



Bild: andreas160578 / Pixabay; alle anderen Bilder: Infineon Technologies

Mehr Power aus der Säule

Um die Leistungsfähigkeit von Umrichtern zu verbessern, wie sie etwa in Ladesäulen eingesetzt werden, sind Mosfets aus Siliziumkarbid in einer Brückentopologie bei vielen Systementwicklern ein aktuelles Thema. Doch worauf sollte man bei deren Einsatz achten? Es folgen einige Designrichtlinien.

Dr. Fanny Björk

Senior Specialist,

Dr. Zhihui Yuan

Technical Marketing Manager, beide bei Infineon Technologies

Effizienz und Produktivität steigern sowie gesetzliche Vorgaben erfüllen – das sind die wichtigsten Faktoren, die die Markttrends bei leistungselektronischen Anwendungen derzeit beeinflussen. Um mit weniger Energie wenn möglich mehr zu erreichen, sind höhere Wirkungsgrade und kleinere, leichtere Systeme erforderlich. Leistungshalbleiter bieten hier neue Potenziale für die gesamte Kette der elektrischen Energieversorgung, von der Bereitstellung und Übertragung des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien am Energiemix bis hin zum Verbraucher.

Zwar ermöglichen Silizium-Mosfets und -IGBTs der neuesten Generation in vielen Fällen noch effektive Lösungen,

aber Transistoren aus Wide-Bandgap-Materialien wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) eröffnen ein neues Niveau an Designfreiheit. Neue Zielvorgaben lassen sich dadurch leichter erreichen. Der Artikel erläutert den Übergang von Silizium zu Siliziumkarbid bei dreiphasigen Leistungsumrichtern. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Designaspekten bei Brückentopologien, wie sie zum Beispiel bei Batterieladegeräten und in Servoantrieben zum Einsatz kommen.

Ein SiC-Mosfet mit einer Sperrspannung von 1200 V bietet sich aus verschiedenen Gründen als Ersatz für eine Siliziumtechnologie an. Im Vergleich zu einem siliziumbasierten IGBT mit gleicher Sperrspannung sind vor allem die gerin-

geren dynamischen Verluste interessant. Da im leitenden Zustand keine Minoritätsträger vorhanden sind, weist das Bauteil beim Abschalten keine Tail-Ströme auf. Das reduziert die Abschaltverluste erheblich.

Auch die Einschaltverluste sind im Vergleich zu IGBTs geringer. Hauptgrund dafür sind die niedrigen Einschaltstromspitzen aufgrund der geringen Sperrverzögerungsladung (Reverse Recovery) der Body-Diode. Im Gegensatz zu IGBTs sind sowohl die Ein- als auch die Ausschaltverluste temperaturunabhängig. Bei Mosfets dominieren typischerweise die Einschaltverluste, während die Ausschaltverluste sehr gering sind – bei IGBTs ist oft das Gegenteil der Fall.

Die Schalteigenschaften eines 1200-V-SiC-Mosfets mit seinen steilen Schaltflanken ist mit denen eines 650-V-Superjunction-Mosfet aus Silizium vergleichbar. Zudem besitzt ein SiC-Mosfet eine verlustarme Body-Diode und aufgrund der fehlenden Superjunction-Struktur und des schnellen Schaltverhaltens eignet er sich für harte Kommutierungen. Topologien und Lösungen, die bis dato nur mit 650-V-Komponenten in einphasigen Leistungswandlern realisiert wurden, lassen sich nun auch bei höheren Busspannungen in dreiphasigen Systemen einsetzen.

