IGBTs treiben: Wie die Spannung richtig ans Gate kommt

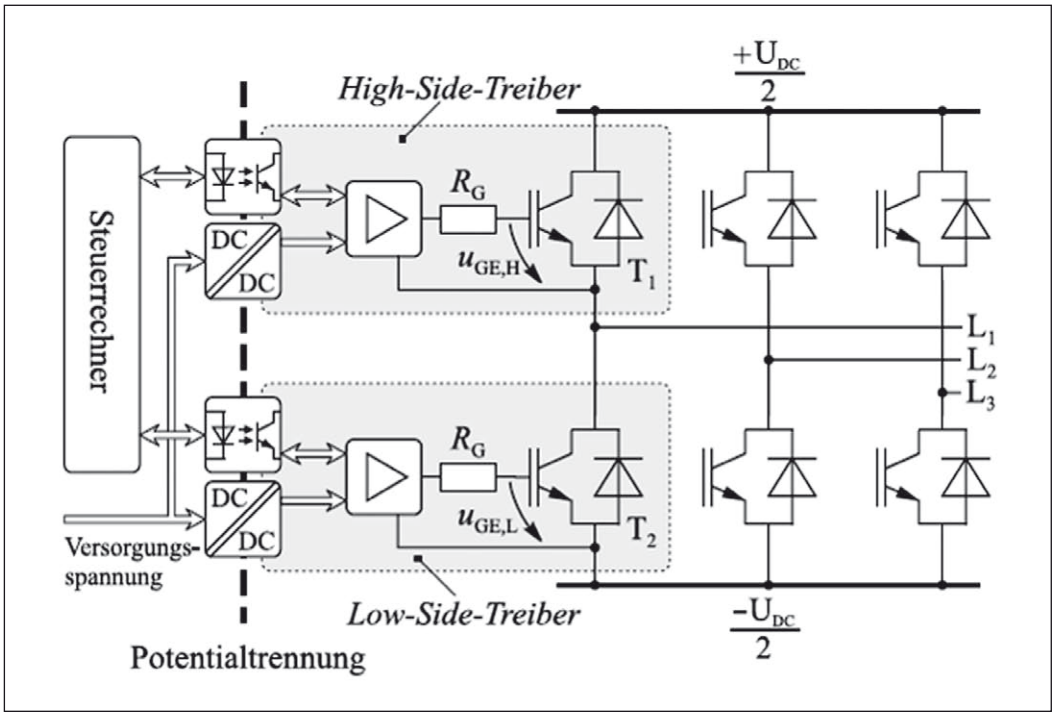

Bild 1: Ein Brückenzweig in einer dreiphasigen IGBT-Leistungsendstufe mit jeweils separaten DC/DC-Wandlern und Isolatoren

MOSFETs und IGBTs erscheinen als ideale Leistungsschalter: Sie werden über ein Gate gesteuert, nur mit Spannung, also leistungsarm. Doch um geringe Verluste zu erreichen, sind kurze Schaltzeiten notwendig. Also muss die Gate-Kapazität schnell umgeladen werden. Hierzu sind dann einige Ampere an Strom erforderlich – also ist doch wieder Leistung gefragt. Direkt aus einer CMOS-Prozessorschaltung heraus kann also ein solcher Leistungsschalter nur theoretisch gesteuert werden; praktisch würde er viel zu langsam umschalten und dabei infolge der hohen Schaltverluste zerstört. Zudem bestünde die Gefahr der Rückwirkung. Transienten würden die Prozessorlogik stören oder gar beschädigen. Es sind spezielle MOSFET- und IGBT-Treiber notwendig.

Negative Abschaltspannung notwendig

Schließlich schalten IGBTs sauberer ab und bleiben auch zuverlässiger abgeschaltet, wenn hierzu nicht nur die positive Einschaltsteuerspannung abgeschaltet und das Gate kurzgeschlossen, sondern eine negative Sperrspannung angelegt wird. Dies erfordert allerdings eine bipolare Spannungsversorgung, womit der Bauteileaufwand weiter steigt. Eine elegante Option sind Treiber in SCALE-Technologie, die mit hochintegrierten ASICs die Leistungshalbleiter und den Rest der Schaltung vor Überlast und Zerstörung schützen. Sie erzeugen die bipolare Spannungsversorgung intern, sodass nur eine unipolare Spannungsversorgung notwendig ist. Zudem enthalten sie ausgedehnte Sicherheitsschaltungen, die bei Überstrom und Kurzschluss eine Entsättigung und Überlastung des Leistungshalbleiters verhindern und Fehlschaltungen (gleichzeitiges Einschalten beider Zweige einer Halbbrücke) vermeiden. Mehr hierzu später.

