

# IGCT – eine neue, zukunftsweisende Technik für kostengünstige Hochleistungs-Umrichter

**Der IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) verbindet die Vorteile des hart angesteuerten GTO-Thyristors, wie dessen erheblich verbessertes Abschaltverhalten, mit bahnbrechenden technischen Innovationen auf der Bauelement-, Gate-Treiber- und Anwendungsebene. Durch das homogene Schalten des IGCT läßt sich der Arbeitsbereich bis an die Grenzen des dynamischen Avalanche ausdehnen. Schutzbeschaltungen werden dabei nicht mehr benötigt. Aufgrund der niedrigen Verluste lassen sich mit dieser Technik auch Anwendungen mit hohen Frequenzen bis in den kHz-Bereich realisieren. Für den Einsatz im Leistungsbereich von 0,5 bis 6 MVA wurde eine neue IGCT-Familie mit integrierten Hochleistungsdiode entwickelt, mit denen durch eine entsprechende Reihen- und Parallelschaltung Leistungen von mehreren 100 MVA erreicht werden können. Die erste mit IGCTs ausgeführte 100-MVA-Netzkupplung steht bereits seit fast zwei Jahren im praktischen Einsatz und bestätigt die hohe Zuverlässigkeit dieser neuen Technik. Auf dem IGCT-Konzept beruht u. a. auch der neue Standard-Drehstromantrieb für den Mittelspannungsbereich ACS 1000.**

**A**ufgrund ihres Funktionsprinzips weisen Thyristoren eine sehr gute Plasmaverteilung auf. Ab 2,5 kV kann dieser Vorteil mit der heutigen Technologie voll genutzt werden, so daß Thyristoren deutlich niedrigere Verluste aufweisen als vergleichbare Transistoren. Das gute Abschaltverhalten der GTO-Thyristoren wurde dabei bislang durch eine Reihe unbefriedigender Zugeständnisse erkauft. So kommt es etwa bei der heute standardmäßig verwendeten GTO-Ansteuertechnik infolge des inhomogenen Schaltverhaltens zu Ausgleichsvorgängen, die aufwendige  $du/dt$ - und  $di/dt$ -Schutzbeschaltungen [1, 2] erforderlich machen. Nachteilig fallen bei diesem Verfahren auch die großen Ansteuereinheiten (Gate-Treiber) ins Gewicht.

Dennoch hat sich die GTO-Technik in verschiedenen Anwendungen im Leistungsbereich von etwa 1 bis 20 MVA durchgesetzt. In erster Linie sind hier drehzahlgeregelte An-

**Dr. Peter K. Steimer**  
**Dr. Horst E. Grüning**  
**Johannes Werninger**  
 ABB Industrie AG

**Eric Carroll**  
**Dr. Sven Klaka**  
**Dr. Stefan Linder**  
 ABB Semiconductors AG

triebe und Netzkupplungen für die Bahnstromversorgung als wichtige Einsatzgebiete zu nennen. Während die fortschreitende Entwicklung der Hochspannungs-IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) [3] diesen in Bereichen, in denen sie mit den herkömmlichen GTOs konkurrieren, einige Vorteile verschaffte, haben entscheidende Fortschritte in der GTO-Technik schließlich zum IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) [4] geführt. Der IGCT vereint die bewährten Eigenschaften der Thyristoren, insbesondere deren niedrige Verluste, mit einer kostengünstigen Abschalttechnik. Letztere arbeitet ohne Schutzbeschaltung (Snubber) und ist damit die ideale Lösung für anspruchsvolle Schaltaufgaben im Mittel- und Hochspannungsbereich.

## Eigenschaften des IGCT

Die Realisierung der angestrebten Eigenschaften des IGCT erfolgte, ähnlich wie beim IGBT, in einzelnen Entwicklungsschritten, die auf folgende Zielvorgaben ausgerichtet waren:

- *verbessertes GTO-Schaltverhalten* für einen Betrieb ohne  $du/dt$ -Schutzbeschaltung bei hoher Stromdichte
- *niedrigere Durchlaß- und Schaltverluste* durch eine dünnere Siliziumscheibe
- *geringere Anforderungen an den Gate-Treiber*, insbesondere im Durchlaßzustand
- *Entwicklung von antiparallelen Dioden*, die in der Lage sind, auch bei hohen  $di/dt$ -Werten ohne Schutzbeschaltung abzuschalten
- *Betrieb bei hohen Frequenzen*
- *Integration der Hauptschalter* (GTO-Thyristor und Diode) in einem Halbleiterbauelement

Für Anwendungen mit hohen Leistungen waren darüber hinaus einige zusätzliche Eigenschaften erforderlich:

- *höhere Zuverlässigkeit pro MVA* durch einfacheren Aufbau und geringere Anzahl von Komponenten
- *Erweiterung des Leistungsbereichs* auf mehrere 100 MVA durch eine kostengünstige und zuverlässige Reihen- und Parallelschaltung

