

Bild 1: Querschnitt eines P-GaN-Transistors; das ausgereifte Konzept für einen GaN-Transistor nutzt eine Lage mit p-dotiertem GaN unter dem Gate.

GaN-HEMT sorgt für 98 Prozent Wirkungsgrad im 3-kW-Netzteil

GaN-Leistungshalbleiter machen große Fortschritte. Mit einer Technologieübersicht und abschließendem Praxisbeispiel einer Schaltnetzteil-Entwicklung zeigt dieser Artikel den Nutzen.

BERNHARD ZOJER, ERIC PERSSON UND FRANCESCO DI DOMENICO *

Es gibt kaum einen Bereich der Leistungselektronik, in dem nicht entweder höherer Wirkungsgrad, geringere Abmessungen, geringeres Gewicht, niedrigere Kosten oder sogar all diese Anforderungen zusammen angestrebt werden. Seit vielen Jahren haben Ingenieure Mittel und Wege gefunden, mit klassischen Siliziumtransistoren immer höhere Wirkungsgrade zu erreichen. Mittlerweile erscheint die herkömmliche Technik zwar weitgehend ausgereizt, aber eine neue Generation von Schaltern aus Widebandgap-Halbleitermaterialien,

insbesondere Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN), wird den Entwicklern von Leistungssystemen bisher ungeahnte Möglichkeiten eröffnen.

Dieser Artikel geht speziell auf GaN-Transistoren ein und erläutert, wie diese die Leistungselektronik grundlegend verändern werden. Um das Resümee gleich vorwegzunehmen: Die neue Produktfamilie von 600-V-Enhancement-mode-GaN-HEMTs (CoolGaN) von Infineon ermöglicht in Kombination mit einer speziell dafür entwickelten Gate-Treiberfamilie (GaN EiceDRIVER) leistungsfähige und robuste Systemlösungen für nahezu alle Bereiche der Leistungselektronik.

Der GaN-HEMT: sein Aufbau und seine Funktionsweise

Galliumnitrid (GaN) ist als Halbleitermaterial seit Jahrzehnten bekannt; bis vor kurzem waren die benötigten Trägersubstrate jedoch so teuer, dass GaN-Transistoren nur sehr beschränkt für Nischenanwendungen

zum Einsatz kamen. Diese Situation hat sich in den letzten Jahren verändert. Weltweite Anstrengungen haben zu signifikanten Fortschritten bei der Produktion zuverlässiger GaN-Transistoren auf kostengünstigen Silizium-Substraten geführt; dies war der Schlüssel für den wirtschaftlichen Erfolg. Technisch gesehen erlaubt GaN höhere elektrische Feldstärken und ermöglicht damit deutlich kleinere Hochspannungsschalter, die ihre Silizium-Pendants in allen wichtigen Kennzahlen übertreffen. Darüber hinaus sind GaN-Schalttransistoren sogenannte Heterojunction-Transistoren mit hoher Elektronenmobilität (HEMTs) und lateralem Stromfluss, während bei Silizium-Superjunction-MOSFETs (SJ-MOSFETs) der Strom im Wesentlichen vertikal fließt.

Bild 1 zeigt den Querschnitt eines solchen GaN-HEMTs. Ausgangsbasis ist ein Silizium-Substrat; dieses wird aufgrund der vorhandenen Lieferinfrastruktur und geringen Kosten verwendet. Anschließend werden epita-

* Bernhard Zojer

... ist Lead Principal für Gate Driver ICs bei Infineon Technologies.

Eric Persson

... ist Lead Principal für GaN Applications, Infineon Technologies.

Francesco Di Domenico

... Principal Application Engineering, Infineon Technologies.

xial auf dem Silizium-Substrat Übergangssichten aufgebracht, um die Unterschiede der Kristallgitter und Wärmedehnungskoeffizienten von Si und GaN auszugleichen. Danach werden weitere Schichten GaN, Al-GaN und p-dotiertes GaN aufgebracht und geätzt, bis die in Bild 1 gezeigte Struktur entstanden ist. Metallisierungs- und Passivierungsschichten vervollständigen anschließend den Transistor.

