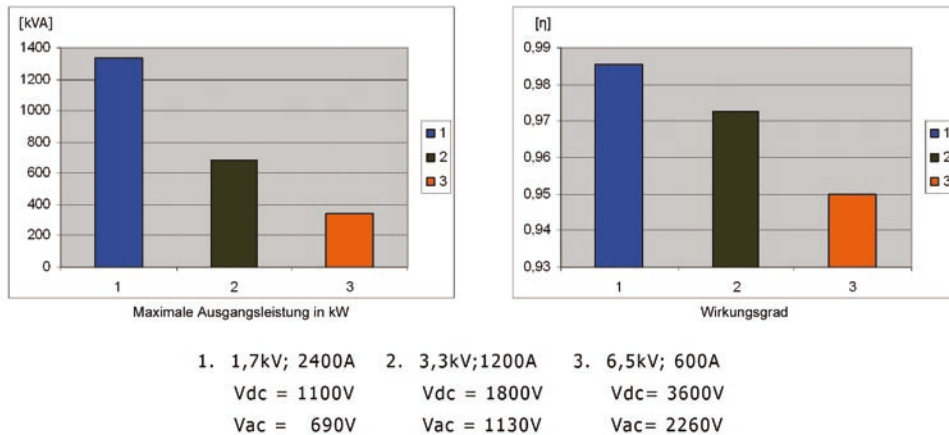


# Bewährte Technologie für hohe Leistungsanforderungen

## Zuverlässige Leistungselektronik für Windenergieanlagen



Dejan Schreiber

**Anwendungen im Megawatt-Bereich erfordern leistungsstarke Halbleiter. Dennoch sind selbst die leistungsfähigsten momentan erhältlichen Halbleiter für viele Systeme nicht stark genug. Sie müssen deshalb parallel geschaltet werden. Die Parallelschaltung von Halbleiterkomponenten in herkömmlichen leistungselektronischen Schaltkreisen ist heute eine weit verbreitete Technologie.**

Eine mögliche Lösung ist die Integration eines leistungselektronischen Basis-Systems, bestehend aus IGBTs und Dioden, Kühlkörper, Zwischenkreiskondensatoren, Treiber und Schutzbeschaltung sowie in der höchsten Ausbaustufe Hilfsstromversorgung und PWM-Controller (als unabhängige Einheit) in einen Drehstromumrichter. Diese Komplettsysteme können dann parallel geschaltet werden und z. B. im 4-Quadranten-Antrieb einer Windenergieanlage mit Permanentmagnetgenerator im 4-MW-Umrichter zum Einsatz kommen. Diese Möglichkeit wird im Folgenden näher beschrieben.

### Vergleich des Wirkungsgrades von IGBTs

IGBTs sind die Arbeitstiere in leistungselektronischen Systemen. Moderne IGBT-Module werden in unterschiedlichen Sperrspannungsklassen gefertigt, z. B. als 1200 V- oder 1700 V-Ausführung und für den Mittelspannungsbereich von 3,3 kV, 4,5 kV oder 6,5 kV. Welche Spannungsklasse ist nun aber am besten für den Hochleistungsbereich geeignet? Die Lösung ergibt sich, wenn man mehrere IGBT-Module in einem möglichst großen Gehäuse zu einem Umrichter zusammenfasst. Die erzielbare Ausgangsleistung lässt sich logischerweise am besten unter optimalen Betriebsbedingungen simulieren.

