

# Einsatz von IGCT-Mittelspannungsumrichtern in Windenergieanlagen

## IGCT-Medium Voltage Converters in Wind Park Applications

Dr Claes Hillberg, ABB Schweiz AG, Turgi, Schweiz

### Kurzfassung

Erneuerbare Energiequellen wie Wind bringen eine unkontrollierbare Komponente in elektrische Netze ein. Das Verhalten eines Windparks ist sowohl bei Normalbetrieb als auch bei Netzstörungen für das gesamte Übertragungsnetz von Bedeutung. Der stetige Zuwachs installierter Leistung und zunehmende Turbinengrösse hat zu einer Verschärfung der Netzanbindungsanforderungen geführt. Windturbinen, die mittels Voll-Umrichter ans Netz angebunden werden, sind sehr gut geeignet um diese Anforderungen zu erfüllen. Basierend auf einer Leistungsplattform, die auch für industrielle Antriebe eingesetzt wird, hat ABB ein Konzept mit Mittelspannungsumrichtern für Windenergieerzeugung realisiert. Durch Messungen und Simulation wird die Funktionsweise demonstriert.

### Abstract

Renewable energy sources such as wind turbines act as unpredictable elements in the electrical grid. The performance of a wind park has an impact on the complete transmission grid at nominal conditions as well as by disturbances. The increasing number of installations and increasing size of each turbine has resulted in more stringent Grid Codes describing the desired performance and interaction of the wind park with the grid. Wind turbines that employ full-size converter systems for connection to the grid are well suited to comply with Grid Code requirements. Based on a component platform used also for industrial drive applications has ABB realized a concept that interfaces the wind turbine with the grid by means of a full-size converter. The paper demonstrates the functionality of the concept with measurements and simulation results.

## 1 Einleitung

Windenergie wird als eine der wichtigsten Arten erneuerbarer Energiequellen betrachtet. Nicht nur werden fast unzählige Neuinstallationen in Betrieb gesetzt, sondern auch die Windturbinen werden grösser und leistungsfähiger. Die grössten kommerziell eingesetzten Turbinen erreichen bereits eine Generatorleistung von 5MW. Windparks werden zunehmend auch auf Offshore oder in abgelegenen Regionen aufgestellt, was die Konstruktion und auch die Anbindung ans elektrische Netz sehr anspruchsvoll macht. Die Netzanbindung der Windenergieanlagen gewinnt schnell an Bedeutung. Erneuerbare Energiequellen wie Wind bringen eine unkontrollierbare Komponente in elektrische Netze ein. Es ist zwar möglich, die mittlere Windgeschwindigkeit für die nächsten Stunden zu voraussagen, aber nicht die detaillierte Kurzdynamik. In Abhängigkeit von der Intensität und der Schnelligkeit der Änderungen können Probleme mit Frequenz- und Blindleistungs-Regelung auftreten, die einen direkten Einfluss auf die Qualität der abgelieferten Energie haben. Das Verhalten eines Windparks ist sowohl bei Normalbetrieb als auch bei Spannungseinbrüchen für das gesamte Übertragungsnetz von Bedeutung; es kann nicht mehr vernachlässigt werden. Deshalb haben die Betreiber von elektrischen Netzen verschiedener Länder reagiert und die Anforderungen in ihren Netzanschlussre-

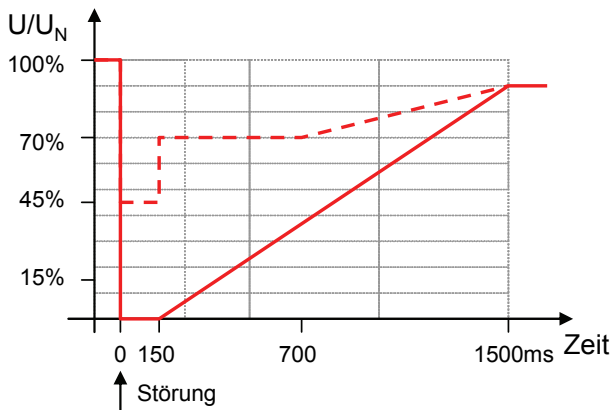
geln (Grid Code) für Windparks angepasst. Prinzipiell soll sich ein Windpark wie ein konventionelles Kraftwerk verhalten. Da viele Turbinentypen den Anforderungen bezüglich Bereitstellung von Blindleistung nicht gerecht werden können, werden eventuell auch Blindleistungskompensationsanlagen benötigt.