Als leitender Kanal zwischen dem Drain und dem Source-Kontakt fungiert das zwei-dimensionale Elektronengas (2DEG), das sich am Übergang zwischen GaN- und Al-GaN-Schicht bildet (in Bild 1 rot dargestellt). Aufgrund der speziellen Geometrie und Dotierung des Gate-Anschlusses ist das 2DEG unter dem Gate unterbrochen und der Transistor daher im Normalzustand nicht leitend (normally-off, enhancement-mode). Um ihn einzuschalten, muss zwischen Gate und Source eine positive Spannung über der Schwellenspannung von etwa 1,2 V angelegt werden.

Der p-Gate-HEMT aus Bild 1 kann auf zwei verschiedene Arten realisiert werden, je nach der Zusammensetzung des Gate-Metalls: Bei Verwendung von Titan entsteht ein ohmscher Kontakt am Gate, bei Verwendung von Titanitrid ein Schottky-Kontakt.

■ Das p-GaN-Gate mit Schottky-Kontakt ergibt Transistoren mit isoliertem Gate, ähnlich einem MOSFET. Bei GaN-Transistoren jedoch sehr empfindlich gegen Überspannung. Dies hat potenziell Nachteile für Robustheit, Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer und erfordert zusätzliche Maßnahmen zur effektiven Begrenzung der Gate-Spannung.

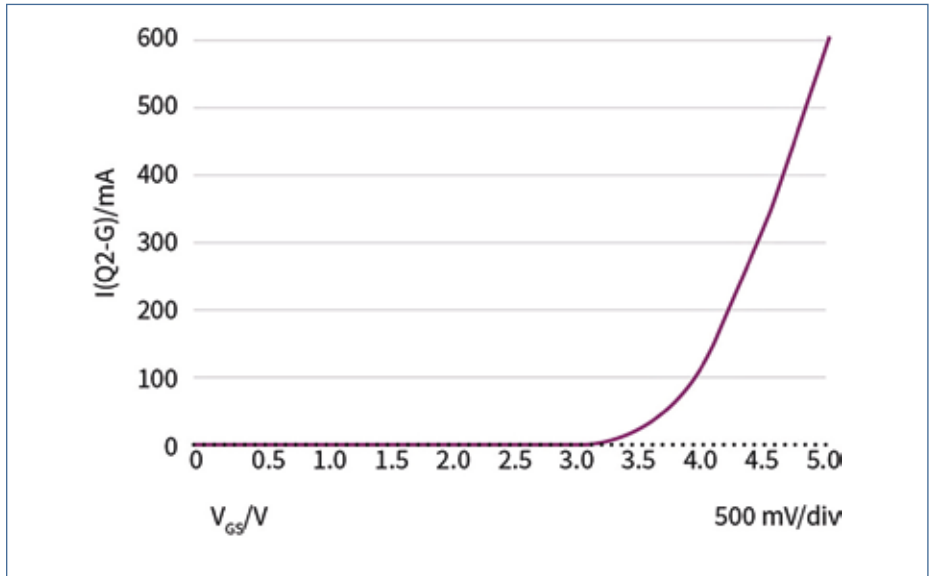


Bild 2: Die Gate-Kennlinie eines P-GaN-Transistors.

■ Ein p-GaN-Gate mit ohmschem Kontakt ist dagegen wesentlich zuverlässiger und robuster. Das Gate ist dann allerdings nicht länger vom Kanal isoliert, sondern bildet eine pn-Diode mit einer Durchlassspannung von etwa 3 V wie in Bild 2 dargestellt. Das unterscheidet einen solchen Transistor doch deutlich von MOSFET und hat starke Auswirkungen auf das Gate-Ansteuerungskonzept. Bei der 600-V-CoolGaN-Familie von Infineon gab letztlich das Zuverlässigkeitsargument den Ausschlag für die Wahl des ohmschen Gate-Kontakts.