Für die Testschaltung wurde zunächst das größte verfügbare Standardgehäuse gewählt (IHM, Breite 190 mm). Dieses wurde mit der

**1 Vergleich des Wirkungsgrades von IGBTs mit unterschiedlicher Sperrspannung ( $V_{dc}$  = DC-Zwischenkreisspannung,  $V_{ac}$  = AC-Ausgangsspannung). Drehstromumrichter mit identischer Kühlung, Trägerfrequenz  $f_{sw} = 3,6$  kHz;  $\cos \phi = 0,9$  und identischen Modulen.**

maximalen Anzahl IGBTs der verschiedenen Spannungsklassen bestückt und optimale Betriebsbedingungen wie in **Bild 1** beschrieben definiert. Bild 1, links zeigt die mögliche Ausgangsleistung auf Basis der genannten Parameter. Im Ergebnis zeigt sich, dass die maximale Ausgangsleistung bei Einsatz von Modulen mit 3,3 kV, 1200 A halb so groß ist wie die entsprechend erzielbare Leistung bei Verwendung von 1,7 kV, 2400 A IGBTs. IGBT-Module mit 6,5 kV, 600 A produzieren nur noch ein Viertel der Leistung von 1700 V-IGBTs. Die Erklärung liegt in der für IGBTs typischen Verlustleistung. Berechnungen des Wirkungsgrades der drei Umrichter (Bild 1, rechts) ergeben einen Anstieg der Verlustleistung im Verhältnis 1:2:4.

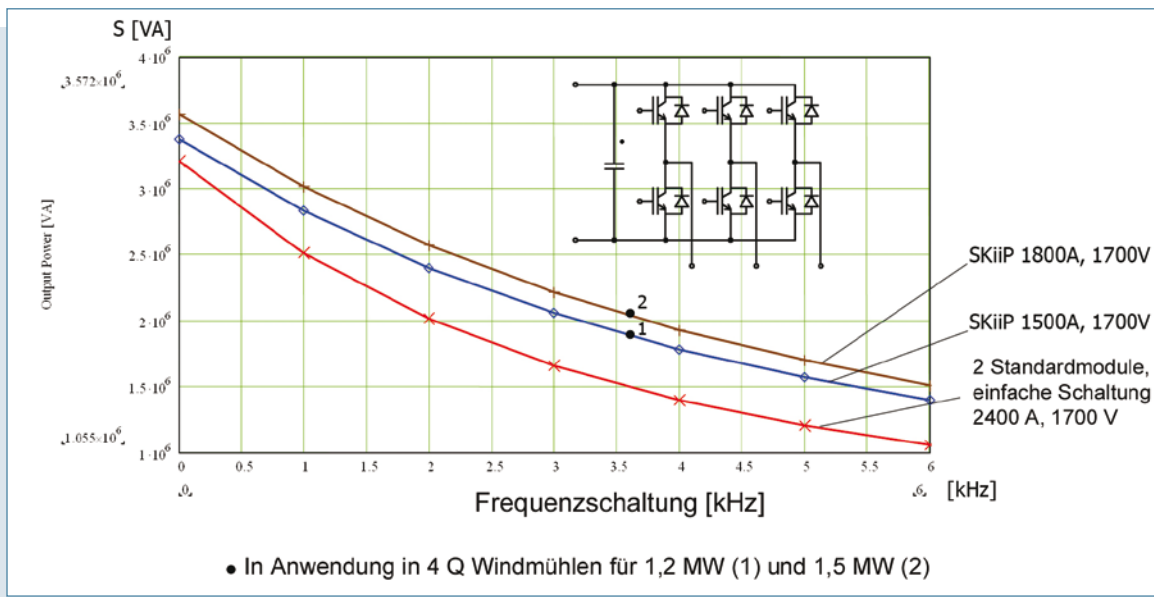
Zum Vergleich wurde jeweils dieselbe Trägerfrequenz mit  $f_{sw} = 3,6$  kHz zugrunde gelegt. Hierdurch können die Filter in den Umrichtern relativ klein gehalten werden. Andere Trägerfrequenzen würden unterschiedliche Ausgangs-Sinusfilter erfordern. Insgesamt stellte sich heraus, dass die größtmögliche Effizienz mit dem Einsatz von 1700 V-IGBTs erzielt wird. Diese sind darüber hinaus als industrielle Standardprodukte relativ kostengünstig.