■ Parasitäres Einschalten und Einschaltverluste

Um die geringen dynamischen Verluste zu erreichen, die mit SiC-Mosfets theoretisch möglich sind, müssen bestimmte Bauteilparameter gut aufeinander abgestimmt sein. Hohe dynamische Verluste können etwa von parasitärem Einschalten (Parasitic Turn-On, PTO) herrühren. Dieses Phänomen tritt auf, wenn die Body-Diode des Mosfets abgeschaltet wird und dadurch die Gate-Spannung durch die Rückkopplung über den kapazitiven Spannungsteiler aus Miller-Kapazität C_{DG} und Gate-Source-Kapazität C_{GS} ungewollt ansteigt. Übersteigt die Gate-Spannung in einer solchen Situation die Schwellspannung, dann fließt kurzzeitig ein Querstrom (Shoot Through) durch beide Schalter einer Halbbrücke. Wie hoch dieser Strom und die damit verbundenen Schaltverluste sind, hängt von den Betriebsbedingungen und der Hardware ab. Kritisch sind hohe Zwischenkreisspannungen, steile Spannungsschaltflanken und hohe Gate-Widerstände beim Ausschalten. Mehr Details darüber finden sich in »Characterization of the parasitic turn-on behavior of discrete CoolSiC Mosfets« [1]. Wie anfällig ein Mosfet für diesen unerwünschten Effekt ist, lässt sich durch das Verhältnis der Mosfet-Kapazitäten $C_{DG}/(C_{DG}+C_{GS})$ und die Gate-Schwellspannung $U_{GS,th}$ abschätzen.

Bild 1 zeigt eine solche Abschätzung auf Basis der Datenblattangaben der neuesten auf dem Markt erhältlichen SiC-Mosfet-Generationen. Sie verdeutlicht die gravierenden Unterschiede verschiedener Technologien und zeigt, dass es nur zwei Hersteller gibt, die Produkte mit einer inhärenten Unempfindlichkeit gegen parasitäres Einschalten anbieten: Bei ihnen übersteigt der durch die Miller-Kapazität verursachte Gate-Spannungshub nicht die Schwellspannung.

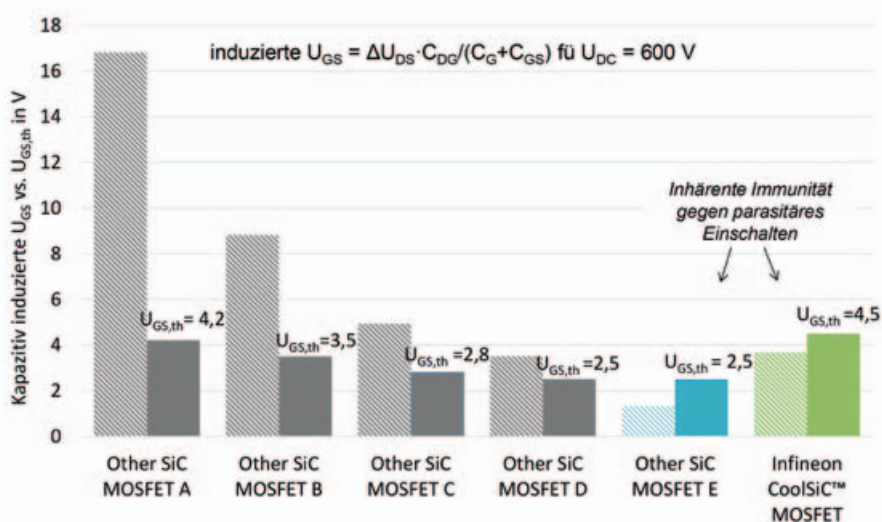


Bild 1: Datenblattvergleich der Resistenz gegenüber unerwünschtem parasitärem Einschaltverlusten verschiedener 1200-V-SiC-Mosfets. Dabei wurde der kapazitiv eingekoppelte Anstieg der Gate-Spannung im Vergleich zur typischen Schwellspannung der Komponenten berechnet. Die verschiedenen SiC-Mosfets haben einen Nenn-Einschaltwiderstand von 60 mΩ bis 80 mΩ.