CoolGaN-Transistoren haben insbesondere hinsichtlich den folgenden Parametern Vorteile gegenüber vergleichbaren Transistoren in traditionellem Silizium:

Ausgangsladung Q_{oss} : Typische SJ-MOS-FETs für 600-V-Anwendungen zeigen eine extrem starke Abhängigkeit der Ausgangskapazität von der Spannung V_{DS} zwischen Drain und Source (bei kleinen Spannungen ist die Kapazität bis zu 1000-mal höher als bei großen). Das heißt, wenn V_{DS} von 0 auf etwa 25 V erhöht wird, steigt die Ausgangsladung schnell steil an. Diese Kurve flacht dann plötzlich ab, und die Ladung erhöht sich nur noch geringfügig, wenn V_{DS} bis auf 400 V oder mehr erhöht wird. CoolGaN-Transistoren haben eine wesentlich linearere Kennlinie und im Vergleich mit SJ-Transistoren ist bei gleichem Kanalwiderstand $R_{DS(on)}$ die Ladung Q_{oss} etwa zehnmal niedriger. Dies ist ein signifikanter Vorteil bei resonant

EN50121-3-2
EN61000-4-x
EN50153
EN60077-1
EN61287
EN50163
EN61373
EN45545-1/2/5

Fahrleitung 600/750 VDC

DC Teil Onboard potentialgetrennt

420 - 1000 VDC
1270 VDC/1min
1950 V/10 ms
3000 V/2 ms

n x Aktive Aufschaltstromgrenze

Funktionale Parallel-Schaltung

Niedervolt 24 V/110 V (>600 V)/n x 200 A=800 A/n x 6 kW
Nulllastfähigkeit
Redundanter Betrieb, geregelt parallel
Keine Entkoppeldiode erforderlich

SYKO®

Hilfsbetriebe-Umrichter bis zu $\Sigma >45$ kW/62 kW

AC Teil potentialgetrennt

Kompressoren
n x 6 kW/3 Ph/480 V/60 Hz-8 kW/20 sek-10 kW/4 sek (I²t) f-U-control

Ventilatoren
n x 6 kW/8,5 kW dyn. 1 Ph 230 V/50 Hz

Servicesteckdosen

SYKO Ges. für Leistungselektronik mbH
63533 Mainhausen
Tel: +49 6182 9352-0/Fax: -15
www.syko.de/info@syko.de