Problem: Hochliegende und wechselnde Potentiale

Ein weiteres prinzipielles Problem liegt jedoch darin, dass IGBT- und MOSFET-Gegentaktbrücken nicht mit Komplementärhalbleitern arbeiten, wie man es von bipolaren Transistorendstufen kennen mag. Sie werden nicht um einen gemeinsamen Nullpunkt herum ausgesteuert, was auch die Schaltungen bei den hohen Arbeitsspannungen unnötig verkomplizieren würde, sondern mit einer niedrigen Spannung zwischen Gate und Source beziehungsweise Emitter. Während dies auf der Low Side trivial klingt, wo alle Source- beziehungsweise Emitter-Anschlüsse auf einem gemeinsamen Bezugspunkt enden, ist es auf der High Side kompliziert: Hier gibt es bei einer Drehstrombrücke für jeden IGBT/MOSFET einen anderen, mit hohen Transienten auf hohem Spannungspegel schwankenden Bezugspunkt!

Direkt aus einer vorhandenen Niedervolt-Versorgungsspannung können die Treiber der Leistungshalbleiter der High Side also nicht betrieben werden. Zudem ist für ihre Ansteuerung eine kapazitätsarme galvanische Trennung notwendig. Und die einzelnen Versorgungsspannungen können auch nicht aus einfachen Netzteilen oder DC/DC-Wandlern gewonnen werden – die Transienten verlangen nach speziellen, kapazitätsarmen Lösungen, um keine Fehlzündungen der Leistungshalbleiter oder Beschädigungen der Stromversorgung hervorzurufen. Welche Lösungen kommen für derartige Aufgaben in Frage und welche Bauteile sind hier sinnvoll einzusetzen?

6 Treiber, 6 DC/DC-Wandler, 12 Optokoppler?

Eine an der Bergischen Universität Wuppertal verfasste Dissertation [1] zeigt die zunächst logische Lösung mit jeweils sechs eigenen Treiberstufen, DC/DC-Wandlern sowie galvanischen Isolatoren (symbolisiert als Optokoppler) (Bild 1). Letztere sogar doppelt, wenn ein Rückkanal beispielsweise zum Abschalten bei Überlast und Kurzschluss gefragt ist. Das funktioniert, ist aber doch ein ziemlicher Aufwand. Geht es nicht günstiger?

Doch, natürlich. Auf der Low Side, in der unteren Hälfte der Brücke, ist die Situation ja relativ unkompliziert. Zwar liegt der Pegel der Steuerung hier nahe an der negativen Versorgungsspannung, doch ist dieser statisch und alle drei Zweige können

Kurz gefasst

IGBTs und MOSFETs sind leicht anzusteuern, weil sie spannungsgesteuerte Bauelemente sind. Doch es gibt einige spezielle Anforderungen an die Treiberschaltung und auch deren Stromversorgung. Je nach Leistungsklasse sind unterschiedliche Lösungen sinnvoll.

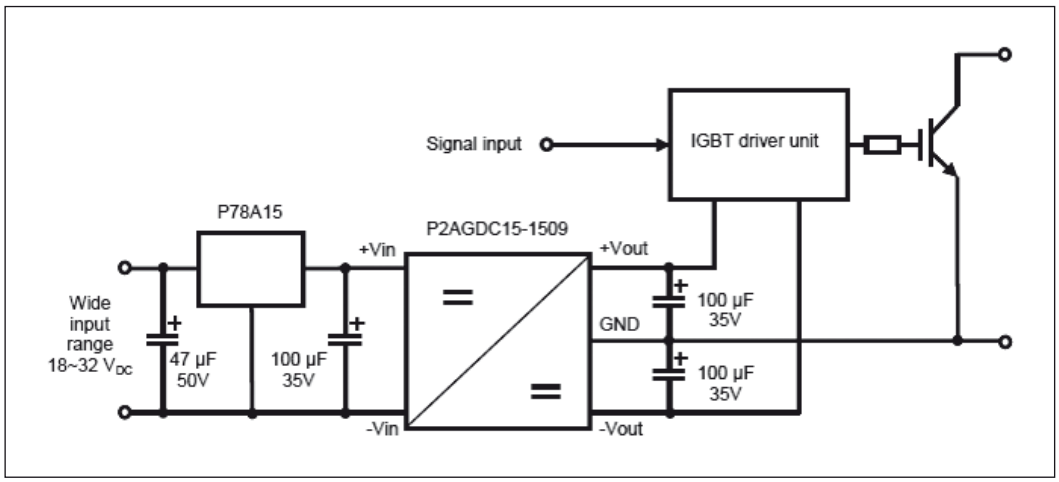

Bild 2: Applikationsschaltung eines DC/DC-Wandlers zum Versorgen von IGBT-Treiberschaltungen

