

Messung des dynamischen Maximum-Power-Point-Trackings bei Netzverbund-Wechselrichtern

H. Häberlin, M. Kämpfer und U. Zwahlen

Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Informatik (HTI)

Labor für Photovoltaik, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Tel: +41 34 426 68 11, Fax: +41 34 426 68 13, www.pvtest.ch, E-Mail heinrich.haeberlin@bfh.ch

1. Einführung

Im letzten Jahr wurde in Staffelstein die neue Grösse „totaler Wirkungsgrad η_{tot} “ vorgestellt, die eine bessere Charakterisierung des statischen Betriebsverhaltens von PV-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen erlaubt [1]. Dieser totale Wirkungsgrad η_{tot} ist das Produkt aus DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad η und statischem MPP-Tracking-Wirkungsgrad η_{MPPT} .

Neben dem statischen Betriebsverhalten, das durch η , η_{MPPT} und η_{tot} gut beschrieben werden kann, interessiert in der Praxis natürlich auch das dynamische Verhalten. Es ist für Zeiten mit rasch wechselnder Einstrahlung von Interesse. In einem Beitrag des FhG-ISE wurde letztes Jahr auf Grund von zeitlich hoch aufgelösten Messungen der Bestrahlungsstärke G gezeigt, dass in den auftretenden Strahlungsspitzen noch ein gewisses zusätzliches Energiepotenzial vorhanden wäre, wenn der Wechselrichter diese Spitzen effektiv verarbeiten könnte [2]. Eine Voraussetzung dazu ist die richtige leistungsmässige Dimensionierung des Wechselrichters. Allerdings kann die Energie in Strahlungsspitzen nur ausgenützt werden, wenn das dynamische Maximum-Power-Point-Tracking schnell genug ist. Aus Sicht des PV-Anlagenbetreibers ist ein gutes dynamisches MPP-Tracking zur Erzielung eines hohen Energieertrags sehr erwünscht.

2. Definition des statischen MPP-Tracking-Wirkungsgrades η_{MPPT}

Der statische MPP-Tracking-Wirkungsgrad η_{MPPT} ist wie folgt definiert [1]:

$$\eta_{\text{MPPT}} = \frac{1}{P_{\text{MPP}} \cdot T_M} \int_0^{T_M} u_A(t) \cdot i_A(t) \cdot dt \quad (1)$$

$u_A(t)$ = Spannung, $i_A(t)$ = Strom am DC-Eingang des Wechselrichters. P_{MPP} = Verfügbare maximale PV-Leistung im MPP. T_M = Dauer der Messung (Beginn bei $t = 0$). Empfohlen: 60 s bis 300 s pro Leistungsstufe.

Wie in [1] beschrieben, ist vor der Messung des statischen MPP-Tracking-Wirkungsgrades η_{MPPT} nach dem Einstellen einer neuen Leistungsstufe eine gewisse Stabilisierungsperiode erforderlich (z.B. 60 s, bei Wechselrichtern mit träger MPP-Regelung auch länger). Dann werden während der darauf folgenden Messzeit T_M (meist 1 – 5 Minuten) der DC-Strom und die DC-Spannung mit einer hohen Abtastfrequenz (z.B. 1000 bis 10000 Messpunkte/s) möglichst gleichzeitig gemessen.

3. Definition des dynamischen MPP-Tracking Wirkungsgrades

Für dynamische Tests, welche Tage mit wechselnder Bewölkung simulieren, sind relativ schnelle Variationen zwischen zwei Stufen mit bekannten P_{MPP} -Werten zweckmässig. Für kleine PV-Anlagen sind die Flanken der Leistungsvariationen dabei steiler als bei grossen Anlagen. Bei kleinen Anlagen bis zu einigen kW kann die PV-Leistung bei speziellen Wettersituationen mit scharf definierten Wolken (speziell im Frühling und Frühsommer) in weniger als 500 ms von etwa 15% bis 120% der DC-Nennleistung variieren. Ein guter Wechselrichter sollte unter solchen Bedingungen zumindest nicht ausschalten.