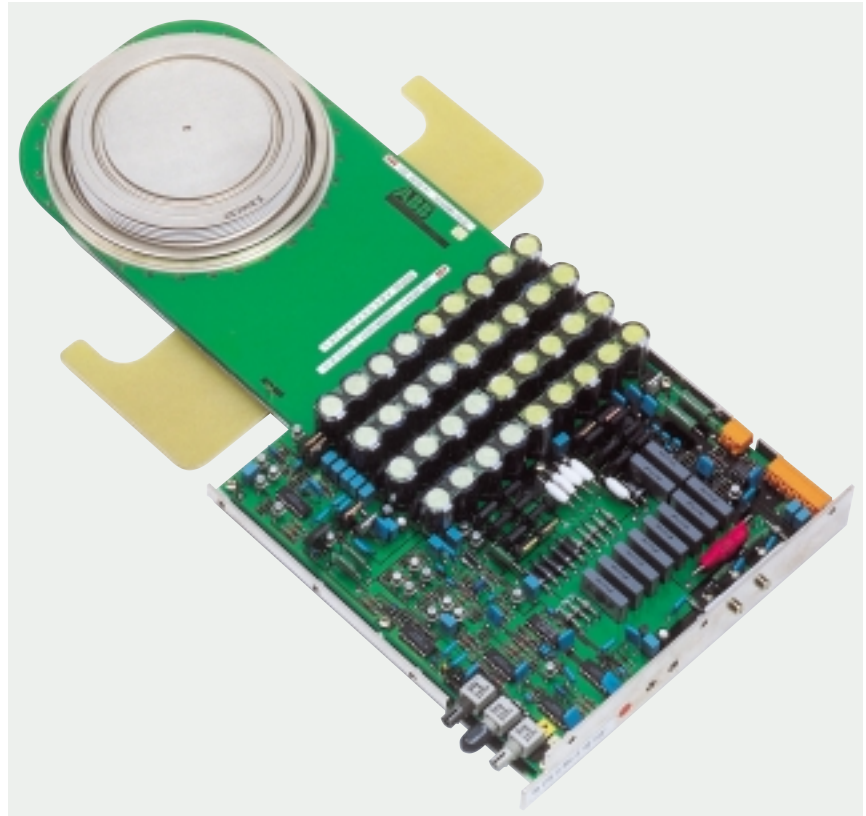
**Verbessertes  
GTO-Schaltverhalten**

Eine erhebliche Ausweitung des zuverlässigen GTO-Arbeitsbereichs bei hohen Leistungen (3 kA/4,5 kV) wird durch die harte oder Hard-Drive-Ansteuerung erreicht, bei der ein integrierter Gate-Treiber zunächst den Kathodenstrom vollständig sperrt, bevor sich die Anodenspannung aufbaut. Diese Technik setzt eine sehr niedrige Steuerkreisinduktivität voraus, die durch eine koaxiale Gate-Durchführung und die Kontaktierung des Gate-Treibers über eine Mehrlagen-Leiterplatte gewährleistet wird. Auf diese Weise können mit einer Gatespannung von 20 V Werte  $\geq 5\text{--}6 \text{ kA}/\mu\text{s}$  realisiert werden [5]. Wenn der Kathodenstrom den Wert Null erreicht hat, erfolgt ein Übergang des vollen verbleibenden Anodenstroms zum Gate, das in einem niederohmigen Zustand bleibt. Ein Übersteuern des Gates wird vermieden und dadurch der Energieverbrauch des Gate-Treibers minimiert.

Die harte Ansteuerung führt den Thyristor aus einem stabilen, durch sein Einrastverhalten gekennzeichneten pnpn-Zustand innerhalb von  $1 \mu\text{s}$  in einen pnp-Zustand. Der gesamte Abschaltvorgang erfolgt dann im Transistormodus, wodurch ein Einrasten ausgeschlossen ist und ein homogenes Schalten erreicht wird. Der zulässige Arbeitsbereich SOA (Safe Operating Area) kann so bis zum dynamischen Avalanche ausgedehnt werden ( $250 \text{ kW}/\text{cm}^2$ ). Das Schaltgerät ist so ausgelegt, daß es die gesamte Siliziumfläche bis an die physikalischen Grenzen nutzen kann. Damit werden Abschaltströme pro Siliziumflächeneinheit möglich, wie sie zuvor nur von den besten, mit Schutzbeschaltungen versehenen GTO-Geräten erreicht wurden. **2** zeigt das typische Abschaltverhalten ohne  $du/dt$ -Schutzbeschaltung.

**Niedrigere Durchlaß- und  
Schaltverluste**

Durch den Einbau einer Pufferschicht auf der Anodenseite läßt sich die Dicke des Bauelements bei gleicher Vorwärts-Durchbruchspannung bis zu 30% reduzieren. Leistungshalbleiter mit Pufferschicht sind den herkömmlichen Ausführungen insbesondere aufgrund des günstigeren Kennlinienverlaufs



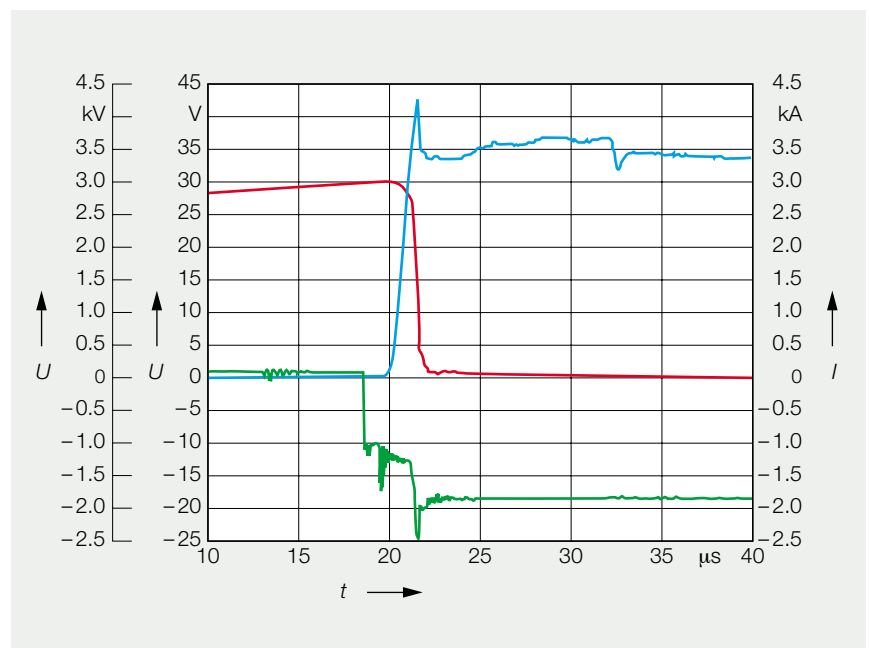
**Der IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)**

**1**

**Abschaltverhalten des IGCT ohne Schutzbeschaltung  
(Spannungsnachlaufzeit  $t_s = 1,6 \mu\text{s}$ )**

**2**

$U$ Spannung	Rot	Anodenspannung
$I$ Strom	Grün	Anodenstrom
$t$ Zeit	Blau	Gatespannung



**Tabelle 1:**  
**Gegenüberstellung von GTO, Hard-Drive-GTO (HD-GTO)**  
**und dem neuen IGCT**

Sperrschichttemperatur 125 °C; Siliziumscheibe 85 mm Durchmesser;  
Nennspannung 4,5 kV

		GTO	HD-GTO	IGCT
Durchlaßspannung	V	3,2	3,2	2,4
Max. Stromsteilheit beim Einschalten	A/µs	500	3000	3000
Einschaltverluste	W	5	1	0,5
Abschaltverluste bei 3 kA	W	10 (6 µF)	13 (0 µF)	10 (0 µF)
Kapazität der Schutzbeschlaltung (beim Abschalten von 3 kA)	µF	6	0	0
Max. Abschaltstrom	kA	3	3–6	3–6
Leistung des Gate-Treibers (500 Hz)	W	80	30	15
Gespeicherte Gateladung	µC	800	2000	2000
Max. Spannungssteilheit beim Abschalten (du/dt)	V/µs	500	≥ 4000	≥ 4000
Speicherzeit	µs	20	1	1

der dünneren Elemente mit ihren niedrigeren Durchlaß- und Schaltverlusten deutlich überlegen. Bei Verwendung einer solchen Pufferschicht in einem vierschichtigen Bauelement kann auf Anodenshorts verzichtet werden, ohne daß dies eine Verschlechterung der Elektronenableitung beim Abschalten zur Folge hat. In den neuen IGCTs wird die Pufferschicht in Verbindung mit einer «transpa-

renten» Anode, d. h. einem pn-Übergang mit stromabhängigem Emitterwirkungsgrad, eingesetzt. Bei entsprechender Auslegung werden die Elektronen während des Abschaltvorgangs ebenso schnell ausgeräumt wie über Anodenshorts. In *Tabelle 1* sind die verbesserten Eigenschaften des IGCT denen herkömmlicher Hard-Drive- und Standard-Thyristoren gegenübergestellt.