Ein niedriges Kapazitätsverhältnis ist offenbar vorteilhaft, wenn es darum geht, parasitäres Einschalten zuverlässig zu verhindern. Aber je niedriger die Miller-Kapazität C_{DG} wird, desto schwieriger lassen sich die Schaltgeschwindigkeiten des Bauelements über das Gate beeinflussen. Es gilt also, einen möglichst optimalen Kompromiss zwischen der Unempfindlichkeit gegen parasitäres Einschalten und der Steuerbarkeit des Schaltverhaltens zu finden. Die hohe Schwellspannung von über 4 V bei CoolSiC-Mosfets nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein. Damit lässt sich ein parasitäres Einschalten auch bei sehr schnellen Schaltvorgängen minimieren.

Die Einschaltverluste wurden auf einem handelsüblichen Evaluation-Board [2] von Infineon gemessen (Bild 2). Die erreichbaren minimalen Einschaltenergien der verschiedenen SiC-Mosfet-Bauelemente wurden bei 800 V, 15 A und +150 °C mit einer Gate-Spannung von 0 V und einem externen Gate-Widerstand von 4,7 Ω gemessen. Als Einschaltspannung U_{GS} wurde die in den jeweiligen Datenblättern empfohlene Spannung verwendet, das heißt, ein Wert zwischen +15 V und +20 V. Als Referenz diente ein schnell schaltender Silizium-IGBT von Infineon mit einer Sperrspannung von 1200 V.

Aufgrund der Unempfindlichkeit gegen parasitäres Einschalten erreicht der CoolSiC-

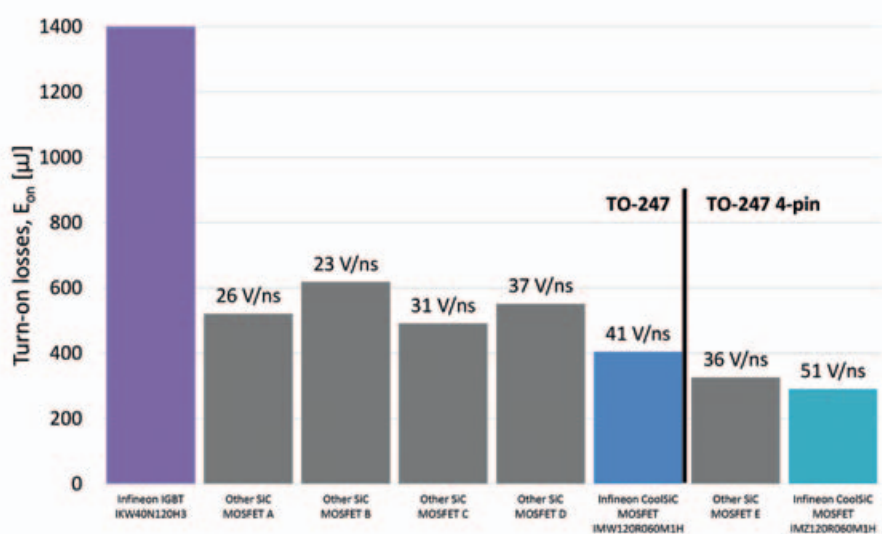


Bild 2: Minimale erreichbare Einschaltverluste und zugehörige du/dt -Werte für eine Gate-Spannung beim Abschalten von 0 V, gemessen auf einer Doppelpuls-Leiterplatte [2] mit handelsüblichen SiC-Mosfets mit 60 mΩ bis 80 mΩ.