Ein einfach zu realisierender Test des dynamischen Verhaltens ist eine nahezu rechteckige Variation zwischen etwa 20% und 100% des Nennwertes von Strom resp. Leistung mit

steilen Flanken und nur wenigen (1-3) Zwischenstufen, die nur während sehr kurzer Zeit (z.B. während 100 ms bis 200 ms) angenommen werden.

Vor dem Beginn eines dynamischen MPP-Tracking Tests müssen wie bei den statischen Tests die P_{MPP} -Werte auf den vorgesehenen Leistungsstufen bestimmt werden und eine Stabilisierungsperiode von 1 – 5 Minuten vorgesehen werden. Dann folgen einige Testzyklen (z.B. 3), während denen die effektive dynamische MPPT-Messung stattfindet. Natürlich finden die meisten Wechselrichter den tatsächlichen MPP nicht sofort, deshalb wird die angebotene MPP-Leistung nach einer Änderung nicht sofort vollständig absorbiert. Die Zeit T , während welcher der hohe und der tiefe Stromwert während eines Testzyklus angenommen wird, kann zwischen 2 s und 60 s variieren, was eine totale Zykluszeit von 4 s bis 120 s ergibt und eine totale Testzeit $T_M = \sum T_{Mi}$ auf dem gewählten Leistungs- und Spannungsbereich von höchstens 6 Minuten ergibt.

Der dynamische MPPT-Tracking-Wirkungsgrad wird dann analog wie in (1) bestimmt:

$$\eta_{MPPT_{dyn}} = \frac{1}{\sum P_{MPPi} \cdot T_{Mi}} \int_0^{T_M} u_A(t) \cdot i_A(t) \cdot dt \quad (2)$$

wobei

$$\sum P_{MPPi} \cdot T_{Mi} = P_{MPP1} \cdot T_{M1} + P_{MPP2} \cdot T_{M2} + \dots + P_{MPPn} \cdot T_{Mn} \quad (3)$$

(Summe der verschiedenen MPP-Energien, die unter optimalen Bedingungen auf den verschiedenen Leistungsstufen absorbiert werden könnten)

T_{Mi} = Zeit während welcher der Solargenerator-Simulator die MPP-Leistung P_{MPPi} anbietet

$$\text{Totale Messzeit } T_M = \sum T_{Mi} = T_{M1} + T_{M2} + T_{M3} + \dots + T_{Mn} \quad (4)$$

Der dynamische MPPT-Wirkungsgrad stellt somit das Verhältnis der vom Wechselrichter effektiv bezogenen Energie zur während des Testzyklus vom Solargenerator-Simulator in den jeweiligen MPPs angebotenen Energie dar.

Bild 1 zeigt das vom Solargenerator-Simulator angebotene Leistungsprofil während eines dynamischen MPP-Tracking Tests. Für einen realistischen Test ist es dabei sehr wichtig, dass sich der Solargenerator-Simulator wie ein realer Solargenerator auf konstanter Temperatur verhält, d.h. dass auf der kleineren Leistungsstufe die MPP-Spannung U_{MPP} tiefer ist als bei der hohen Leistungsstufe!

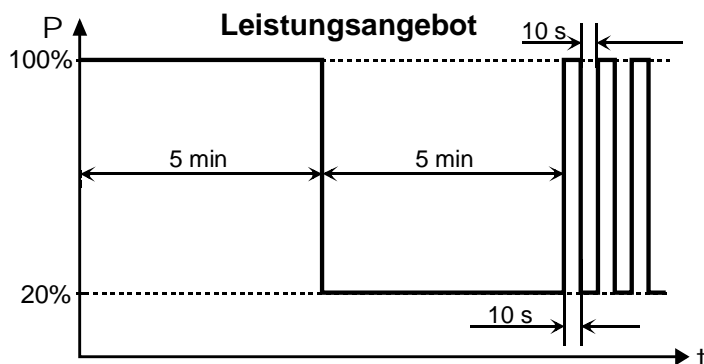


Bild 1: Vom Solargenerator-Simulator angebotenes Leistungsprofil während eines dynamischen MPP-Tracking Tests. Vor dem dynamischen Test werden einerseits die MPP-Leistungen auf der hohen und tiefen Stufe genau bestimmt, andererseits wird dem Gerät vor dem Beginn des Tests eine Stabilisierungsperiode von 5 Minuten angeboten, um den MPP auf der tiefen Stufe sicher zu finden. Der eigentliche dynamische Test beginnt erst mit den schnellen Wechselschritten tief-hoch-tief mit jeweils 10s Dauer pro Stufe.