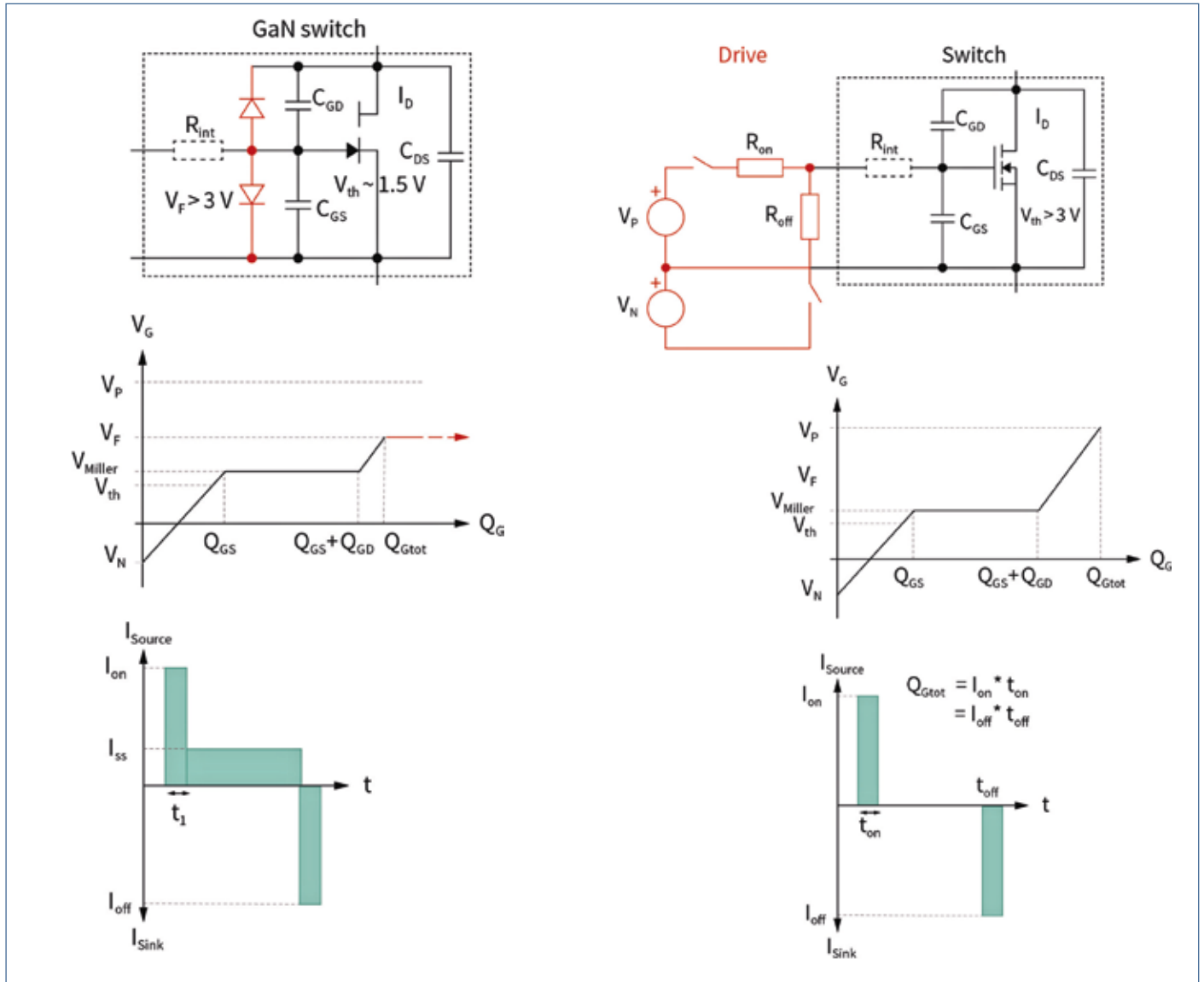


Bild 3: Hier sind schematisch die Gate-Ansteuerung und die Kennlinien eines MOSFETs und eines GaN-HEMT im E-Modus dargestellt.

schaltenden Anwendungen wegen der Verkürzung der erforderlichen Totzeit; außerdem werden so höhere Betriebsfrequenzen ohne Anstieg der Verluste möglich.

Ausgangsernergie E_{oss} : Während Q_{oss} bei GaN-Transistoren um eine Größenordnung niedriger ist als bei SJ-MOSFETs, gilt das nicht in diesem Ausmaß für E_{oss} , die in C_{oss} gespeicherte Energie. Im Wesentlichen ist das ebenfalls auf die nicht-lineare Ausgangskapazität bei SJ-Transistoren zurückzuführen. Dort wird die meiste Ladung bei einer niedrigen Spannung V_{DS} gespeichert und daher eine geringere Energie benötigt als für die eher lineare Kapazität der GaN-HEMTs. Infolge dessen ergibt sich bei E_{oss} eine relativ bescheidene Verbesserung um 25% gegenüber SJ-Transistoren. Dies gilt für einzelne Schalter. In vielen Leistungselektronik-Topologien werden allerdings Halbbrücken aus

zwei gegeneinander arbeitenden Schaltern verwendet, und in diesen Fällen ist GaN wieder deutlich im Vorteil. Insbesondere in hart-schaltenden Anwendungen (beispielsweise Leistungsfaktorkorrekturschaltung PFC) können GaN-Transistoren in Funktionen eingesetzt werden, für die SJ-MOSFETs schlicht ungeeignet sind (z.B. als Diode wegen der extrem hohen Speicherladung einer MOSFET-Bodydiode). Dadurch ermöglicht GaN attraktive neue Lösungen wie die sogenannte Totem-Pole-PFC.

Diode-Speicherladung Q_{tr} : GaN-Transistoren haben konstruktionsbedingt keine Diode zwischen Drain und Source, das heißt, Q_{tr} ist Null. Insbesondere in hart-schaltenden Anwendungen (etwa Leistungsfaktor-Korrekturschaltung PFC) können GaN-Transistoren dadurch auch in Funktionen eingesetzt werden, für die SJ-MOSFETs wegen ihrer

extrem hohen Diode-Speicherladung schlicht ungeeignet sind. Dadurch ermöglicht GaN attraktive neue Systemlösungen wie die Totem-Pole PFC.