## 2 Netzanforderungen

Die Netzanschlussregeln fordern, dass alle Energieerzeuger über ihren ganzen Betriebsbereich das Netz unterstützt. Typische Schlüsselpunkte für Windparks, die angesprochen werden, sind

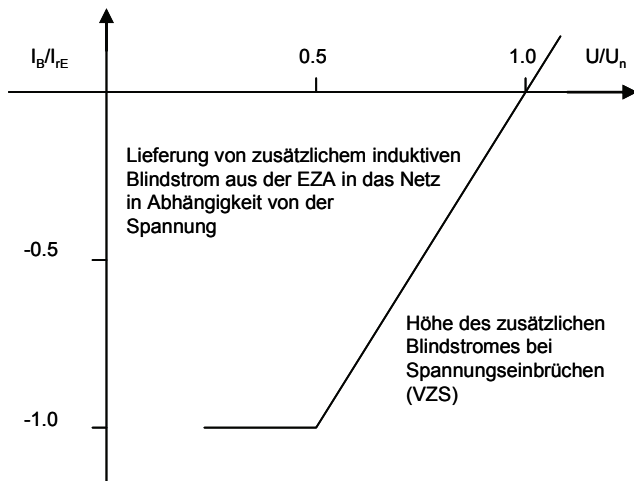
- Netzfrequenzabhängige Abgabe von Wirkleistung
- Spannungsabhängige Blindleistungs-Abgabe/-Aufnahme
- Spannungsregelung
- Durchfahrvermögen bei Netzfehler (Fault-Ride-Through)

Unter anderem hat der deutsche Netzbetreiber e.on seinen Grid Code angepasst [1], National Grid (GB) hat sogar eine Anleitung für Windparkbetreiber zu Verfügung gestellt, [2]. Andere Länder haben schon oder werden bald ähnliche Anforderungen einführen. siehe Bild 1 u. 2.



**Bild 1** Fault-Ride-Through Anforderung (2006)

Es wird z.B. verlangt, dass die Anlage auch für Netzeinbrüche bis 15%, oder noch tiefere, Restspannung während mehrere hundert Millisekunden am Netz verbleibt, und dass Blindstrom während dem Fehler eingespeist wird.

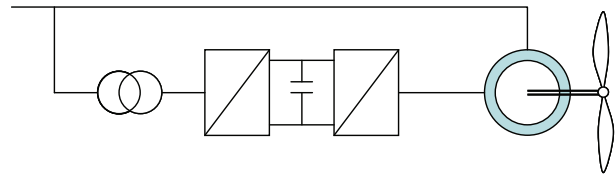


**Bild 2** VDN Anforderung an Einspeisung von Blindstrom während Netzfehler

Häufig können die Anforderungen bezüglich Frequenzregelung und Verbleiben am Netz bei Netzfehlern erfüllt werden, manchmal ist die mögliche Blindleistungserzeugung nicht ausreichend, um die Netzanforderungen für den ganzen Windpark zu erfüllen, [3].

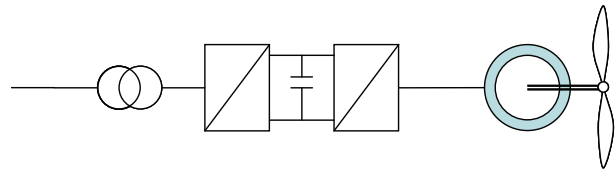
### 3 Konzept

Eine Möglichkeit, den Windgenerator ans Netz anzuschliessen, ist mittels einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine, DFIG (Bild 3a). Die erforderliche Umrichterleistung beträgt damit nur ein Teil der Maschinenleistung, etwa 30%. Die Maschine kann in einem relativ beliebigen aber optimalen Arbeitspunkt gefahren werden. In Abhängigkeit von deren Auslegung kann die Maschine geregelt Blindleistung abgeben oder aufnehmen.



