

Ansteuern von IGBT`s

Der IGBT ist ein spannungsgesteuerter Leistungshalbleiter und kann leistungslos durch Anlegen einer Steuerspannung von 15V eingeschaltet werden. Diese Aussage findet man oft in grundsätzlichen Beschreibungen zum Einsatz von IGBT und MOSFET und kaum eine ist so irreführend. Vielmehr ist es so, dass die Ansteuerung wohl den größten Einfluss auf die Betriebssicherheit des kompletten Wechselrichters hat.

So wird zum Beispiel in vielen Fällen der Ansteuerungs-Leistungsbedarf unterschätzt. Auch stellt sich im Zusammenhang mit der Ansteuerung von IGBT`s die Frage ob der in den betreffenden Datenblättern angegebene Gate-Widerstandswert auch als Gate-Widerstand auf dem Treiberboard vorgesehen werden soll. Diese Frage kann weder mit ja noch mit nein beantwortet werden, weil schaltungsbedingte Gegebenheiten eine maßgebende Rolle bei der Auswahl des Gatewiderstandes spielen. Auch ist das richtige „Zeitmanagement“ bei der Abschaltung von Kurzschlussströmen mit dem Festlegen der Ansprechschwellen und der Festlegung der Ansprechzeit ab wann ein möglicher Kurzschluss detektiert werden soll von großer Bedeutung für die Betriebssicherheit des gesamten Wechselrichters.

Treiberleistung

Die Leistung die der Treiber zur Verfügung zu stellen hat hängt zum Einem von der Größe der Eingangskapazität C_{ies} des IGBT bzw. MOSFET und zum Anderen von der Höhe der Schaltfrequenz ab. Der Wert der Eingangskapazität C_{ies} kann dem Datenblatt entnommen werden. Der Wert der Eingangskapazität ist jedoch abhängig von der über dem Bauelement anstehenden Kollektor-Emitterspannung V_{ce} die hier bei einer Spannung V_{ce} von 25V ermittelt wird.

Input Capacitance	C_{ies}	$V_{CE} = 25 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	7.5	nF
Output Capacitance	C_{oes}		0.65	nF
Reverse Transfer Capacitance	C_{res}		0.45	nF

Bild 1: Datenblattwerte für Eingangskapazität Cies

In der Anwendung jedoch wird der IGBT bzw. MOSFET eingeschaltet, so dass nur eine Restspannung (Kollektor-Emitter Sättigungsspannung $V_{ce_{sat}}$) von wenigen Volt ansteht. Der Wert der Eingangskapazität Cies ist aber in diesem Normal-Arbeitspunkt etwa Faktor 5 höher als der im Datenblatt ausgewiesen Wert.

Unter Kenntnis dieser Umstände kann die erforderliche Treiberleistung mit hinreichender Genauigkeit wie folgt berechnet werden:

$$P_{\text{treiber}} = C_{\text{gate}} \times dU_{\text{gate}}^2 \times f_{\text{schalt}}$$

$$C_{\text{gate}} = 5 \times C_{\text{ies}}$$

Eine weitere, genauere Methode ist die messtechnische Bestimmung der Gateladung pro Umladung mit der Berechnung wie folgt:

$$P_{\text{treiber}} = Q_{\text{gate}} \times dU_{\text{gate}}^2 \times f_{\text{schalt}}$$

Es bedeuten:

P_{treiber} :	Erforderliche Treiberleistung
C_{gate} :	Eingangskapazität bei V_{cesat}
dU_{gate} :	Gesamter Spannungshub am Gate
C_{ies} :	Eingangskapazität nach Datenblatt
f_{schalt} :	Schaltfrequenz
Q_{gate} :	Gateladung pro Umladung

In aller Regel hat ein Treiber auch einen Eigenverbrauch welcher mit berücksichtigt werden muss. Bei großen IGBT Modulen oder Parallelschaltungen von IGBT Modulen werden so rasch Treiberleistungen erforderlich die mehrere Watt (sogar einige 10W bei hochtaktenden Resonanzanwendungen) betragen können.

Der zur Potentialtrennung erforderliche DC/DC-Wandler muss diese Leistung unter allen Betriebsbedingungen zur Verfügung stellen können.

DC/DC-Wandler, Potentialtrennstellen

In den üblichen Schaltungskonfigurationen die beim Aufbau von Wechselrichtern zum Einsatz kommen liegen die IGBT auf unterschiedlichen Potentialen gegen Erde und gegeneinander. Es ist daher sinnvoll eine galvanische Potentialtrennung auf jedem IGBT-Treiber für die Leistungsversorgung und Ansteuerung vorzusehen. Die Potentialtrennung für die Leistungsversorgung des IGBT Treibers wird in aller Regel durch einen DC/DC-Wandler realisiert (welcher die vor ermittelte Leistung zur Verfügung stellt), für die Ansteuerung werden optisch Komponenten oder Übertrager eingesetzt.

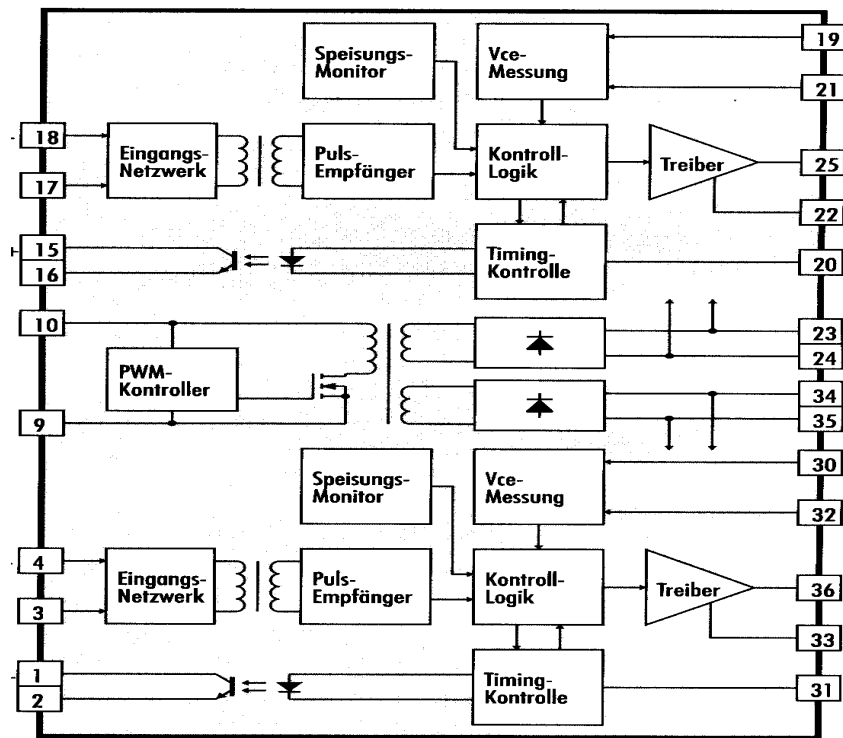


Bild 2: IGBT Treiber mit Potential-Trennstellen

Dies hört sich einfacher an als es tatsächlich ist, werden doch an die Potentialtrennstellen außerordentlich hohe zusätzliche Anforderungen gestellt.

