

RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高速動作化

Speed Enhancement for the 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications with RC-IGBT

高下 卓馬 KOGE, Takuma

井上 大輔 INOUE, Daisuke

安達 新一郎 ADACHI, Shinichiro

富士電機は、薄型化した RC-IGBT (逆導通 IGBT) を搭載し、高速動作化したパッケージ構造の車載用第 3 世代直接水冷型モジュールを開発した。IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT の適用により、ターンオン、ターンオフ時のスイッチング速度の増加を実現した。また、寄生インダクタンスは、RC-IGBT と内部レイアウトの最適化により従来パッケージに対して 50% 減少させた。さらに、重畳サージ電圧は三相それぞれに PN 端子対を持つパッケージ構造とすることで減少させた。これらの技術により、第 3 世代のモジュールのスイッチング損失は第 2 世代のモジュールに対して 30% 減少した。

Fuji Electric has employed a thin reverse-conducting IGBT (RC-IGBT) in the development of a 3rd-generation direct liquid cooling module for automotive applications that is characterized by its high-speed packaging structure. By utilizing an RC-IGBT that integrates an IGBT and FWD on a single chip, the module achieves faster switching at turn-on and turn-off. In addition, parasitic inductance has been decreased by 50% compared with conventional packages through use of the RC-IGBT and internal layout optimization. Furthermore, superimposed surge voltage has been reduced by adopting a packaging structure that equips all 3 phases with a PN terminal pair. These technologies have enabled the 3rd-generation module to reduce switching loss by 30% compared with 2nd-generation modules.

1 まえがき

地球温暖化防止に向けた CO₂ 排出規制の強化を背景に、エンジンとモータの双方を利用するハイブリッド自動車 (HEV)、ならびにモータのみで走行する電気自動車 (EV) が実用化され、開発は現在も活発に進められており、さらなる普及が期待されている。HEV や EV の動力制御に用いるインバータには、車内の限られたスペースに搭載するための小型化および電池やモータの高出力に対応するための高電力密度化が求められている。

図 1 に、富士電機の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールにおける電力密度トレンドを示す。産業用 IGBT モジュールの最新世代である第 7 世代モジュールにおける電力密度は、300 kVA/L 程度である。これに対し、車載用 IGBT モジュールの最新世代である第 3 世代モジュールは 800 kVA/L であり、約 2.5 倍高い。

富士電機は、高電力密度化の要求に応えるため、最新

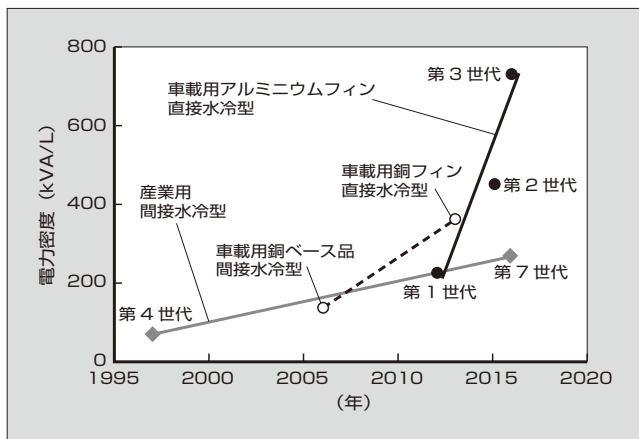


図 1 IGBT モジュールの電力密度トレンド

の薄ウェーハ化技術を適用し、薄型化した IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) をワンチップ化した第 7 世代 RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を開発した。インバータ動作では発生損失の低減のため、定常損失だけでなくスイッチング損失を低減する必要がある。

本稿では、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュール (車載用第 3 世代モジュール) における低損失化のための、薄型化した RC-IGBT 技術と高速動作化してスイッチング損失を低減したパッケージ構造について述べる。

2 低インダクタンスパッケージ設計

2.1 低インダクタンス化における RC-IGBT の特徴

図 2 に、RC-IGBT の概略構造を示す。HEV 向けの RC-IGBT は、量産しているフィールドストップ (FS) 型 RC-IGBT をベースとし、ストライプ状に IGBT 領域と FWD 領域を形成している。最新の薄ウェーハ化技術により電力損失を低減するとともに、トレンチ間隔、チャンネル密度、コンタクトなどの表面構造の最適化を行い、RC-IGBT の性能を向上させた。図 3 に、同一電流密度における第 7 世代 RC-IGBT と従来の第 6 世代 IGBT・FWD の

