Leistungselektronik für Hochleistungsanwendungen

Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) und der IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) werden diejenigen elektronischen Bauelemente sein, die im nächsten Jahrzehnt vorzugsweise für FACTS (Flexible AC Transmission Systems) und andere Hochleistungsanwendungen in neuen Märkten zum Einsatz kommen. Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter und der Gehäusetechnik werden dazu beitragen, daß die Leistungselektronik verstärkt in den Bereich der Energieverteilung eindringt, wobei Effizienz und Betriebssicherheit der Geräte steigen und die Kosten für die geschalteten Megawatts sinken werden.

Im Laufe der letzten 50 Jahre hat sich die Energieumwandlung derart stark verbreitet, daß heute rund 15 % der erzeugten elektrischen Energie elektronisch in die eine oder andere Form umgewandelt werden. In den meisten Fällen erfolgt diese Umwandlung jedoch immer noch am «Verbraucherende» der Energieversorgungskette. So hat es bis in die neunziger Jahre gedauert, bis sich die selbstgeführten Hochleistungs-Umrichter auf der Übertragungsebene durchgesetzt hatten, obwohl netzgeführte Geräte der Leistungselektronik bereits seit dreißig Jahren in der HGÜ-Technik zum Einsatz kommen. An der Schwelle zum 21. Jahrhundert stehen Industrie und Gesellschaft am Anfang einer neuen Epoche, in der sich der Einsatz der Leistungselektronik für Anwendungen in der Energieverteilung zunehmend als wirtschaftlich sinnvoll anbieten wird, weil Wirkungsgrad und Betriebssicherheit der Geräte durch Neuentwicklungen im Bereich der Leistungshalbleiter und Gehäuse kontinuierlich steigen und die Kosten für Schaltgeräte im Megawattbereich sinken werden.

Einsatzmöglichkeiten der Leistungselektronik

Industrie und Bahntechnik

Geräte der Leistungselektronik werden typischerweise in Bereichen eingesetzt, in denen sie dank ihrer Eigenschaften besonders wirtschaftlich sind. In den Anfängen wurden sie für Stromversorgungs- und Batterielade-geräte sowie für Antriebe verwendet. In den sechziger Jahren kamen erstmalsnetzgeführte Stromrichter (Thyristor und Dioden) in der Bahntechnik zum Einsatz, denen dann in den siebziger Jahren schnelle Thyristoren und Dioden für Anwendungsfälle mit Zwangskom-mutierung (Chopper und Wechselrichter) folgten. Die achtziger Jahre sahen dank der Entwicklung der bipolaren Darlington- und Triplington-Transistoren sowie des GTO (Gate Turn-off Thyristor) und des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) eine rasche Verbreitung von industriellen Antrieben.

Während der frühen achtziger Jahre drängten die Transistor-Bauelemente die Thyristor-Bauelemente (schnelle Thyristoren und GTOs) in immer höhere Leistungsbereiche hinein, so daß sich die GTOs bis Anfang der neunziger Jahre zu «Geräten sehr hoher Leistung» entwickelt hatten, die für den Einsatz in der Bahntechnik sowie in leistungsstarken Industrieantrieben (> 1 MW) sowie in Mittelspannungsantrieben (> 2,3 kV) geeignet waren. Die IGBTs mit ihren einfachen Anforderungen an die Steuerung (Spannungssteuerung) er-setzten Darlington-Transistoren (Stromsteuerung) und wurden vorzugsweise für Niederspannungsantriebe bis 480 V_{eff} eingesetzt. Bis Mitte der neunziger Jahre hatten sie dank der breiten Verfügbarkeit von Geräten mit Nennspannungen bis 1800 V die GTOs in Mittelspannungsmotoren bis 690 V_{eff} verdrängt.

Infolge der breiten Verfügbarkeit kostengünstiger Geräte hat sich der Sektor Niederspannungsantriebe zu einem Drei-Milliarden-Dollar-Markt mit einer jährlichen Wachstumsrate von rund 7 % entwickelt.

Mit der Einführung des IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) [1] in den späten Neunzigern erhielt die Antriebsindustrie neue Impulse, weil dieses Bauelement bei Mittel-spannungsantrieben bis 6900 V_{eff} [2] das bewirkte, was vorher der IGBT bei Niederspannungsantrieben bis 690 V_{eff} bewirkt hatte. Dieser Markt entspricht etwa einer halben Milliarde US$ und weist wegen der großen Anzahl installierter Mittelspannungsmotoren eine Wachstumsrate von rund 15 % pro Jahr auf. 95 % dieser Motoren arbeiten ohne Drehmoment- und Drehzahlregelung, weil auf diesen Spannungsebenen bisher keine kostengünstigen Antriebslösungen zur Verfügung standen.

Stromerzeugung, -übertragung und –verteilung

Triebkraft hinter der Entwicklung der Leistungselektronik war in den letzten 30 Jahren das Bestreben, Steuerungs- und Regelungsaufgaben auf der Benutz-erebene kostengünstig zu realisieren, sei es um Spannungen zu stabilisieren