So müssen die Potentialtrennstellen speziell im Zusammenhang mit dem Einsatz von 1700V, 2500V, 3300V, 4500V und 6500V sperrenden IGBT hohe Isolationsspannungen aufweisen. Noch wichtiger ist die Alterungsbeständigkeit der Isolationssfestigkeit. Die zur Beurteilung dieser Alterungsbeständigkeit wichtige Angabe der Teilentladungsfestigkeit, speziell die der Glimmaussetzspannung, ist den Datenblättern der entsprechenden Komponenten oftmals nicht zu entnehmen. Der Anwender ist gut beraten wenn er sich daher bei dem Hersteller der betreffenden Komponenten den Wert für die Glimmaussetzspannung schriftlich garantieren lässt. Dieser Wert sollte ca. 20% über der in der Anwendung dauernd auftretenden Spannungsbeanspruchung liegen. Sollte eine Angabe zur

Glimmaussetzspannung nicht möglich sein, sollte dieses Bauelement aus Sicherheitsgründen nicht eingesetzt werden.

In Wechselrichtern werden die IGBT mit einigen Kilohertz möglichst schnell ein- und wieder ausgeschaltet um die dabei entstehenden Schaltverluste so gering wie möglich zu halten. Dabei entstehen an der „Ausgangsseite“ der Potentialtrennstellen, an den IGBT also, hohe Spannungsänderungsgeschwindigkeiten von kV/us.

Die Potentialtrennstellen müssen daher kleinst mögliche Koppelkapazitäten aufweisen um ein Einkoppeln von Störsignalen auf die „Eingangsseite“, der Ansteuerseite also, zu verhindern.

Eingekoppelte Störsignale führen zu schweren Fehlfunktionen des Wechselrichters und zu IGBT-Ausfällen wegen fehlender dv/dt-Störfestigkeit der Treiberschaltung.

Die Potentialtrennstelle des DC/DC-Wandlers muss zusätzlich noch in der Lage sein eine Leistung von einigen Watt wie vor schon ausgeführt zu übertragen. Dies bedingt natürlich eine bestimmte Baugröße für den Übertrager. Mit zunehmender Baugröße werden die Koppelkapazitäten in aller Regel größer mit einhergehender höherer Problematik bezüglich dv/dt-Störfestigkeit.

Erreicht das Design des Treiberboards eine dv/dt-Störfestigkeit von $>50.000\text{V/us}$ auf einen Spannungswert welcher dem des Wertes der Sperrspannung des eingesetzten IGBT entspricht, so kann davon ausgegangen werden dass das Treiberboard ausreichend dv/dt störfest ist.

Gate-Widerstand

In den Datenblättern der IGBT sind zur Spezifizierung der dynamischen Eigenschaften unter anderem die hierzu erforderlichen Gate-Widerstände angegeben. Die damit ermittelten Werte für

Einschaltverlustenergie E_{on} , Ausschaltverlustenergie E_{off} , Reverse Bias Safe Operating Area (RBSOA), und Short Circuit Safe Operating Area (SCSOA) sind für die weitere elektrische und thermische Auslegung von größter Bedeutung. Insofern sind die in den Datenblättern angegebenen Werte für die Gate-Widerstände als Minimalwert bzw. optimaler Wert zu betrachten. Der Treiber muss demnach in der Lage sein den mit diesem Gate-Widerstand und dem Spannungshub am Gate resultierenden Spitzen-Umladestrom führen zu können. Bei einem Gate-Widerstand von 1Ω und einem Spannungshub von $\pm 15V$ sind das demzufolge $15A$. Tatsächlich wird der Umladestrom etwas kleiner sein, da in den IGBT Modulen herstellerseitig kleine Gate-Dämpfungswiderstände eingebaut werden. Grundsätzlich gilt es festzuhalten, dass die mit optimalen Gate-widerständen und optimaler streuinduktivitätsarmer Messschaltung ermittelten und ausgewiesenen dynamischen Werte in der Praxis oft nicht erreicht werden, da sich der mechanische Aufbau von Wechselrichtern von dem der Messschaltung deutlich unterscheidet.

Bei leistungsstarken Wechselrichtern kommen vielfach große Einzelschalter IGBT-Module, montiert auf Großflächenkühlern zum Einsatz. Um eine möglichst homogene Wärmeeinbringung auf den Großflächenkühler zu erhalten, müssen die sechs IGBT-Schalter eines Wechselrichters sinnvoll gestreut auf den Kühler montiert werden damit ein guter Kühlerwirkungsgrad erzielt wird. So man dies tut, erhält man nun zwischen den einzelnen IGBT Einzelschalter lange Kommutierungswege mit den zugehörigen Streuinduktivitäten. Da IGBT speziell bei der Abschaltung von Überströmen oder Kurzschlussströmen sehr hohe Stromänderungsgeschwindigkeiten bis einige $kA/\mu s$ zulassen, können so hohe Schaltüberspannungsspitzen entstehen die sich auf die Betriebs-DC-Busspannung addieren.

