

High temperature / power density / output frequency SiC dc-ac converter system for hybrid electric vehicles

Doctoral Thesis

Author(s):

Wrzecionko, Benjamin T.

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009943735>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 20944

**HIGH TEMPERATURE /
POWER DENSITY /
OUTPUT FREQUENCY
SIC DC-AC CONVERTER SYSTEM
FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
BENJAMIN TOBIAS WRZECIONKO
Dipl.-Ing., RWTH Aachen University
born 16 June 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner
Prof. Dr. Hans-Peter Nee, co-examiner

2013

Abstract

In this Ph. D. dissertation, a compact power electronic SiC inverter system with high output frequencies and direct air-cooling for use in hybrid vehicles at an ambient temperature of 120 °C is investigated in detail.

The research and development of hybrid and electric vehicles has intensified significantly in recent years and still continues to grow. The focus is on power electronic converters as links between the electrical energy storage on the one hand and the electrical machine or conventional 12 V loads on the other hand. The use of power electronics in vehicles is subject to specific requirements concerning power density, power to weight ratio, efficiency and cost. Furthermore, a high resistance to harsh environmental conditions, e.g. extreme ambient temperatures and vibrations, is required. In addition, a trend towards the use of compact electrical machines with high rotational speeds, which require significantly higher output and switching frequencies of the supplying power electronics converters, can be identified. Novel semiconductor devices based on silicon carbide (SiC), allow high switching speeds as well as the operation at high junction temperatures and can thus potentially contribute to the fulfillment of these requirements. However, so far highly compact converters with SiC switches and diodes for high ambient temperatures have attracted relatively little attention in the literature.

First, current SiC power switches are thoroughly evaluated regarding their potential use in the described inverter system in terms of area-specific conduction properties in forward and reverse direction, switching behavior, thermal behavior, ability for parallelization, reliability, and safety in case of a fault. Because of the one order of magnitude higher breakdown electrical field of SiC compared to silicon (Si), unipo-

lar devices — offering fast switching and with possible parallelization (reduction of the conduction losses) an additional degree of freedom — can be used advantageously in the considered blocking voltage class of 1.2 kV and at elevated junction temperatures. Particular reliability considerations lead to benefits for junction field effect transistors (JFETs) against the background of the current state of the SiC semiconductor technology. For voltage source converters, normally-off devices are favorable. Due to high junction temperatures above the technological limit of Si, a full-SiC solution and therefore the novel normally-off JFET is preferred for the investigated system.

A detailed analysis of the loss behavior over the temperature with respect to given converter parameters such as dc-link voltage, switching frequency, and thermal resistance from the power semiconductor junction to the ambience shows that a junction temperature of 250 °C allows a utilization of the JFET by more than 90 % at an ambient temperature level of 120 °C.

Subsequently, new gate drive circuit topologies for the control of the employed normally-off JFETs are researched taking into account parasitic effects and the individual requirements of the novel SiC switch that excel the requirements of today's Si devices in their complexity in terms of sequencing and value of the necessary voltage levels (e.g., 3 V during on-state, a high noise immunity during the off-state due to a threshold voltage of only 0.7 V, which, due to the inherently high gate-drain capacitance, is a severe challenge, and ± 15 V during switching). As a result, a novel ac-coupled gate driver is presented and experimentally verified, that allows a safe operation of the normally off JFETs with minimum switching and conduction losses without the limitations mentioned in the literature, such as frequency restrictions or self-heating.

With respect to the dc-ac converter itself, a mechanical concept of the inverter with 50 kHz switching frequency is investigated, which includes new ways to solve electrical and thermal trade-offs. In particular, the operation of the signal electronics and the gate driver for power semiconductors with a junction temperature of 250 °C within the specified operating temperature range is ensured by appropriate placement and cooling methods while taking the electrical requirements for limits on the wiring inductances and symmetry requirements regarding the component placing into account. The analysis includes an accurate thermal model of the converter and an optimized active cooling of the signal electronics using a Peltier cooler.

For the direct air-cooling of the employed power semiconductors, a high temperature fan with a comparable fluid dynamic performance at 120 °C as commercial high performance fans at 20 °C is investigated which can be operated advantageously for high temperature applications as described in this dissertation up to a temperature of 250 °C at a rotational speed of 19'000 min⁻¹. The research includes the mechanical fan assembly, the magnetic and mechanical design of the electrical machine taking thermal expansion and maximum allowable operating temperature of the materials into account, the geometry of the blades as well as the choice of the materials for the shaft, bearings, bearing housings, laminations, magnets, and windings.