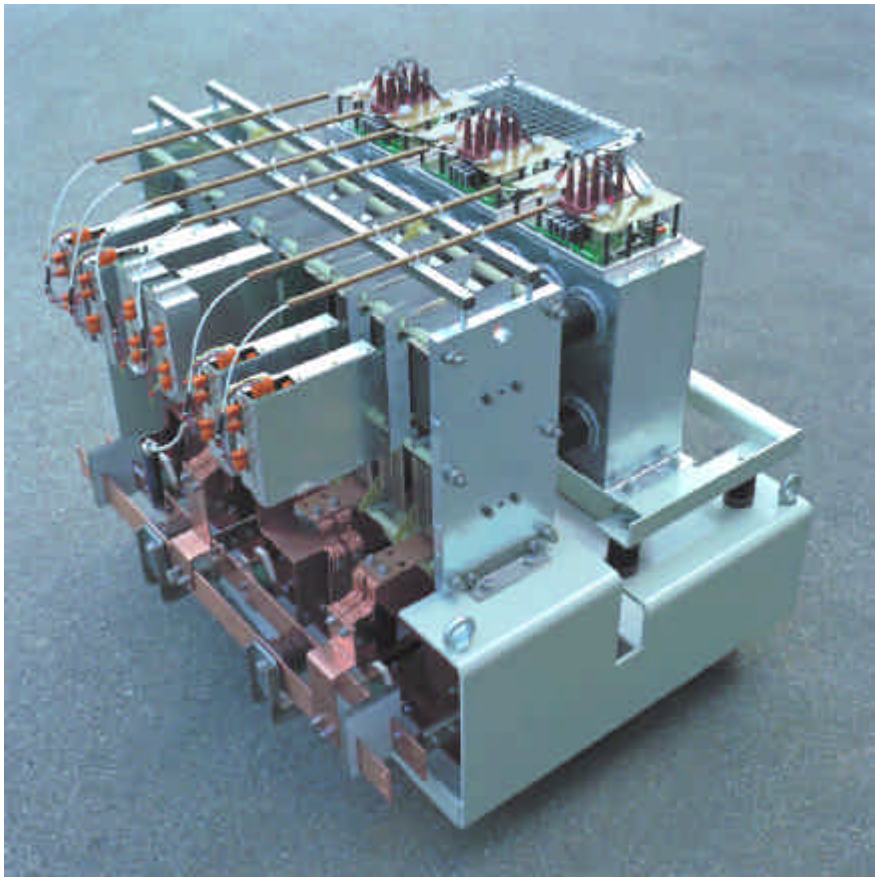
Eric I. Carroll
ABB Semiconductors AG

(Stromversorgungsgeräte) oder die Motordrehzahl, die Beschleunigung und das Drehmoment (in industriellen Prozessen und Verkehrsmitteln) zu regeln. Auch die Unternehmen im Bereich der Stromübertragung und -verteilung hatten ihre Probleme zu lösen – ihnen standen aber traditionell keine kostengünstigen Lösungen zur Verfügung. Ausnahmen waren die HGÜ-Anlagen zur Übertragung großer Leistungen mit Spannungen bis zu 1 MV über große Entfernungen sowie statische Blindleistungskompensatoren zur Steuer-ung von Drosselspulen und Kondensatoren für die Spannungs-stabilisierung. In all diesen Fällen wurden für die Leistungsregelung Thyristoren mit Anschnittsteuerung eingesetzt, haupt-sächlich weil diese die höchsten Leistungen beherrschen und somit die kostengünstigsten Lösungen ermö-glichten.

Bei den Stromerzeugern bestand wenig Anlaß, in der Ausgangsstufe Bauelemente der Leistungselektronik einzusetzen, weil die Leistungen naturgemäß sehr hoch sind (250 MW) und die Generatoren synchron mit dem starren Netz arbeiten.

Neue Märkte

Es beginnen sich neue Anwendungen abzuzeichnen (Tabelle 1), die zwischen den Bereichen Bahntechnik und Industrie sowie zwischen den Bereichen Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung angesiedelt sind. Diese Anwendungen lassen sich grob unter den Begriffen «FACTS», «Stromversorgungsqualität» und «Anwendungsspezifische Stromversorgungen» zusammenfassen . Vorangetrieben werden diese Entwicklungen durch die weltweite Liberalisierung der Energiemärkte, den breiteren Einsatz von Produktionsprozessen, die auf störungsfreie Energiequellen angewiesen sind (z. B. Kunststoffolien- oder Halbleiterfertigung), sowie durch Umweltschutzbedenken, die einerseits eine effiziente Übertragung und einen effizienten Verbrauch der elektrischen Energie postulieren, aber andererseits beispielsweise die Montage zusätzlicher Übertragungsleitungen erschweren.



Dreiphasiger Stromrichter in IGCT-Technik für einen Spannungsstabilisator, ausgelegt für 1,5 MW und 1 kHz, von ABB Industrie AG

Nach verschiedenen Schätzungen werden diese neuen Einsatzmöglichkeiten der Leistungselektronik in den ersten Jahren des nächsten Jahrhunderts weltweit einen Ausrüstungsmarkt von bis zu 3 Milliarden US$ schaffen, der von der Größe her mit den traditionellen Märkten für Bahntechnik und Industrieantriebe vergleichbar sein wird.

Bauelemente

Die Palette der für die neuen Märkte zur Verfügung stehenden Halbleiterbauelemente scheint für die nächsten Jahre begrenzt zu sein (Tabelle 2). Obwohl viele Bauelementstrukturen wiederholt vorgestellt und besprochen werden, bleiben die meisten entweder im niedrigen Leistungsbereich, oder sie kommen über das Forschungs-stadium nicht hinaus.

