

# 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機能化

Functionality Enhancement of 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications Equipped with RC-IGBT

佐藤 憲一郎 SATO, Kenichiro

榎本 一雄 ENOMOTO, Kazuo

長睦 文男 NAGAUNE, Fumio

富士電機は、ハイブリッド自動車や電気自動車向けに、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールを開発した。車載用パワーモジュールには、低損失化と小型化が求められている。水冷フィンとカバーを一体化したアルミニウム製ウォータージャケットとフランジ構造の冷媒出入り口を採用し、放熱性を改善した。また、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD (Free Wheeling Diode) を一体化した RC-IGBT (逆導通 IGBT) を適用し、同じ活性面積で 20% の電力損失を低減した。これらにより、パワーモジュールの低損失化と小型化を実現した。

Fuji Electric has developed a 3rd-generation direct liquid cooling power module for automotive applications such as hybrid and electric vehicles. Power modules for automotive applications are required to be compact and exhibit low power loss. We have improved heat dissipation performance of the module by using an aluminum water jacket that combines the liquid cooling fins with cover as well as refrigerant inlet and outlet ports with a flange structure. In addition, employing a reverse conducting IGBT (RC-IGBT) that integrates an insulated gate bipolar transistor (IGBT) with free wheeling diode (FWD) enables the power module with the same active area to reduce power loss by 20%. As a result, the power module has achieved a lower loss and a smaller size.

## 1 まえがき

CO<sub>2</sub> 排出量の削減や地球資源の保護のために、世界各国が取組みを加速しており、自動車メーカーはハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の開発を積極的に進めている。HEV や EV では、電気モータを動作させるためにインバータが用いられており、その中で重要なキーコンポーネントの一つが IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである。IGBT モジュールには、バッテリーの電力を効率よく利用するために低損失化と小型化が求められている。

これらの要求に応えるため、富士電機はこれまで直接水冷方式を用いた IGBT モジュールを製品として提供するとともに開発を継続してきた<sup>(1)~(4)</sup>。今回、従来の車載用直接水冷型パワーモジュールよりも、さらに高性能化と高機能化を行った車載用第 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) を開発した。

本稿では、RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT)<sup>(5)</sup> 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機能化について述べる。

## 2 特徴

今回開発した車載用第 3 世代モジュールの外観を図 1 に示す。この製品は、冷媒の流路設計の最適化により、従来品よりも高い放熱性能を達成している。カバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットと、フランジ構造の冷媒出入り口を採用したことにより、ユーザはフランジ出入り口に指定流量の冷媒を流す配慮を行うだけでよい。

車載用第 3 世代モジュールの主な製品仕様を表 1 に、モジュールの等価回路を図 2 に示す。また、製品の特徴を次

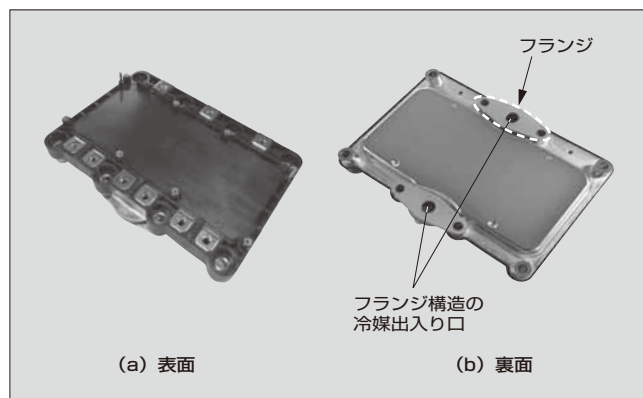


図 1 車載用第 3 世代モジュール

表 1 車載用第 3 世代モジュールの主な仕様

項目	定格・特性
コレクター-エミッタ間電圧	750 V
定格電流	800 A
最大動作温度	175 °C
外形寸法	W162 × D116 × H24 (mm)
絶縁耐圧	2,500 V (交流実効値)
IGBT 部飽和電圧	1.45 V (25 °C, 800 A)
FWD 部順電圧	1.50 V (25 °C, 800 A)
IGBT/FWD 部熱抵抗	0.14 °C/W (10 L/min, LLC)
質量	560 g

