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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　石川　勝美

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）

東日本大震災により, 私たちの暮らしの中で, エネルギーを当たり前ように消費してきた考え方を見直す機会となり, 今まで以上に, 太陽光発電などの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, 環境配慮型自動車の普及や家電などでは, 省エネルギー (以下、省エネ) となる高効率インバータ製品の導入が一段と進んできている。この省エネ技術を牽引してきたのがパワーエレクトロニクス技術であり, パワーデバイスの進歩と共に, エアコン, 冷蔵庫,IH 調理器などの白物家電, エレベータ, ロボット, ハイブリッド自動車, 電車, 建設機械などのインバータ応用製品が進化し, 高効率なインバータシステムを実現してきた。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,30 年経過した今でも, キーデバイスとして, 様々なインバータシステムを適用されてきている。

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 年台より急激に注目されてきた。単結晶の成長が難しかったが,2000 年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,SiC のショットキーバリアダイオードに注目した。IGBT とペアで使用する従来の Si のダイオードは,pn 接合を用いたダイオードであったが,SiC を使った場合, 高耐圧のデバイスでも, ショットキーバリアダイオードを使うことができ, ダイオードがオフに移行した場合に発生するスイッチング損失を大幅に低減できることから, インバータの低損失化・小型化が期待できる。また, スイッチング素子に使うトランジスタについても,SiC 接合 FET(SiC-JFET) や,SiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect transistor) が開発され, 更なるインバータの低損失化・小型化が期待されている。

本研究では,HEV(ハイブリッド自動車) や鉄道インバータを研究対象とし,IGBT や SiC ダイオード,SiC-JFET を搭載したインバータの省エネ化, 低コスト化・小型化, インバータの高信頼化技術の開発を目的とする。

まず, 最初の章では,1997 年に世界に初登場したハイブリッド自動車 (HEV) 用のインバーに広くも使用されきている IGBT に関して, 高信頼な駆動回路・保護回路を検討した。本研究では, 大電流用途のインバータにおいて, 数百 A でのスイッチング時でも, 安定な駆動回路や保護回路を備え, 数百 A の大電流 IGBT を駆動できるロバストな駆動回路や短絡保護回路を内蔵した 600V のドライバ IC を開発した。特に,IGBT の短絡保護技術に関しては, 従来の高価なセンス IGBT を用いていた方式から, 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, 通常市販されている各種の IGBT の全てに対応可能なようにし, 短絡検出時間を, センス IGBT を用いた方式よりも短い 2,5μs 以内の高速で検知する方式を構築した。また, 通常動作時には, 誤動作しない短絡保護技術を構築した。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 パーセント低減するゲート駆動回路を構築

した。これらを搭載した回路で, インバータ実機にて, 短絡動作検証及び誤動作の有無の検証を行って,HEV の実製品へも製品適用した。

次の章では,Si に代わる次世代のデバイスと注目されている SiC を用いたデバイスの導入を検討した。日本では, 直流 1500 V 架線が 90 パーセント以上を占めているため, 直流 1500V に適用可能な 2 レベルインバータを構築するため, 世界に先駆けて,3.3kV 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た。Si のダイオードでは, 定格電流が 30 パーセント程度で, ダイオードの通流幅が 5μs 以下と小さい場合は,Si のダイオード内の正孔と電子の再結合する影響で, 過大な電圧を発生するため, ゲート抵抗を大きくせざるを得なかったが,SiC-SBD を適用することによって, ゲート抵抗を小さくすることができ, ターンオン損失が 1/6 に低減し, リカバリ損失が 1/10 以下に低減することを実現した。この回路をインバータに適用した場合のインバータ損失は 15 パーセント低減でき, コンバータに適用した場合のコンバータ損失は 40 パーセント低減でき, インバータとコンバータを同時に適用した場合は,32 パーセント低減可能であることを見出した。また,180kW モータの無負荷駆動に成功した。

次の章では, 従来の 3.3kV/1200 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た。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, スイッチング素子には, 導通特性を改善した Si の IGBT を適用した。また, 駆動技術については,IGBT のターンオン時に,3.3kV/1200A IGBT のゲートの状態をその場検出して,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 パーセント低減した。また, 実装技術については, 熱伝達率に優れた小型冷却器を開発した。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 パーセント低減した。また, コンデンサの改善や, 冷却きの小型化により, インバータの質量と体積を 40 パーセント低減した。また,190kW モータを 4 台同時に駆動することに成功した。

次の章では, インバータ・電力変換器の更なる省エネ・小型化を実現するため, スイッチング素子にも SiC 適用する。SiC では酸化膜信頼性が課題であり, 酸化膜を使用しない SiC-JFET(接合 FET) 素子が注目されている。SiC-JFET は, ノーマリオン型とノーマリオフ型の 2 つのタイプがある。ノーマリオン型 SiC-JFET は,Si-MOSFET とカスコード接続してノーマリオフを実現しているが, オン抵抗が高くなる。一方, ノーマリオフ型の SiC-JFET は, 閾値電圧が 1V 程度と非常に低く,3V 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, 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,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,50ns 以内のターンオン時間、50ns 以内のターンオフ時間を実現した。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 2kW のサーバ電源を試作し, 効率最高点で 95.1 パーセントとなる世界最高クラスの電源効率を実現した。