€ ***Ersatzschaltbilder eines IGCT***

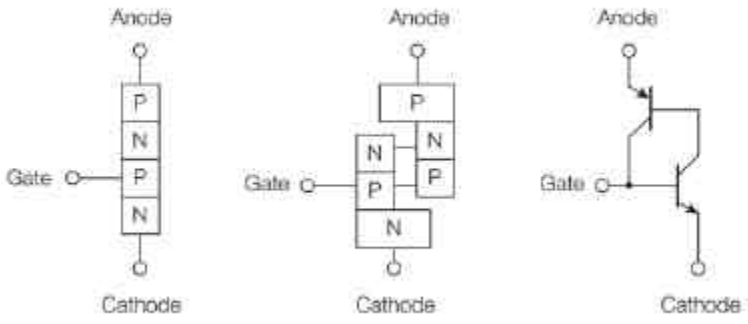


Tabelle 1: Anwendungen, die sich für die Leistungselektronik abzeichnen

Anwendung	Beschreibung	Typische Leistung (MW)	Segment
STATCOM	*Statischer Kompensator* Ermöglicht die kontinuierliche Kompensation induktiver und kapazitiver Blindleistung mit minimaler installierter Kapazität zwecks Spannungsstabilisation und Lastanpassung	100	Energieübertragung und-verteilung, Industrie, Traktion
UPFC	*Unified Power Flow Controller* Mit Stromrichtern arbeitendes System, das denLeistungsfluß, die Spannung und den Leistungsfaktor regelt und damit die optimale Ausnutzung vorhandener Leitungen ermöglicht	200	Energieübertragung und -verteilung
DVR	*Dynamischer Spannungsstabilisator* reagiert unverzögert auf Netzspannungsabfall und stellt den fehlenden Teil der Wellenform auseinem Energiespeichergerät (z.B. Batterie) wieder her	2–100	Stromversorgungqualität
Umschalter	Schaltet die Last auf andere Einspeisungen um	5–30	Versorgungsqualität
Statischer Leistungsschalter	Schaltet Fehler mit hoher Geschwindigkeit ab	5–30	Versorgungsqualität, Traktion
Netz-kupplung	Gestattet den Energieaustausch zwischen kupplung asynchronen Dreiphasen- und/oder Einphasennetzen	2–300	Stromversorgungsunternehmen, Traktion, Industrie
VAR/Drehzahlregelung	Wechselstromerregung synchroner Motor-Generatoren	30	Stromerzeugung
Lokale Stromerzeugung	Brennstoffzellen (DC-Ausgang) oder kleine Strom-Turbogeneratoren, die mit hoher oder veränderlicher Drehzahl laufen und deren Ausgangsfrequenz umgeformt werden muß	2	Stromerzeugung
Energiespeicherung/USV	Kurzzeitige (< 1 h) Energiespeicherung und Spannungswiederherstellung mit Batterien, Schwungrädern, supraleitender magnetischer Energiespeicherung (SMES) usw.	1–100	Versorgungsqualität, Energieübertragung und –verteilung, Traktion, Industrie
Aktives Filter	Kompensiert Oberwellen in Filter Mittelspannungsnetzen	1–30	Versorgungsqualität
Gleichspannungs Kurzkupplung	HGÜ-Verbindungen vom Stromversorgungssunternehmen zu ausgewählten Verbrauchern und von alternativen Energiequellen zum Netz	50	Energieübertragung und -verteilung

Die einzigen Bauelemente, die jetzt und für die nächste Zukunft ernsthaft in Betracht kommen, sind der IGBT, der GTO und der IGCT. Der GTO dürfte wohl durch den IGCT ersetzt werden, weil er gegenüber dem letztgenannten Gerät keinerlei Vorteile aufweist.

Somit bleiben im Endeffekt nur zwei Bewerber für Hochleistungsanwendungen übrig. Bei einer Beschreibung ihrer jeweiligen Vorzüge darf auch die oft vergessene, aber äußerst wichtige schnelle Diode nicht unerwähnt bleiben, weil sie die Frage entscheidet, ob ein Thyristor oder ein Transistor das selbstgeführte Bauelement sein soll.

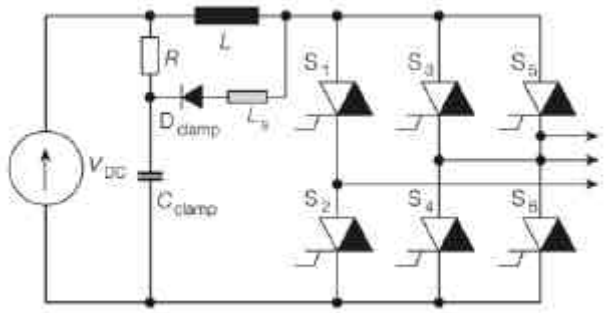
Kriterien für die Auswahl der Bauelemente

Obwohl die Halbleiterbauelemente nur 1 % der Kosten einer großen Anlage, beispielsweise einer 100-MW-Netzkupplung, ausmachen, beeinflussen sie doch das Betriebsverhalten sowie die Investitions- und Betriebskosten des kompletten Systems überproportional stark. Hinsichtlich des Entwurfs der Ausrüstung gelten zwar für alle Anwendungen die gleichen Kriterien, ihr Gewicht ist jedoch von Anwendung zu Anwendung verschieden. Für die Ausrüstung sind die nachfolgend genannten Kriterien in dieser Rangfolge maßgebend:

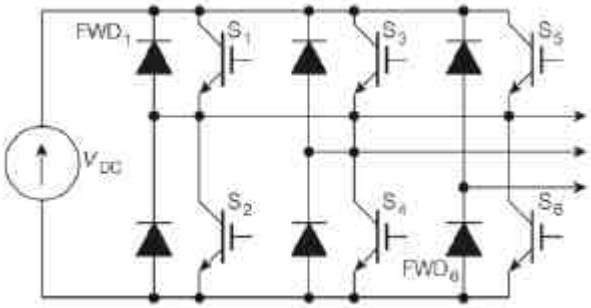
- Kosten des Halbleiterbauelements und der Schaltung
- Zuverlässigkeit (Verschleiß, Zufallsausfälle)
- Wirkungsgrad bei Voll- und Teillast
- Baugröße (Gewicht, Volumen, Grundfläche)

Ausgehend von diesen Systemanforderungen ergeben sich für Halbleiterbauelemente folgende Anforderungen:

- niedrigere Kosten der Halbleiterbauelemente
- robuster Betrieb (kleine Anzahl von Hilfskomponenten)
- hohe Betriebssicherheit (wenige Zufallsausfälle, hohe Leistungs- und Temperaturwechsel, hohe Sperrfestigkeit)
- einfache Montage und Instandsetzung (modulare Bauweise)
- hohe Ströme (Abschalt-, Effektiv-, Mittel-, Scheitel-, Stoßstrom)
- hohe Spannungen (periodische Spitzen-, Stoß-, Dauergleichspannung)
- hohe Schaltgeschwindigkeit (kurze Ein/Aus-Verzögerungen, kurze Anstiegs-/Abfallzeiten, kurze Ein-/Ausschaltzeiten)
- niedrige Verluste (Leit-, Schaltverluste)
- hohe Schaltfrequenz (hohe Schaltgeschwindigkeit, niedrige Schaltverluste).