For the control of the presented converter system with SiC semiconductors that reach a junction temperature of up to 250 °C under full load, a new concept for electrically isolated current measurement at ambient temperatures of 250 °C is found and realized after an in-depth analysis of known concepts concerning high accuracy, large bandwidth for measurements of alternating currents with frequencies up to 1 kHz and direct currents as well as noise immunity at steep voltage transients of 30 V/ns.

Finally, the investigated novel concepts for a safe control with minimum losses of the employed JFETs, for the design of the inverter, the direct air-cooling using the new high temperature fan and the galvanically isolated high temperature current measurement are validated in an experimental system analysis of a demonstrator system at temperature levels up to 250 °C. The presented work is completed by putting the technical achievements in a broader automotive context.

Kurzfassung

In der vorliegenden Doktorarbeit wird das Gesamtsystem eines kompakten leistungselektronischen Wechselrichters auf Basis von SiC-Halbleitern mit hoher Ausgangsfrequenz und direkter Luftkühlung für den Einsatz in Hybridfahrzeugen bei Umgebungstemperaturen von 120 °C detailliert untersucht.

Die Forschung und Entwicklung im Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeuge hat sich in den letzten Jahren stark intensiviert und wächst von Jahr zu Jahr weiter. Leistungselektronische Umrichter als Bindeglieder zwischen dem Energiespeicher einerseits und dem elektrischem Antrieb oder Verbrauchern im Niederspannungsbordnetz andererseits stehen hier im Vordergrund. Der Einsatz von Leistungselektronik im Automobil ist durch besondere Anforderungen an Leistungsdichte, Leistungsgewicht, Effizienz und Kosten gekennzeichnet. Weiterhin wird eine hohe Resistenz gegen widrige Einsatzbedingungen, z. B. extreme Umgebungstemperaturen und Vibrationen, gefordert. Darüber hinaus gibt es einen Trend zum Einsatz kompakter hochdrehender elektrischer Maschinen, die signifikant höhere Ausgangs- und Schaltfrequenzen leistungselektronischer Konverter erfordern. Neueste Halbleiterbauelemente auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) ermöglichen hohe Schaltgeschwindigkeiten und einen Betrieb bei hoher Sperrschichttemperatur und können so potentiell einen Beitrag zur Erfüllung dieser Anforderungen leisten. Allerdings haben bisher hochkompakte Konverter mit SiC-Schaltern und -Dioden für hohe Umgebungstemperaturen in der Literatur relativ wenig Beachtung gefunden.

Zu Beginn dieser Arbeit werden daher aktuelle SiC-Leistungsschalter umfassend für ihren möglichen Einsatz im beschriebenen Wechselrichter im Hinblick auf flächenbezogenes Leitverhalten in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung, Schaltverhalten, Temperaturverhalten, Paral-

lelisierbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit im Fehlerfall evaluiert. Auf Grund der um eine Größenordnung höheren Durchschlagsfeldstärke von SiC im Vergleich zu Silizium (Si) können auch in der betrachteten Sperrspannungsklasse von 1,2 kV und bei erhöhter Sperrschichttemperatur unipolare Bauelemente mit niedrigeren Schaltverlusten und dem zusätzlichen Freiheitsgrad der Parallelisierung (Verringerung der Leitverluste) vorteilhaft eingesetzt werden. Insbesondere Zuverlässigkeitsüberlegungen beim aktuellen Stand der SiC-Halbleitertechnik führen zu Vorteilen für *«junction field effect transistors»* (JFETs), wobei für spannungseingeprägte Konverter wie im vorliegenden Fall ein selbstsperrendes Bauelement favorisiert wird. Wegen der auftretenden hohen Sperrschichttemperaturen über dem technologischen Limit von Si wird eine reine SiC-Lösung und daher ein neuartiger selbstsperrender JFET bevorzugt.

Eine detaillierte Analyse des Verlustverhaltens über der Temperatur in Bezug auf gegebene Konverterparameter wie Zwischenkreisspannung, Schaltfrequenz und thermischer Widerstand von der Halbleitersperrschicht zur Umgebung zeigt, dass eine Sperrschichttemperatur von 250 °C eine Ausnutzung des Halbleiters zu mehr als 90% bei einer Umgebungstemperatur von 120 °C erlaubt.