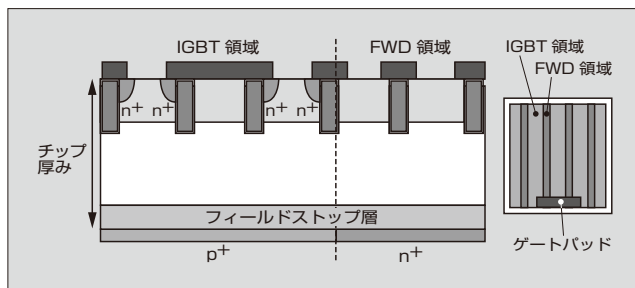


図 2 RC-IGBT の概略構造

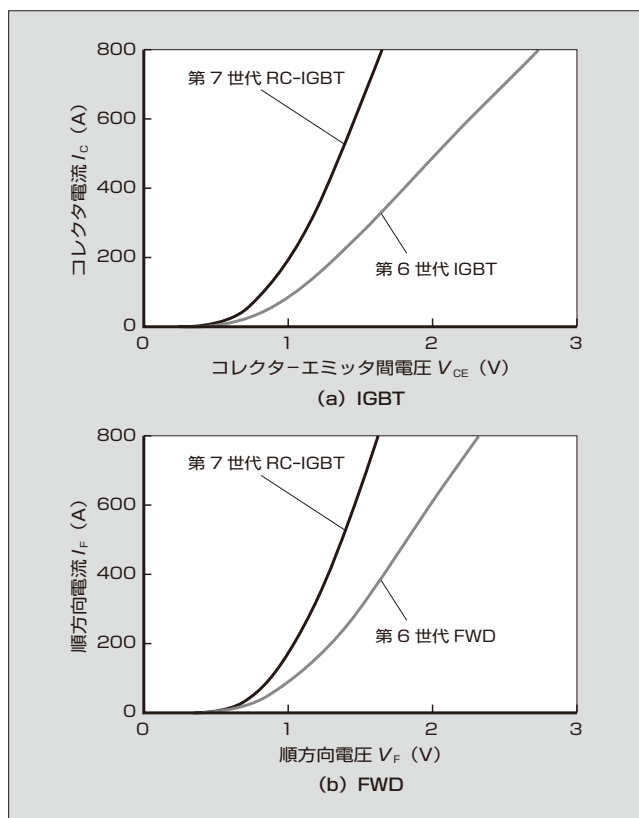


図 3 RC-IGBT と従来の IGBT・FWD の出力特性

出力特性を示す。薄ウェーハ化技術と表面構造の最適化により、 $V_{CE(sat)}$ と V_F は、従来の第 6 世代 IGBT・FWD の組合せと比較して飛躍的に減少した。

RC-IGBT は IGBT と FWD のワンチップ化により、パッケージサイズの小型化が可能になる。第 7 世代 RC-IGBT は、同一の出力電力を従来チップに比べて 70% に相当するサイズで達成できる。図 4 に、RC-IGBT と一般的な従来のハーフブリッジ回路の基板レイアウトを示す。RC-IGBT の場合、従来の IGBT と FWD で構成される IGBT モジュールに対して基板面積を 75% まで減少でき、P 端子から N 端子への電流経路長を 78% まで減少できる。

IGBT モジュールの寄生インダクタンスは、P 端子から N 端子への電流経路幅と PN 端子間距離に依存する。

項目	第 7 世代 RC-IGBT	第 6 世代 IGBT・FWD
基板レイアウト		
基板サイズ割合	0.75	1
PN 間電流経路長の比率	0.78	1

図 4 RC-IGBT と従来の基板レイアウト比較

IGBT モジュールを IGBT と FWD で構成すると、電流経路長に限界がある。そのため、寄生インダクタンスを減少させるために、電流経路幅を大きくできる並列接続や、PN 端子間距離を小さくできるラミネートブスバーがよく適用されている。しかしながら、これらの施策はパッケージサイズが大きくなる傾向がある。^{(3)~(6)} RC-IGBT は電流経路が短くなるので、寄生インダクタンスが飛躍的に減少するとともに、パッケージの小型化が可能である。