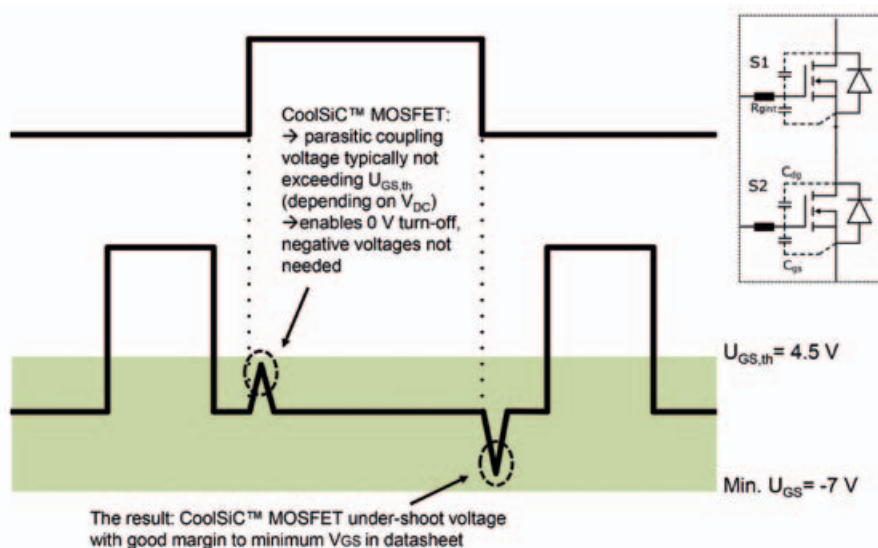


Bild 3: Schematische Darstellung der Gate-Spannung während des Ein- und Ausschaltens inklusive der kapazitiv eingekoppelten Spannungen. Die angegebenen Parameter beziehen sich auf das Produktdatenblatt des IMZ120R060M1H [3].

Mosfet von Infineon bei schnellen Schaltvorgängen Flankensteilheiten von mehr als 40 V/ns. Daraus resultieren Einschaltenergien, die die niedrigsten aller SiC-Bauteile in diesem Vergleich sind. Gegenüber einem schnell schaltenden IGBT sinken die Einschaltverluste sogar um 80 Prozent. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Messergebnisse nicht vollständig mit den in Bild 1 gezeigten Rechenwerten korrelieren. Erklären lässt sich dies durch Vereinfachungen, auf der die Berechnungsvorschrift basiert: Es wurden ausschließlich Kapazitätswerte bei 600 V verwendet und als konstant angenommen, darüber hinaus wurde der Einfluss des Gate-Widerstands ignoriert.

Aus Bild 2 geht deutlich hervor, dass ausnahmslos bei allen SiC-Bauteilen die Einschaltverluste gegenüber einem IGBT signifikant sinken. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Steilheit der Schalttransienten einiger SiC-Mosfets eher als moderat einzustufen ist – ein klares Indiz für die hohe Leistungsfähigkeit der 1200-V-SiC-Mosfets. Zudem veranschaulicht Bild 2 deutlich, dass TO-247-Gehäuse mit einem vierten, separaten Kelvin-Source-Anschluss noch steilere Flanken (>50 V/ns) und niedrigere Schaltverluste erlauben als Standard-TO-247-Gehäuse mit nur drei Anschlüssen. Bereits bei verhältnismäßig niedrigen Strömen von 15 A sinken die Schaltverluste um zehn Prozent. Bei höheren Strömen steigt dieser Prozentsatz. Verantwortlich dafür ist eben dieser separate Kelvin-Source-Anschluss, weil er die negative Rückkopplung des Laststromanstiegs in den Gate-Kreis minimiert.

■ Gate-Ansteuerung für sicheren Betrieb

Parasitäre Einschaltpulsspannungen in SiC-Mosfets erhöhen nicht nur die dynamischen Verluste, sondern mit Blick auf die maximalen Gate-Nennspannungen auch den sicheren Betrieb und damit die Zuverlässigkeit des Gate-Oxids. Um parasitäre Einschaltpulsspannungen zu verhindern, kann eine negative Gate-Spannung zum Abschalten verwendet werden. Problematisch ist dabei jedoch oftmals, dass die im Datenblatt angegebene maximale negative Gate-Spannung durch den negativen Spannungshub, den die Miller-Kapazität

verursacht, überschritten wird. Bild 3 zeigt schematisch eine solche Situation.