Im Folgenden werden neue Schaltungstopologien zur Ansteuerung der eingesetzten selbstsperrenden JFETs unter Berücksichtigung parasitärer Effekte sowie individueller Anforderungen des neuartigen SiC-Schalters erforscht, die in ihrer Komplexität hinsichtlich der Abfolge und Dimensionierung der notwendigen Spannungsniveaus die Anforderungen heutiger Si-Bauelemente übersteigen (z. B. 3 V im eingeschalteten Zustand, Sicherstellung einer äußerst geringen Störempfindlichkeit im ausgeschalteten Zustand, was bei einer Schwellenspannung von nur 0.7 V und einer inhärent hohen Miller-Kapazität eine große Herausforderung darstellt, und ± 15 V während der Schaltvorgänge). In diesem Zusammenhang wird eine neue wechselstromgekoppelte Ansteuerschaltung vorgestellt, die einen sicheren schalt- und leitverlustminimalen Betrieb des selbstsperrenden JFETs ohne die bisher in der Literatur erwähnten Einschränkungen in Bezug auf Schaltfrequenz oder Wärmeentwicklung erlaubt.

Im Hinblick auf den DC-AC-Konverter selbst wird ein mechanisches Gesamtkonzept des Inverters mit 50 kHz Schaltfrequenz erforscht, das neue Wege zur Lösung von elektrischen und thermischen Zielkonflikten beinhaltet. Insbesondere der Betrieb der Ansteuer- und Regelelektro-

nik für Leistungshalbleiter mit einer Sperrschichttemperatur von 250 °C innerhalb des spezifizierten Betriebsbereichs (Temperaturbelastung der Komponenten) wird durch geeignete Platzierung und Kühlmethoden sichergestellt, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der elektrischen Anforderungen im Hinblick auf Obergrenzen der Zuleitungsinduktivitäten und Symmetrieanforderungen hinsichtlich der Komponentenanordnung. Eine optimierte aktive Kühlung der Signalelektronik mit Hilfe eines Peltierelements wird hierzu effizienzoptimal ausgelegt und eingesetzt.

Zur volumenminimalen Luftkühlung der eingesetzten Leistungshalbleiter wird ein Hochtemperaturlüfter mit vergleichbaren fluiddynamischen Eigenschaften bei 120 °C wie kommerzielle best-in-class Lüfter bei 20 °C untersucht, der vorteilhaft für in dieser Dissertation beschriebene Hochtemperaturanwendungen bis zu einer Lufttemperatur von 250 °C bei einer Drehzahl von 19'000 min⁻¹ betrieben werden kann. Dies beinhaltet den mechanischen Lüfteraufbau, das magnetische und mechanische Design der elektrischen Maschine unter Rücksicht auf Wärmedehnungen und zulässige Maximaleinsatztemperaturen der Materialien, die Schaufelradgeometrie sowie die Materialwahl für Welle, Lager, Lagergehäuse, Blechpaket, Magnete und Wicklungen.

Zur Regelung des Konvertersystems mit SiC-Halbleitern, die unter Vollast eine Sperrschichttemperatur von bis zu 250 °C erreichen, wird ein Konzept zur potentialgetrennten Strommessung bei Umgebungstemperaturen von 250 °C in Bezug auf hohe Genauigkeit, Breitbandigkeit für Messungen von Wechselströmen mit Frequenzen bis 1 kHz und Gleichströmen sowie Störuneempfindlichkeit bei auftretenden Potentialänderungen des den zu messenden Strom führenden Leiters von 30 V/ns erforscht und realisiert.

Abschließend werden die erforschten, neuartigen Konzepte zur sicheren und verlustminimalen Ansteuerung der eingesetzten JFETs, zum Inverterdesign, zur volumenminimalen Kühlung mittels eines neuen Hochtemperaturlüfters und zur potentialgetrennten Hochtemperaturstrommessung im Rahmen einer experimentellen Systemanalyse an Hand eines Demonstratorsystems bei bis zu 250 °C verifiziert. Eine Einordnung der technischen Ergebnisse in den automobilen Gesamtkontext rundet die Arbeit ab.