### Vergleich unterschiedlicher 1700 V-Typen

1700 V-IGBTs werden in verschiedene Gehäusetypen eingebaut. Im Folgenden werden zwei der größten Einzelschaltermodule vom Typ IHM 1700 V, 2400 A mit einem Dual-Modul mit etwa gleichem Footprint vom Typ SKiIP1513GB172 verglichen. Montiert man die zwei SKiIPs Rücken an Rücken auf einen Kühlkörper, erhält man eine Halbbrücke für einen Nennstrom von  $2 \times 1500 \text{ A} = 3000 \text{ A}$  (Gehäusetemperatur =  $25^\circ \text{ C}$ ) bzw. 2250 A bei einer Gehäusetemperatur von  $70^\circ \text{ C}$ .

Zwei Einzelschaltermodule ergeben zusammen eine Halbbrücke für Nennströme von 2400 A. Vergleicht man die Berechnungsergebnisse, so kann festgestellt werden, dass mit der SKiIP-Lösung über den gesamten Schaltfrequenzbereich höhere

Dejan Schreiber ist Senior Applications Manager bei Semikron International.



Ausgangsströme realisiert werden können, als mit den Einzelschaltermodulen im größtmöglichen Gehäuse (**Bild 2**).

Durch den Einsatz eines leistungsstärkeren SKiiP-Moduls, beispielsweise eines SKiiP (1700 V, 1800 A) mit Aluminiumnitratsubstrat (Keramik), kann die Ausgangsleistung des Drehstromumrichters bei gleichem Footprint weiter gesteigert werden, in dem Beispiel bis zu 1800 kVA (**Bild 3**).

## Parallelschaltung von IGBT-Modulen

Folgende Lösungen für den parallelen Betrieb von IGBT-Modulen sind möglich.

1. Ein einzelner Drehstromumrichter zur Erzeugung der Gesamtleistung: Der Phasenweig besteht aus mehreren parallel geschalteten IGBT-Modulen und einem Leistungstreiber. Jedes IGBT-Modul benötigt einen eigenen Gatewiderstand und symmetrische Zwischenkreis- und AC-Ausgangsanschlüsse [1].
2. Hartes Parallelschalten von Dreiphasen-IGBT-Basiseinheiten. Das System wird über einen Controller und seine Modulationssignale (PWM-Signale) gesteuert. Alle beteiligten Drehstromumrichter werden über eine gemeinsame Zwischenkreisspannung versorgt. Die parallele Schaltung wird über eine Parallel-Karte pro Treiber und Basiseinheit hergestellt. Leichte Unterschiede der Anstiegszeiten (unter 100 ns) werden durch kleine AC-Ausgangsdrosseln kompensiert (< 5µH Induktanz). Alle Drehstromumrichter arbeiten parallel, eventuell auftretende geringe Zeitverzögerungen werden durch zusätzliche AC-Drosseln ausgeglichen. Der symmetrische Aufbau und der positive Temperaturkoeffizient der IGBT-Sättigungsspannung sichern eine optimale Laststromverteilung [2].
3. Ein System wie unter Punkt 2 beschrieben, jedoch mit zusätzlicher Korrektur des Modulationssignals pro Basiseinheit

zur Steuerung der gleichmäßigen Laststromverteilung auf die parallel geschalteten Basiseinheiten.

4. Parallelbetrieb mehrerer Einheiten mit synchroner Impulsbreitenmodulation und kreisstromfreier Betrieb durch zusätzliche hoch entwickelte PWM-Regelung [3].
5. Basiseinheiten mit Potentialtrennung: Jede Basiseinheit speist über isolierte Wicklungen Strom an die Lastseite und besitzt einen eigenen Controller. Die PWM-Signale sind dabei unabhängig, asynchron und freilaufend. Jede Basiseinheit besitzt einen separaten Zwischenkreis und ist netzseitig mit einem Sinusfilter (LC-Filter) ausgestattet. Die einzelnen Zwischenkreise sind untereinander kreisstromfrei, vorausgesetzt die Ausgänge sind galvanisch isoliert. Dies ist die einfachste Form der Parallelschaltung einzelner Basiseinheiten mit unabhängigen Standardcontrollern.