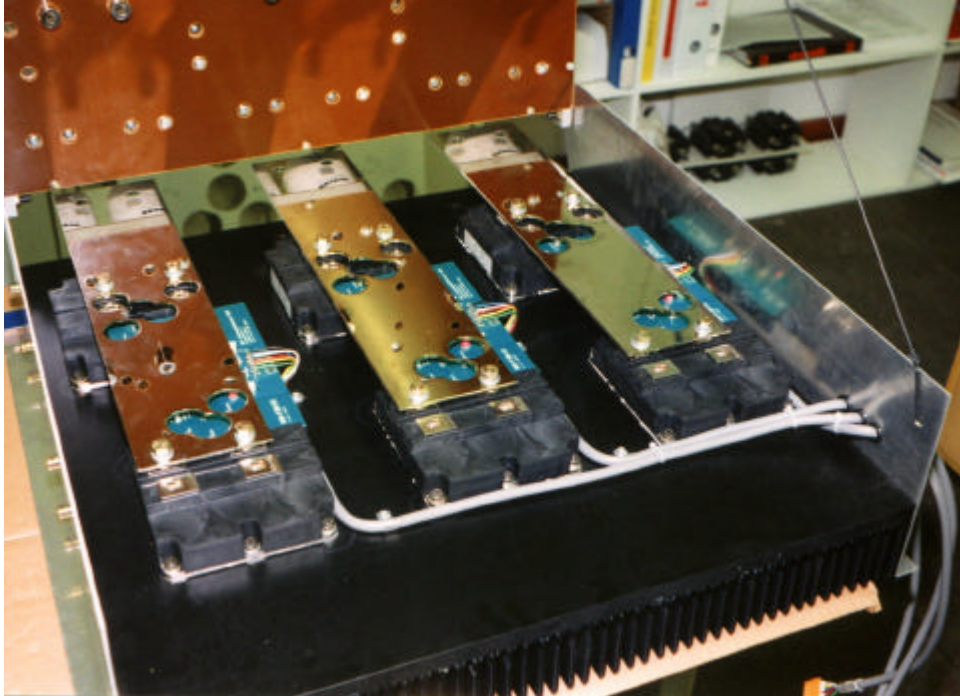


Bild 3: IGBT „Verlustleitungsquellen“ auf Flächenkühler

Bei ungünstigen Betriebsbedingungen wie z.B. einer Kurzschlussabschaltung im regenerativen Betrieb kann es dann geschehen, dass Spannungen am IGBT zustande kommen die dessen Sperrvermögen überschreiten. Der IGBT fällt aus.

Es muss dann ein Kompromiss zwischen thermisch und elektrischer Effizienz des Wechselrichters und der Schaltgeschwindigkeit der IGBT gefunden werden.

Reduzierung der Schaltüberspannung durch Anpassung des Gate-Widerstandwertes

Die Schaltgeschwindigkeit der IGBT lässt sich durch eine moderate Erhöhung des Gate-Widerstandwertes in gewissen Grenzen verringern. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Gate-Widerstand nicht zu hoch wird und es zusammen mit den parasitären

Komponenten des IGBT (Millerkapazität, Streuinduktivität der Gatezuleitung) zu keinen Oszillationen der Gatespannung kommt.

Es ist zu berücksichtigen, dass das Erhöhen des Gate-Widerstandwertes einen deutlichen Anstieg der Ein- und Ausschaltenergien im Vergleich mit den im Datenblatt

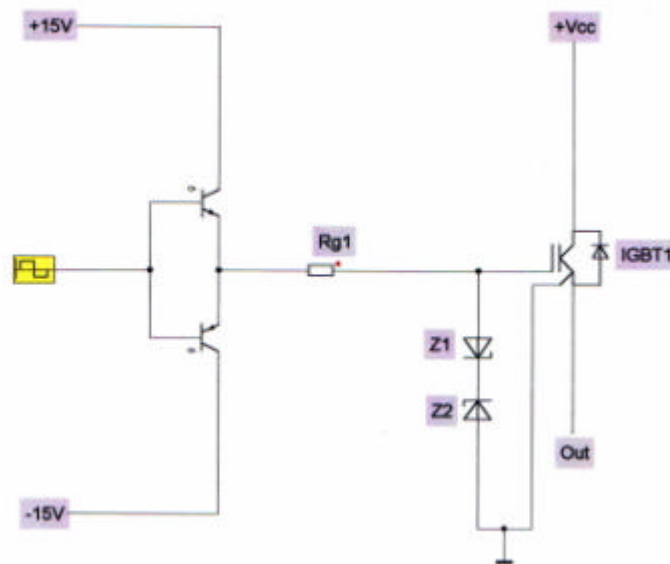


Bild 4: Treiberschaltung mit Gate-Widerstand

ausgewiesenen mit sich bringt. Dies muss im thermischen Design bei der Dimensionierung des Kühlers berücksichtigt werden und setzt die messtechnische Überprüfung der Ein- und Ausschaltverlustenergien mit dem nun eingesetzten Gate-Widerstandwertes bei einer IGBT-Sperrschichttemperatur von 125°C voraus.

Reduzierung der Schaltüberspannung durch Anpassung des Widerstandwertes, asymmetrische Ansteuerung

In vielen Fällen ist es sinnvoll das Ein- und Ausschalten getrennt zu beeinflussen. So kann das Einschalten zum Beispiel mit dem im Datenblatt spezifizierten Gate-Widerstandswert erfolgen, das

Ausschalten hingegen wird durch einen hochohmigeren Gate-Widerstandswert verlangsamt um die Schaltüberspannungsspitze zu verringern. Dies geschieht durch einen zweiten Widerstand und einer Serendiode welche zum eigentlichen Gate-Widerstand parallel geschaltet werden. Der Einschaltpfad ist somit niederohmiger als der Ausschaltpfad.

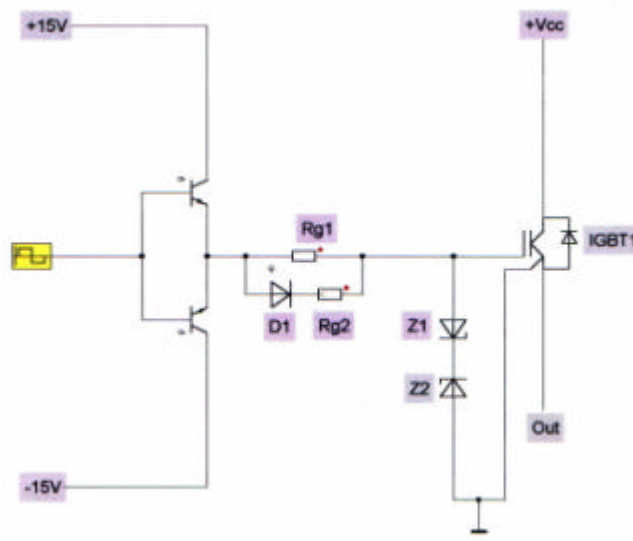


Bild 5: Asymmetrische Ansteuerung

Dies verbessert die Verlustleistungsbilanz des IGBT weil die Einschaltverlustenergie lediglich in der im Datenblatt spezifizierten Höhe anfällt. Die Höhe der Ausschaltverlustenergie muss hingegen wie vor schon geschildert messtechnisch ermittelt werden und in der thermischen Dimensionierung entsprechend berücksichtigt werden.

