 2000 wurden auf ein ganzes Jahr hochgerechnet).

Schlussbemerkungen

Sowohl die Leistungen als auch die Zuverlässigkeit neuer Photovoltaik-Wechselrichter haben sich gegenüber früheren Tests [1, 2, 3] deutlich verbessert. Es sind aber noch einige Anstrengungen nötig, um die in der Energietechnik üblichen Standards zu erreichen. Mit den neuen Testeinrichtungen ist das Photovoltaik-Labor der HTA Burgdorf gerüstet, Wechselrichter noch umfangreicher und gründlicher zu untersuchen und zur weiteren Verbesserung dieser Geräte beizutragen. Es wird auch interessant sein, zu erforschen, ob der beobachtete Trend zu grösserer Zuverlässigkeit auch längerfristig und auch bei neueren Anlagen (mit zum Teil recht hohen Spannungen auf der Gleichstromseite!) anhält. Im Rahmen eines soeben angelaufenen neuen Monitoring-Projektes wird diese Entwicklung weiter verfolgt.

Verdankungen

An diesen Messungen waren folgende aktiven und ehemaligen Assistenten des Photovoltaiklabors beteiligt: Ch. Beutler, L. Borgna, R. Fischer, J. Graf, S. Leuenberger, Ch. Liebi und Ch. Renken. Der Autor dankt allen für ihre wertvollen Beiträge zu diesen Untersuchungen. Dank gilt auch allen Diplomanden, welche im Rahmen ihrer Diplomarbeit an der Weiterentwicklung der Messtechnik des Photovoltaiklabors mitgewirkt haben.

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen mehrerer Aufträge des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt. Ein früheres Langzeit-Monitoring-Projekt, dessen Zuverlässigkeitsdaten in diesem Aufsatz ebenfalls integriert sind, wurde auch vom PSEL mitfinanziert. Die Aktivitäten der HTA Burgdorf auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden auch durch die IBB Burgdorf (heute Localnet AG) und dem EW Bern unterstützt. All diesen Firmen und Institutionen, die durch ihre Zuwendungen diese Arbeiten ermöglicht haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

[1] *H. Häberlin, H.P. Nyffeler* und *D. Renevey*: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest. Bulletin SEV/VSE 10/1990.

[2] *H. Häberlin* und *H. R. Röthlisberger*: Neue Photovoltaik- Wechselrichter im Test. Bulletin SEV/VSE 10/1993.

[3] *H. Häberlin, F. Käser, Ch. Liebi* und *Ch. Beutler*: Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Wechselrichtern für Netzverbundanlagen. Bulletin SEV/VSE 10/1996.

[4] *J. D. Graf* und *H. Häberlin*: Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen. Schlussbericht des BFE-Projektes DIS 2744 / 61703, ENET Nr. 200023, Juli 2000. Erhältlich bei ENET, Egnacherstr. 69, CH-9320 Arbon.

[5] *Ch. Liebi, H. Häberlin* und *Ch. Beutler*: Aufbau einer Testanlage für PV-Wechselrichter bis 60 kW. Schlussbericht des BFE-Projektes DIS 2744, ENET Nr. 9400561, Januar 1997.

[6] *H. Häberlin*: Energieertrag 1997 der netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in Burgdorf. Bulletin SEV/VSE 10/1998.

[7] *H. Häberlin* und *Ch. Renken*: Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation. Bulletin SEV/VSE 10/1999.

[8] *H. Häberlin*: Tests an Sinus-Wechselrichtern für Photovoltaik-Inselanlagen. Elektrotechnik 11/2000.

[9] *H. Häberlin*: Entwicklung der Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen 1989–2000. Elektrotechnik 12/2000.

[10] *H. Häberlin*: Das neue 60-kW_p-Photovoltaik-Testzentrum der Ingenieurschule Burgdorf. Bulletin SEV/VSE 22/1994.

[11] *Ch. Renken* und *H. Häberlin*: Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen. Schlussbericht PSEL-Projekt 113 / BFE-Projekt DIS 19490 / 59074, Aug. 1999.

[12] *T. Erge*: Development of Standard Test Procedures for Electromagnetic Interference (EMI) Tests and Evaluations on Photovoltaic Components and Plants (PV-EMI-Project, JOR 3 CT 98 0217) – FINAL REPORT.

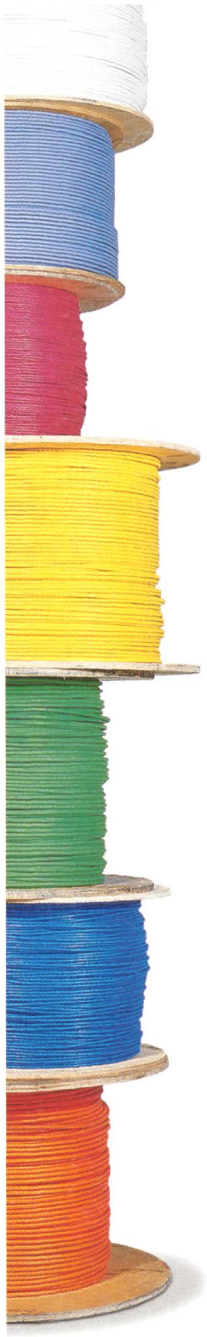
Informationen über weitere Aktivitäten des Photovoltaik-Labors der HTA Burgdorf und weitere Publikationen (teilweise online) sind unter **http://www.pvtest.ch** zu finden.

Résultats de tests réalisés sur des onduleurs photovoltaïques modernes pour des installations raccordées au réseau

L'auteur donne un aperçu des résultats des tests réalisés sur de nouveaux onduleurs pour installations raccordées au réseau, onduleurs maintenant commercialisés. Les tests ont porté sur le rendement de transformation courant continu – courant alternatif, les courants d'harmoniques, la compatibilité électromagnétique, la sensibilité aux signaux de télécommande, la puissance d'enclenchement, le domaine de puissance nominale et l'exploitation lors d'une surabondance de puissance.

Ein grenzenloses Kabel-sortiment.

Wir führen ständig Tausende von Kilometern an Daten- und Kommunikationskabeln für Sie an Lager.



BKS

BKS Kabel-Service AG
Fabrikstrasse 8
CH-4552 Derendingen
Tel: +41/32-681 54 54
Fax: +41/32-681 54 59
e-mail: bksmail@bks.ch

www.bks.ch