特集論文

SiCパワーモジュール化技術

大月高実* 大開美子*** 井上貴公* 玉木恒次**

Technologies for SiC Power Module

Takami Otsuki, Takahiro Inoue, Koji Tamaki, Yoshiko Obiraki

要 旨

低炭素化社会の実現に向けて、FA(Factory Automation)、 家電、電鉄等のパワーエレクトロニクス機器の省エネルギ ー・小型化競争の加速が予想される。パワーデバイスに対 しても、これら要求への対応としてワイドギャップ半導体 であるSiC(Silicon Carbide)を用いたパワーデバイスの開 発が不可欠となっている。三菱電機では全社的なプロジェ クト体制を構築し、社内パワーエレクトロニクス事業部門 との連携によってSiCデバイスを搭載したパワーモジュー ルの開発に取り組んでいる。 本稿では、SiCパワーモジュール化技術として次の2点 について述べる。

- インテリジェントパワーモジュール(IPM)化
 従来のSiパワーモジュールと同じ保護機能を搭載。
 ・制御電源電圧低下保護/過熱保護/短絡保護
- (2) 小型化・大容量化
- モジュールの小型化と大容量化に伴う課題と解決案の提示。
 - ・サージ電圧抑制(インダクタンスの低減)
 - ・並列間電流均等化(電流アンバランスの抑制)



産業用フルSiC-IPMとフルSiCパワーモジュール

大幅な電力損失低減で産業機器の高効率化・小型化に貢献するパワーモジュール。

1. まえがき

省エネルギー化の気運がますます高まる中,パワーデバ イスが注目されて久しいが,現在使用されているSiデバイ スはその材料物性で決まる理論限界に近付いている。今後 そのSiに代わると期待されているものに,ワイドギャップ 半導体であるSiCやGaN(Gallium Nitride)がある。当社で は,全社的なプロジェクト体制を構築し,SiCデバイスを 搭載したパワーモジュールの開発を進めてきた。

本稿では、SiCデバイスを搭載したパワーモジュール化 の技術として、①従来のSiデバイス搭載品と同じ保護機能 を搭載したインテリジェントパワーモジュール(IPM)化、 ②モジュールの小型化・大容量化、の2点について述べる。

2. IPM化

2.1 IPMの特徴と内部構成

従来のSiデバイスを搭載したIPM(Si-IPM)は,各種保 護機能(制御電源電圧低下保護/過熱保護/短絡保護)を 持っている。SiCデバイスを搭載したIPM(SiC-IPM)に対 してもそのコンセプトを踏襲し,各種保護機能を搭載させる。

IPMの内部構成を図1に示す。SiC化については、主に FWD(Free Wheeling Diode)部にSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)を搭載するハイブリッドSiC化(ハイブリッ ドSiC-IPM)と、トランジスタ部にSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor),FWD部 にSiC-SBDを搭載するフルSiC化(フルSiC-IPM)がある。 ハイブリッドSiC-IPMとすることで、FWD部のリカバリ ー損失低減が可能であり、フルSiC-IPMとすることで、 さらにトランジスタ部のスイッチング損失及び定常損失低 減が可能となる。以降では、フルSiC-IPMについて述べる。

2.2 保護機能の搭載

2.2.1 保護機能

図2にIPMのブロック図を示す。SiC-IPMで搭載して いる保護機能は、次の3種類がある。

- ①制御電源電圧低下保護
- ②過熱保護

③短絡保護

制御電源電圧低下保護とは、制御電源電圧が低下したと きに生じるSiC-MOSFETのドレイン・ソース間電圧VDS (on)損失増加(=熱破壊)を防止するために、制御電圧を 検出し、設定電圧以下になると、SiC-MOSFETを強制的 にオフする機能である(図3)。

過熱保護とは、熱破壊を防止するため、SiC-MOSFET の表面温度を直接検出(温度センサ)し、設定温度以上にな ると、SiC-MOSFETをオフする機能である(図4)。

短絡保護とは、短絡破壊を防止するために、SiC-MOS FETのドレイン電流を検出し(電流センサ),設定電流以 上になるとSiC-MOSFETをオフする機能である(図5)。 今回,従来のSi-IPMと同じこれら3種類の保護機能を 搭載したSiC-IPMを開発した。