Gate-Ladung Q_g : Von der Gate-Ladung hängt es ab, wie schnell und wie häufig ein Transistor ein- und ausgeschaltet werden kann – eine kleine Gate-Ladung ermöglicht hohe Arbeitsfrequenzen. CoolGaN-Transistoren haben gegenüber SJ-Transistoren mit dem gleichen $R_{DS(on)}$ nur etwa ein Siebtel der Gate-Ladung.

Ohmsche Verluste: Der Temperaturkoeffizient von $R_{DS(on)}$ für CoolGaN-Transistoren ist niedriger als bei SJ-Silizium-Transistoren. Zwischen 25 und 150 °C erhöht sich $R_{DS(on)}$ für GaN auf das Doppelte, bei SJ-Transistoren auf das 2,4-Fache. 20% Unterschied im Temperaturkoeffizienten bedeutet, dass bei gleichen Nennwerten für $R_{DS(on)}$ die ohmschen

Verluste in CoolGaN-Transistoren bei Betriebstemperatur niedriger sind. Daher ermöglichen GaN-Schalter bessere Wirkungsgrade bzw. Leistungsdichten, die mit aktuellen Siliziumtransistoren nicht erreichbar sind.

Eine negative Gate-Spannung garantiert sicheres Ausschalten

Wie bereits erläutert sind GaN-HEMTs mit ohmschem p-GaN-Gate robuste und zuverlässige Leistungsschalter, unterscheiden sich jedoch signifikant von MOSFETs. Das Gate-Modul ist nicht vom Kanal isoliert, sondern verhält sich wie eine Diode mit einer Durchflussspannung V_F von 3 bis 4 V. Im eingeschalteten Zustand wird ein geringer permanenter Gate-Strom benötigt, um stabile Betriebsbedingungen zu erreichen. Der Schalter ist normalerweise nichtleitend, die Schwellenspannung V_{th} ist jedoch recht niedrig (etwa +1 V). Daher ist in vielen Anwendungen die bei MOSFETs übliche Gate-Spannung 0 nicht ausreichend für ein sicheres Ausschalten, sondern es ist eine negative Gate-Spannung ($-V_N$) von einigen Volt erforderlich.

Der GaN-EiceDRIVER zum Ansteuern von CoolGaN

Ein CoolGaN-Schalttransistor kann nicht so angesteuert werden wie ein konventioneller MOSFET, weil ständig ein Strom fließen muss (I_{ss}) und die Abschaltspannung negativ ist ($-V_N$) (Bild 3). Für I_{ss} sind einige mA ausreichend; bei schnell schaltenden Über-

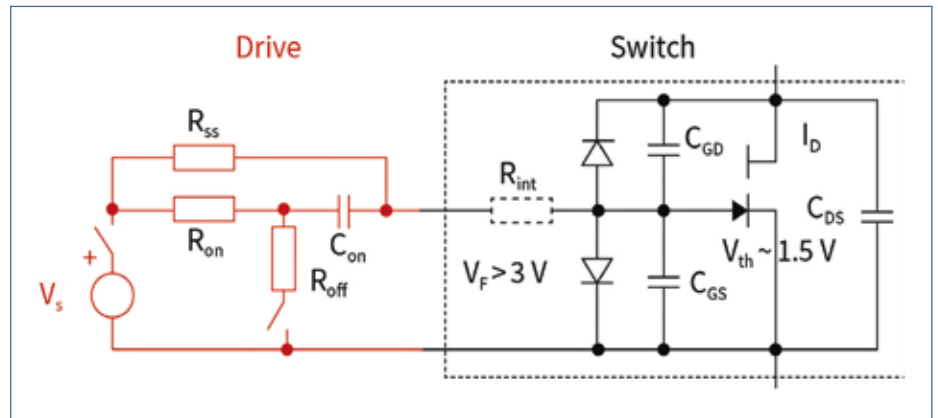


Bild 4: Vorschlag für eine Ansteuerschaltung für das Gate eines GaN-HEMT im E-Modus.