Da der IGCT im leitenden Zustand als Thyristor arbeitet, sind die Durchlaßverluste zwangsläufig niedriger als bei einem vergleichbaren IGBT. Die Schaltverluste sind bei beiden Geräten ähnlich, sofern auch der IGBT mit einer Pufferschicht ausgeführt wird (unter Vernachlässigung der höheren Einschaltverluste des IGBT, wenn die Stromsteilheit ( $di/dt$ ) über das Gate gesteuert wird). Die niedrigen Verluste und der Verzicht auf eine Schutzbeschlaltung ermöglichen die Realisierung wirtschaftlicher IGCT-Anwendungen mit Schaltfrequenzen zwischen 500 Hz und 2 kHz.

**Geringere Anforderungen an den Gate-Treiber**

Die Auslegung von Gate-Treibern für GTO-Thyristoren wird üblicherweise von folgenden Faktoren wesentlich mitbestimmt:

- Der Abschaltsteuerstrom (750 A beim Abschalten von 3 kA) muß in eine Steuerkreisinduktivität von 300 nH «gepumpt» werden. Hierzu wird eine hohe Gateladung ( $Q_g$ ) pro Steuerimpuls benötigt ( $Q_g = 0,5 t_s \times I_{GQM}$ , wobei  $t_s$  die Spannungsnachlaufzeit und  $I_{GQM}$  den Abschaltspitzenstrom bezeichnet). Zudem treten an den Ausgangs-MOSFETs hohe Verluste auf.

**Tabelle 2:**  
**IGCT-Produktfamilie mit monolithisch integrierter, antiparalleler Diode**

Spannungs- klasse	Durchmesser der Silizium- scheibe [mm]	Bauelement- nummer	$I_{TGQM}$ [A]			$E_{Aus}$ [Ws]	Max. di/dt [A/cm <sup>2</sup> ] (Dioden- teil)	$I_{rr}$ [A]
			3,3 kV DC	2,7 kV DC	1,9 kV DC			
4,5 kV $U_{DM}$ (2,7 kV DC)	38	5SGR04D4502		340	480	1,1	130	110
	51	5SGX08F4502		640	910	2,1	345	280
	68	5SGX14H4502		1100	1560	3,6	525	430
	91	5SGX26L4502		2250	3200	7,1	945	769
6 kV $U_{DM}$ (3,3 kV DC)	38	5SGR03D6004	275			1,45	90	114
	51	5SGX06F6004	520			2,7	230	270
	68	5SGX10H6004	910			4,8	350	433
	91	5SGX19L6004	1820			9,6	630	780

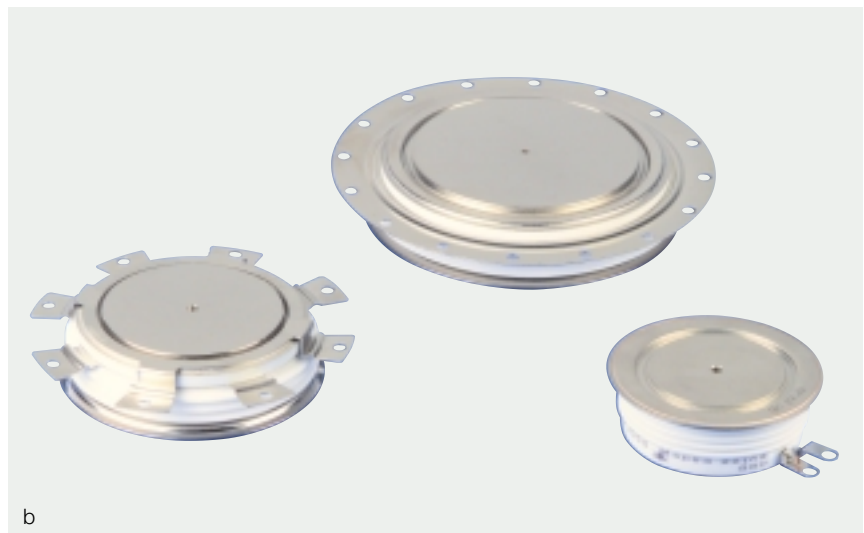
$I_{TGQM}$  Höchstzulässiger Abschaltstrom  
 $E_{Aus}$  Abschaltverluste bei  $I_{TGQM}$   
 $I_{rr}$  Sperrverzögerungsstrom beim Abschalten der Diode

- Um den eingeschalteten Zustand sicherzustellen, wird ein hoher Gate-Strom benötigt (typische Werte bei einem 3-kA-GTO sind 4 bis 8 A), insbesondere bei niedrigen Temperaturen.

Die neuen GCTs stellen in diesen Punkten deutlich niedrigere Anforderungen an die Gate-Treiber:

- Die Speicherzeit  $t_s$  wird etwa um den Faktor 20 verkürzt und die erforderliche Gateladung trotz des höheren  $I_{GQM}$  ungefähr um den Faktor 4 verringert. Zusammen mit der großen Anzahl von parallelgeschalteten Bauelementen, die nötig sind, um den hohen Abschalt-Steuerstromimpuls zu führen, bewirkt dies eine deutliche Verringerung der MOSFET-Verluste.
- Der Gate-Steuerstrom wird im eingeschalteten Zustand durch die transparente Anode um den Faktor 20 reduziert.

Zusätzlich erfordert der IGCT einen niederinduktiven Anschluß an den Gate-Treiber, der aus diesem Grund möglichst nahe am GCT platziert werden muß. Um eine maximale Robustheit und Kompaktheit zu erreichen, muß die Gate-Treiberschaltung daher um den GCT herum angeordnet werden und zusammen mit dem GCT und dem Kühlkörper eine integrale Baueinheit bilden. Außerdem darf sie nur diejenigen Schaltungsteile enthalten, die für den Gate-Treiber selbst benötigt werden **3a**. Durch diese Bauweise wird sowohl die Anzahl der Teile im Gate-Treiber als auch die Wärmeabgabe, die elektrische Beanspruchung und die innere Wärmebeanspruchung verringert, was sich in niedrigeren Kosten und Ausfallraten des Gate-Treibers niederschlägt. Der IGCT mit integriertem Gate-Treiber läßt sich leicht in den IGCT-Stack einsetzen und an die Stromversorgung sowie die zur Steuerung verwendeten LWL-Kabel anschließen. Das sorgfältig konzipierte Druckkontaktsystem sorgt dafür, daß nach dem Freiklinken der Feder auf den GCT ein definierter Druck einwirkt, durch den der für einen einwandfreien Strom- und Wärmeübergang erforderliche Kontakt hergestellt wird. Dadurch wird die Montage erheblich erleichtert und eine größtmögliche Zuverlässigkeit gewährleistet.