Wie in den Bildern 1 und 2 zu erkennen ist, verkraften CoolSiC-Mosfets im TO-247-Gehäuse steile du/dt-Anstiege, ohne dass es zu signifikanten parasitären Einschaltpulsspannungen und Spannungsunterschreitungen kommt. Bei dieser Mosfet-Familie lassen sich somit sowohl die Leistungsparameter (dynamische Verluste) als auch die Betriebssicherheit innerhalb der Datenblattgrenzen anpassen. Bei sorgfältig ausgelegten Platinen-Layouts mit minimierter zusätzlicher Gate-Drain-Kapazität lassen sich diese Bauteile mit einer Abschaltspannung von 0 V betreiben. Somit steht einem einfachen unipolaren Gate-Ansteuerungsverfahren nichts im Wege – ohne Abstriche bei der Effizienz.

■ Anwendungsbeispiel Servoantrieb

In Industrierobotern oder Automatisierungslösungen werden Servoantriebe eingesetzt, die typischerweise mit leistungsstarken und kompakten Umrichtern ausgestattet sind. Solche Anwendungen lassen sich dank der Eigenschaften der SiC-Mosfets optimieren [4]. Die Leit- und Schaltverluste können in allen Betriebsarten reduziert werden: bei Beschleunigung, konstanter Drehzahl und im Bremsmodus. Üblicherweise laufen Servoantriebe mindestens 90 Prozent der Betriebszeit mit konstanter Drehzahl. Dies bedeutet normalerweise ein niedriges Drehmoment und eine geringe Stromaufnahme. Hier

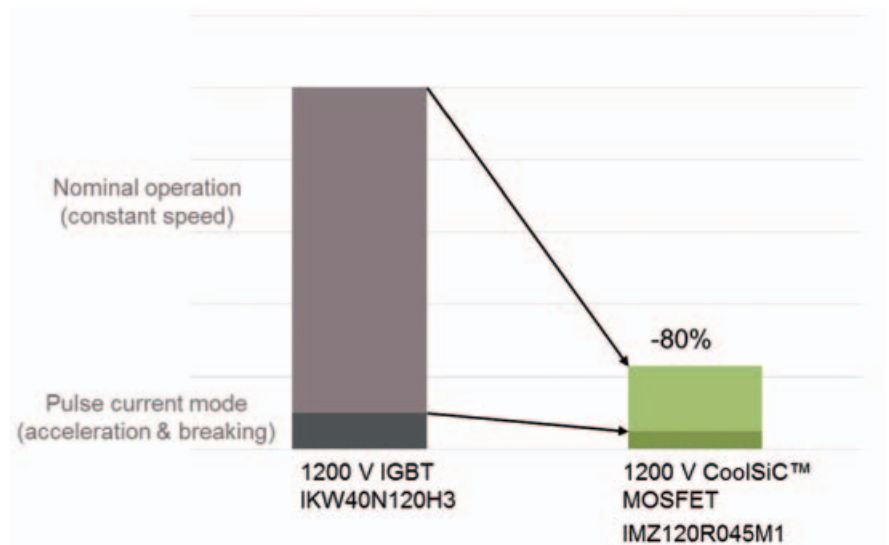


Bild 4: Typische Reduzierung der Systemverluste in einem Umrichter für Servoantriebe unter Berücksichtigung aller Betriebsarten. Für die Berechnung wurde ein CoolSiC-Mosfet mit 45 mΩ und einer Sperrspannung von 1200 V mit einem Si-IGBT für 40 A und einer Sperrspannung von 1200 V in einer Zwei-Level-B6-Topologie verglichen.

können SiC-Mosfets gegenüber einem IGBT die Verluste um insgesamt circa 80 Prozent senken (Bild 4). Dies ist nicht nur auf geringere dynamische Verluste zurückzuführen, sondern auch auf geringere Leitverluste aufgrund der ohmschen Ausgangskennlinie ohne Knickspannung.