gangsbedingungen sind jedoch Gate-Ladeströme bis zu 1 A erforderlich. Um das gewünschte Verhalten zu erreichen und einen speziellen Treiber mit zwei getrennten Einschaltpfaden und bipolarer Versorgungsspannung zu vermeiden, wird üblicherweise ein Standard-Gate-Treiber mit einer passiven RC-Schaltung kombiniert. Ein kapazitiv gehoppelter, niederohmiger Pfad liefert einen hohen Strom während des Schaltvorgangs, während parallel dazu ein größerer Widerstand einen kleinen Dauerstrom für das Gate definiert. Darüber hinaus kann die Kopplungskapazität (C_c) zur Erzeugung einer negativen Spannung verwendet werden. Im leitenden Zustand wird C_c auf die Differenz zwischen der Treiber-Betriebsspannung und der GaN-Gate-Diodenspannung aufgeladen.

Bei Umschaltung in den nicht leitenden Zustand wird diese Ladung zwischen C_c und C_{GS} umverteilt und erzeugt eine erste negative Gate-Spannung ($-V_N$). Bild 4 zeigt die empfohlene Gate-Treiberschaltung für die CoolGaN-Transistoren von Infineon.

Eine RC-Schaltung kann zwar vorübergehend eine negative Gate-Ansteuerspannung (V_N) aufbringen, die aber mit einer gewissen Zeitkonstante wieder auf 0 abfällt; unter Umständen reicht das nicht aus, um sicherzustellen, dass der Transistor unter allen dynamischen Schaltbedingungen nicht leitend bleibt. Der ideale Gate-Treiber müsste die benötigte Mindestspannung V_N für eine konstante Zeit (die länger ist als die Totzeit des Systems) aufbringen. Danach würde die Gate-Spannung wieder auf 0 geschaltet, um

Neue HybridPACK-Module für xEV-Inverter

Mit einer Reihe weiterer Leistungsmodule für Hauptumrichter unterstützt Infineon die Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Allein vier HybridPACK-Drive-Module sind für Inverter im Leistungsbereich von 100 bis 200 kW vorgesehen. Für Hauptumrichter bis 80 kW in Hybrid- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen mit hohen Anforderungen an die Leistungsdichte gibt es das HybridPACK Double Sided Cooling (DSC) S2, eine technisch aufgerüstete Variante des bestehenden HybridPACK DSC. Alle neuen HybridPACK-Drive-Leistungsmodule haben die gleiche Grundfläche wie das bereits eingeführte Modul (FS820R08A6P2x) der Produktfamilie. Ohne das System-Design wesentlich verändern zu müssen, soll die Inverter-Performance schnell und

einfach skalierbar sein. Für moderate Leistung gibt es HybridPACK Drive Flat (FS660R08A6P2Fx) und Wave (FS770R08A6P2x) als Teil der Produkte für kostenoptimierte Inverter-Lösungen mit 100 bis 150 kW. Ihre Bodenplatte für die Verbindung zum Kühlelement des Inverters haben verschiedene Strukturen mit unterschiedlicher Wärmeabfuhr. Indes ist FS380R12A6T4x eine Variante des HybridPACK-Drive-Performance-Moduls (150 kW). Während auch hier die Pin-Fin-Bodenplatte mit der neuen Keramik zum Einsatz kommt, wird ein Chip-Satz mit IGBT4 verwendet. Damit liegt die Sperrspannung bei 1200 V und ist insbesondere für E-Fahrzeuge geeignet, die mit einer Batteriespannung ab 700 V auf besonders schnelles Laden ausgerichtet sind (Schaltfrequenzen bis 8 kHz).



Bild: Infineon

HybridPACK DSC S2: Die Leistung des Moduls konnte um 40% erhöht werden.



Bild: Infineon

HybridPACK Drive Wave: Die Bodenplatten gibt es mit verschiedene Strukturen (hier Wave).

identische Bedingungen für die nächste Einschaltung zu gewährleisten. Falls jedoch ein nicht leitender Zustand deutlich länger dauert als eine normale Schaltperiode, sollte die Gate-Spannung wieder auf einen negativen Wert geschaltet werden, um nach dem ersten Impuls ein mögliches unerwünschtes Einschalten zu vermeiden.