Typischer IGCT-Wechselrichter
(Patent angemeldet)



Typischer IGBT-Wechselrichter

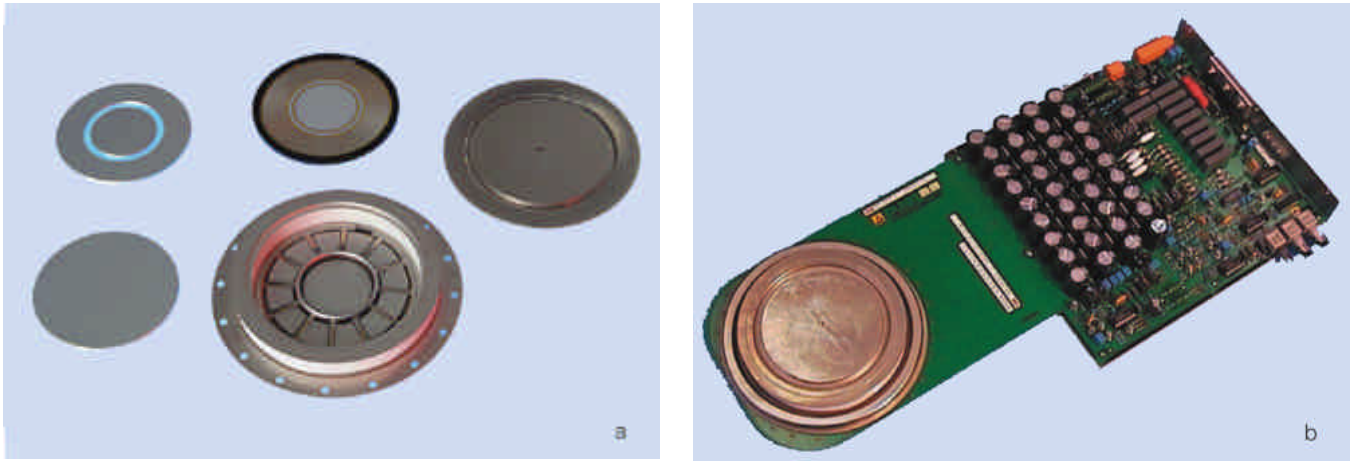
C_{clamp}	*«Clamp»-Kondensator*	*R*	*Widerstand*	$FWD_{1–6}$	*Freilaufdioden 1–6*
D_{clamp}	*«Clamp»-Diode*	$S_{1–6}$	*IGCT 1–6*	$S_{1–6}$	*IGBT 1–6*
L	*Induktivität*				
Ls	*Streuinduktivität des «Clamp»-Kreises*				

Thyristoren und Transistoren

Wie aus *Tabelle 2* ersichtlich ist, fallen selbstgeführte Halbleiterbauelemente in die Kategorie der Thyristoren oder der Transistoren. Jede Kategorie weist sehr unterschiedliche Merkmale auf, die sich bei der Realisierung der genannten Ziele als Vor- bzw. Nachteile bemerkbar machen. Es ist kein Zufall, daß die beiden praktisch in Frage kommenden Wettbewerber für Hochleistungsanwendungen diesen beiden Kategorien angehören.
Transistoren sind Verstärker, die es ermöglichen, große Kollektorströme mit einem kleinen Basisstrom als Steuerstrom wie bei herkömmlichen bipolaren Transistoren oder im Falle der komplizierter aufgebauten IGBTs mit einer Gate-Spannung, die nur sehr wenig Strom und somit nur eine kleine Steuerleistung benötigt, zu ändern. Der Gate-Steuerkreis kann die Geschwindigkeit ändern, mit der die Ein- oder Abschaltung erfolgt.
Thyristoren sind Schalter, die aus einem «regenerativen» Transistorpaar bestehen . Sobald die «regenerative» Wirkung ausgelöst (oder unterbrochen) wird, schalten die Thyristorschalter sehr rasch vom «Ein-Zustand» in den «Aus-Zustand» und umgekehrt. Das Gate hat dabei nur einen geringen oder gar keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit, mit der diese Umschaltung erfolgt.
Eine etwaige Einstellung der Geschwindigkeit, mit der sich die Anodenspannung und der Anodenstrom während der Schaltung ändern (di/dt und dv/dt), muß entweder über externe Komponenten erfolgen oder in das Eigenverhalten des Halbleiterbauelements hineinkonstruiert werden. Beim IGCT wird dies für dv/dt beim Abschalten durch die Anodengestaltung erreicht. Für di/dt ist dies beim Einschalten jedoch nicht so einfach. Somit ergeben sich für Dreiphasen-Zweipunkt-Wechselrichter mit IGCTs und IGBTs die Grundschaltungen gemäß bzw. . Weil viele der in *Tabelle 1* aufgeführten neuen Anwendungen im Hochleistungsbereich mit selbstgeführten

Tabelle 2:
Lieferbare selbstgeführte Halbleiterelemente

Thyristoren	*Transistoren*
• GTO (Gate Turn-Off Thyristor)	• BIPOLAR TRANSISTOR
• MCT (MOS-Controlled Thyristor)	• DARLINGTON TRANSISTOR
• FCTh (Field-Controlled Thyristor)	• MOSFET
• SITh (Static Induction Thyristor)	• FCT (Field Controlled Transistor)
• MTO (MOS Turn-Off Thyristor)	• SIT (Static Induction Transistor)
• EST (Emitter-Switched Thyristor)	• IEGT (Injection Enhanced (insulated) Gate Transistor)
• IGTT (Insulated Gate Turn-off Thyristor)	• **IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor)
• IGT (Insulated Gate Thyristor)	
• **IGCT** (Integrated Gate-Commutated Thyristor)	



Offener GCT (a) mit rückwärtsleitendem Siliziumwafer (oben Mitte) und kompletter IGCT (b) ausgelegt für 4,5 kV/2,6 kA

U-Umrichtern arbeiten werden, werden diese beiden Schlüsselkomponenten mit Blick auf diese einfache Wechselrichtertopologie behandelt.

zeigt einen typischen IGCT-Umrichter, bei dem zwischen die Stromversorgung mit quasi-Null-Impedanz (Gleichstromzwischenkreis) und den Wechselrichter eine di/dt-Begrenzungsschaltung gelegt ist. Die Induktivität L begrenzt die Anstiegsgeschwindigkeit im Wechselrichter, wenn einer der IGCTs (Schalter S_1 bis S_6) eingeschaltet wird. Die Begrenzung des Stromanstiegs wird durch die zulässige Abfallgeschwindigkeit des Stroms in der zugehörigen Diode bestimmt, die bei den meisten IGCTs auf der gleichen Halbleiterscheibe integriert ist. Die nach der Kommutierung der Diode in der Induktivität L gespeicherte Energie wird anschließend im Widerstand R vernichtet; der optionale «Clamp»-Kondensator, Cclamp, kann dazu benutzt werden, die Spannungsüberhöhung auf ein Minimum zu begrenzen.