mit einer geringen Spannung, die an der gleichen negativen Versorgungsspannung hängt, gesteuert werden. In der Praxis kommt man hier mit einer Spannungsversorgung für alle drei Zweige aus inklusive der drei Steuerschaltungen, die sogar auf die galvanische Trennung verzichten können, wenn die negative Versorgungsspannung als gemeinsamer Masse-Bezugspunkt verwendet wird. Auf der High Side gibt es dagegen keinen gemeinsamen Bezugspunkt. Hier sitzen die Emitter auf den drei unterschiedlichen und schnell wechselnden Potentialen L1, L2 und L3 und damit auch die Steuerspannung. Doch immerhin brauchen wir also in der Praxis schon einmal maximal vier Spannungsversorgungen und nicht sechs.

Gate-Treiber benötigen spezielle DC/DC-Wandler

Für die Versorgung der Low Side sind Standard-DC/DC-Wandlermodule normalerweise ausreichend. Bei der Versorgung der High Side führen diese dagegen zu Problemen. Die schnell wechselnden Potentiale führen über die Kapazität zwischen Eingang und Ausgang des DC/DC-Wandlers zu Fehlsteuerungen mit der Gefahr von Beschädigung von Leistungsschaltern und DC/DC-Wandlern. Spezielle PHI-CON DC/DC-Wandler, die auf die Bedürfnisse der Gate-Ansteuerung auf der High Side ausgelegt sind, schaffen Abhilfe: sie sind transientenfest und kapazitätsarm, isolieren sicher auch 300 V_{AC} effektiv und liefern auf Wunsch auch die negative Spannung zum sicheren und schnellen Sperren des IGBTs [2].

In Bild 3 ist der Aufbau einer Treiberschaltung zu sehen, wie sie beispielsweise in Intelligenten Power Modulen (IPM) genutzt wird. Die notwendige galvanische Trennung sowohl für die Signale (hier mit Optokopplern realisiert) als auch die Versorgung (DC/DC-Wandler) sind hier nicht gezeigt. Ähnliche Schaltungen lassen sich auch außerhalb eines Moduls mit einer diskreten Treiberschaltung mit Optokopplern, Steuerlogik und DC/DC-Wandlern aufbauen. Problematisch sind der hohe Aufwand, die geringe Geschwindigkeit und das Altern der Optokoppler, das in den einzelnen Zweigen unterschiedlich ausfallen kann. Zudem ist es in der Praxis mit einer reinen Ansteuerung, mit dem klassischen „Treiben" von der Steuerung zum Leistungsschalter, nicht getan: Um Überlast- und Defekt-Zustände zu erkennen, ist auch eine Rückmeldung in die Gegenrichtung erforderlich – und damit im Normalfall eine weitere galvanisch zu trennende Übertragungsstrecke mit einem zweiten Satz isolierender Koppler. Eine Alternative hierfür sind Datenkoppler nach dem GMR-Prinzip [3].

Bootstrap und Level-Shifter

Eine weitere Lösungsmöglichkeit sind Steuerschaltungen, die selbst das Potential entsprechend verschieben und eine geeignete Steuerspannungsversorgung erzeugen. So arbeiten integrierte Lösungen wie die DIP-IPM-Bausteine von Mitsubishi [4]: Hier reicht eine Versorgungsspannung von 15 V für die komplette Ansteuerung aus und die galvanische Trennung wird auf die Seite des Mensch-Maschine-Interface verlegt – der Baustein selbst liegt auf Netzpotential. Allerdings sind rein kapazitiv arbeitende Level-Shifter leistungsmäßig begrenzt und die Verdrahtung hat sehr kompakt zu sein, um keine Probleme mit Streukapazitäten zu erzeugen. Als integriertes DIP-IPM ist dies eine gute Lösung. Mit der neuen DIPIPM+-Serie können Inverter bis zu 5,5 kW realisiert werden. Bei höheren Leistungen stößt diese Schaltung jedoch an ihre Grenzen. Gefährlich für die Leistungsschalter können hier negative Transienten werden, wenn keine Schutzbeschaltung wie in den DIP-IPMs vorgesehen ist.