**Der IGCT ist auf maximale Robustheit und Kompaktheit ausgelegt.**



- a IGCT der Baugröße 51 mm mit integrierter Diode, Gate-Treiberschaltung und Kühlvorrichtung  
 b Bauelemente der IGCT-Familie (51, 68 und 91 mm) mit integrierter Diode

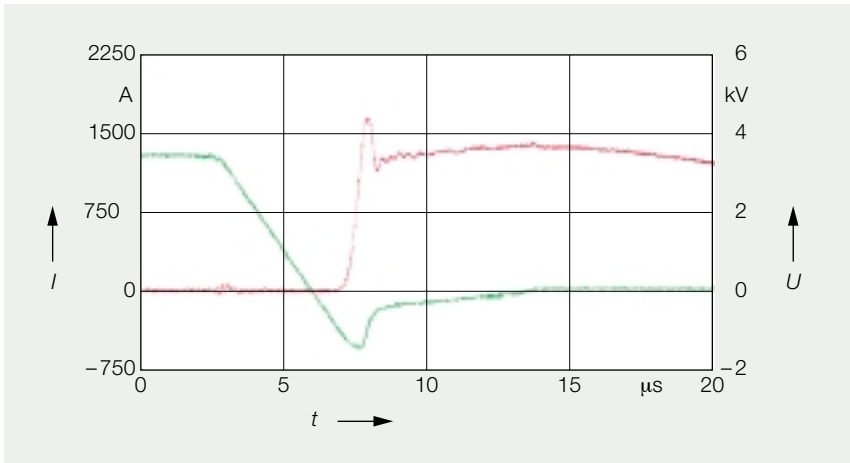
**Abschalten mit antiparallelen Dioden ohne Schutzbeschaltung bei hohen  $di/dt$ -Werten**

Da der IGCT keine Schutzbeschaltung benötigt, müssen auch die antiparallelen Dioden ohne eine solche Beschaltung auskommen. Dies wird durch den Einsatz modernster Hochleistungsdioden in «Press-pack»-Bauform ermöglicht **4**, die mit verbesserten Bestrahlungsverfahren und klassi-

schen (nichtstrukturierten) Prozessen hergestellt werden. Der jeweils erreichbare  $di/dt$ -Wert steht dabei in einem direkten Verhältnis zur Diodenfläche.

**Betrieb bei hohen Frequenzen**

Zu den herausragenden Eigenschaften des GCT gehört seine Fähigkeit, auch bei hochfrequenten Ein- und Abschalt-Pulsbursts einwandfrei zu arbeiten. Dagegen können bei



**Kennlinien der Leistungsdiode beim induktiven Abschalten ohne Schutzbeschaltung ( $di/dt = 400 \text{ A}/\mu\text{s}$ )**

4

U Spannung                      Rot    Anodenspannung  
 I Strom                            Grün    Anodenstrom  
 t Zeit

herkömmlichen GTO-Thyristoren zwei aufeinanderfolgende Abschaltvorgänge nur in relativ langen Zeitabständen erfolgen. Beim Abschalten führt hier die Umverteilung und Verdichtung des durch den GTO fließenden Stroms zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung (die schließlich ein ungleichmäßiges Einschalten zur Folge hat).

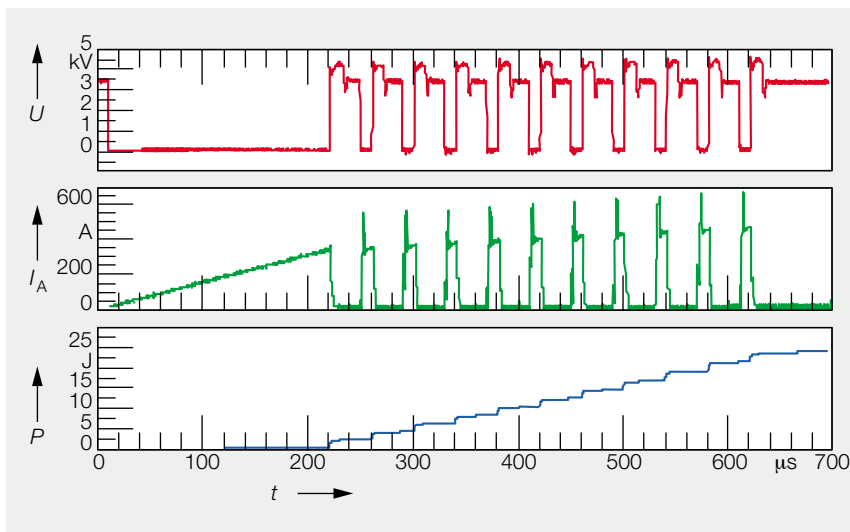
Dadurch kann es leicht zu örtlichen Überhitzungen und sogar zu thermischen Durchbrüchen kommen. Der Mindestabstand zwischen aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen wird somit beim GTO vor allem durch die Zeit bestimmt, die zur Wiederherstellung einer gleichmäßigen Sperrschichttemperatur benötigt wird. Diese

**Hochfrequenzprüfung eines 51-mm-IGCT bei 25 kHz mit 10 Impulsen**

5

Zwischenkreisspannung 3,3 kV; Sperrschichttemperatur 80 °C; Ein 10 μs; Aus 30 μs

U Spannung    P Verluste  
 I<sub>A</sub> Anodenstrom                                      t Zeit



Einschränkung wird jedoch beim GCT durch sein extrem gleichmäßiges Schaltverhalten aufgehoben.

Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der beim Abschalten erzeugten Wärme über den gesamten Schalter hat der GCT, abgesehen von der Sperrschichttemperatur, kein «thermisches Gedächtnis». Die Schaltfrequenz wird daher letztlich nur durch die Wärmeabfuhr des GCT begrenzt.

Da die thermischen Kapazitäten bei kurzen Heizimpulsen weitaus niedriger sind als bei einer kontinuierlichen Aufheizung, entstehen durch kurze Pulsbursts keine Übertemperaturen. 5 zeigt eine Impulsfolge mit 10 Impulsen bei 25 kHz und einem Tastgrad von 25 % (10 μs Ein/30 μs Aus).

**Integration der Hauptschalter in einem Halbleiter-Bauelement**

Bislang waren die Vorteile einer monolithischen Integration von durchgriffsicheren GTO-Thyristoren und Dioden immer mit dem Nachteil verbunden, daß der GTO zum Schutz vor Durchgreiffeffekten (Punch-through) eine dickere Siliziumscheibe benötigte als die zugehörige Freilaufdiode. Schaltgeräte mit rückwärtsleitenden GTOs waren daher mit sehr hohen Diodenverlusten behaftet. Letzteres konnte erstmals durch das Pufferschichtkonzept des GCT überwunden werden. Da die optimale Dicke der Siliziumscheibe für den durchgriffsicheren GCT und die antiparallele Diode bei dieser Technik in etwa gleich ist, wurde die monolithische Zusammenfassung beider Elemente nun wieder zu einem interessanten Lösungsansatz.