Bei Ausfall von zwei Halbleiterbauelementen in einer Phase wird der dabei entstehende Strom, I_{fault}, von der Induktivität auf einen Wert begrenzt, der durch folgende Formel gegeben ist:

$$I_{fault} = V_{DC} \bullet \sqrt{C / L} \qquad (1)$$

worin C die Kapazität des Gleichstrom-Zwischenkreises bezeichnet.

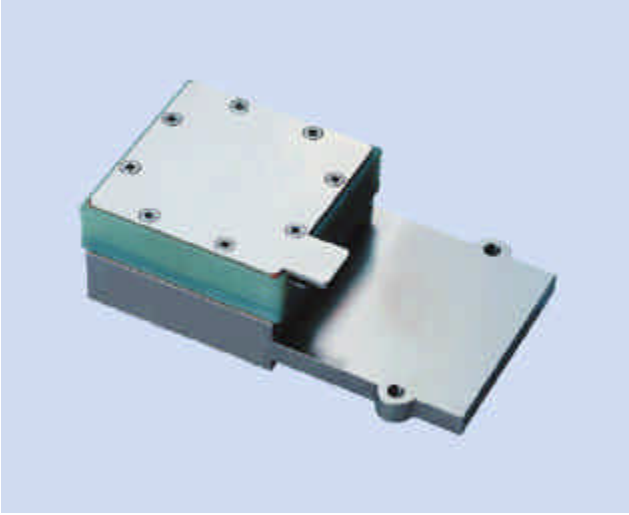
zeigt einen IGBT Wechselrichter, der ausschließlich aus Halbleiterbauelementen besteht. Er kann für Systeme mit niedriger Leistung als Einzelbaustein ausgeführt werden, wird jedoch im allgemeinen aus mehreren Modulen mit parallelgeschalteten IGBT- und Dioden-Chips aufgebaut, um die gewünschte Nennleistung zu erhalten .

Der Vorteil des modularen Aufbaus gemäß liegt darin, daß keine Hilfskomponenten erforderlich sind. Die di/dt Begrenzungsfunktion wird von der Gate-Steuerung übernommen, die die Einschaltung des IGBT auf die zulässige Abschaltgeschwindigkeit der Diode verzögert. Die im IGBT auftretenden Verluste sind nachweislich [3] genau so groß wie die Verluste, die im Widerstand gemäß entstehen. In kommt es bei gleichzeitigem Ausfall von zwei Halbleiterbauelementen in der gleichen Phase durch den Wegfall von Impedanzen (z. B. einer Induktivität) zwischen der Leistungselektronik (Wechselrichter) und dem Gleichstrom-Zwischenkreis zu extrem hohen Fehlerströmen. Diese Tatsache beschränkt die direkte Verwendbarkeit des Aufbaus gemäß auf niedrige Spannungen (bis etwa 1,5 kV) oder kleine Kondensatoren im Gleichstrom-Zwischenkreis. Bei höheren Spannungen und Leistungen müssen der Zwischenkreis und der Wechselrichter durch Drosselspulen oder Widerstände entkoppelt werden, um explosionsartige Schäden durch gleichzeitige Verdampfung der Chip-Anschlußdrähte zu vermeiden und die elektromagnetischen Kräfte des Fehlerstroms zu begrenzen [4].

Eine Ausnahme bilden gegebenenfalls Höchstspannungssysteme, wo eine große Anzahl von in Reihe geschalteten IGBTs verwendet wird und redundante Bauelemente vorgesehen sind. Bei Einhaltung der vorgeschriebenen Wartungsabstände würde nur ein direkter Blitzeinschlag zum gleichzeitigen Ausfall aller redundanten Bauelemente in einem Phasenzweig führen, so daß auch hier der Verzicht auf Impedanzen denkbar wird. zeigt einen in «Presspack» Bauform ausgeführten IGBT, der speziell für Reihenschaltung entwickelt wurde [4]. Hier sind die parallelgeschalteten IGBT- und Dioden-Chips druckkontaktiert, wobei jede Kontaktstelle für den Vollaststrom ausgelegt ist, falls einer der Chips ausfallen sollte. Auf diese Weise ist der Serienbetrieb des Stacks (bei Berücksichtigung entsprechender Redundanzen) gewährleistet, wenn einmal ein Bauelement im Kurzschlußbetrieb ausfallen sollte.



„ IGBT-Modul, ausgelegt für 2500 V/1200 A (Einzelschalter)



... IGBT-Modul in «Presspack»-Bauform, ausgelegt für 2500 V/700 A, für Reihenschaltung

Dioden

Wie bereits erwähnt, spielt die Diode beim gewählten Aufbau eine entscheidende Rolle, weil sie das zulässige di/dt beim Einschalten eines U-Umrichters bestimmt und somit für den Hauptteil der in der Siliziumscheibe oder im Widerstand auftretenden Einschaltverluste verantwortlich ist. Die entsprechenden Kurvenformen sind in dargestellt.

In [3] wurde nachgewiesen, daß sich die stromkreisspezifischen Einschaltverluste, Eon-circuit, durch folgende Formel berechnen lassen:

$$E_{on-circuit} = \frac{V_{DC}^2 \bullet I_{peak}^2}{2 \bullet k \bullet P_{r\,r\,max}} \qquad (2)$$

k ist eine Konstante und P_{rrmax} die maximale Sperrverzögerungsleistung der Dioden für einen sicheren Betrieb. Je höher Prrmax der Diode ist (auch ein Maß für den zuverlässigen Arbeitsbereich SOA (Safe Operating Area), umso niedriger sind die stromkreisspezifischen Einschaltverluste (es kann nachgewiesen werden, daß die stromkreisspezifischen Verluste dann am niedrigsten sind, wenn der Sperrverzögerungsstrom, I_{RR}, ungefähr gleich dem Laststrom ist [4]).