Genau das wird mit der neuen GaN-EiceDRIVER-Familie von Infineon erreicht. Aufgrund eines neuen differentiellen Konzepts (Patent angemeldet) können diese dedizierten Gate-Treiber die Vorteile der RC-Schaltung (beispielsweise Einfachheit, Programmierbarkeit) nutzen und zugleich die mit diesem Konzept verbundenen Nachteile vollständig vermeiden.

Anwendung der GaN-Bausteine in einem Schaltnetzteil

Ein interessantes Beispiel für die Anwendung von CoolGaN-Systemen im Segment der Schaltnetzteile ist das SHE-Netzteil (mit besonders hohem Wirkungsgrad) für 3 kW mit dem modernsten Produkt der Eltek-Flatpack2-Familie, dessen Spitzenwirkungsgrad bei 98% liegt: Es gibt mehrere Verfahren, um den Wirkungsgrad von 98% zu erreichen, aber nur mit CoolGaN-Transistoren ist derzeit dies einfach, zuverlässig und kostengünstig möglich. Warum ist CoolGaN der Schlüssel zur hervorragenden Leistung des Eltek-SHE-Netzteils? Ein Spitzenwirkungsgrad von 98%, wie er üblicherweise im Lastbereich von 30% bis 50% erwartet wird, ist nur durch sorgfältige Auswahl der Topologien sowohl in der PFC- als auch in den isolierten HV-DC/DC-Stufen des Netzteils möglich. Natürlich müssen diese Stufen jeweils einen Spitzenwirkungsgrad von über 99% erreichen und eine gewisse Reserve besitzen, damit in der Massenproduktion der Gesamtwert garantiert werden kann.

Mit sorgfältig dimensionierten, resonant schaltenden Topologien lässt sich in einer HV-DC/DC-Stufe dieses Ziel ohne wesentliche Probleme erreichen. Der Engpass bei solchen Konstruktionen ist meist die Schaltung zur Leistungsfaktorkorrektur.

Betrachtung zur brückenlosen PFC und Totem-Pole-Schaltung

Die bekanntesten und relativ unkompliziert einsetzbaren PFC-Topologien arbeiten mit harter Umschaltung. Sie enthalten in der Regel eine Vollwellen-Gleichrichterbrücke und eine Boost-Schaltung. In dem Leistungspfad existieren immer zwei Spannungsabfälle an den Dioden der Eingangsbrücke und einer in der Boost-Stufe: Die zugehörigen Verluste begrenzen den Wirkungsgrad des

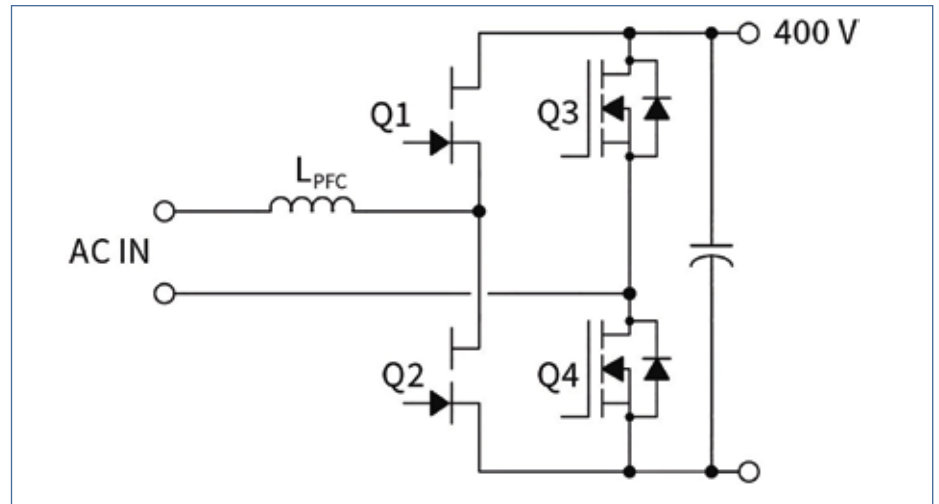


Bild 5: Der brückenlose Totem-Pole-PFC-Wechselrichter.