Die dadurch entstandenen Möglichkeiten bildeten die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Reihe von IGCTs 6 (Tabelle 2) mit integrierter Freilaufdiode, die für den Betrieb ohne Schutzbeschaltung ausgelegt sind [6]. Die neue Produktfamilie umfaßt acht Bauelemente mit integrierten Dioden, die sich für Zweipunkt- und Dreipunkt-Wechselrichter mit Zwischenkreisgleichspannungen bis 6,6 kV (2 x 3,3 kV) und Abschaltströmen bis 3 kA (nicht gleichzeitig) eignen. Damit lassen sich folgende Wechselrichterleistungen ohne Reihen- oder Parallelschaltungen realisieren:

- Zweipunkt-Wechselrichter: 0,5 bis 3 MVA (4,5 MVA)
- Dreipunkt-Wechselrichter: 1 bis 6 MVA (9 MVA)

Bei Verwendung diskreter IGCTs in der Baugröße 91 mm mit separaten antiparallelen Dioden sind Leistungen bis maximal 4,5 MVA (Zweipunkt-Wechselrichter) bzw. 9 MVA (Dreipunkt-Wechselrichter) erreichbar.

**Höhere Zuverlässigkeit pro MVA**

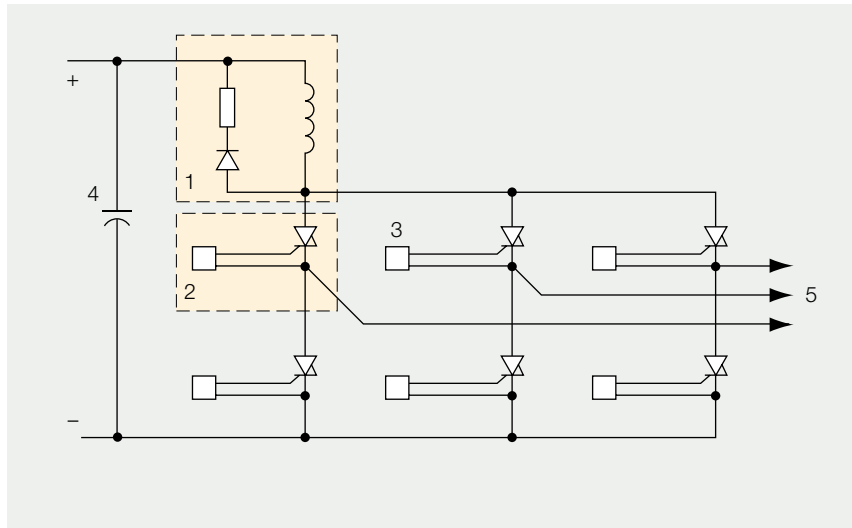
Durch den Einsatz der neuen IGCTs, die einen Betrieb ohne  $du/dt$ -Schutzbeschaltungen zulassen, wird der klassische Aufbau von GTO-Schaltungen grundlegend verändert. Da keine Beschaltungskondensatoren mehr vorhanden sind, entfallen auch folgende typische Störeinflüsse:

- Schwingungen zwischen Beschaltungskondensator und -drossel
- Durchschalten der Beschaltungsdioden infolge von Spannungsänderungen in der Gleichstromsammelschiene
- Parasitäre Schwingungen nach dem Einschalten

Die antiparallele Diode kann zwar ohne eine  $du/dt$ -Schutzbeschaltung betrieben werden, doch ist eine Begrenzung der Stromsteilheit ( $di/dt$ ) weiterhin erforderlich, um Spannung und Strom an der Diode im zuverlässigen Arbeitsbereich zu halten. Da der GCT aufgrund seiner Thyristoreigenschaften diese Aufgabe nicht selbst übernehmen kann, wird hierzu eine Drosselspule eingesetzt. Diese ist wie bei den üblichen GTO-Konfigurationen mit einer Klemmschaltung versehen, die eine Diode und einen Widerstand enthält und dazu dient, im äußerst unwahrscheinlichen Falle einer Durchzündung den Strom zu begrenzen.

Durch Verwendung einer einzigen  $di/dt$ -Begrenzung für alle drei Phasen **6** ist ein Dreiphasen-Wechselrichter mit stark vereinfachtem Aufbau [7] realisierbar, für den nur noch 11 elektrische Komponenten benötigt werden:

- 6 IGCTs
- 1 Drossel
- 1 «Clamp»-Diode
- 1 «Clamp»-Kreiskondensator
- 1 «Clamp»-Widerstand
- 1 Gate-Treiber-Stromversorgung



**Typische Dreiphasen-Wechselrichterschaltung mit IGCTs**

**6**

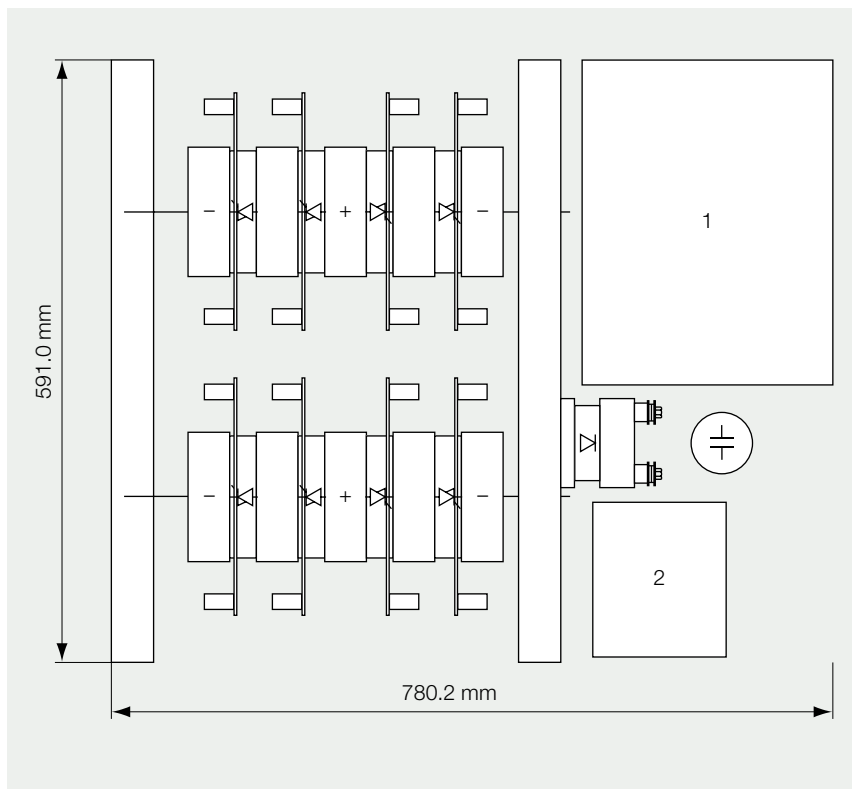
- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| 1 $di/dt$ -Schutzbeschaltung | 4 Zwischenkreiskondensator |
| 2 IGCT                       | 5 Dreiphasiger Ausgang     |
| 3 Gate-Treiber               |                            |