Beim Beschleunigen und Abbremsen arbeitet der Antrieb normalerweise mit wesentlich höheren Strömen. Hier ließen sich die dynamischen Verluste gegenüber einem IGBT um bis zu 50 Prozent reduzieren – selbst wenn die Spannungsflanke auf 5 V/ns begrenzt war.

Da sich die Verluste durch die neuen Halbleiter um bis zu 80 Prozent reduzieren lassen, können die damit ausgerüsteten Servoumrichter mit höheren Pulsströmen arbeiten, sie fallen kompakter aus (gleiche Baugröße bei höheren Strömen) und die Abmessungen der Lüfter und Kühlkörper können kleiner sein. Dadurch lässt sich der Umrichter oft sogar in den Motor integrieren. Aufgrund des hart schaltenden Betriebs in der typischerweise verwendeten B6-Topologie sind niedrige dynamische Verluste, fehlendes parasitäres Einschalten und eine robuste, für harte Kommutierung geeignete Body-Diode die wichtigsten Merkmale, die für den Einsatz von SiC-Mosfets in dieser Anwendung sprechen.

■ Anwendungsbeispiel Batterieladegerät

Ein schnelles Gleichstrom-Ladesystem, das über das Drehstromnetz gespeist wird, ist ein entscheidender Faktor für die weitere Marktentwicklung bei Elektrofahrzeugen. Denn dadurch lassen sich die Bedenken der Nutzer wegen zu geringer Reichweite ausräumen. Entwickelt werden auch Energiespeicherlösungen für die genannte Ladeinfrastruktur, die mit bidirektionalen Wandlern für das Laden und Speisen der Systeme ausgerüstet werden. An immer mehr Standorten, an denen nachhaltige Energiequellen wie Solarmodule zum Laden von Elektrofahrzeugen und für andere Zwecke genutzt werden können, werden Batterieblöcke aufgestellt.

Moderne Batterieladegeräte verwenden LLC-Topologien mit entlastetem Schalten in der DC-DC-Stufe (Bild 5a). Da nur bei Silizium-Bauelementen mit 650 V Sperrspannung die dynamischen Verluste gering genug sind, sind bei einer Gleichspannung von 800 V zwei kaskadierte LLC-Vollbrücken nötig.