Übertrager: Signal + Power

Die klassische Methode der galvanischen Trennung ist der Übertrager als induktives Bauelement. HY-LINE Power Components hat

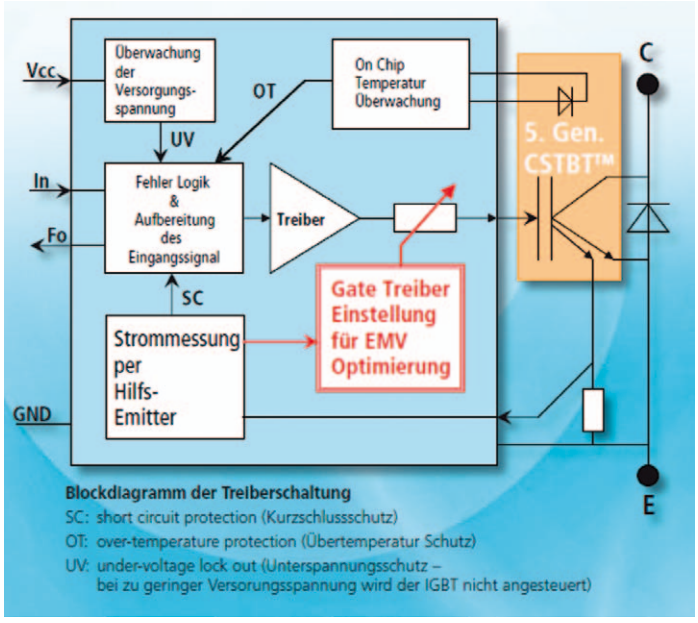

Bild 3: Blockschaltbild eines IGBT-Treibers

Bild 4: Impulsübertrager von RÖ-LO

Bild 5: SCALE-iDriver

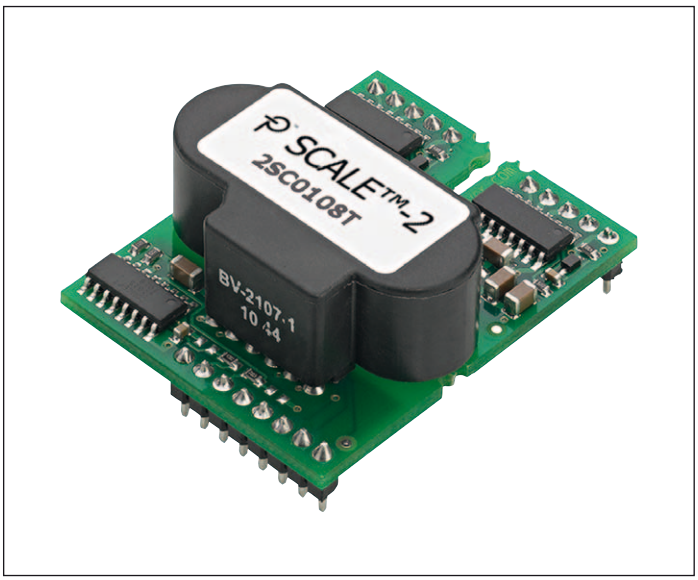

Bild 6: SCALE2+-Core-Driver

hier beispielsweise die TI-Serie der Impulsübertrager von Sirio sowie die Treiber- und Zündtransformatoren von RÖLO im Angebot [5]. Der Vorteil: Neben der Signalübertragung kann hier auch die notwendige Steuerleistung mit übertragen werden – eine separate Stromversorgung ist nicht erforderlich. Bei Thyristoren wird auf diese klassische Art die gesamte Zündenergie über Trenntransformatoren mit einer hohen Isolationsspannung (3 bis 7 kV) geführt. Wegen der geringen Bandbreite der Übertrager ist diese Methode jedoch auf kurze Zündimpulse und Frequenzen unter 30 kHz beschränkt. Für IGBTs und MOSFETs, die spannungs- und nicht stromgesteuert schalten wie der Thyristor, ist diese Lösung mit zusätzlicher Beschaltung und eben diesen Einschränkungen bei der Taktfrequenz nutzbar.