に示す。

### (1) パワーモジュールの小型化

IGBT には、第 7 世代のチップ技術を適用して損失を低減するとともに、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) をワンチップ化した RC-IGBT を採用して、パワーモ

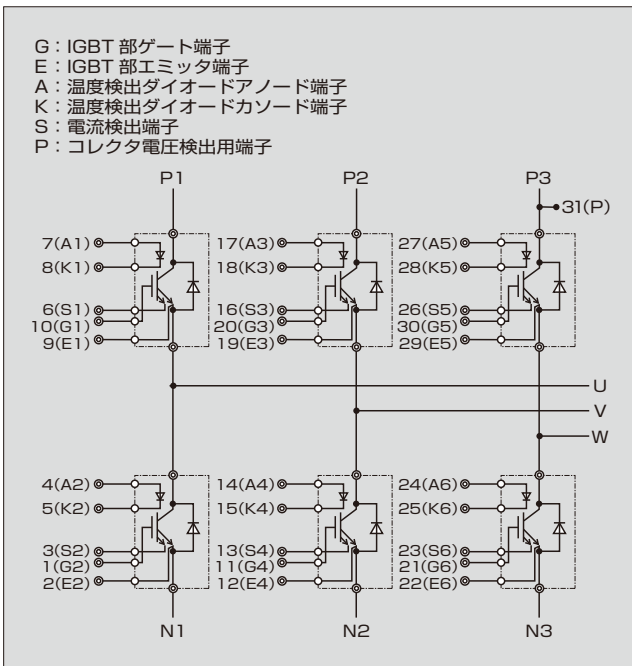


図2 車載用第3世代モジュールの等価回路

ジュールの15%小型化を図った。また、RC-IGBTにはIGBTに流れる電流とジャンクション温度の検出機能を搭載し、小型化を損なわずにチップ性能を発揮することと、短絡や過熱に対して確実な保護動作を行うことができるようにした。

車載用第3世代モジュールでは、図2に示すように各アームのIGBT部には、駆動に必要なゲートおよびエミッタ端子に加えて、温度検出用ダイオードのアノードおよびカソード端子、電流検出用端子を配置している。温度検出用ダイオードはRC-IGBTに内蔵している。

### (2) 高放熱性能を持つ冷却器構造

水冷フィンとカバーを一体化した冷却器構造により、放熱性の向上と薄型化を実現した。冷媒出入り口はフランジ構造を採用し、インバータ筐体(きょうたい)との水密性はOリングなどで確保する。

### (3) 主端子配線の低インダクタンス化

平滑コンデンサに接続する各相の入力端子を独立させることと、配線を最短にすることによりインダクタンスを下げ、高速スイッチング動作によるスイッチング損失の低減と、電流遮断時のサージ電圧の低減を図った。<sup>(6)</sup>

## 3 高機能化のための要素技術

### 3.1 RC-IGBT の設計技術

図3に、RC-IGBTの概略構造を示す。フィールドストップ(FS)型IGBTを採用し、ストライプ状に交互にIGBT領域とFWD領域を一つのチップに配置した構造である。ワンチップ化でチップ周辺部の耐圧を確保するガードリングと呼ばれる領域を削減でき、二つのチップで構成する従来よりもチップ面積が小さくなる。また、IGBT動作時にはFWD部からも放熱し、FWD動作時にはIGBT