Gesamtsystems, sodass es faktisch unmöglich ist, die angestrebte Effizienz von 99% zu erzielen. Eine erste Verbesserung kann durch Beseitigung der Diodenbrücke im Eingang erreicht werden, wenn sogenannte brückenlose PFC-Topologien Verwendung finden. Bei detaillierter Analyse und Vergleich der am häufigsten verwendeten brückenlosen Wechselrichter ergibt sich, dass der brückenlose Totem-Pole-PFC-Wechselrichter (Bild 5) mit einer geringen Anzahl von Komponenten auskommt und die geringsten Leistungsverluste aller brückenlosen Topologien aufweist.

Bei diesem Konzept werden alle Dioden im Strompfad durch Halbleiterschalter ersetzt. Die geringere Anzahl von Komponenten macht die Topologie sowohl aus Leistungs- als auch aus Kostengründen attraktiv. Andererseits sind bestimmte Aspekte unbedingt zu berücksichtigen und sorgfältig zu analysieren.

Die Totem-Pole-PFC-Schaltung arbeitet im CCM-Betrieb (Konstantstrombetrieb), d.h. der Eingangsstrom wird je nach Lastzyklus zwischen den Transistoren Q1 und Q2 kommutiert. Während der sogenannten Totzeit (wenn sowohl Q1 als auch Q2 nicht leiten) muss der Strom in umgekehrter Richtung (von Source nach Drain) durch Q1 bzw. Q2 fließen. Beim folgenden Einschaltvorgang würde bei Verwendung von SJ-MOSFETs für Q1/Q2 wegen des großen Q_{tr} der Bodydiode extrem hohe Stromspitzen und somit Schaltverluste auftreten. Diese Probleme machen es unmöglich, SJ-MOSFETs im CCM-Modus in brückenlosen Totem-Pole-PFC-Schaltungen einzusetzen, es sei denn, es werden komplexe Schutzschaltungen genutzt, die die Zahl der Komponenten und die Kosten extrem erhöhen. Mit anderen Worten: das

Totem-Pole-Konzept für den CCM-Betrieb kann nur mit effizienten Leistungshalbleitern funktionieren, bei denen keine Probleme durch die Speicherladung einer Bodydiode auftreten.

Der CoolGaN-Transistor ist die geeignete Wahl für diese Anwendung: durch die fehlende Ladung Q_{tr} kann ein ordnungsgemäßer Schaltbetrieb in der CCM-Totem-Pole-Topologie erfolgen; gleichzeitig werden die Einschaltverluste reduziert. Die extrem geringe Gate-Ladung, die geringe in der Ausgangskapazität gespeicherte Energie und die allgemein vernachlässigbaren Abschaltverluste sind weitere Vorteile von CoolGaN-Schaltern in dieser Topologie.

Optimierung mit GaN auf 98% Spitzenwirkungsgrad

Aus diesem Beispiel lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von CoolGaN die beste Lösung ist, um den Wirkungsgrad einer Totem-Pole-PFC-Schaltung im CCM-Betrieb zu optimieren. Eltek erreicht in dem 3-kW-Netzteil einfach, zuverlässig und kostengünstig einen Spitzenwirkungsgrad von 98%.

Das Bauteil wird für 400-V-Anwendungen als Variante mit 70 mΩ $R_{DS(on)}$ mit unterseitig gekühltem TO-Leadless-Gehäuse gefertigt und als oberseitig gekühltes DSO-20-87 zur Oberflächenmontage. Die 600-V-Familie gibt es im oberseitig gekühlten DSO-20-87-Gehäuse und unterseitig gekühlten DSO-20-85. Abgerundet wird das CoolGaN-Portfolio bei der 600-V-Variante mit dem unterseitig gekühlten TO-Leadless- sowie dem DFN-8x8-Gehäuse. Beide Varianten gibt es in der Widerstandsklasse 70 mΩ und 190 mΩ. // KU

Infineon Technologies