Reduzierung der Schaltüberspannung durch zweistufige Abschaltung

Oftmals stellt man fest, dass es möglich wäre die IGBT im Nennstrombereich noch sicher mit den im Datenblatt spezifizierten Gate-Widerstandswerten abzuschalten was eine optimale Verlustleistungsbilanz ergäbe. Ein Abschalten von hohen Überströmen oder gar Kurzschlussströmen würde jedoch zu Ausfällen führen weil die entstehende Überspannung dann zu hoch wird. Hier bietet sich eine aktive zweistufige Abschaltung der IGBT an. Im Nennstrombereich wird der IGBT niederohmig, z.B. mit den im Datenblatt spezifizierten Gate-Widerstandswerten ein- und ausgeschaltet, im hohen Überstrom- oder Kurzschlussstrombereich jedoch durch einen zweiten hochohmigeren Ausschaltkanal abgeschaltet. Wurde dieser zweite Kanal aktiviert und hat dies zu einer Abschaltung geführt so ist sicherzustellen, dass der Treiber danach keine weiteren Einschaltsignale mehr akzeptiert um sicherzustellen, dass dieser unzulässige Betriebspunkt nicht weiter gefahren wird.

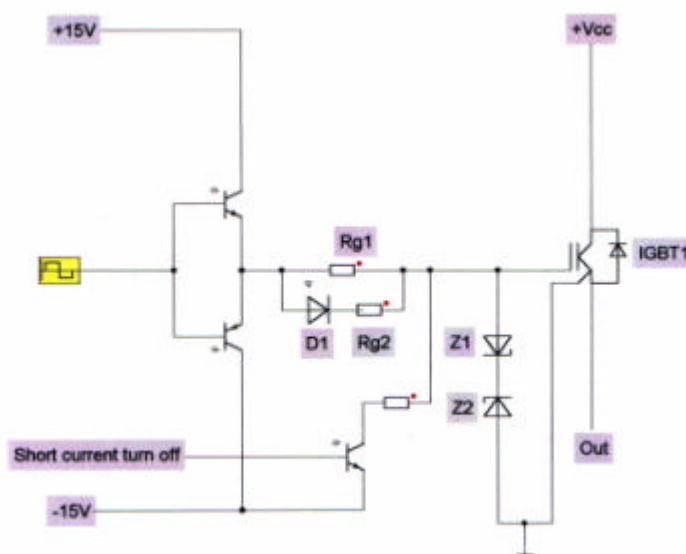


Bild 6: Ansteuerung mit 2-stufiger Abschaltung

Die Festlegung der Abschaltsschwellen ist daher sehr wichtig und wird ähnlich wie bei der Überwachung eines Kurzschlusses durch eine sogenannte V_{cesat} -Überwachung detektiert. Die dazu notwendige Hardware wird auf dem Treiberboard implementiert und erhöht naturgemäß dessen Komplexität.

Reduzierung der Schaltüberspannung durch „Active Clamping“.

Beim „Active Clamping“ geschieht der korrigierende Eingriff zur Reduktion der Schaltüberspannung nicht über den IGBT Treiber selbst. Zwischen Kollektor und Gate des zu schützenden IGBT wird eine Suppressordiode geschaltet deren Ansprechschwelle unterhalb der zulässigen Sperrspannung des IGBT liegt. Die Gate-Emitterstrecke wird durch eine Zenerdiode geschützt deren Spannung sinnvoller Weise bei ca. 18V liegt.

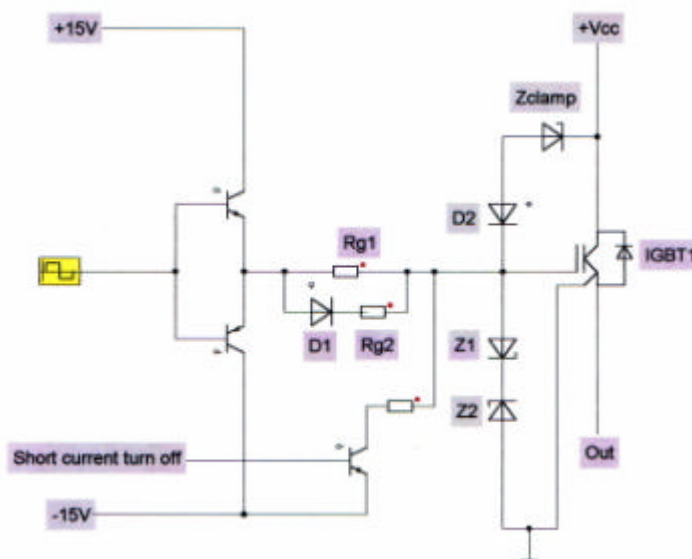


Bild 7: Ansteuerung mit 2-stufiger Abschaltung und active clamp

Will nun beim Ausschalten des IGBT eine Spannungsspitze entstehen

die oberhalb der Ansprechschwelle der Suppressordiode liegt, wird das Gate aufgeladen und der IGBT geht in den Linearbetrieb über.

Dadurch entsteht am IGBT eine Überspannung die höchstens der Ansprechschwelle der Suppressordiode zuzüglich der Spannung der Schutz-Zenerdiode entspricht. Die Energie aus der Schaltüberspannung wird durch den IGBT-Chip verheizt. Es muss jedoch beachtet werden, dass der IGBT-Chip in einem Zeitraum von wenigen 100ns Verlustleistungen, abhängig von seiner Größe, bis zu einigen 100kW verheizen muss. Dies ist eine extreme Belastung für den IGBT-Chip und lässt ihn entsprechend altern. Daher ist diese Art des Schutzes gegen Schaltüberspannungen nur für absolut seltene Ereignisse geeignet.

Reduzierung der Schaltüberspannung durch di/dt-Regeleingriff des Treiberboards

Bei dieser Lösung wird die Schaltüberspannung durch einen Regeleingriff des Treiberboards reduziert. Das Treiberboard selbst hat eine Stromquellen-Charakteristik. Für die Gate-Widerstände finden jene Werte wie sie im IGBT Datenblatt ausgewiesen sind Verwendung.

Das Treiberboard detektiert selbst das di/dt durch eine Spannungsmessung direkt am IGBT. Dazu ist ein vierter Anschlusspunkt am IGBT Treiberboard vorzusehen welcher an den Hauptemitter des IGBT-Moduls angeschlossen wird. Somit ist das IGBT-Modul wie folgt kontaktiert.