## Anwendungsbeispiel für eine Parallelschaltung

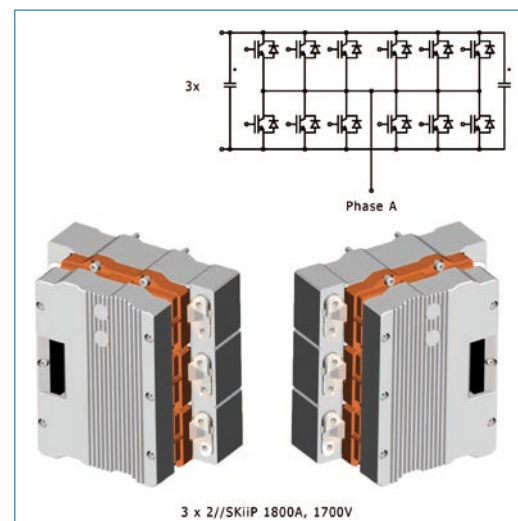
Drei 1500 kVA-Einheiten mit 4-Quadranten-Antrieb werden an die separaten Wicklungen eines Windmühlengenerators mit Permanentmagnet angeschlossen, wobei jeder Antrieb standardmäßig über jeweils einen generatorseitigen und einen netzseitigen Controller verfügt (**Bild 4**). Ein übergeordneter vierter Controller sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Generator-Drehmoments. Kommt es in einem der 4-Q-Antriebe zu einer Betriebsstörung, können die anderen Antriebe ohne Unterbrechung weiterarbeiten. Das beschriebene System läuft in einer Windenergieanlage mit 3,6 MW Ausgangsleistung, die über einen permanentmagnet-erregten Generator mit drei separaten Motorwicklungen verfügt. Es ist für bis zu 12 parallel geschaltete Vierquadrantenantriebe und Anschluss an 12 Generatoren oder 12 Generatorwicklungen ausgelegt. [4]

## Reihenschaltung von Basiseinheiten

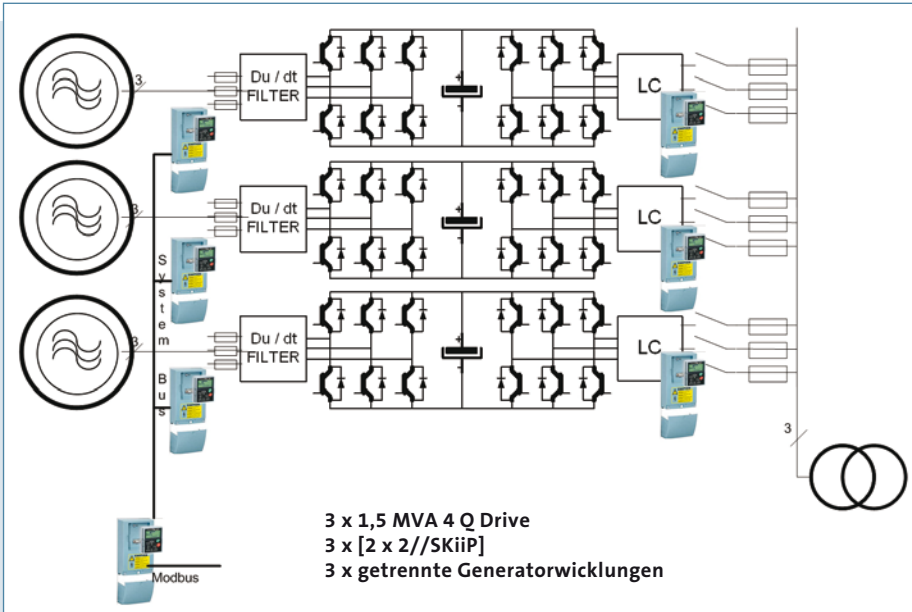
Bei der elektrischen Auslegung von Windenergieanlagen müssen verschiedene Aspekte und Elemente berücksichtigt werden:

- hohe Generatorleistungen,
- geringe Verluste,
- veränderliche Drehzahl,
- hoher Wirkungsgrad,
- sinusförmiger Netzstrom,
- guter Leistungsfaktor und niedriger Klirrfaktor,
- aktive und reaktive Leistungsregelung,
- modularer Aufbau für unterschiedliche Ströme und Spannungen,
- einfache Montage,
- hohe Zuverlässigkeit sowie
- geringe Kosten.