2.2 重畳サージ電圧抑制のためのパッケージ設計

周知のように、パッケージの低インダクタンス化によりターンオフ時と逆回復時のサージ電圧は減少する。車載用第 3 世代モジュール (6MBI800XV-075V) の寄生インダクタンスは第 7 世代 RC-IGBT の適用と内部レイアウトの最適化により、第 6 世代 IGBT・FWD を搭載した車載用第 2 世代モジュール (6MBI600VW-065V)⁽⁷⁾ に対して 2 分の 1 程度である。しかし、寄生インダクタンスの減少だけでなく、重畳サージ電圧を減少することがインバータ動作において重要である。三相インバータのサージ電圧は、平滑コンデンサとモジュールが接続された状態でターンオフ動作時にモジュールの PN 端子に発生する。ターンオフ動作が、例えば U 相とその他の相 (V 相) の間において起こると、P 端子と N 端子の間に発生するサージ電圧は重畳される。

図 5 に、世代別 PN 端子間のサージ電圧を示す。平滑コンデンサは、自動車用インバータにおいては直列に接続した状態で使用される。車載用第 3 世代モジュールのパッケージではスイッチング速度 ($-di/dt$) が 1.5 倍大きいにもかかわらず、PN 端子間サージ電圧が飛躍的に減少している。サージ電圧は、車載用第 2 世代モジュールのパッケージのように各相の PN 端子が共通化されている場

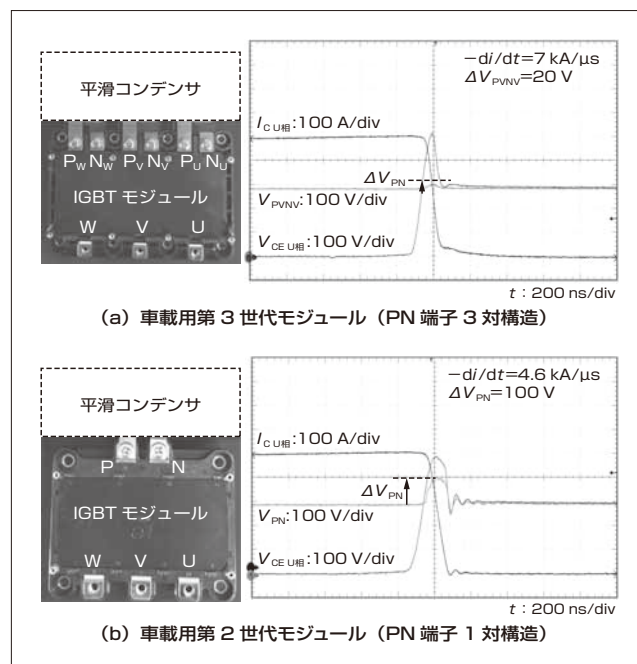


図 5 世代別 PN 端子間のサージ電圧

合、容易に重畳される。一方、車載用第 3 世代モジュールのパッケージでは、各相の PN 端子が独立しているため、PN 端子間サージ電圧は大幅に低減している。

重畳サージ電圧を評価するため、二相スイッチングにおけるサージ電圧を測定した。図 6 に、二相スイッチングにおける重畳サージ電圧測定の等価回路を示す。

車載用第 2 世代モジュールでは、パッケージ構造の制限により各相の電流を測定するのは困難であった。そのため、電流は二相全体で測定した。図 7 に、世代別モジュールのターンオフ波形を示す。上側の波形は U 相のみの単相スイッチングの場合であり、下側の波形は U 相と V 相による二相スイッチングの場合である。車載用第 2 世代モジュールでは、二相スイッチング時のサージ電圧は単相スイッチングに対して 54V 増加した。一方、車載用第 3 世代モジュールでは、単相スイッチングと二相スイッチングでほとんど差がなかった。さらに、スイッチング速度 ($-di/dt$) が 1.5 倍大きいにもかかわらず、車載用第 3 世代モジュールでのサージ電圧は車載用第 2 世代モジュールよりも小さくなった。この結果は、同じバッテリー電圧とデバイス耐圧の状態の下で車載用第 2 世代モジュールに対し、1.5 倍以上スイッチング速度を増加できることを示している。重畳サージ電圧は逆回復動作時も同様に発生する。したがって、車載用第 3 世代モジュールではターンオン時の