**Bild 3a** Netzanbindung mittels DFIG.

Die Grösse der Rotorspeisung ist abhängig von der Dynamik und der Maschine, wird aber mit Fault-Ride Through Anforderungen grösser. Wenn die Umrichterleistung knapp bemessen ist, muss wegen den Netzanbindungsanforderungen bezüglich Blindleistung möglicherweise eine zusätzliche Kompensation installiert werden. Bei einem Netzfehler wird die Maschine auch direkt betroffen von Fehlerströmen und mechanischen Beanspruchungen. Gegenübergestellt kann eine Ausführung mit sogenanntem Voll-Umrichter werden, in welcher die ganze Leistung der Maschine durch einen Umrichter geführt wird, siehe Bild 3b.



**Bild 3b** Netzanbindung mittels Voll-Umrichter

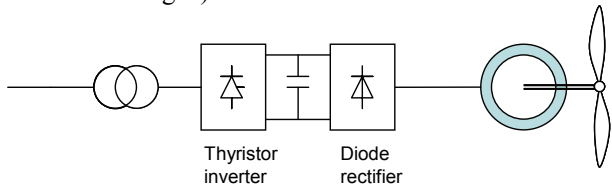
Die Ausgangsfrequenz des Generators ist häufig ungleich 50Hz. Auch ein Generator mit niedriger Frequenz kann, mittels des Frequenzumrichters, auch während stark wechselnden Windverhältnissen ans 50Hz Netz angebunden werden. Ein Voll-Umrichter entkoppelt die Turbine vom Netz; die Turbine selbst wird nicht direkt von Netzfehlern betroffen. Der Voll-Umrichter ist bestens geeignet, um strenge Grid Code Anforderungen bezüglich Blindstrom-einspeisung, Dynamik, und Fault-Ride-Through zu erfüllen. Die Installation von Windturbinen im Meer bringt zusätzliche Anforderungen bezüglich Platz, Gewicht, Verfügbarkeit und Wartung. Ein Permanentmagnet-Synchrongenerator bringt hier wesentliche Vorteile:

- Die Speisung für Erregung entfällt (Gewichtreduktion im Maschinenhaus der Turbine)
- Verbesserung des Wirkungsgrades (Feldverluste entfallen)
- Höhere Zuverlässigkeit (z.B. Schleifringe entfallen)
- Höhere Leistungsdichte (Leistung/Volumen) (Gewichtreduktion im Maschinenhaus der Turbine)
- Verbessertes dynamisches Verhalten (Erregungsdynamik entfällt)
- Der Generator ist von 50Hz Netz entkoppelt und wird nicht direkt von Netzstörungen betroffen, was eine erhöhte Lebensdauer des Getriebes erwarten lässt.

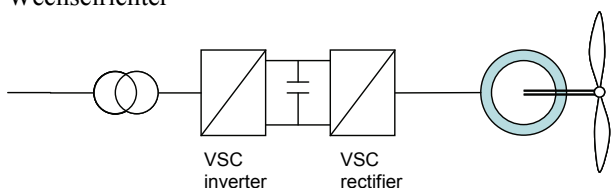
Die meisten Turbinen mit einer Leistung grösser 2MW werden heute mit variabler Drehzahl betrieben. Für Offshore Installationen, wo eine hohe Zuverlässigkeit und ein geringer Wartungsbedarf sehr wichtig sind, gilt ein Generator mit Permanentmagnet als Vorzugslösung. Diese Lösung verlangt nach einem Voll-Umrichter.