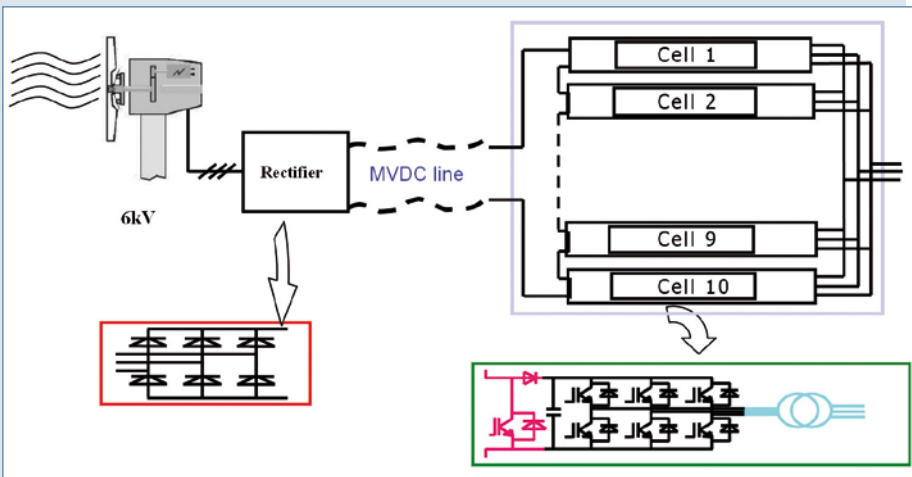
Für die Konstruktion von Windenergieanlagen in der Multi-Megawatt-Klasse sind Mittelspannungsgeneratoren in der Zukunft eine interessante Option, da die Ströme und somit die Kabelquerschnitte gering sind. Silizium ist für hohe Mittelspannungen jedoch ungeeignet. Daher greift



**3: Beispiel für eine 1800 kVA-Halbbrücken-Basiseinheit.**



4: Drei unabhängige 4-Quadranten-Antriebe in Parallelschaltung mit getrennten Generatorwicklungen. Das System kann über einen, zwei oder drei parallele Antriebe betrieben werden.



5: Zellenkonzept für Windmühlen im Mittelspannungsbereich.

man auf die Reihenschaltung von Basiselementen zurück.

### Anwendungsbeispiel für eine Reihenschaltung

Ein 5 MW-Generator erzielt bei einer Ausgangsnennspannung von 6,3 kV einen Effektivstrom von 3 x 436 A. Die gleichgerichtete Spannung des drehzahlregulierten Generators liegt zwischen 1 und 10 kV DC. Die Anbindung solcher Leistungen an das Versorgungsnetz ist nur möglich, wenn jede Windenergieanlage einen eigenen Transformator erhält. Die Netzspannung liegt zwischen 20 und 30 kV und ist die Ausgangsspannung des Transformators. Der Transformator kann mehrere - in dem in Bild 5 gezeigten Fall 10 - Dreiphasen-Wicklungen auf der Eingangsseite für jeweils 3 x 690 V besitzen, was der Eingangsspannung entspricht. Pro Phasenwicklung wird eine Basiseinheit, in dem in Bild 5 dargestellten Fall ein 600 kVA-Drehstromumrichter, angeschlossen. Ein vierter IGBT-Zweig wird