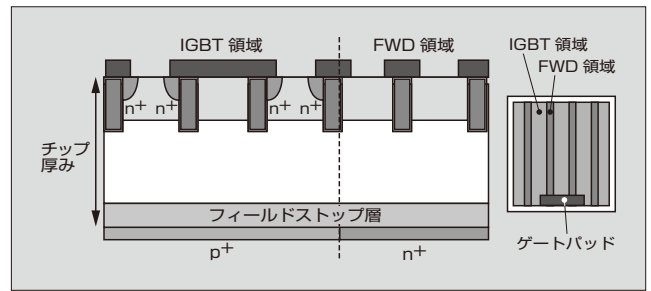


図3 RC-IGBTの概略構造

部からも放熱するので、IGBTとFWDそれぞれの動作時に熱抵抗を低減できる効果がある。さらに、最新の薄ウェーハ化技術、トレンチ構造、チャンネル密度などの最適化により低損失化とチップの小型化が可能となり、パワーモジュールの小型化に貢献している。IGBT領域およびFWD領域の比率は、インバータの力行動作および<sup>(注1)</sup>回生動作を考慮して最適化している。また、IGBTとFWDを一体化したことにより、IGBT部のターンオフ動作時にFWD領域もキャリアの排出経路として使うことにより、RC-IGBTではターンオフ損失を低減することができる。

RC-IGBTの採用、IGBT領域とFWD領域の配分の最適化、さらには最新世代のチップ技術を用いることにより、IGBTモジュールとしての電気特性も改善でき、電力損失を低減している。同じ活性面積では、20%の電力損失の低減を実現している。<sup>(7)</sup>

### 3.2 RC-IGBTの保護技術

IGBT技術の世代交代が進み、飽和電圧やスイッチング損失が低減すると、重要となるのが短絡保護である。すなわち、飽和電圧の低減に伴って短絡電流が増加するため、短絡エネルギー耐量を超えることなく短時間で遮断するとともに、サージ電圧の増加を抑える必要がある。RC-IGBTにおいて短絡動作が発生した場合、高速かつ確実に遮断するため、車載用第3世代モジュールでは電流検出方式による短絡保護を採用している(図4)。この方式は、短絡が発生した場合に短絡電流の一部を電流検出端子に分流し、接続した抵抗に発生する電流検出用電圧 $V_{SC}$ によって短絡保護動作を開始する。直列に接続した抵抗 $R_{SE1}$ および $R_{SE2}$ の抵抗値を設定することにより、短絡保護を開始する電流値を設定する。富士電機では、電流検出方式による短絡保護回路を搭載したモジュール評価用のドライブ基板を用意している。ここでは、評価用ドライブ基板の機能を紹介するとともに、短絡保護の考え方を述べる。