Um einen vollständigen Überblick über das Verhalten während des dynamischen Tests zu erhalten, ist es zweckmäßig, nicht nur die vom Testobjekt aufgenommene Leistung P_{DC} , sondern auch die Spannung U_{DC} , auf der das Gerät arbeitet, in Funktion der Zeit darzustellen (siehe Bild 2). Weitere Informationen liefert ein Diagramm der gemessenen I-U-Kennlinien auf der tiefen und hohen Leistungsstufe mit den während der Messung abgetasteten Arbeitspunkten (siehe Bild 3).

4. Dynamischer MPP-Tracking-Wirkungsgrad einiger Wechselrichter

In Bild 2, 3 und 4 ist exemplarisch das dynamische Verhalten eines Wechselrichters dargestellt. Aus Platzgründen wird bei den übrigen Geräten jeweils nur eine Kurve dargestellt.

In Bild 2 und den Bildern 4 - 7 ist jeweils der zeitliche Verlauf der aufgenommenen Leistung $P_{DC}(t)$ mit eingezeichneten Leistungsniveaus P_{MPP} high und P_{MPP} low und der zeitliche Verlauf der Arbeitsspannung $U_{DC}(t)$ mit den Spannungen U_{MPP} high und U_{MPP} low angegeben. Auf diesen Diagrammen sieht man dann nicht nur, wie die momentane Leistungsaufnahme im Vergleich zur offerierten Leistung ist, sondern warum ggf. nicht die volle Leistung bezogen wurde. In Bild 2 erkennt man, dass das Gerät im Wesentlichen auf der alten MPP-Spannung der tiefen Leistungsstufe (also links vom MPP) verharrt.

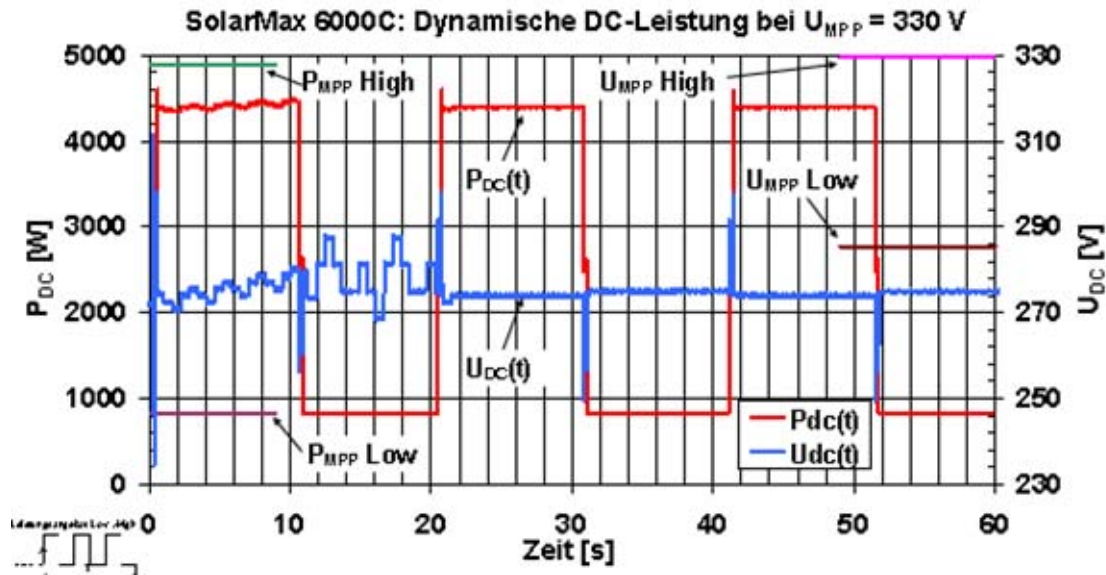


Bild 2:

Dynamische Leistung $P_{DC}(t)$ bei $U_{MPP} = 330$ V (bei voller Leistung) bei einem Solarmax 6000C und einem Leistungsangebot gemäss Bild 1. Die Leistung auf der hohen Stufe wird nach dem Wechsel von tiefer zu hoher Leistung nicht sofort voll absorbiert, der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad beträgt hier $\eta_{MPPTdyn} = 91,7\%$.