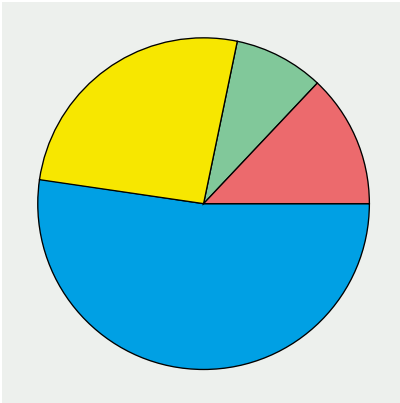
**Entwurf eines 3-MVA-Musterwechselrichters**

**7**

Abmessungen für 3 MVA: ca. 780 x 590 x 330 mm  
 Abmessungen für 0,9 MVA: ca. 630 x 460 x 230 mm

- |           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| 1 Drossel | 2 Gate-Treiber-Stromversorgung |
|-----------|--------------------------------|





**Zusammensetzung der erwarteten Ausfallrate eines 3-MVA-Wechselrichters in IGCT-Technik (MTBF-Wert des gesamten Wechselrichters > 45 Jahre)**

- Blau Gate-Treiber
- Gelb Gate-Treiber-Stromversorgung
- Rot GCT
- Grün Klemmschaltung

Die geringe Anzahl von Bauteilen und die zugrundeliegende bewährte Technik garantieren ein hohes MTBF (Mean Time Between Failures) des Wechselrichters. Mehrere Qualifikationsprüfungen, Betriebserfahrungen mit wichtigen Komponenten (bis zu  $400 \times 10^6$  Betriebsstunden) sowie die aktuellen Betriebsdaten einer in der Bahnstromversorgung eingesetzten 100-MVA-Netzkupplung [8] lassen für einen kompletten, in IGCT-Technik ausgeführten Dreiphasen-Wechselrichter mit einer Leistung von 3 MVA einen MTBF-Wert  $\geq 45$  Jahre und eine Ausfallrate  $\leq 2300$  FIT (1 FIT = 1 Ausfall in  $10^9$  Stunden) erwarten [7], [8]. Den größten Anteil an Ausfällen stellen dabei die Faseroptik und die Logikschaltungen; die Gate-Treiber sind dagegen nur in geringem Maße an der FIT-Rate beteiligt. Die Leistungskomponenten (einschließlich der Impulscondensatoren) zeichnen sich wie bei den Gate-Treibern standardmäßig ausgeführter GTOs durch niedrige, vorhersehbare Ausfallraten aus.

**Erweiterung des Leistungsbereichs auf mehrere 100 MVA**

Eine dynamische Sperrspannung von 6 kV und ein Abschaltstrom von 6 kA können als typische Maximalwerte angesehen werden, die derzeit mit der GTO-Technik erreichbar

sind. Bei einem Dreipunkt-Wechselrichter ohne Reihenschaltung von Halbleitergeräten entspricht dies einer maximalen Leistung von 15 MVA. Die zukünftigen Anforderungen an Umrichter für leistungselektronische Anlagen werden jedoch um ein Vielfaches höher liegen. Schon in naher Zukunft werden Wechselrichterleistungen von mehreren 100 MVA gefragt sein. Der Schlüssel zur Realisierung solcher Hochleistungsanwendungen liegt in der Reihenschaltung von gesteuerten Halbleitergeräten.

In Reihe geschaltete Thyristoren haben sich beim Schalten hoher Gleichspannungen in der Übertragungstechnik bestens bewährt und werden in diesem Bereich bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Aufgrund

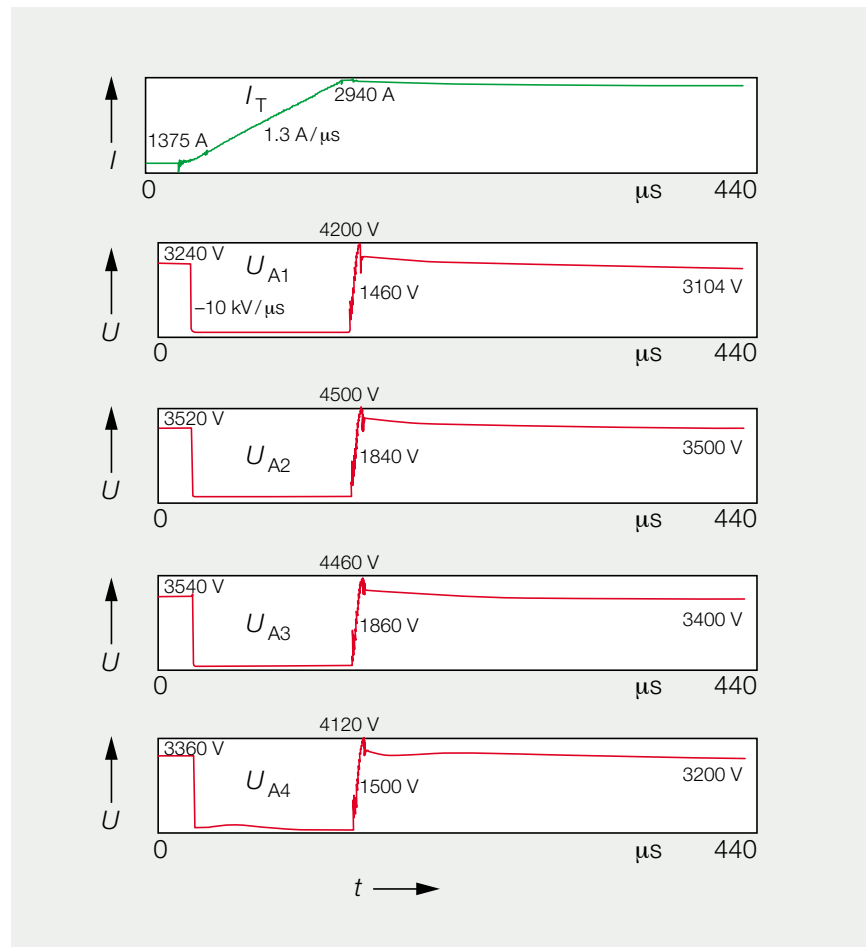
seiner kurzen Spannungsnachlaufzeit von  $1 \mu s$  erlaubt auch der IGCT eine einfache und zuverlässige Reihenschaltung, die für den Aufbau von Höchstleistungs-Wechselrichtern von grundlegender Bedeutung ist.