### Mittlere Spannungsebene, Umrichterspannung kleiner 5 kV

Voll-Umrichter sind bestens geeignet, um grosse Windturbinen ans Netz anzubinden. Kompakte, effiziente und zuverlässige Umrichter in Mittelspannungstechnik sind verfügbar. Der Strom ist kleiner und einfacher zu handhaben, als bei Niederspannungslösungen, und bringt auch den Vorteil von Gewichtsreduktion mit (geringer Querschnitt der Verbindungen).



**Bild 3c** Voll-Umrichter mit Diodenbrücke und Thyristor-Wechselrichter



**Bild 3d** Voll-Umrichter mit Spannungsumrichter

Die Ausführung mit Spannungsumrichter (Bild 3d) hat gemäss [4] gegenüber einer vordergründig einfacheren Ausführung mit einem Diodengleichrichter und einem Thyristorwechselrichter (Bild 3c) einige Vorteile.

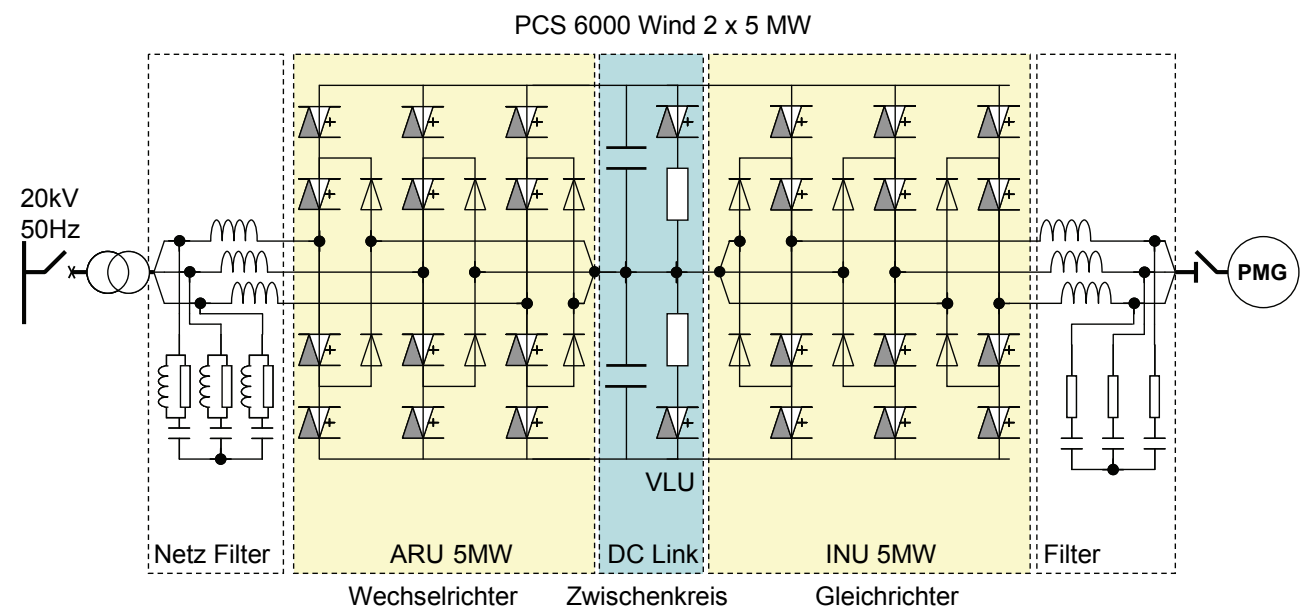
#### Aktiver Gleichrichter:

- Möglichkeit dem Generator eine gute Spannungsqualität anzubieten (kleinere Oberwellenströme im Rotor, kleinere Belastung an ev. Getriebe)
- Erlaubt, dass die Maschine als Motor gefahren wird, (sehr nützlich bei Wartung, Rotorpositionierung, und Werksprüfung)

#### Wechselrichter:

Erfüllt den Grid Code durch folgende Eigenschaften:

- Kann Wirk- und Blind-Leistung unabhängig regeln
- Nimmt bei der Spannungsregelung aktiv Teil
- Blindleistungsregelung (unterstützt bei schwachen Netzen mit Abgabe/Aufnahme von Blindleistung)
- Fault-Ride-Through Fähigkeit, erlaubt Einspeisung von Blindstrom während dem Fehler



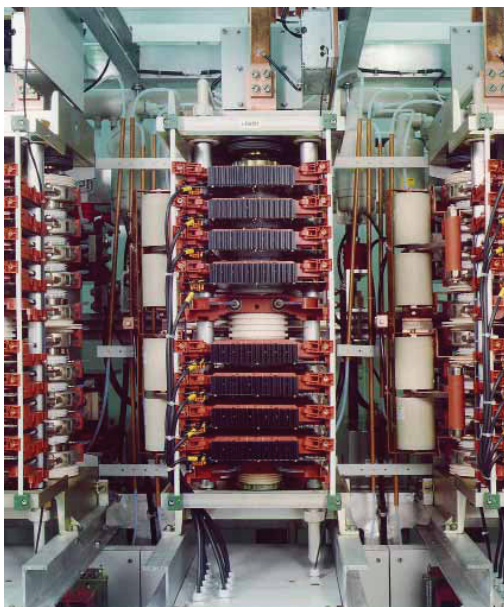
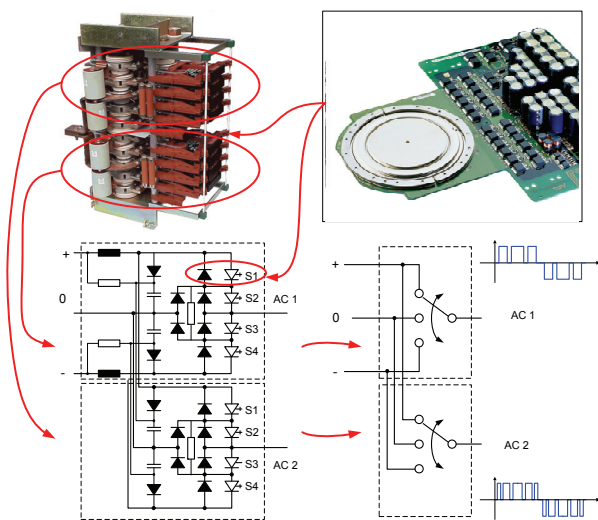
**Bild 4** ABB Windumrichter PCS6000, 4-Quadranten 3-Punkt Umrichter

Bild 4 zeigt die beiden Umrichterblöcke in 3-Punkt Schaltung, die mit einem gemeinsamen Zwischenkreis verbunden sind. Auf der Generatorseite ist ein Flankenfilter vorhanden, das den Generator vor den steilen Spannungsflanken schützt, welche durch das Schalten der Halbleiter entstehen. Der netzseitige Umrichter wird mit einem optimierten Pulsmuster angesteuert, das Harmonische niedriger Ordnung eliminiert. Das Filter mit optimaler Grösse muss nur Stromharmonische höherer Ordnungszahl reduzieren, um die Normen, z.B. VDEW oder IEEE, zu erfüllen. Der DC Zwischenkreis wird gegen Überspannung durch einen

Spannungsbegrenzer, VLU, geschützt. Bei einer Netzstörung kann die vom Generator abgegebene Wirkleistung nicht oder nur teilweise vom Wechselrichter an die Netzseite übertragen werden. Dies führt zu einer Spannungserhöhung im Zwischenkreis. Der Spannungsbegrenzer VLU kann diese Überschussenergie während einer kurzen Zeit vernichten und trägt damit für die Fault-Ride-Through Fähigkeit entscheidend bei. Der Generator wird dadurch auch weitgehend vor Drehmoment-Schwingungen während dem Netzfehler geschützt.