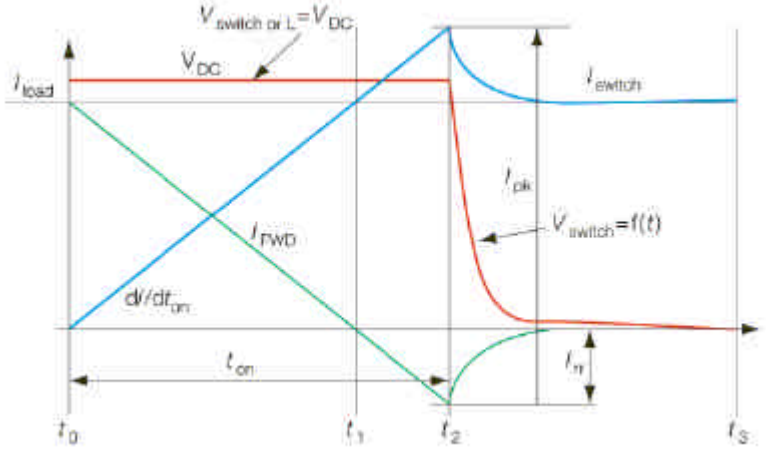
zeigt den Spannungszusammenbruch über dem Halbleiterbauelement, der anschließend einen bauelementspezifischen Verlust, Eon-device, verursacht:

$$E_{on-device} \approx I_{peak} \bullet \int_{t_3}^{t_2} V_{switch}(t) \bullet dt \qquad (3)$$

V_{switch} ist die Spannung über dem Bauelement, während diese auf ihren Dauerdurchlaßwert fällt. Bei Ausnutzung eines erweiterten SOA der Dioden gemäß Gl. (2) verringert sich $E_{on-circuit}$, während sich $E_{on-device}$ vergrößert, so daß – wenn keine di/dt-Drosselspule vorhanden ist – die IGBT-Einschaltverluste nur durch Erhöhung der Geschwindigkeit der Diode verringert werden können. Ist jedoch eine Drosselspule vorhanden, so bewirkt

† ***Allgemeines Einschaltverhalten zu Bildern 3 und 4***

FWD	*Strom der Freilaufdiode*
I_{load}	*Laststrom*
I_{pk}	**Scheitelstrom**
I_{switch}	*Stationärer Schalterstrom*
di/dt_{on}	*Anstiegsgeschwindigkeit des Schalterstroms*
V_{DC}	*Gleichspannung*
$V_{switch\ or\ L}$	*Spannung über Schalter oder Induktivität*
t_0	*Einschaltzeitpunkt Schalter*
t_{on}	*Dauer des Stromanstiegs*
t_1	*Zeitpunkt, in dem der Schalterstrom den stationären Laststrom erreicht*
t_2	*Zeitpunkt, in dem der Diodenstrom den Scheitelwert erreicht*
t_3	*Zeitpunkt, in dem die Schalterspannung auf den Beharrungsstrom fällt*



sowohl eine Erhöhung der Geschwindigkeit als auch eine Erweiterung des SOA eine Verringerung der Einschaltverluste, und es wird sichergestellt, daß diese Verluste nicht über das Silizium des aktiven Bauelements abgeführt werden. Die heutigen Siliziumdioden stoßen inzwischen an ihre Leistungsgrenzen und dürften ihre SOA-Grenzen bis zum Ende dieses Jahrhunderts erreichen. Aus diesem Grund werden die bei Schaltungen ohne Drosselspulen geltenden Beschränkungen für die Einschaltverluste so lange unverändert fortbestehen, bis Siliziumkarbid-Dioden mit 100fach niedrigeren Schaltverlusten zur Verfügung stehen [5]. Obwohl es bereits Labormodelle mit Spannungen bis 5 kV gibt, werden zuverlässige, kostengünstige Bauelemente wahrscheinlich erst in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrzehnts allgemein verfügbar sein.