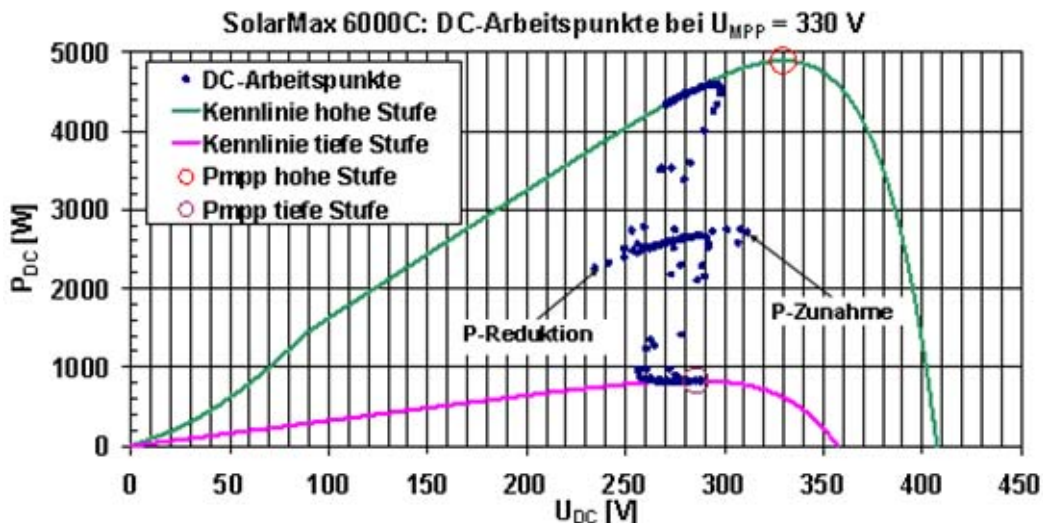


Bild 3:

DC-Arbeitspunkte der dynamischen Messung gemäss Bild 2 bei $U_{MPP} = 330$ V (bei voller Leistung). Das Gerät arbeitet praktisch während des ganzen Tests auf der MPP-Spannung der tiefen Stufe, arbeitet somit auf der hohen Stufe links vom MPP und verliert deshalb dort etwas Energie.

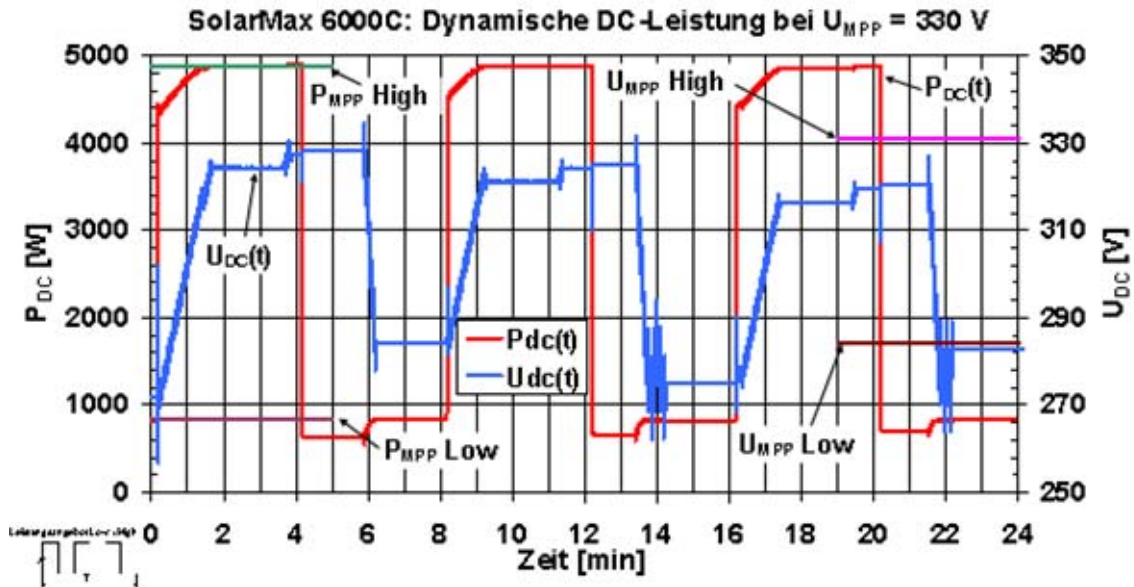


Bild 4:

Lässt man dem Gerät aber nach einem Leistungssprung aus einem stabilen Zustand mehr Zeit, findet es den MPP nach einiger Zeit immer. Nach einem Leistungssprung von einer tiefen zu einer hohen U_{MPP} beginnt das Gerät rasch den neuen MPP zu suchen; nach einem Sprung, der eine Reduktion von U_{MPP} zur Folge hat, tritt eine Verzögerung von 1 – 2 Minuten auf. In diesem Fall beträgt der dynamische Tracking-Wirkungsgrad für langsame Einstrahlungs-Änderungen $\eta_{MPPT_{dyn-L}} = 97,6\%$.

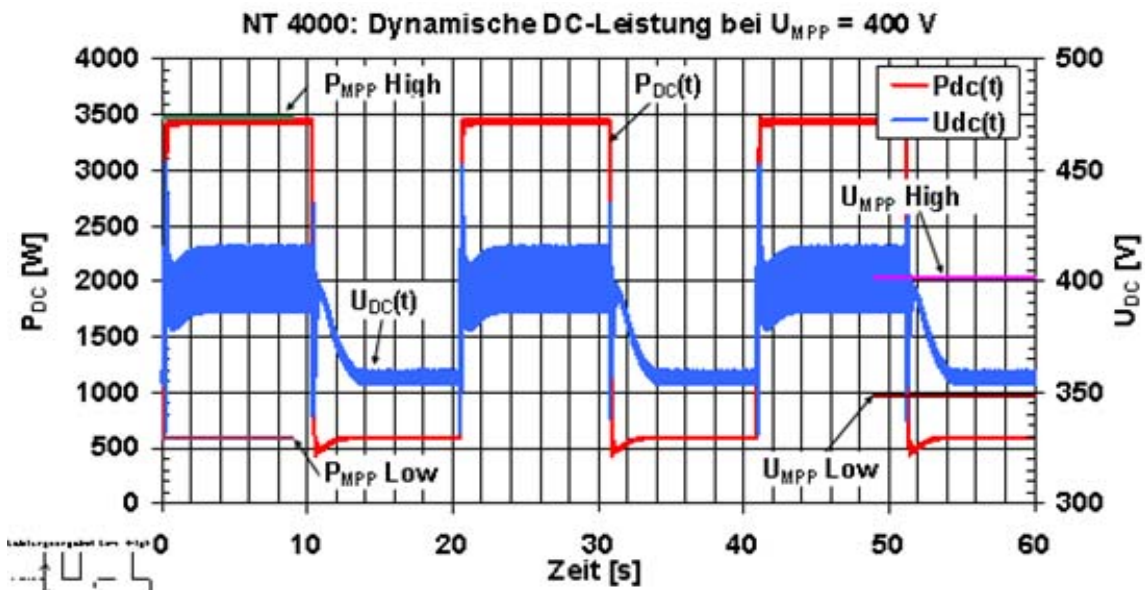


Bild 5:

Dynamische Leistung $P_{DC}(t)$ bei $U_{MPP} = 400$ V (bei voller Leistung) bei einem NT4000 und einem Leistungsangebot gemäss Bild 1. Das dynamische Verhalten dieses Gerätes ist hervorragend, der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad beträgt $\eta_{MPPT_{dyn}} = 97,3\%$.