Kollektor: Anschluss für den Kollektor Sense zur Kurzschlussüberwachung.

- Gate: Niederinduktiver Anschluss zur Ansteuerung des IGBT.
- Hilfsemitter: Niederinduktiver Anschluss zur Ansteuerung des IGBT auf Emitterpotential.
- Hauptemitter: „Induktiv behafteter Anschluss“ (im Vergleich zum Hilfsemitter) auf Emitterpotential.

Fließt nun ein Strom mit bestimmter Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt „aus dem IGBT-Modul heraus“ entsteht zwischen dem Anschluss des Hilfsemitters und Anschluss des Hauptemitters ein induktiver Spannungsabfall der proportional der Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt ist. Dieser induktive Spannungsabfall wird zur Regelung der Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt herangezogen. Dazu wird das IGBT-Modul vom IGBT-Treiberboard welches eine Stromquellencharakteristik aufweist mit minimalem Gate-Widerstandswert hart eingeschaltet. Wird eine zu hohe Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt im Lastkreis festgestellt wird das Gate des IGBT durch das IGBT-Treiberboard wieder entladen bis sich das gewünschte di/dt einstellt.

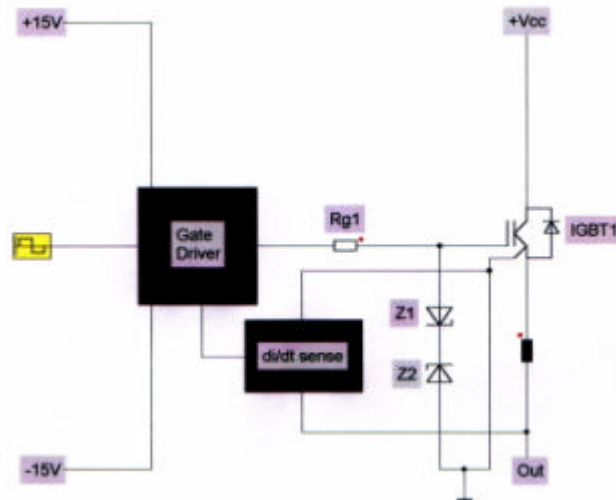


Bild 8: Ansteuerung mit di/dt-Regelung

Der Vorteil dieser Art der Ansteuerung ist, dass das Ausschalt di/dt in allen Arbeitspunkten konstant weitgehend ist und die entstehenden Schaltverluste sehr genau definiert und berücksichtigt werden können. Nachteilig ist, dass das IGBT Treiberboard sehr komplex wird und dass die dynamische Abstimmung an den IGBT Typ und das Wechselrichter-Design gebunden ist. Jede Änderung an IGBT oder Wechselrichter-Design macht eine neue Abstimmung des IGBT-Treiberboards notwendig.

Anschließen des IGBT-Treiberboards auf der Leistungsseite

Grundsätzlich müssen die IGBT-Treiberboards so dicht wie möglich am IGBT Modul sein um die Streuinduktivitäten zwischen IGBT-Treiberboard und IGBT-Modul so klein wie möglich zu halten. Bei leistungsstarken IGBT-Einzelschaltern hat es sich als vorteilhaft erwiesen die Treiberboards direkt auf den Steueranschlüssen des IGBT-Moduls zu kontaktieren.

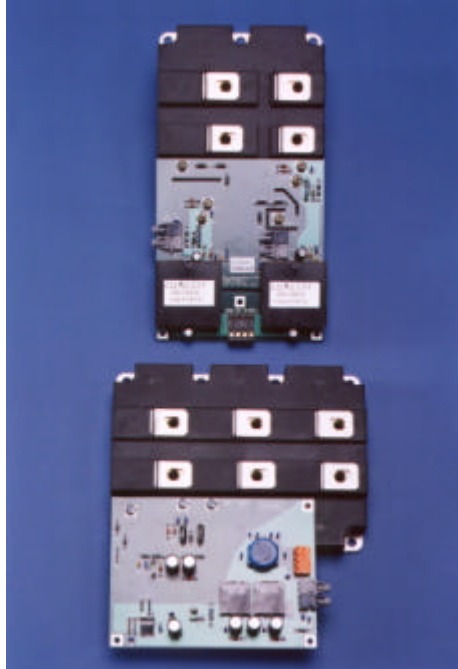


Bild 9: Treiberboard auf IGBT-Steueranschlüsse montiert

Werden die Steueranschlüsse der IGBT-Module mit Drähten angeschlossen so müssen die Gate und Emitterleitungen verdrillt und so kurz wie möglich gehalten werden.
Auf jeden Fall ist zu überprüfen, dass es zu keinen Oszillationen im Ansteuerpfad zum IGBT kommt.

Anschließen des IGBT-Treiberboards bei parallel geschalteten IGBT Modulen auf der Leistungsseite.

Vielfach werden z.B. 200A/1200V IGBT-Phasenzweigmodule direkt parallel geschaltet. So sind Konfigurationen zu finden in denen bis zu sechs solcher Module für einen Schalter parallelgeschaltet sind.
Eine solche Konfiguration ist aus mehreren Gründen kritisch einzustufen und bedarf genauester messtechnischer Untersuchung.

Zunächst gilt festzustellen, dass die Forderung nach einer kürzest möglich Verbindung zwischen IGBT-Treiberboard und IGBT Modul nicht mehr einzuhalten ist. Es ergeben sich zwangsläufig sogar unterschiedliche „Leitungslängen“ mit entsprechenden kaum definierbaren Streuinduktivitäten und unterschiedliche Signallaufzeiten im Ansteuerpfad. Dies kann im Zusammenspiel mit der Gatekapazität des IGBT-Moduls zu Oszillationen im Ansteuerpfad führen. Erhebliche Störungen und auch IGBT- Ausfälle sind die Folge.