Um eine größtmögliche Verfügbarkeit der Anlage zu gewährleisten, können entsprechend der gängigen Praxis mehr IGCTs in Reihe geschaltet werden als für den jeweiligen Anwendungsfall eigentlich erforderlich wären. Dies bringt mehrere Vorteile:

- Falls ein IGCT oder eine antiparallele Diode ausfällt, arbeitet die Anlage dennoch ohne Unterbrechung weiter. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ein ausgefallener IGCT aufgrund seiner Press-pack-Bauform wie ein Kurzschluß wirkt. Der

**Abschaltverhalten von vier in Reihe geschalteten 3-kA-IGCTs bei einer Zwischenkreisspannung von 13,2 kV**

- $I_T$  Laststrom
- $U_{A1-A4}$  Anodenspannungen der GTOs 1, 2, 3, 4
- $t$  Zeit



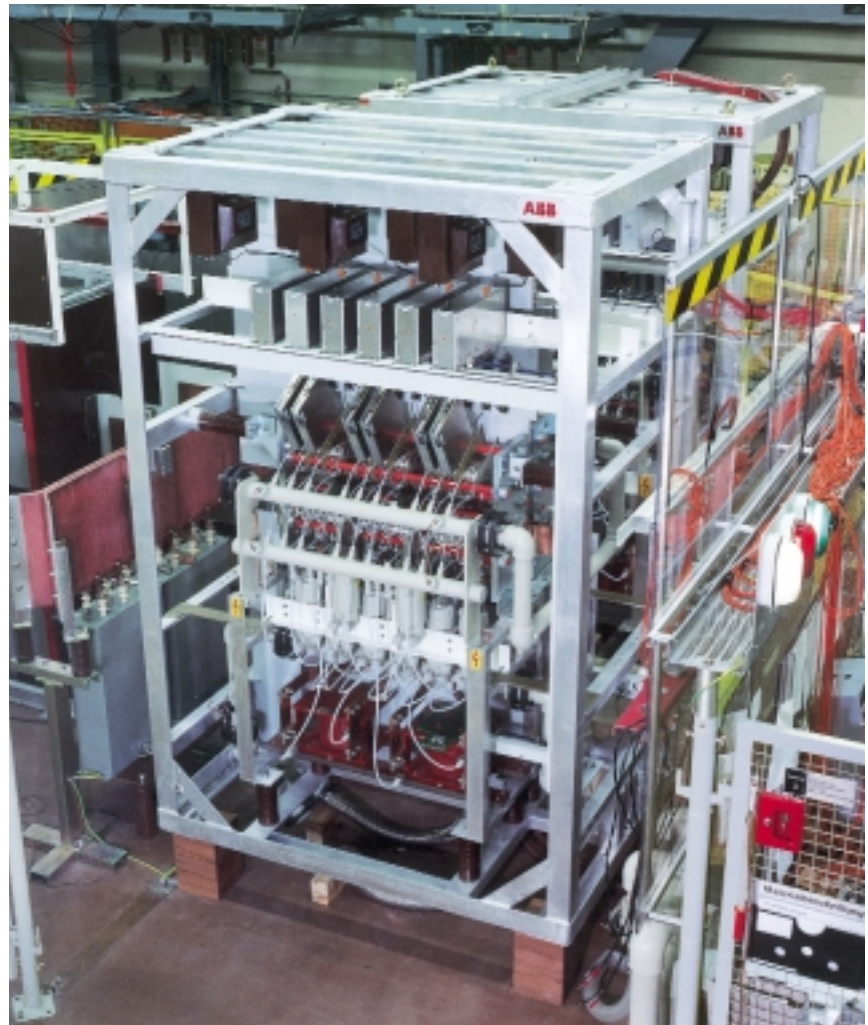
Ausfall wird durch einen Elektronikschaltkreis erfaßt und über LWL-Kabel gemeldet. Das ausgefallene Bauelement kann dann zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen routinemäßig durchgeführter Wartungsarbeiten ausgetauscht werden.

- Durch die zusätzlichen, redundanten IGCTs wird die Spannungsbelastung der einzelnen Komponenten, einschließlich etwaiger Schutzbeschaltungen, verringert. Diese hat bekanntermaßen einen starken Einfluß auf die Lebensdauer der einzelnen IGCTs. So wird beispielsweise durch eine Senkung der Spannungsbelastung um ein Drittel die durchschnittliche Lebensdauer ungefähr um den Faktor 20 erhöht.
- Der Einsatz redundanter IGCTs verringert die Gefahr der Durchzündung in einer Umrichterphase und ermöglicht so den Bau von Hochleistungs-Umrichtern ohne Sicherungen. Dies führt zu einer höheren Zuverlässigkeit und einem verbesserten Wirkungsgrad. Obwohl Durchzündungen in einer Umrichterphase bei einer solchen Konfiguration sehr unwahrscheinlich sind, wird der Umrichter dennoch so ausgelegt, daß er den in einem solchen Fall auftretenden Beanspruchungen standhält.

9 zeigt das Oszillogramm einer gleichzeitigen Abschaltung von vier in Reihe geschalteten IGCTs. Dank der sehr kurzen Spannungsnachlaufzeit ( $1 \mu\text{s}$ ) und der folglich noch kleineren Streubreite der Abschaltzeiten der einzelnen Bauelemente (unter  $0,2 \mu\text{s}$ ) wird eine hervorragende Spannungsaufteilung zwischen den IGCTs erzielt. Um dynamische Überspannungen auf ein Mindestmaß zu beschränken, wurde bei der Auslegung der Hochleistungs-Phasenmodule auf eine möglichst geringe Induktivität geachtet.

Künftige IGCT-Anwendungen werden vermutlich von weiteren Entwicklungsfortschritten profitieren, wie etwa:

- einer weiteren Verringerung der Anzahl von  $du/dt$ -Schutzbeschaltungen oder deren völliger Abschaffung beim Einsatz in Reihe geschalteter Leistungshalbleiter
- Schaltfrequenzen von bis zu 1 kHz oder höher
- einer Treiberversorgung über die Anode, die durch die transparente Anode des



**Hochleistungs-Wechselrichtermodul in IGCT-Technik. Ein solches Modul wird in der Regel mit einer Reihenschaltung von sechs Halbleiterbauelementen ausgeführt. Jeder 4,5-kV-Schalter des Moduls ist maximal mit einer Gleichspannung von 3 kV belastbar. Der  $du/dt$ -Schutz wird durch wenige, einfach aufgebaute RCD-Beschaltungen gewährleistet. Die Stromversorgung der Gate-Treiber erfolgt über spezielle Trenntransformatoren.** 10

IGCT und die dadurch bedingten niedrigeren Leistungsanforderungen der Gate-Treiber ermöglicht wird