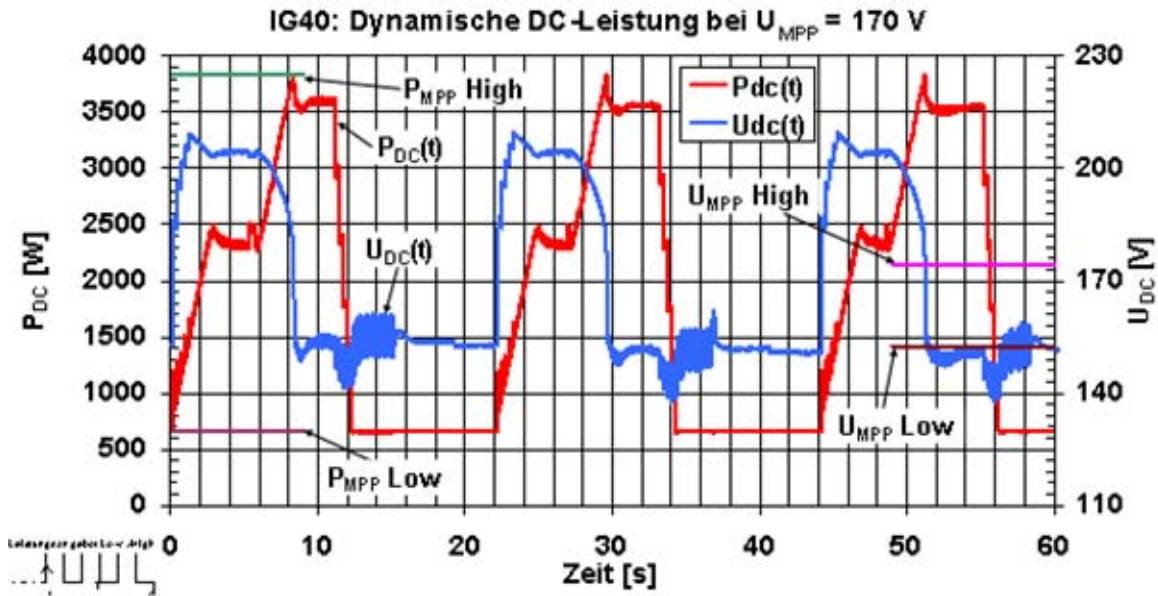


Bild 6:

Dynamische Leistung $P_{DC}(t)$ bei $U_{MPP} = 170$ V (bei voller Leistung) bei einem IG40 und einem Leistungsangebot gemäss Bild 1. Das Gerät hat vermutlich noch ein Problem bei der schnellen Aktivierung des zweiten Teil-Wechselrichters. Die Leistung auf der hohen Stufe wird nach dem Wechsel von tiefer zu hoher Leistung nur ganz allmählich absorbiert, der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad beträgt nur gerade $\eta_{MPPT_{dyn}} = 71,6\%$.

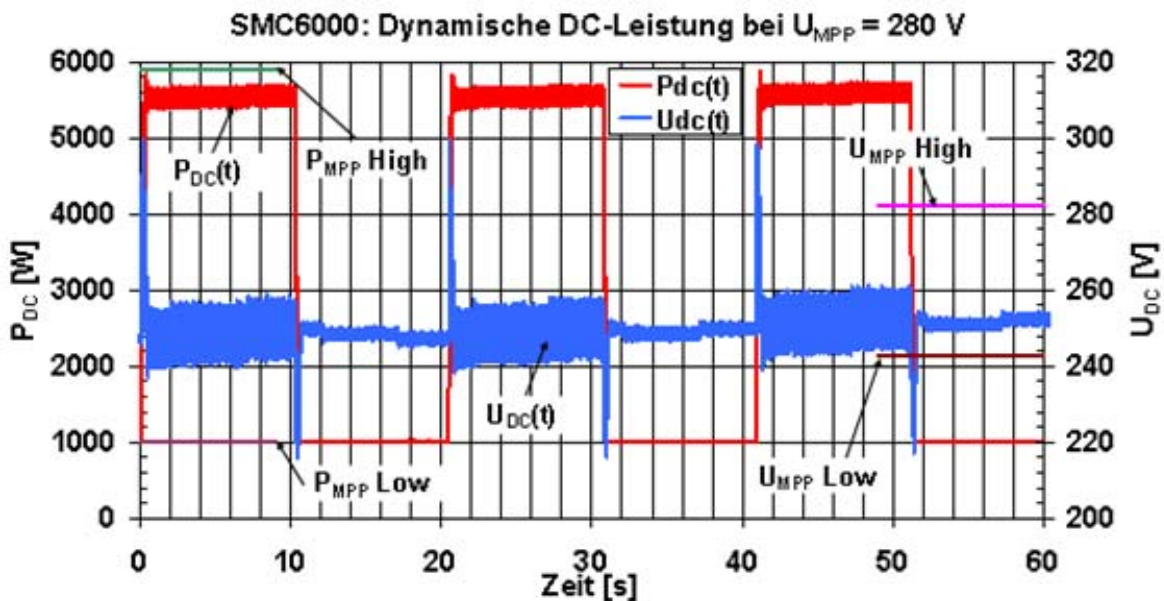


Bild 7:

Dynamische Leistung $P_{DC}(t)$ bei $U_{MPP} = 280$ V (bei voller Leistung) bei einem SMC 6000 und einem Leistungsangebot gemäss Bild 1. Der neue MPP wird auch hier nicht sofort ganz gefunden. Das dynamische Verhalten dieses Gerätes ist aber befriedigend, der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad beträgt $\eta_{MPPT_{dyn}} = 93,2\%$.

Weitere dynamische Messungen wurden auch beim Solarmax 2000E, Solarmax 3000E, Solarmax 6000E, Solarmax 25C und SB3800 durchgeführt. Aus Platzgründen können diese Messungen hier nicht dargestellt werden. Messungen des totalen Wirkungsgrades η_{tot} an einigen Wechselrichtern und eine Übersicht über alle 2004 und 2005 durchgeführten Wechselrichtertests sind in einem separaten Beitrag [3] enthalten.

Detaillierte Testberichte zu diesen Geräten sind unter www.pvtest.ch > Wechselrichter-Testberichte zu finden. Weitere Geräte sind noch im Test.

Hinweis

Bei den in diesem Bericht beschriebenen Messungen wurde mit grosser Sorgfalt vorgegangen. Weil Fehler jedoch nie ausgeschlossen werden können, lehnen wir aber jede Haftung im juristischen Sinn für die Richtigkeit und Vollständigkeit der im Bericht enthaltenen Angaben ab.

Verdankungen

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen mehrerer Aufträge des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt. Die Aktivitäten der HTI Burgdorf auf dem Gebiet der Photovoltaik werden auch von der Localnet AG, Burgdorf unterstützt. All diesen Firmen und Institutionen, die durch ihre Zuwendungen diese Arbeiten ermöglicht haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

- [1] H. Häberlin, L. Borgna, M. Kämpfer und U. Zwahlen: "Totaler Wirkungsgrad – ein neuer Begriff zur besseren Charakterisierung von Netzverbund-Wechselrichtern". 20. Symposium Photovoltaik, Staffelstein, 2005.
- [2] B. Burger: "Auslegung und Dimensionierung von Wechselrichtern für netzgekoppelte PV-Anlagen". 20. Symposium Photovoltaik, Staffelstein, 2005.
- [3] H. Häberlin, M. Kämpfer und U. Zwahlen: "Neue Tests an Photovoltaik-Wechselrichtern: Gesamtübersicht über Testergebnisse und gemessene totale Wirkungsgrade". 21. Symposium Photovoltaik, Staffelstein, 2006.

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

Measurement of Dynamic MPP-Tracking Efficiency at Grid-Connected PV Inverters

H. Haeberlin, M. Kaempfer, U. Zwahlen, HTI Burgdorf, PV Laboratory, CH-3400 Burgdorf/Switzerland

Last year the new quantity „total efficiency η_{tot} “ was introduced, which can describe the static operating behaviour of a grid-connected PV inverter much better than conversion efficiency η alone.

At locations, where there are often variable cloudy conditions, besides static behaviour also the dynamic MPPT-behaviour has to be considered. Inverters with a fast MPP tracker have a somewhat higher energy yield under quickly changing irradiance than devices with slow MPP tracking. In a study of FhG-ISE in 2005, it was shown with a correct sizing of the inverter and a fast dynamic MPP-tracking, in principle a few additional percent of energy could be obtained from the same PV array.

In this contribution, a method and some measurements to determine dynamic MPP-tracking behaviour of grid-connected PV inverters are shown.

Extended test reports (in German) are available on the internet at the address indicated below.

Further information about the research activities and publications in German and English (many of them can be downloaded) of the PV laboratory of HTI (former name: ISB) is available on the internet: <http://www.pvtest.ch>.