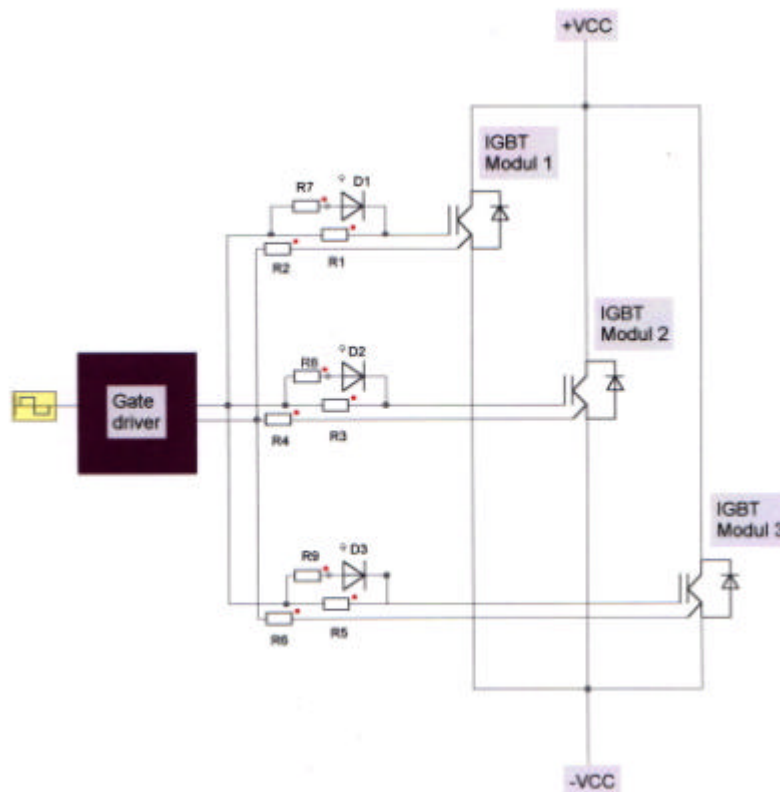


Bild 10: Anordnung der Ansteuerung bei parallel geschalteten IGBT

Ein weiterer Aspekt ist das thermische Verhalten einer solchen Konfiguration. Werden mehrere IGBT Module parallel geschaltet auf einen Kühler montiert so geschieht dies meist auf einem wenig breiten dafür aber langen Kühlprofil. Damit sind die IGBT Module aus Sicht

der Kühlung in Serie geschaltet. Man erhält so einen nicht zu vernachlässigenden Temperaturgradienten von bis zu einigen 10°C über die Kühlerlänge mit entsprechend unterschiedlichen Chiptemperaturen im IGBT Modul. Den IGBT selbst wird dies nicht weiter stören, da dieser durch seinen positiven Temperaturkoeffizienten, NPT Technologie vorausgesetzt, eine gleichmäßige Laststromaufteilung erzwingt. Dies gilt jedoch nicht für die im IGBT Modul mit eingebauten Freilaufdioden. Diese haben einen negativen Temperaturkoeffizienten. Dies kann dazu führen, dass die am ungünstigsten gekühlte Freilaufdiode innerhalb der Parallelschaltung zu Gunsten der besser gekühlten immer mehr Laststrom übernimmt. Der Laststrom steigt an, ebenso die Rückstromspitze welche die IGBT beim Wiedereinschalten zusätzlich als Laststrom führen müssen. Im besten Fall führt dies zu einer Fehlerabschaltung des IGBT Moduls weil der IGBT-Treiber eine Überstromsituation erkannt hat. Im schlechtesten Falle führt dies zu Ausfällen.

Anschließen des IGBT-Treiberboards auf der Controllerseite

IGBT sind hart schaltende Bauelemente. Es können durchaus Stromänderungsgeschwindigkeiten von einigen $\text{kA}/\mu\text{s}$ und Spannungsänderungsgeschwindigkeiten bis einige $\text{kV}/\mu\text{s}$ erreicht werden.

Wird ein IGBT-Treiberboard mit elektrischen Signalen angesteuert so muss dringend darauf geachtet werden, dass es zu keinen Einstreuungen von der Lastseite auf das Ansteuerkabel kommt. Die Leitungsführung vom Controller zum IGBT-Treiberboard sollte so kurz wie möglich gewählt, Schleifen sollten vermieden werden. Die Verwendung geschirmter Kabel ist empfehlenswert.

Potentialtrennstellen, Isolationsspannung, Teilentladungsfestigkeit

Da die einzelnen IGBT einer Wechselrichterbrücke auf unterschiedlichem Potential gegen Masse und untereinander liegen muss der IGBT Treiber eine sichere galvanische Trennung bereitstellen. Dies gilt sowohl für den Ansteuerungseingang als auch für den Fehler-Rückmeldungskanal und den DC/DC Wandler welcher zur Leitungsversorgung des IGBT Treibers dient.

Werden zur Ansteuerung und zur Fehlerrückmeldung optische Trennstellen verwendet sind hier keine Probleme hinsichtlich Isolationsfestigkeit zu erwarten. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die ausgewählten Sender- und Empfängerbausteine eine ausreichende dv/dt -Störfestigkeit haben und auch bei negativen Temperaturen eine gute Signalübertragung gewährleisten.

Kommt zur Ansteuerung und Fehlerrückmeldung anstelle einer optischen eine elektrische Signalübertragung zum Einsatz so werden die Potentialtrennstellen, wie auch beim DC/DC-Wandler mit Übertrager aufgebaut. Neben einer hohen dv/dt -Störfestigkeit, wie schon vor beschrieben, werden an diese Übertrager hohe Anforderungen bezüglich Isolationsfestigkeit gestellt. Dabei ist die Angabe der Isolationsspannung mit der die Übertrager getestet werden nicht ausreichend da hiermit die Alterungsbeständigkeit der Potentialtrennstelle nur unzulänglich beschrieben wird. Die Angabe Glimmfestigkeit, hier der Wert für die Glimmaussetzspannung, ist die wesentlich sinnvollere Angabe. Die Glimmaussetzspannung ist der Wert bei dem eine Glimmentladung erlischt. Die Glimmeinsetzspannung liegt bei höheren Spannungswerten als die Glimmaussetzspannung. Es ist empfehlenswert Treiber einzusetzen deren Glimmaussetzspannung ca. 20% höher liegt als jener Spannungswert mit dem die Potentialtrennstelle beaufschlagt wird. Da ein Glimmen erst bei noch höheren Spannungswerten auftritt ist damit eine ausreichende Sicherheit bezüglich Isolationsfestigkeit und Beständigkeit gewährleistet.