jeder Basiseinheit vorgeschaltet. Dieser Aufbau wird als Mittelspannungszelle bezeichnet. Alle Zellen können in Reihe geschaltet werden. Der netzseitige Drehstromrichter der Zelle speist in den Transformator und regelt so seine eigene Zwischenkreisspannung. Bei 3 x 690V Wechselfspannung beträgt die Zwischenkreisspannung 1050 V. Zehn in Reihe geschaltete Basiseinheiten können eine Gegenspannung (Counter Electro Motive Force - CEMF) von bis zu 10 \* 1050 V = 10,5 kV erzeugen. Der Spannungsausgleich erfolgt über die gleichgerichtete Generatorspannung. Bei fallender Generatordrehzahl nimmt auch die Generatorspannung ab. Zur Regelung des Gleichstroms und damit Steuerung des Generator-Drehmoments müssen daher einige der Zellen überbrückt werden. Bei Überbrückung von 5 Zellen beträgt die verbleibende Gegenspannung noch 5 \* 1050 V = 5,25 kV. Werden mehr als 5 Zellen überbrückt, erhöht sich der Gleichstrom und damit das Drehmoment des Generators. Überbrückte Zellen können, da sie

Wechselrichterseitig immer mit dem Netz verbunden sind, zu jeder Zeit die volle Blindleistung ins Netz speisen, auch wenn die Windenergieanlage lediglich im Teillast arbeitet. Fällt eine Zelle aus, wird diese ebenfalls überbrückt. Die maximale Zellen-Zwischenkreisspannung beträgt 1200 V. Daher kann auch mit nur neun Zellen in Reihe eine gleichgerichtete Generatorspannung von bis zu 9 \* 1200 V = 10,8 kV erzeugt werden. Die Eigenschaften von drehzahlregulierten Windturbinen mit Mittelspannung-Synchrongenerator und in Reihe geschalteten Umrichterzellen noch einmal kurz zusammengefasst lauten:

- Generator-Gleichspannung von 0 bis  $V_{dcmax}$ ;
- Gleichspannung pro Zelle 1050 V, maximal 1200 V;
- Anzahl der Zellen =  $V_{dcmax}/V_{cell}(+1)$ ;
- Ausgangsleistung pro Zelle:  $P_{genmax}/\text{Anzahl der Zellen}$ ;
- Systemredundanz (+1);
- Zellen-Einschaltzeit von 0 bis 100%;
- Zelle kann volle Blindleistung im ausgeschalteten Zustand produzieren;
- hoher Wirkungsgrad bei sowohl niedrigen als auch hohen Stromwerten;
- netzseitige Brummfrequenz =  $N_{cell} * F_{swcell}$ ;
- einfacher Transformator auf Netzseite.

### Zusammenfassung

In modernen Hochleistungsapplikationen werden viele Parallel oder in Serie geschaltete IGBT-Module benötigt, um die geforderte Leistung zu verarbeiten. In vielen Anwendungen ist es jedoch bei weitem effizienter, eine Anzahl separat geregelter Sub-Systeme, z. B. mehrere Einheiten in Parallel- oder Reihenschaltung zu verwenden, als nur einen einzigen großen Schaltaufbau mit vielen hart parallel geschalteten IGBT-Modulen. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Guter Netzleistungsfaktor und niedriger Klirrfaktor mit niedriger Schaltfrequenz und weniger passiven Komponenten.
- Modularer Aufbau für unterschiedliche Ströme und Spannungen sowie schnelle Montage.
- Redundanter Betrieb.
- Einsatz bewährter Halbleiterelemente.
- Höherer Wirkungsgrad auch im Teillastbereich.
- Hohe Zuverlässigkeit.
- Niedrige Kosten pro kW.

#### Literaturhinweise:

- [1] Srajber, D.: IGBT with Homogeneous Structure used for High Power Converter Design. PCIM 1991, Nürnberg.
- [2] Semikron Application Notes: SKiiP Parallel Operation of „GB“-type SKiiP Systems. [http://www.neu.skd.semikron.com/internet/webcms/objects/pdf/Application\\_notes\\_SKiiP\\_engl.pdf](http://www.neu.skd.semikron.com/internet/webcms/objects/pdf/Application_notes_SKiiP_engl.pdf)
- [3] Boroyevich, D.: Modeling and control of parallel three-phase PWM converters.
- [4] The Switch. [www.theswitch.fi](http://www.theswitch.fi).