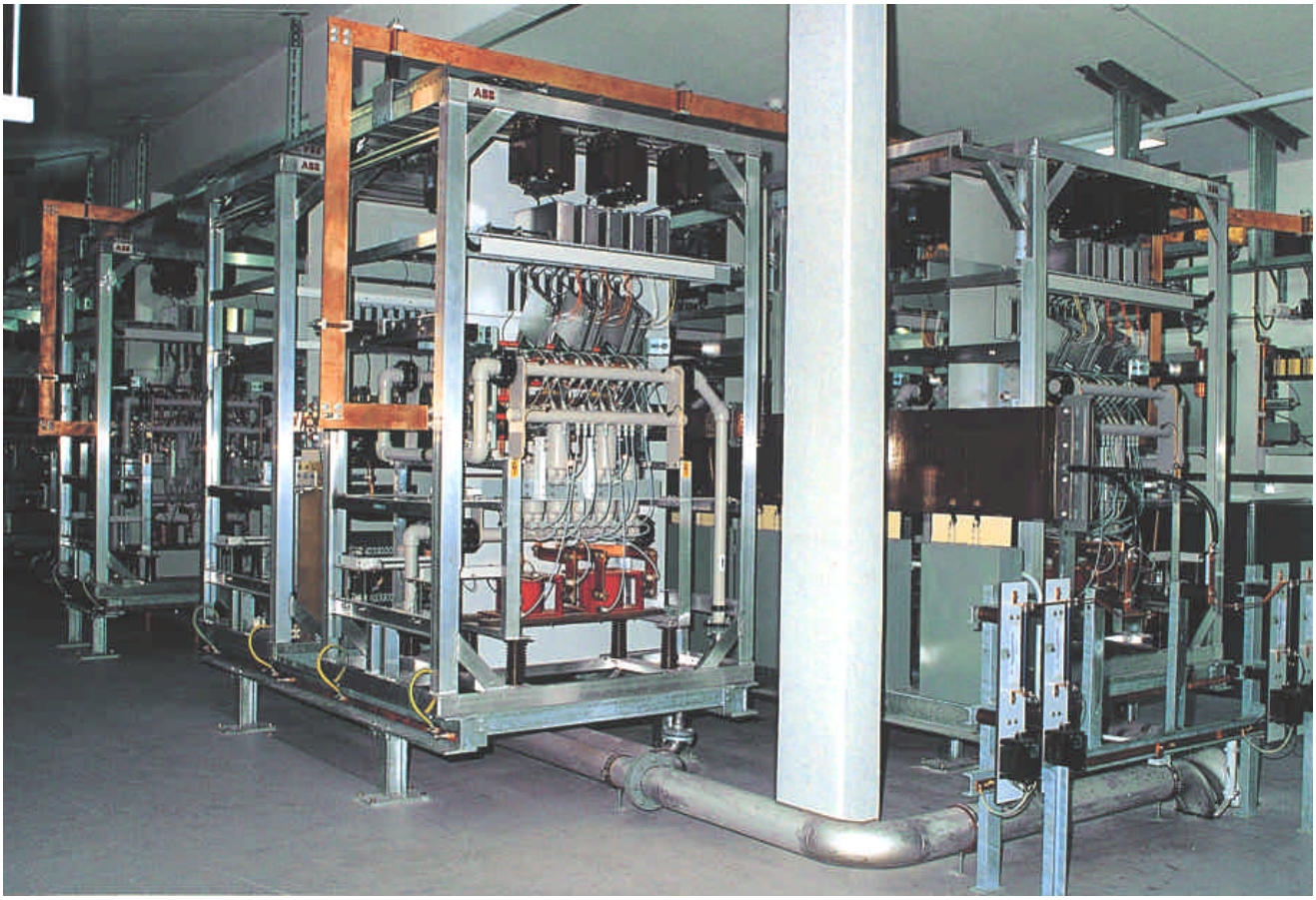
Kosten, Zuverlässigkeit, Frequenz und Wirkungsgrad

Bei künftigen Anwendungen in der Energieübertragung werden Kosten, Zuverlässigkeit, Frequenz und Wirkungsgrad als Bewertungskriterien eine wichtige Rolle spielen. Die beiden erstgenannten Kriterien wirken im Gleichklang, weil beide von einer minimalen Anzahl von Bauelementen profitieren. Demgegenüber wirkt sich die für die aktive Filterung benötigte Frequenz auf alle Zielvorgaben negativ aus, weil die Schaltverluste mit der Frequenz steigen und die von einem Bauelement beherrschbare Nutzenergie reduzieren. Folglich müssen mehr Bauelemente eingesetzt werden, was wiederum negative Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit hat. Bei den in Tabelle 1 aufgeführten Hochleistungsanwendungen ermöglichen zwar die heutigen IGCTs transiente Schaltleistungen bis zu 16 MW, sie müssen aber trotzdem in Reihen- oder Parallelschaltung eingesetzt werden, um den Anforderungen dieser Anwendungen zu genügen. Da die Geräte im allgemeinen für mittlere bis hohe Spannungen (10 kV und mehr) bestimmt sind, wird das Hauptaugenmerk der Reihenschaltung gelten müssen [6].

Wechselrichter mit 100 MW Nennleistung sind bereits mit direkt in Reihe geschalteten IGCTs der ersten Generation [7], wenngleich bei Netzfrequenz, realisiert worden. Heute werden IGCT-Wechselrichter mit 5 MW Nennleistung und direkter Einspeisung vom 4160-V-Mittelspannungsnetz ohne Schutzbeschaltung oder Reihenschaltung mit Pulsweitenmodulation von 500–1000 Hz kommerziell betrieben. Die IGCTs der zweiten Generation, deren Verluste 30 % unter denen vor nur 3 Jahren liegen, kommen jetzt in STATCOMs und in Netzkupplungen, wie z. B. im 100-MW Bahnstromumrichter Karlsfeld der Bayernwerk AG [8] zum Einsatz. Die Abschaltleistungen ohne Schutzbeschaltung (4 kA) entsprechen dabei denen herkömmlicher GTOs

‡

100-MW-Bahnstromumrichter für 16 $^{2}/_{3}$ Hz in Karlsfeld, Deutschland. Die Inbetriebsetzung erfolgt im Oktober 1999.



mit einer 6 µF-Schutzbeschaltung.

Sowohl die IGBTs als auch die IGCTs erfüllen die Forderung nach «robustem Schalten», worunter die Fähigkeit der Geräte verstanden wird, ohne Kommutierungsnetzwerke oder dv/dt Schutzbeschaltungen abzuschalten. Diese Netzwerke sind nicht nur wegen der damit verbundenen zusätzlichen Kosten und Verluste unerwünscht, sondern auch deshalb, weil sie Zeitkonstanten ins Spiel bringen, die ihrerseits die Schaltfrequenz beschränken. Aufgrund ihrer niedrigen Verluste und ihres Betriebs ohne Schutzbeschaltung können 6-kV-IGCTs mit einer Schaltfrequenz von 500 Hz arbeiten, bei Pulspaketsteuerung bis 25 kHz bei voller Leistung [9]. Bei Halbleiterbauelementen für niedrigere Spannungen sind höhere, durch thermische Grenzen bestimmte Frequenzen möglich, nämlich 1 kHz bei 4,5-kV- und 3 kHz bei 3,3-kV Bauelementen.

Ferner ist bei großen Anlagen das Volumen der Ausrüstung oder noch häufiger der Grundflächenbedarf ein wesentlicher Kostenfaktor. Die IGCT-Wechselrichter sind sehr kompakt gebaut und mit Werten von 13 bis 20 kVA pro Liter und Wirkungsgraden von 99,65 % bei 200 Hz PWM [1] konkurrenzlos.