#### (1) 評価用ドライブ基板

図5に、車載用第3世代モジュールに装着した評価用ドライブ基板の外観を示す。評価用ドライブ基板は6ア

<注1> 力行: モータの動力を機械に伝えて加速すること

<注2> 回生: 減速時モータが発生する電力をバッテリーへ返すこと

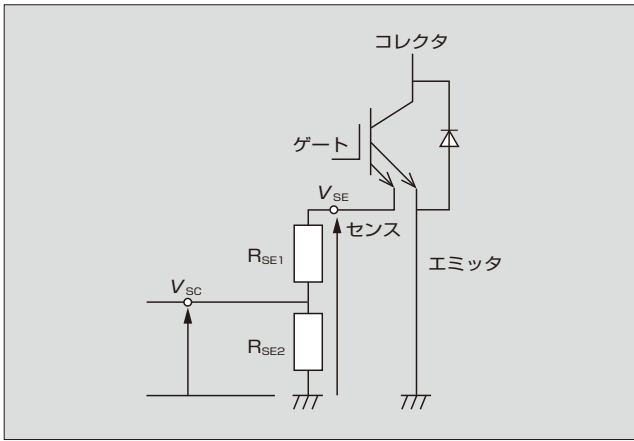


図4 電流検出方式による短絡保護

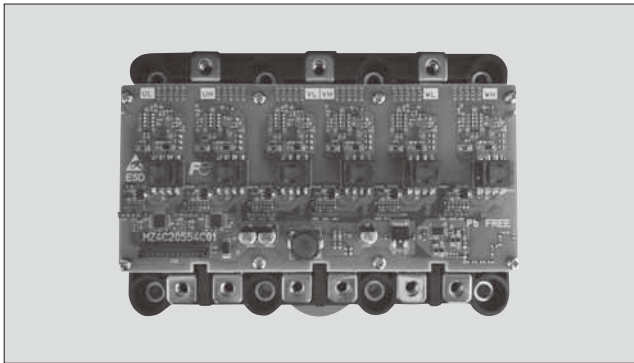


図5 車載用第3世代モジュールに装着した評価用ドライブ基板

μ分の IGBT 部ドライブ回路を持ち、ゲート駆動電圧は +15/-0V (オン電圧/オフ電圧) である。短絡検知と同時に、短絡電流を抑制するため、ゲート駆動電圧をクランプ状態にする機能を持っている。また、短絡保護機能とともに、図2に示すパワーモジュールのコレクタ電圧検出用端子を用いてパワーモジュールに入力される直流電圧の監視機能も持っている。

図6に、車載用第3世代モジュールにおける、評価用ドライブ基板を用いた短絡保護動作波形の例を示す。このときの短絡保護の動作フローを次に示す。

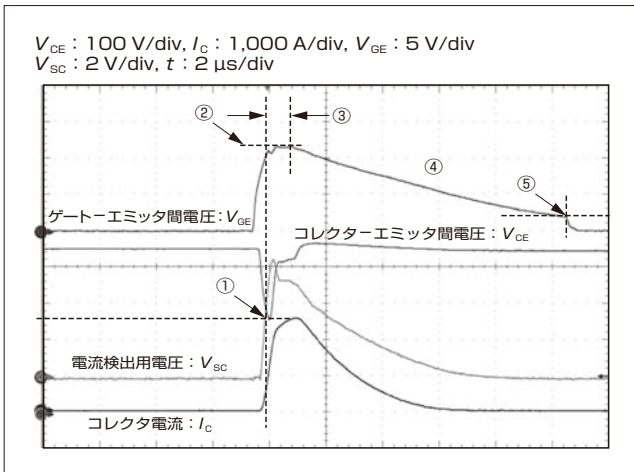


図6 短絡保護動作波形

- (a) 短絡が発生し、 $V_{SC}$  (図4) が上昇する (図6①)。
- (b)  $V_{SC}$  が短絡電流と判断するしきい値電圧を超えた時点から、短絡電流を抑制するためにゲート-エミッタ間電圧が12Vでゲートクランプ状態になる (図6②)。
- (c) 短絡状態が継続すると、ゲートクランプ状態が継続する (図6③)。
- (d) ゲートクランプ状態がある期間継続すると、短絡発生の異常状態と判断し、ゲート-エミッタ間電圧が緩やかに低下するソフト遮断動作を行う (図6④)。
- (e) IGBTのゲートしきい値電圧よりも十分低いゲート-エミッタ間電圧でソフト遮断動作が終了し、通常遮断状態でゲート-エミッタ間電圧がオフする (図6⑤)。

(2) 短絡保護設計のポイント

素子破壊を起こさず、確実に短絡動作を検知し、短絡保護を行うことが必要であり、次に示す内容が短絡保護設計のポイントとなる。

- (a) 短絡検知電圧
  - 短絡電流を検知する電圧値を決定する。
- (b)  $V_{SC}$  最大電圧
  - ドライブ IC の耐圧以下とする。
- (c) ゲートクランプ電圧
  - 短絡電流の制限値を決定する。
- (d) ゲートクランプ保持時間・ソフト遮断動作時間
  - 短絡エネルギーを破壊レベル以下とするための、それぞれの時間を決定する。

一方、IGBTの正常なスイッチング動作では、 $V_{SC}$  を適用最大電流の範囲で短絡検知電圧より低い値とする必要がある。万一、正常動作において短絡を誤検知した場合、IGBTのスイッチング損失の増加や装置の誤動作を引き起こす。先に述べた短絡保護での短絡検知電圧の設定においては、正常動作での  $V_{SC}$  の挙動も考慮する必要がある。