Durch den Einsatz einer Vorladeeinrichtung wird der Zwischenkreis vor dem Zuschalten der Windenergieanlage erst aufgeladen. Auf diese Weise kann der Umrichter den Transformator auf der Netzseite magnetisieren und mit der Netzspannung synchronisieren, bevor der Netzschalter eingeschaltet wird. Ein stossfreies Zuschalten des Windumrichters ans Netz erfolgt, was bei schwachem Netz sehr vorteilhaft ist.

Der ABB Windumrichter PCS6000 ist aus standardisierten, sehr kompakten leistungselektronischen Baugruppen bestehend aus IGBT-Halbleitern aufgebaut, (Bild 5). Der Umrichter verfügt über eine hervorragende Zuverlässigkeit bei sehr gutem Wirkungsgrad, was wesentliche Vorteile sind für eine Umrichterinstallation im Turm einer Windturbine [5].



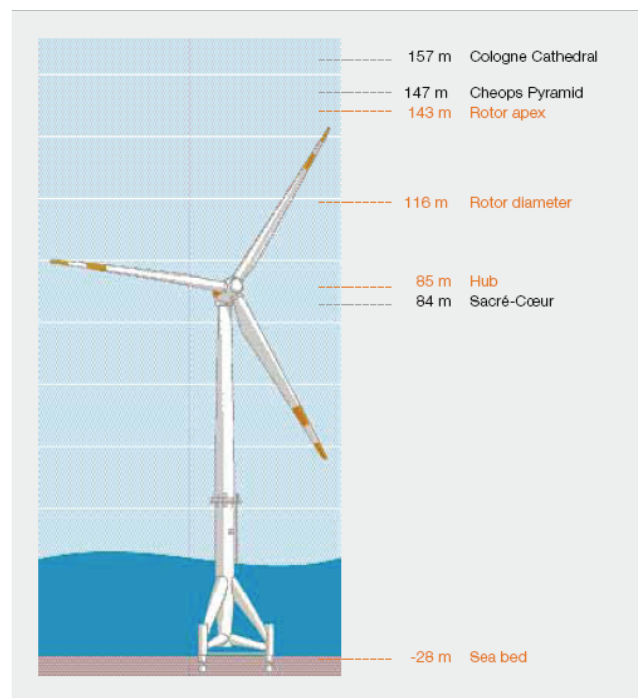
**Bild 5** Mittelspannungs-IGCT Baugruppe mit hoher Leistungsdichte

Der Signalaustausch zwischen Umrichter, Regelung/Steuerung und Hilfsbetriebe wie Kühlung, wird mit

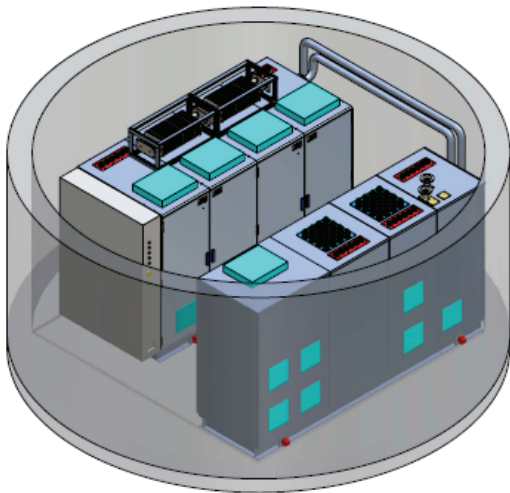
Lichtleitern ausgeführt um eine Immunität gegen EMV-Störungen zu gewinnen.