Die IGCTs und IGBTs wirken beim Abschalten als Transistoren, und als solche erzeugen sie die gleichen Verluste. Die Einschaltverluste wurden bereits angesprochen und sind bei IGCTs mit ihren obligatorischen di/dt-Steuerdrosseln vernachlässigbar. Daher werden die «externen» stromkreisspezifischen Verluste (die um den Preis einer zusätzlichen Schaltung zurückgewonnen werden können) in der Wärmebilanz des Halbleiterbauelements nicht berücksichtigt. Im leitenden Zustand wirkt der IGCT als Thyristor mit zwei «Injecting»-Emittern, welche die Hälfte der Leitungsverluste einer Transistorstruktur beitragen und in der Wärmebilanz mehr Raum für dynamische Verluste und damit für die Frequenz lassen.

Beim GTO, dem traditionellen Arbeitspferd der Leistungselektronik, waren in den letzten zehn Jahren stetige Kostensenkungen in der Größenordnung von 20 % pro MVA und Jahr zu verzeichnen. Der GCT hat diesen Trend gestoppt, aber die Treiberkosten halbiert, die Kosten für die Kühlung um 30 % gesenkt und die Kosten für Schutzbeschaltungen und Freilaufdioden ganz erübrigt. Auf diese Weise wurden in einem einzigen Schritt bei der Leistungselektronik Kosteneinsparungen von 30 % erzielt.

Entwicklungstendenzen und Verbesserungen

Derzeit sind IGBTs und IGCTs für Spannungen bis 3,3 bzw. 6 kV lieferbar. Diese Spannungen können bis Ende dieses Jahrhunderts auf 6,5 bzw. 9 kV erhöht werden, wenn die erhöhten Verluste solcher Bauelemente bei den jeweiligen Anwendungen toleriert werden können. Die heutigen 4,5-kV-IGCTs auf einer 4-Zoll-Siliziumscheibe sind für Ströme bis 4 kA ausgelegt, doch konnte bereits nachgewiesen werden, daß 6 kA bei 6 kV im Bereich des Möglichen liegen [4].

Anorganische Passivierungsmittel, wie z. B. DLC (Diamond-Like Carbon), werden höhere Nenngleichspannungen oder höhere Sperrschicht-Betriebstemperaturen ermöglichen. Ferner könnten neue Werkstoffe, wie z. B. Metallmatrix-Aluminiumsiliziumkarbid, den Wärmewiderstand senken, indem sie die Möglichkeit bieten, die Siliziumscheibe direkt mit dem Gehäuse zu verkleben. IGBT-Module mit eingebauter Wasserkühlung befinden sich bereits für Traktionsanwendungen in der Entwicklung, und dieses Prinzip läßt sich gegebenenfalls auch auf monolitische IGCTs anwenden. Herkömmliche Thyristoren mit Phasenanschnittsteuerung werden auch weiterhin die traditionelle Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung beherrschen [10], während sich der neu eingeführte bidirektional gesteuerte Thyristor (BCT) zu einem wichtigen Bauelement in der herkömmlichen Blindleistungskompensation entwickeln wird [11].

Schlußfolgerungen

Bei den vielfältigen FACTS-Anwendungen, die im Laufe der nächsten zehn Jahre entstehen werden, dürften hauptsächlich die IGBTs und IGCTs Anwendung finden. In Höchststrom- und Mittelspannungsanwendungen wird vorzugsweise die Thyristorstruktur zum Einsatz kommen – besonders dann, wenn Entkopplungsdrosseln wünschenswert oder notwendig sind.

Der IGBT in der Konfiguration ohne Drosselspule wird stark von den raschen Fortschritten bei den Siliziumkarbid-Dioden profitieren, obwohl die kommerzielle Einführung dieser Dioden in FACTS-Anwendungen noch auf sich warten läßt. Nichtsdestoweniger wird der IGBT auch weiterhin in der kostengünstigen Konfiguration ohne Drosselspule bevorzugt werden, wenn sich die höheren Kosten des Bauelements ausreichend kompensieren lassen.

Literaturhinweise

[1] **S. Klaka, M. Frecker, H. E. Grüning:** The integrated gate-commutated thyristor: a new high-efficiency, high-power switch for series or snubberless operation. PCIM ’97 Europe.

[2] **H. M. Stillman:** IGCTs – Megawatt-Halbleiterschalter für den Mittelspannungsbereich. ABB Technik 3/97, 12–17.

[3] **E. I. Carroll, N. Galster: IGBT or IGCT:** considerations for very high power applications. Forum Européen des Semiconducteurs de Puissance, 1997.

[4] **H. R. Zeller:** High power components: from the state of the art to future trends. PCIM ’98 Europe.

[5] **D. Silber:** Leistungsbauelemente: Funktionsprinzipien und Entwicklungstendenzen. ETG-Fachbericht, 1998.

[6] **P. K. Steimer, H. E. Grüning, J. Werninger, E. I. Carroll, S. Klaka, S. Linder: IGCT** – eine neue, zukunftsweisende Technik für kostengünstige Hochleistungs-Umrichter. ABB Technik 5/98, 34–42.

[7] **P. Steimer, H. E. Grüning, J. Werninger, D. Schröder:** State-of-the-art verification of the hard driven GTO inverter development for a 100 MVA intertie. PESC ’96 Baveno.

[8] **V. Fister, S. Kreitmayer, E. Jergas, M. Niessen, D. Lönard, J. Northe:** Bahnstromumrichter Karlsfeld der Bayernwerke AG. Elektrische Bahnen 95 (1997) 11, 297–303.

[9**] S. Klaka, L. Linder, M. Frecker:** A family of reverse conducting gate commutated thyristors for medium voltage drive applications. PCIM ’97 Asia.

[10] **P. Kamp, G. Neeser, B. Blöcher:** Höchstsperrende Halbleiter-Bauelemente

in stationären Hochleistungs-Stromrichtern. ETG-Fachbericht, 1998.

[11] **K. Thomas, B. Backlund, O. Toker, B. Thorvaldsson:** The bidirectional control thyristor. PCIM ’98 Asia.

Adresse des Autors

Eric I. Carroll
ABB Semiconductors AG
CH-5600 Lenzburg/Schweiz
Telefax + 41 (0) 62 888 6305
E-mail:
eric.caroll@chsem.mail.abb.com