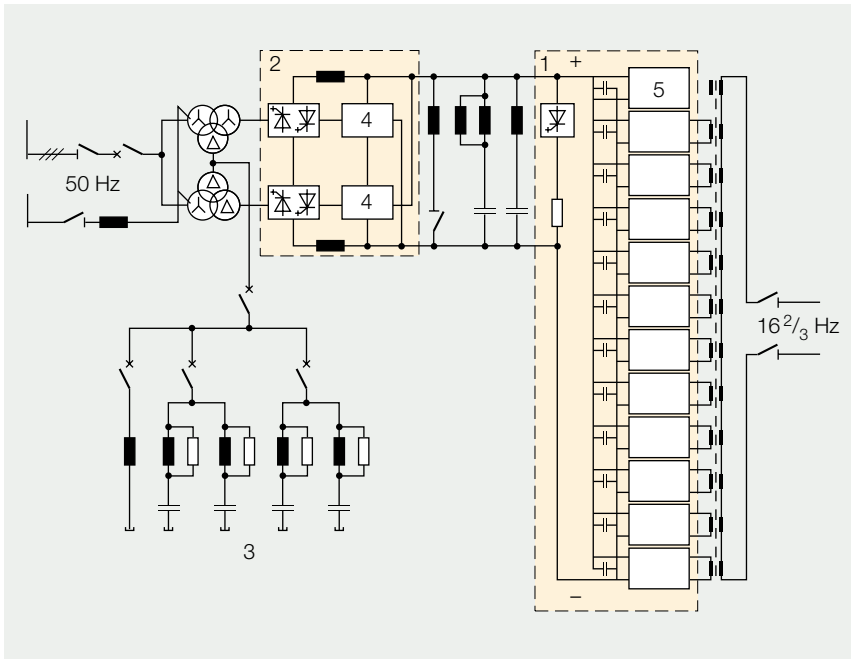
Der ersten kommerziellen Nutzung von in IGCT-Technik ausgeführten Hochleistungs-Wechselrichtermodulen – in einer 100-MVA-Netzkupplung [8], die seit Mitte 1996 in Betrieb ist 10, 11 – waren zahlreiche Simulationen und Prüfungen vorausgegangen. Inzwischen hat sich diese Anlage auch im praktischen Einsatz hervorragend bewährt. Von mehr als 300 IGCTs ist bislang nur einer ausgefallen, wobei dieser Ausfall auf einen fehlerhaften Kontakt an einer Leuchtdiode zurückzuführen war. Somit wird die von der

IGCT-Technik erwartete hohe Zuverlässigkeit durch die bisherigen Erfahrungswerte bestätigt ( $< 400 \text{ FIT}$  pro IGCT-Ebene).

Diese eindrucksvollen Werte sind zum Teil der geringeren Spannungsbeanspruchung zu verdanken, die sich aus der Reihenschaltung mit redundanten IGCTs ergibt. Eine weitere Reduzierung der Teilezahl durch den Betrieb ohne Schutzbeschaltungen wird sich in Zukunft in einer noch höheren Zuverlässigkeit niederschlagen, die sich so den mit der herkömmlichen Thyristortechnik erreichbaren Werten ( $< 100 \text{ FIT}$  pro Ebene) immer mehr annähern wird.

Die inhärente Zuverlässigkeit des IGCT bil-





**100-MVA-Netzkupplung mit in Reihe geschalteten IGCTs (seit Mitte 1996 in Betrieb)**

- 1 IGCT-Umrichter
- 2 Thyristor-Umrichter
- 3 Filterkreise

- 4 Gemeinsamer Abschaltkreis
- 5 H-Brücke

det zusammen mit der Redundanz den Grundstein für den Bau zukünftiger Höchstleistungs-Umrichter, denen insbesondere im Hinblick auf die neuen Märkte für FACTS (Flexible AC Transmission System) und anwendungsspezifische Stromversorgungen eine bedeutende Rolle zukommt.

**Schlußfolgerungen**

Der IGCT vereint entscheidende technische Innovationen, die zukünftig seinen Einsatz in anspruchsvollen leistungselektronischen Anlagen ermöglichen. Dadurch wird er zur Schlüsselkomponente bei Entwicklungen für den Mittel- und Hochspannungsbereich mit Leistungen zwischen 0,5 und mehreren 100 MVA. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften erlaubt er die Realisierung von Hochleistungsanwendungen durch eine einfache und robuste Reihenschaltung einzelner Halbleiterelemente. Einige weitere Vorteile des IGCT gegenüber anderen Schaltgeräten (wie etwa niedrige Kosten, geringe Komplexität und hoher Wirkungsgrad) sorgen dafür, daß er in diesem Leistungsbereich

praktisch konkurrenzlos ist. Verschiedene Hersteller von Leistungshalbleitern haben den IGCT bereits in ihrem Lieferprogramm.

Seine hohe Zuverlässigkeit hat der IGCT bei seinem ersten kommerziellen Einsatz in einer 100-MVA-Netzkupplung in Bremen unter Beweis gestellt. Aufgrund der hervorragenden Betriebserfahrungen mit dieser Anlage hat die Deutsche Bahn AG inzwischen eine zweite, in der gleichen Technik ausgeführte Netzkupplung mit einer Leistung von 2 x 66 MVA bestellt.

Darüber hinaus hat ABB eine neue Reihe von Standard-Drehstromantrieben für den Mittelspannungsbereich (ACS 1000) mit Leistungen zwischen 0,5 und 6 MVA [9] auf den Markt gebracht. Mehrere Anlagen aus dieser Antriebsfamilie stehen bereits erfolgreich im Einsatz.

**Literaturhinweise**

[1] T. M. Undeland: Snubber for pulse width modulation bridge converters with power transistors or GTO. Int. Power Electr. Conf. (EPCD), Tokyo, 1983, 313–323.

[2] W. McMurray: Efficient snubber for voltage source GTO inverter. IEEE Trans. Power Electron., vol PE-2, no 3, 1987, 264–272.  
 [3] K. Ishii, Y. Konishi, M. Takeda, E. Thal, G. Debled: A new high power, high voltage IGBT. Conf. Rec. of PCIM, Nuremberg, 1997.  
 [4] H. M. Stillman: IGCTs – Megawatt-Halbleiterschalter für den Mittelspannungsbereich. ABB Technik 3/97, 12–17.  
 [5] H. Grüning: Low-inductive GTO terminal. Patent EP 0588026 and US 5345096, 1992.  
 [6] S. Inder, S. Klaka, M. Frecker, E. Carroll, H. Zeller: A new range of reverse conducting gate-commutated thyristors for high voltage, medium power applications. EPE, Trondheim, Norway, 1997.  
 [7] H. Grüning, B. Ødegård: High performance low cost MVA inverters realized with integrated gate commutated thyristors (IGCT). EPE, Trondheim, Norway, 1997.  
 [8] R. Boeck, O. J. Gaupp, P. Dähler, E. Bärlocher, J. Werninger, P. Zanini: Vollstatische 100-MW-Frequenzkupplung Bremen. ABB Technik 9/10-96, 4–17.  
 [9] S. Malik, D. Kluge: ACS 1000 – weltweit erster Standard-Drehstromantrieb für den Mittelspannungsbereich. ABB Technik 2/98, 4–11.

**Adressen der Autoren**

Dr. Peter K. Steimer  
 Dr. Horst E. Grüning  
 Johannes Werninger  
 ABB Industrie AG  
 CH-5300 Turgi/Schweiz  
 Telefax: +41 (0) 56 299 40 40  
 E-mail:  
 peter.steimer@chind.mail.abb.com

Eric Carroll  
 Dr. Sven Klaka  
 Dr. Stefan Linder  
 ABB Semiconductors AG  
 CH-5600 Lenzburg/Schweiz  
 Telefax: +41 (0) 62 888 63 06  
 E-mail:  
 eric.carroll@chsem.mail.abb.com