## 4 Das Projekt Alpha Ventus

Der Windpark Alpha Ventus ist eine Pilot-Anlage die von den Elektrizitätsunternehmen E.ON Climate and Renewables, EWE und Vattenfall Europe finanziert ist. Die Anlage wird in 30m Wassertiefe auf dem Meeresboden etwa 45 km nördlich der Nordseeinsel Borkum aufgestellt. Alpha Ventus ist der erste deutsche Windpark der unter typischen Hochsee-Verhältnissen, in dieser Wassertiefe und mit diesem Abstand von der Küste errichtet wird. Mit Hilfe des Forschungsprojekts Alpha Ventus wird viel Erfahrung bezüglich Konstruktion eines derartigen Windparks, dessen Netzanbindung und Betrieb gesammelt. Davon werden weitere kommerzielle Installationen profitieren. Zu Beginn werden 2x6 Stück 5 MW Turbinen aufgestellt. Die Leistung der Windturbinen wird zu einer Unterstation auf einer im Meer errichteten Plattform geführt und von dort ans Festland übertragen. Der Windpark in der Nordsee soll in Kurze in Betrieb gehen. Die ersten sechs Turbinen werden eine Fläche von etwa vier Quadratkilometern in Anspruch nehmen. Die einzelnen Turbinen werden in einer Gitterartigen Formation in einem Abstand von zirka 800m aufgestellt sein. Die sechs Turbinen von Hersteller Multibrid [6] werden mittels einer Dreibeinkonstruktion mit dem Meeresboden fest verankert. Der Rotor mit eingerechnet wird die Windturbine nahezu gleich hoch sein wie der Kölner Dom, 150 m. Bei maximaler Drehzahl der Turbine werden die Flügelspitzen die Luft mit etwa 300 km/h durchschneiden, Bild 6.



**Bild 6** 5 MW Windturbine, Multibrid Offshore Aufstellung.

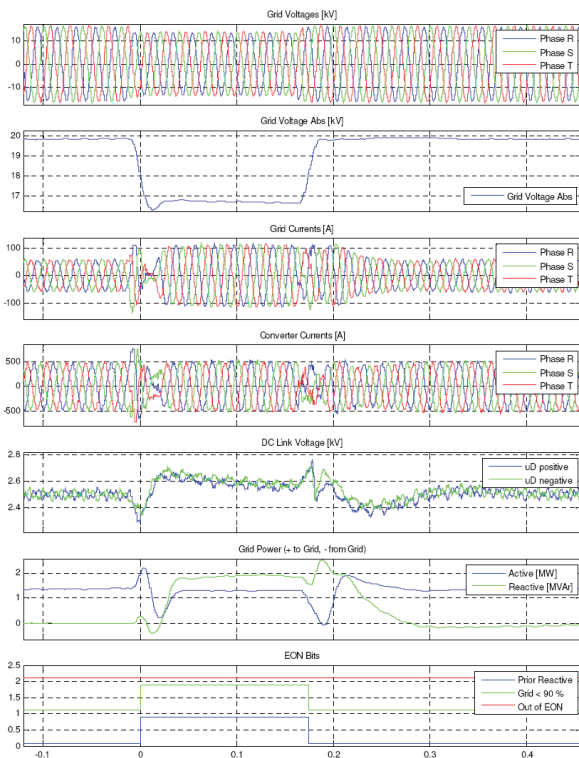


**Bild 7** Einbau des Umrichters im Turm der Windenergieanlage

Alle Systemkomponenten finden jeweils im Inneren des Turms der 5 MW Anlage auf engstem Raum einer Plattform Platz, siehe Bild 7. In Referenz [7] wird ausführlich über diese Pilotanlage der Windenergie berichtet.

## 5 Verhalten bei Netzstörungen

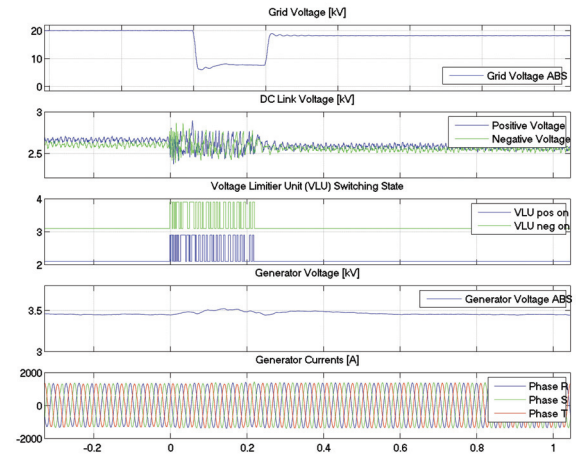
Nachfolgend sind einige Messungen vom Betrieb einer 5MW Windturbine dargestellt.