Unipolare, bipolare Ansteuerung der IGBT

Im Prinzip lässt sich der IGBT durch Anlegen einer Steuerspannung von +15V auf das Gate einschalten. Beim Wegnehmen dieser Steuerspannung schaltet er wieder aus. Diese sogenannte unipolare Ansteuerung ist jedoch nicht sicher wenn IGBT's in einer Wechselrichterbrücke betrieben werden. Hier kann der unipolar ausgeschaltete IGBT ungewollt einschalten wenn dessen antiparallele Freilaufdiode durch den im Phasenzweig gegenüberliegenden IGBT abkommmutiert wird. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die parasitäre Millerkapazität die das Gate des ausgeschalteten IGBT über einen kapazitiven Verschiebestrom, hervorgerufen durch das Abschalt-dv/dt der Freilaufdiode, wieder auflädt. Da dann der in dem Phasenzweig gegenüberliegende IGBT gezielt eingeschaltet wird kommt es so zu kurzzeitigen Kurzschlussströmen im betroffenen IGBT-Phasenzweig mit einer Frequenz die der PWM-Taktfrequenz entspricht.

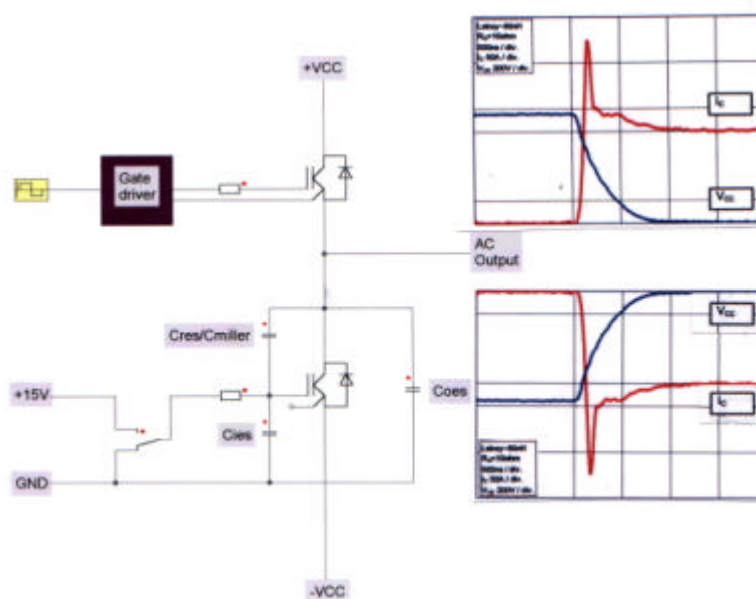


Bild 11: Unipolare Ansteuerung und Rückwirkung auf den Ansteuerpfad des "low side IGBT"

Das Treiberboard kann diese Kurzschlusssituation nicht erkennen, da die Kurzschlusserkennung genau im Zeitbereich des Einschaltens deaktiviert ist. Hierzu wird im nachfolgenden Kapitel weiter eingegangen. Messtechnisch ist dieser Fehlbetrieb schlecht zu erfassen. Misst man den Ausgangsstrom (hier kommt man mit der Stromzange gut ran) so sieht alles normal aus, da der Kurzschlussstrom im Phasenzweig fließt. Allein durch eine Strommessung im Phasenzweig ist dieser Fehler nachweisbar. Dies gestaltet sich aber sehr oft speziell bei parallel geschalteten IGBT schwierig, da der kompakte niederinduktive Aufbau ein Platzieren einer Stromzange oft nicht zulässt bzw. weitere parasitäre Effekte begünstigt.

Der vor geschilderte Betrieb ist nicht zulässig, erzeugt er doch extrem hohe Verlustleistungen im IGBT-Chip. Ein Ausfall aufgrund thermischer Überlastung ist sehr wahrscheinlich.

Durch Einsatz einer bipolaren Steuerspannung wird dieser Fehlbetrieb sicher verhindert. Weit verbreitet ist eine symmetrische bipolare Steuerspannung von +/-15V. Auch asymmetrische Steuerspannungen z.B. +15V/-8V sind möglich, allerdings sollte die negative Steuerspannung nicht kleiner als -8V sein damit der ausgeschaltete IGBT auch sicher ausgeschaltet bleibt.

Kurzschlussstromerfassung, Kurzschlussstromabschaltung

Das Erkennen und Abschalten von Über- und Kurzschlussströmen ist durch das Entsättigungsverhalten der IGBT relativ elegant zu bewerkstelligen. Eine Entsättigung liegt vor wenn der IGBT im eingeschalteten Zustand zwischen Kollektor und Emitter Spannung aufnimmt die deutlich oberhalb der im Datenblatt ausgewiesenen Werte für die Sättigungsspannung V_{cesat} liegt. Bei Strömen, Faktor 3 bis 5 höher als der angegebene Typenstrom nimmt der IGBT die gesamte DC-Busspannung über seine Kollektor-Emitter-Strecke auf.

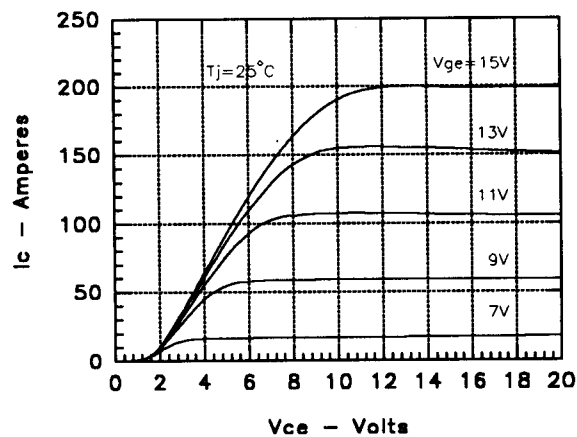


Bild 12: Ausgangskennlinienfeld eines IGBT

Dies führt zu hohen Verlustleistungen die den IGBT zerstört wenn dieser nicht innerhalb 10 μ s abgeschaltet wird.

Um dies sicherzustellen verfügen Treiberboards über eine sogenannte V_{cesat} -Detektion.

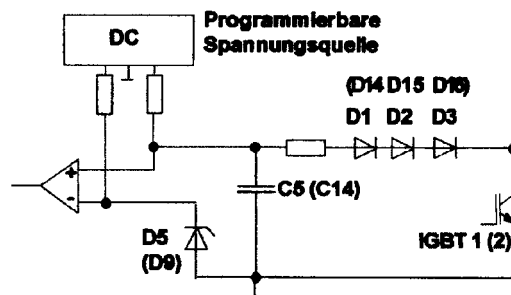


Bild 13: Kollektorsense zur Erfassung einer Kurzschlussituation

Eine auf dem Treiberboard integrierte Spannungsquelle sorgt bei eingeschaltetem IGBT dafür, dass ein Strom über die Kollektor-Emitter-Strecke des IGBT fließt. Dazu wird das Treiberboard mit einem Kollektor-Sense-Ausgang versehen welcher an den Kollektor bzw. Hilfskollektor des zu schützenden IGBT angeschlossen wird. Die so gemessene Spannung entspricht der V_{cesat} des IGBT zuzüglich dem Spannungsabfall der Kollektor-Blockdioden D1 bis D3 bzw. D14 bis D15.