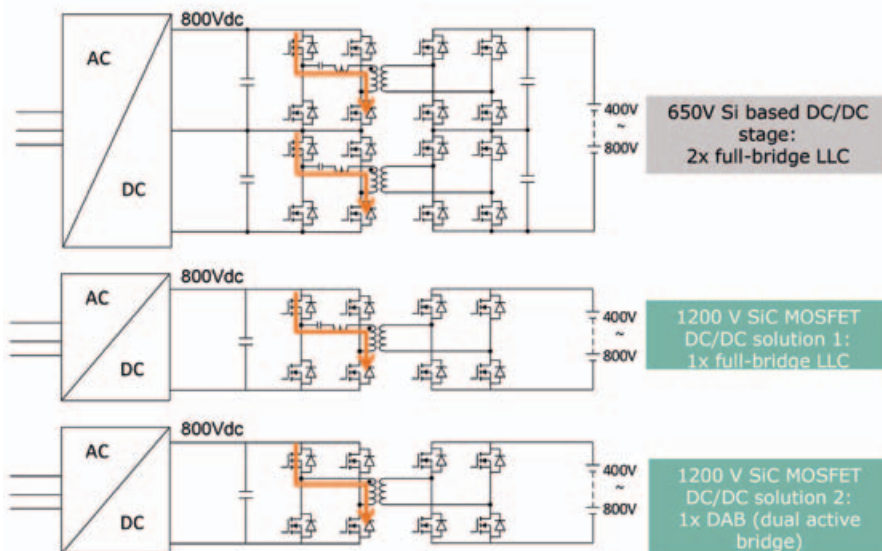


Bild 5: Aus dem Drehstromnetz gespeistes Gleichstrom-Batterieladegerät. Die Sekundärseite erlaubt bidirektionalen Leistungsfluss. Lösung mit siliziumbasierten Komponenten (oben), verglichen mit der Schaltung unter Verwendung eines SiC-Mosfets mit einer Sperrspannung von 1200 V. Die Pfeile zeigen, dass sich mit SiC-Mosfets aufgrund der geringeren Zahl der Schalter im Strompfad die Leitverluste halbieren lassen.

Kommen jedoch SiC-Mosfets mit einer Sperrspannung von 1200 V zum Einsatz, kommt man mit der halben Anzahl an Schaltern und Ansteuer-ICs aus (Bild 5b). Dadurch sinkt nicht nur der Platzbedarf, auch der Wirkungsgrad lässt sich optimieren. Bei einer SiC-Mosfet-Lösung sind in jedem Betriebszustand nur zwei Schalter leitend, bei der Siliziumlösung mit 650-V-Schaltern dagegen vier. Systeme mit siliziumbasierten Komponenten sind heute typischerweise auf einen Systemwirkungsgrad von etwa 97 Prozent optimiert. Durch die Halbierung der Leitverluste und die niedrigeren Abschaltverluste aufgrund der kleineren Ausgangskapazitäten in einem SiC-Mosfet kann der Wirkungsgrad um einen Prozentpunkt steigen. Bei bidirektionalen Ladegeräten bedeutet dies eine Einsparung von mindestens zwei Prozent Batterieleistung.

Die niedrigen Gesamtschaltverluste eines SiC-Mosfets für 1200 V, kombiniert mit einer schnellen internen Body-Diode, die für harte Kommutierung geeignet ist, sind auch für traditionelle Lösungen mit harter Kommutierung wie die Dual-Active-Bridge interessant (Bild 5c). Das bedeutet deutlich weniger Aufwand für die Steuerung, insgesamt geringere Komplexität und weniger Komponenten machen solche Lösungen immer attraktiver.

■ Fazit

Das Portfolio an CoolSiC-Mosfets von Infineon für 1200 V in TO-247-Gehäusen

eignet sich sowohl für neue Anwendungen wie Batterielade-Infrastrukturen und Energiespeicherlösungen als auch für etablierte Anwendungen wie Servoantriebe. In Topologien mit hartem und weichem Schalten verbessern diese Mosfets die Effizienz, reduzieren die Anzahl der erforderlichen aktiven Bauelemente sowie die Komplexität des Systems.

Zudem sind CoolSiC-Mosfets unempfindlich gegen unerwünschtes parasitäres Einschalten. Sie haben daher die niedrigsten dynamischen Verluste aller aktuellen SiC-Mosfets, erleichtern den Schaltungsentwurf unter Berücksichtigung des sicheren Betriebs innerhalb der Datenblattgrenzen und erlauben es, mit einer Gate-Abschaltspannung von 0 V zu arbeiten. Eine einfache, unipolare Gate-Ansteuerung ohne Abstriche beim Wirkungsgrad ist damit möglich. (rh)

REFERENZEN

- [1] K. Sobe, et al., Characterization of the parasitic turn-on behavior of discrete CoolSiC Mosfets, PCIM Europe 2019, Nürnberg, Deutschland, 2019
- [2] 1200V HighSpeed 3 IGBT in TO-247PLUS Evaluation Board, <https://tinyurl.com/y4mlbd6o>, Infineon
- [3] Datenblatt IMZ120R060M1H (CoolSiC 1200 V SiC Trench Mosfet), <https://tinyurl.com/y26lxfvq>
- [4] Beckhoff zeigt dezentrales Servoantriebssystem, <https://tinyurl.com/y35gouc>, Wir Automatisierer