HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	パワー半導体素子の駆動・保護回路技術に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	石川, 勝美
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11607号
Issue Date	2014-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57740
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Katsumi_Ishikawa_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　石川　勝美

審査担当者　主　査　教　授　小笠原 悟司
副　査　教　授　北 裕幸
副　査　教　授　五十嵐 一
副　査　准教授　竹本 真紹

学位論文題名

パワー半導体素子の駆動・保護回路技術に関する研究
（Study on Drive and Protection Circuit Technology for Power Semiconductor Devices）

近年, 従来の省エネルギーだけでなく, 太陽光発電など再生可能エネルギーなどの創エネルギーの導入が活発化し, インバータに代表されるパワーエレクトロニクス技術が, さまざまな分野に適用されてきている。特に,1980 年後半に使い勝手の良い IGBT(Insulated Gate Bipolar transistor) 素子が登場して以来インバータの高性能化・高効率化が進められ,IGBT はキーデバイスとして 30 年経過した今でも様々なインバータシステムに使用されている。また,1950 年代からパワーデバイスの材料として使用されてきた Si(シリコン) 材料に代わり, 約 10 倍の絶縁破壊電圧強度を持つ SiC(炭化珪素) が 1990 年台より注目され,2000 年代後半になって性能の良い結晶が市販され始めた。SiC を使ったデバイスとして,Si-SBD(Schottky Barrier Diode) ならびに SiC 接合 FET(SiC-JFET) や,SiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect transistor) が特に注目されており, インバータの低損失化・小型化が期待されている。
本論文では,HEV(ハイブリッド自動車) や鉄道用インバータやサーバ電源を対象に, 従来の Si-IGBT だけでなく SiC-SBD や SiC-JFET を搭載したインバータについて, その駆動・保護回路技術の高性能化技術の開発について述べている。
第 3 章では,IGBT に用いる高信頼の駆動・保護 IC について検討している。数百 A の大電流用途のインバータにおいても確実に IGBT の短絡保護するために, 従来は高価なセンス IGBT 付のパワーデバイスが用いてきた。これに対して,IGBT の制御端子 (ゲート) 電圧と,IGBT の高圧端子 (コレクタ) 電圧を併用して電圧検知する方式を採用することで, 高価なセンス IGBT が不要で, 短絡検出時間も高速である方式を開発している。また, 通常動作時の IGBT のターンオフ損失を増加させずに,IGBT の短絡時のピーク電流を 15% 低減するゲート駆動回路を開発し,HEV へ実用化している。
第 4 章では,SiC-SBD と Si-IGBT との組合せを検討している。日本で多く採用されている直流 1500 V 架線に適用可能な 2 レベルインバータの高効率化を実現するために, 世界に先駆けて 3.3 kV 級の SiC-SBD と Si-IGBT を搭載したプロトタイプ (3.3kV/200A) の Si/SiC ハイブリッドモジュールを開発している。従来の Si のダイオードを用いたデバイスと比較して, ターンオン損失が 1/6 に低減し, リカバリ損失が 1/10 以下に低減している。これを適用した場合には, 車両用インバータとコンバータの損失を 32% 低減可能であることを示し,180 kW モータの駆動に成功している。
第 5 章では, 従来の 3.3 kV/1200 A のモジュールの 2/3 のサイズの Si/SiC ハイブリッドモジュールを開発している。ショットキーバリア接合に pn 接合をマージした JBS(Junction Barrier Schottky)

構造を開発し, 導通特性を改善した Si の IGBT に適用した。また, 駆動技術については,IGBT のターンオン時に,3.3 kV/1200 A IGBT のゲートの状態を検出して,3 段階に分けて制御する低損失駆動技術を適用することで, 従来の固定ゲート方式と比較して, ターンオン損失を 15% 低減している。その結果,IGBT の性能改善と SiC ダイオードによるスイッチング損失の低減効果により, インバータ損失を 35% 低減している。また, コンデンサの改善や, 冷却器の小型化により, インバータの質量と体積を 40% 低減した。また,190 kW モータを 4 台同時に駆動することを実現している。

第 6 章では, 閾値電圧の低いノーマリオフ SiC-JFET の駆動速度の高速化について, 回路・実装方式の両面から検討し, インバータ・電力変換器の更なる省エネ・小型化を実現している。酸化膜を使用しない SiC-JFET(接合 FET) 素子において, ノーマリオフ型の SiC-JFET は, 閾値電圧が 1 V 程度と非常に低く,3 V を越えるとゲート-ソース間に電流が流れるため, 制御電圧範囲が狭い点が課題である。本研究では,SiC-JFET のソース分割端子の実装方式と, ゲート抵抗にコンデンサを並列接続するスピードアップコンデンサ駆動回路方式を採用し,50 ns 以内のターンオン時間、50 ns 以内のターンオフ時間を実現している。また, この実装方式や駆動回路方式を適用した PFC 回路や,DC-DC コンバータ回路を構築し, 製品版同等の 2 kW のサーバ電源を試作し, 効率最高点で 95.1% となる世界最高クラスの電源効率を実現している。

これを要するに, 著者は, 従来のインバータの問題点であった, 短絡保護, 短絡電流抑制, 損失低減, 小型化, 高速化, コスト低減などの問題を同時に解決する新しいパワー半導体素子の駆動・保護回路技術を開発し, さらにそれを実証して新しい知見を得たものであり, 電気工学ならびにパワーエレクトロニクス分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって, 著者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。