図5. 短絡保護シーケンス

2.2.2 チップの外観

先に述べた保護機能を実現するための,各種センサを搭載したSiC-MOSFETの外観を図6に示す。Si-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)と同じように,電流 センサ及び温度センサを搭載している。なお,温度センサ はチップ上に設けており,表面温度をいち早く検知するこ とが可能である。

2.2.3 保護機能動作の実例

保護機能動作の一例として,図7に誘導負荷短絡保護時



図 6. SiC-MOSFET



図7.誘導負荷短絡保護時の波形



の波形を示す。短絡電流を検知した際にエラー信号が出力 され(上段の波形が"高"→"低"へ切り替わり),同時に電流 (下段の波形)が遮断されており,短絡保護機能が動作して いることが確認できる。

2.3 損失低減効果

先に述べたようにトランジスタ部及び/又はFWD部を SiからSiCに切り替えることで,損失の低減が見込まれる。

第5世代のIGBTを搭載した定格1,200V/75AのSi-IPM に対する、ハイブリッドSiC-IPM、フルSiC-IPMの損失 比較結果を図8に示す。Si-IPMと比較して、ハイブリッ ドSiC-IPMは約25%低減、フルSiC-IPMは約70%低減を 実現している。この図から、ハイブリッドSiC化によって FWD部のスイッチング損失つまりリカバリー損失が低減 できており、フルSiC化によって、さらにトランジスタ部 のスイッチング損失及び定常損失を低減できていることが 確認できる。

このように、Si-IPMのコンセプトを継承しつつ、低損 失を実現するSiC-IPMの開発を進めている。

3. モジュールの小型化・大容量化

3.1 小型化

SiCを適用することのメリットとして,損失低減以外に もモジュールの小型化が図れることが挙げられる。

SiCはSiと比較して絶縁破壊電界強度が10倍程度高いの で、ドーピング密度を高めてオン抵抗を小さくすることが できる⁽¹⁾。このため、ある一定の電流値を得ようとする場 合、Siと比較してチップサイズの縮小が可能である。その 結果、モジュールサイズの小型化が可能となる。

その一例を図9に示す。SiパワーモジュールをフルSiC パワーモジュールに置き換えることで,設置面積が約60% 削減可能となった。

3.2 大容量化

3.2.1 課 題

図9で示したようにSiパワーモジュールでは2並列必要 であった容量を、フルSiCパワーモジュールでは1並列で 構成できる。つまり、小型化に加え大容量化が可能となっ





フルSiCパワーモジュール 1,200V/800A/2in1

Siパワーモジュール 1,200V/400A/2in1×2

図9. モジュール小型化

約60%減



図10. モジュール内部並列化





た。一方で、大容量化する際にはターンオフ時の電流変化 率増大に伴うサージ電圧が課題となる。インダクタンスは Siパワーモジュールでは2並列によってそれ自体の約半分 となるが、1並列のフルSiCパワーモジュールではSiパワ ーモジュールと比較して、インダクタンスが大きくなるた め、より高いサージ電圧が発生する可能性がある。このた め、大容量化する際にはモジュール内部のインダクタンス を低減する必要がある。

3.2.2 モジュール内部インダクタンス低減

モジュール内部を2ブロックに分け並列化することで、 インダクタンスの低減を実現した(図10)。これによって サージ電圧を抑制でき、高速スイッチングが可能となった。

3.2.3 並列化に伴う課題と解決策

モジュール内部を2ブロックに分け並列化した場合,2 ブロック間の電磁干渉に不均一があると電流がアンバラン スとなる。特に,SiC-MOSFETではSi-IGBTと比較して 高速スイッチングとなるので,アンバランスがより顕著と なる(図11)。



図12. 電磁界解析モデル



そこで、電磁界解析を用いて、2ブロック間の電磁干渉 が均一となるよう、チップ、各種配線を構成した(図12)。 この解析の結果、電流アンバランスが小さくなっているこ とを確認した(図13)。

このように、SiC適用による新たな課題を解決しつつ、 大容量SiCパワーモジュールの開発を進めている。

4. む す び

SiCパワーモジュール化技術について述べた。省エネル ギー製品のニーズが高まる中,この技術は市場の期待に沿 うものであると考える。将来的にはSiに代わるデバイスと して期待されていることもあり,今後はSiC搭載製品を市 場に送り出していくことで,更なる省エネルギー社会の実 現へ貢献していく所存である。

参考文献

(1) 松波弘之,ほか:半導体SiC技術と応用,日刊工業新 聞社 (2003)