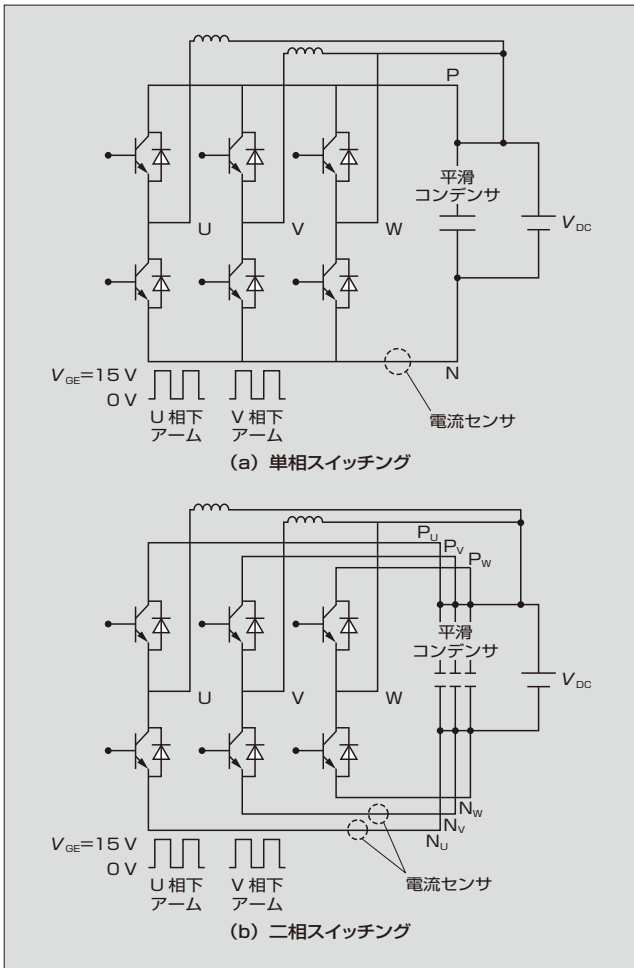


図 6 重畳サージ電圧測定の等価回路

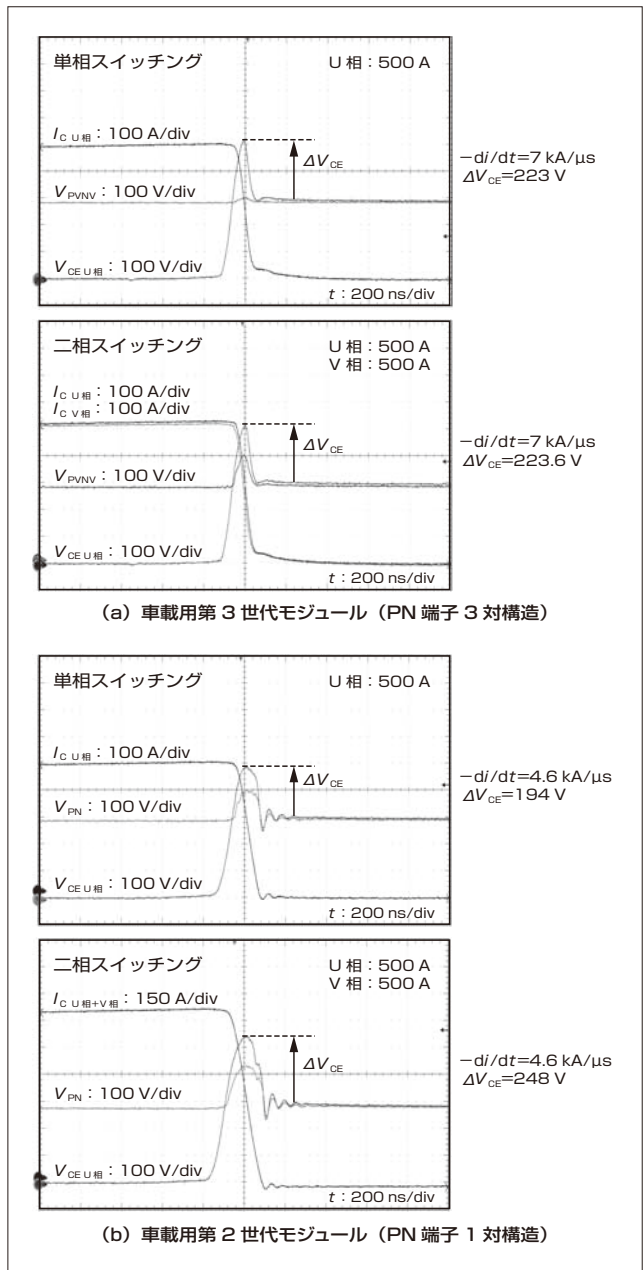


図 7 世代別モジュールのターンオフ波形

スイッチング速度も増加できる。

3 RC-IGBT 適用モジュールの損失特性

図 8 に、世代別モジュールの電力損失の計算結果を示す。 $V_{cc}=400V$ 、出力電流(実効値) $400A$ 、スイッチング周波数 $f_c=10kHz$ の条件の下でのインバータ動作時において、車載用第 2 世代モジュールの電力損失と、RC-IGBT と PN 端子 3 対構造のパッケージを組み合わせた車載用第 3 世代モジュールの電力損失とを比較したものである。ターンオン di/dt とターンオフ $-di/dt$ は、重畳サージ電圧含むサージ電圧が同等になるように設定した。RC-IGBT のサイズは、IGBT と FWD を合わせた全体のサイズに対して 70% 相当である。スイッチング損失は高速スイッチング化により 30% 減少することができた。

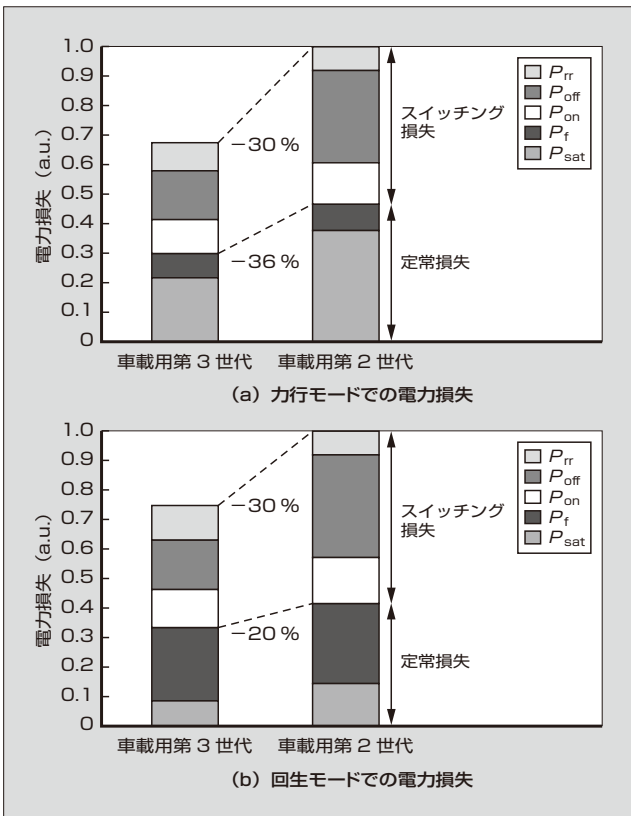


図 8 世代別モジュールの電力損失計算結果

4 あとがき

本稿では、RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高速動作化について述べた。

逆回復特性のソフト性向上のため、第 7 世代 RC-IGBT は表面構造およびフィールドストップ (FS) 層を最適化した。この RC-IGBT の適用により、ターンオン時とターンオフ時のスイッチング速度の増加を実現した。また、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの寄生インダクタンスは、RC-IGBT と内部レイアウトの最適化により従来パッケージに対して 50% 減少させた。さらに、重畳サージ電圧は三相それぞれに PN 端子対を持つパッケージ構造とすることで減少させた。

これらの技術により、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールは、スイッチング損失を車載用第 2 世代直接水冷型パワーモジュールに対して 30% 減少でき、高電力密度化した HEV や EV のインバータシステムの実現に多大

な貢献が期待できる。

今後、さらに設計技術を向上し、小型化、高電力密度化を達成できる製品開発を進める所存である。

参考文献

- (1) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (2) Higuchi, K. et al. "New standard 800 A/750 V IGBT module technology for Automotive application", PCIM Europe 2015, p.1137-1144.
- (3) C. Muller, S. Buschhom. "Power-module optimizations for fast switching a comprehensive study", PCIM Europe 2015, p.434-441.
- (4) Kawase, D. et al. "High voltage module with low internal inductance for next chip generation-next High Power Density Dual", PCIM Europe 2015, p.217-223.
- (5) G. Borghoff. "Implementation of low inductive strip line concept for symmetric switching in a new high power module", PCIM Europe 2013, p.185-191.
- (6) R.Bayerer, D.Domes. "Power circuit design for clean switching", CIPS2010.
- (7) Adachi, S. et al. "High thermal conductivity technology to realize high power density IGBT modules for electric and hybrid vehicles", PCIM Europe 2012, p.1378-1384.



高下 卓馬

車載用 IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部 EV モジュール技術部。



井上 大輔

IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部。



安達 新一郎

車載用 IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部 EV モジュール技術部チームリーダー。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。