**Bild 8** Auf der Anlage aufgenommene Messwerte bei einem Netzspannungseinbruch auf 85% Restspannung während 180ms.

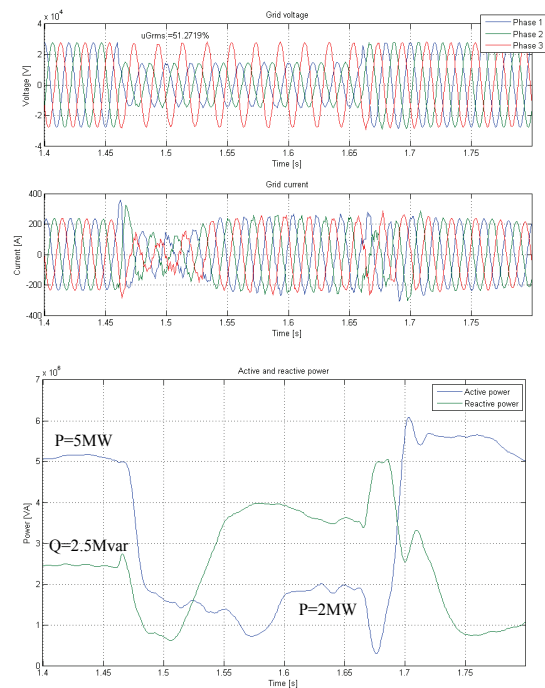
Aus Bild 8 ist ersichtlich, dass während dem Fehler die ans Netz abgegebene Wirkleistung durch den Umrichter redu-

ziert wird. Gleichzeitig wird jedoch unterstützende Blindleistung ins Netz eingespeist.



**Bild 9** Eingriff vom DC Spannungsbegrenzer, VLU, bei einer Netzstörung

Bild 9 zeigt die Entkopplung der Windturbine vom Netz bei einem Netzspannungseinbruch auf etwa 50%. Der Einfluss der Störung auf den Generatorstrom ist fast nicht ersichtlich. Bild 10 zeigt einerseits, wie der Netzumrichter bei einem zweiphasigen Fehler die Ströme symmetriert. Andererseits ist die Unterstützung mit Blindstrom während der Störung ersichtlich.



**Bild 10** Simulation, 2-ph Spannungseinbruch auf 50%, Oben Netzspannung, Netzstrom (symmetrisch!) und unten Leistung P und Q.

## 4 Literatur

- [1] E.ON Netz GmbH, Netzanschlussregeln für Hoch und Höchstspannung, Bayreuth, Germany, Stand 1. April 2006. <http://www.eon->

[netz.com/Ressources/downloads/ENENARHS2006de.pdf](http://netz.com/Ressources/downloads/ENENARHS2006de.pdf)

- [2] National Grid Company plc, Guidance Notes for Power Park Developers, Grid Code Connection Conditions Compliance: Testing & Submission of the Compliance Report, June 2005 – Issue 1
- [3] Maibach Ph., Wernli J., Jones P., Obad M., STAT-COM Technology for Wind Parks to Meet Grid Code Requirements, EWEC 2007
- [4] Maibach Ph., Faulstich A., Eichler M., Dewar S., Full-Scale Medium-Voltage Converters for Wind Power Generators up to 7 MVA, GWREF Beijing, 2006
- [5] Steimer, P.K., Linhofer G., Hillberg C., Hanson J., Power Electronics Building Blocks - Bausteine leistungselektronischer Systeme in elektrischen Netzen, ETG Fachtagung, 2005
- [6] Multibrid Entwicklungsgesellschaft mbH, [www.multibrid.com](http://www.multibrid.com)
- [7] Eichler M., „Offshore but Online“, will be published in ABB Review 2008-3