Da, wie schon dargelegt, die über der Kollektor-Emitter-Strecke entstehende Spannung vom Kollektorstrom abhängig ist, kann diese als Maß für die Höhe des augenblicklich fließenden Kollektorstrom herangezogen werden.

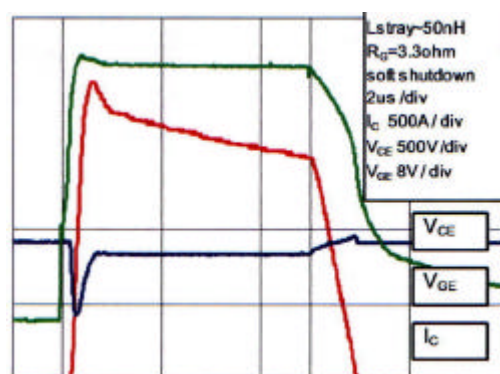


Bild 14: Strom- und Spannungsverläufe am IGBT bei einem Kurzschluss

Steigt die V_{cesat} nun über eine festgelegte Schwelle an, d.h. wird der Kollektorstrom zu hoch, erfolgt eine unmittelbare Abschaltung des betroffenen IGBT durch das Treiberboard. Das Treiberboard wird gegen regulär ankommende Einschalt-Steuersignale verriegelt, der Zustand über eine Fehlerrückmeldung an den Controller zur weiteren Verarbeitung gemeldet.

Die Ansprechschwellen für die Abschaltung werden mit den Referenz-Zenerdioden D5 bzw. D9. eingestellt und liegen üblicherweise zwischen 5V und 12V. Eine höhere Referenzspannung als 12V ist bei der üblichen Standardauslegung der Treiberboards nicht möglich, weil diese mit einer 15V Versorgung arbeiten und an den Blockdioden und IGBT Spannungsabfälle von ca. 3V schon im Normalbetrieb auftreten.

Dies kann bei IGBT mit Sperrspannungen $> 1700V$ zu Abstimmungsschwierigkeiten führen. Da IGBT nicht unendlich schnell einschalten, kann es insbesondere bei IGBT mit hohem

Sperrvermögen einige us dauern bis diese voll eingeschaltet haben und die im Datenblatt ausgewiesenen Werte für V_{cesat} erreicht werden.

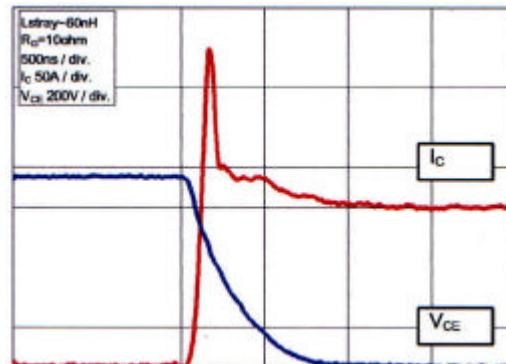


Bild 15: Strom- und Spannungsverläufe am IGBT beim Einschalten

Damit nun ein ordnungsgemäßes Einschalten nicht als unzulässige Überstrombelastung oder Kurzschluss interpretiert wird muss die Erfassung eines möglichen Über- oder Kurzschlussstromes für eine bestimmte Zeit ausgeblendet werden. Dies geschieht mit dem Kondensator C5 bzw. C14 welcher die Freigabeverzögerung für die Messung der IGBT-Kollektor-Emitterspannung V_{ce} bestimmt. Insbesondere bei IGBT mit hohem Sperrvermögen kann es jedoch möglich sein, dass die Kollektor-Emitterspannung am IGBT nach einer Zeit von 10µs noch höher ist als die auf dem Treiberboard eingestellte Referenzspannung. Längere Zeiten können nicht eingestellt werden da der IGBT dann außerhalb des SCSOA (Short Circuit Safe Operating Area) betrieben wird, eine höhere Ansprechschwelle kann aus vor genannten Gründen ebenso wenig eingestellt werden.

In einem solchen Fall muss auf dem Treiberboard eine separate V_{ce} Überwachung installiert werden die mit einer höheren Speisespannung betrieben wird, der IGBT selbst kann ja bekanntlich nur mit Spannungen von +/- 15V angesteuert werden. Dies bedingt eine zweite Spannungsversorgung auf dem Treiberboard mit einem zweiten DC/DC-Wandler mit Eigenschaften wie schon beschrieben.

Ein weiterer kritischer Punkt bei der Abschaltung von Über- und Kurzschlussströmen sind Schalt Spannungsspitzen die durch die unvermeidlichen Streuinduktivitäten entstehen. Diese können bei ungünstiger Verschiebung des Leistungsteiles bei Abschaltungen schon weit unterhalb des IGBT-Nennstrombereiches zum Problem werden. Da die Ein- und Ausschaltzeiten der IGBT bei unterschiedlicher Strombelastung relativ konstant bleiben, entstehen bei der Abschaltung von Über- oder Kurzschlussströmen wesentlich höhere Stromänderungsgeschwindigkeiten als bei der Abschaltung mit niedrigeren Nennstrombelastungen. Dies führt naturgemäß zu ebenso hohen Schaltüberspannungsspitzen. Das gesamte Design des Wechselrichters bezüglich Streuinduktivität, Treiberabstimmung und damit Beherrschung von Schaltüberspannungsspitzen einerseits und den somit entstehenden Verlustleistungen und damit einhergehenden thermischen Auslegung andererseits, ist in sich und miteinander abzustimmen und zu optimieren. Deshalb ist die einfach scheinende Frage ob der im IGBT Datenblatt ausgewiesene Wert für den Gatewiderstand eingesetzt werden kann nicht mit einem ja oder nein zu beantworten. Vielmehr müssen die dadurch entstehenden Wechselwirkungen im Wechselrichter untersucht, berücksichtigt und optimiert werden.

Werner Bresch
GvA Leistungselektronik GmbH
Boehringerstrasse 10-12
68307 Mannheim

Tel: 0621 789 92 12
Fax: 0621 789 92 99
e-mail: info@gva-leistungselektronik.de
www.gva-leistungselektronik.de
www.gva-leistungselektronik.com



Leistungselektronik GmbH