SCALE-Treiber: Vom Chip bis zur Baugruppe

Eine interessante Lösung für den Leistungsbereich von 5,5 bis 110 kW (400 kW mit Booster-stufe), Taktfrequenzen bis 250 kHz und Schaltspannungen bis 1700 V ist der SCALE-iDriver von Power Integrations. Er setzt genau dort fort, wo die DIP-IPM-Lösungen aufhören und nutzt ebenfalls hoch integrierte Technologie. Nur die IGBT-Module sind wegen der höheren Leistung nicht mehr integriert. Im IC selbst werden die Signale über ein eigenes Protokoll bidirektional galvanisch getrennt übertragen, also sowohl vom Treiber zum IGBT-Modul als auch umgekehrt vom IGBT-Modul zurück zum Treiber, womit die Module perfekt gegen fehlerhafte Betriebsbedingungen geschützt werden können. Entsprechende Verfahren, die Überstrom und Kurzschluss erkennen, sind bereits integriert. Lediglich zur Spannungsversorgung ist noch ein externer Übertrager erforderlich – die Regelung der Versorgungsspannungen erfolgt wiederum auf dem Chip selbst. Referenzdesigns ermöglichen den schnellen Aufbau von kompletten IGBT-Treibern.

Ist noch mehr Leistung gefragt, mit IGBT-Schaltspannungen bis 6500 V und Schaltströmen bis über 4000 A, so helfen die SCALE2+ Core Driver von Power Integrations, die ebenfalls hoch integrierte ASICs nutzen – nun getrennt für Steuer- und Leistungsseite – und als komplette Baugruppe mit Übertrager leicht an jedes gängige IGBT-Modul angepasst werden können.

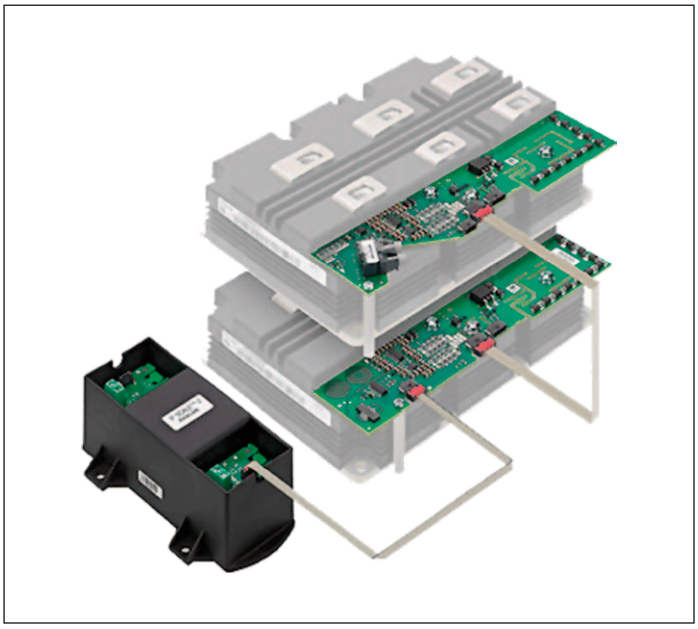

Bild 7: SCALE-2-Master-Slave-IGBT-Treiber mit Lichtwellenleiter-Kopplung

Lichtwellenleiter für Hochvolt-Anwendungen

Dabei sind auch Master-Slave-Treiber und über Lichtwellenleiter 100 % sicher galvanisch getrennte Steuerwege möglich. Ebenso gibt es bis 6500 V spannungs- und transientenfeste DC/DC-Wandler von Power Integrations für diese „Härtefälle". Es gibt also für jede Spannungs- und Leistungsklasse eine sichere, hochintegrierte und kostensparende Treiberlösung. Die Notwendigkeit einer galvanisch getrennten bidirektionalen Signal- und Leistungsübertragung, die bei vermeintlich einfachen, diskreten Lösungsansätzen zum Kostenfresser und Qualitätsengpass werden kann, ist bei allen vorgestellten Treiberbausteinen elegant, sicher und zuverlässig umgesetzt und dennoch kostengünstig.

[1] Dissertation „Ansteuerung von Hochvolt-IGBTs über optimierte Gatestromprofile" http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20091017
[2] DC/DC-Wandler für Gate-Treiber-Applikationen, www.hy-line.de/gate-drive-dcdc
[3] Isolierende Datenkoppler, www.hy-line.de/datenkoppler
[4] IGBT-Module und -Treiber, www.hy-line.de/igbt
[5] Induktivitäten, www.hy-line.de/indukt

Autor:
Wolf-Dieter Roth, Technischer Redakteur bei HY-LINE Power Components
www.hy-line.de/power