(3) 評価結果の例

図7にターンオン時の  $V_{SC}$  の挙動を含む動作波形を、図8に短絡状態とターンオン時の  $V_{SC}$  のチップ温度依存性を示す。

図7における(i)から(iii)の期間での  $V_{SC}$  の挙動を次に示す。

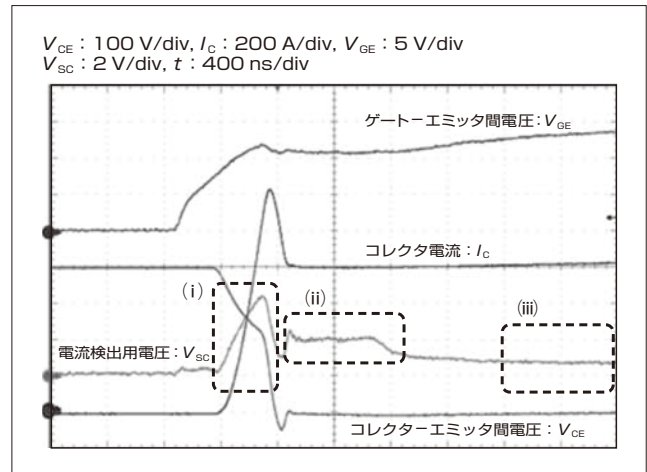


図7 ターンオン動作波形

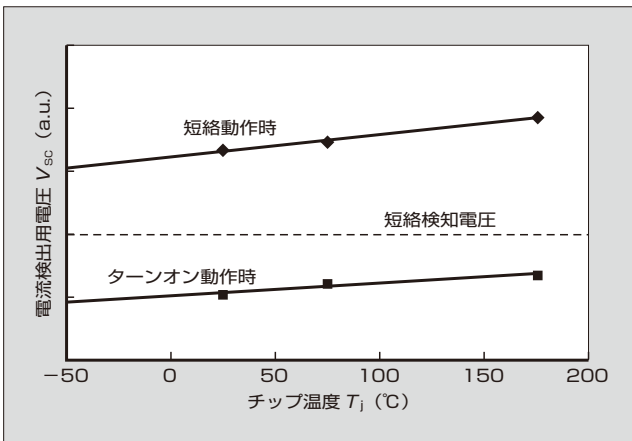


図8 電流検出用電圧のチップ温度依存性

## (a) 期間(i)

コレクタ電流が増加し、電流の傾きにより過渡的に  $V_{sc}$  が上昇する。この期間は正常動作の範囲であり、短絡を検出しない期間とする必要がある。

## (b) 期間(ii)

コレクタ電流は一定値に達したが、ゲート-エミッタ間電圧が一定期間 IGBT のしきい値電圧レベルに保持される期間であり、この期間で高い  $V_{sc}$  が発生する。この期間で短絡を検知すべきであるが、誤検知を防ぐために通常スイッチング時は  $V_{sc}$  を短絡検知電圧よりも低く設定する必要がある。

## (c) 期間(iii)

ターンオン電流とゲート-エミッタ間電圧は所定の設定値へ移行する期間となり、 $V_{sc}$  も低い値となる。

図8に示すターンオン時の  $V_{sc}$  は、期間(ii)の値を示しており、適用される全電流と全温度領域で短絡検知電圧よりも低い値であることが必要である。また、短絡保護動作でのゲートクランプ期間は、上述の通常スイッチングでの期間(i)も考慮して設定する必要がある。

## 3.3 高放熱冷却器の適用技術

車載用第3世代モジュールでは、カバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットとフランジ構造の冷媒出入口を採用している。ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したことおよびフィン形状に工夫を加えたこと<sup>(7),(8)</sup>で、従来品よりも放熱性を30%向上させている。車載用第3世代モジュールは、冷媒出入口にフランジ構造を採用したことが特徴であり、ここではOリングを用いたフランジ構造のシールの確保について述べる。

直接水冷型パワーモジュールは、フランジでシール材を介して装置筐体に取り付けられる。使用温度や冷媒の圧力が変化した場合でも、冷媒漏れを防止するシールが必要である。車載用第3世代モジュールにOリングを用いた例を、図9に示す。実際には、使用環境や通電条件により、装置全体に変形や振動などが発生するので、使用環境下で常にOリングが適切なつづれ幅でフランジと筐体に接している状態を維持することが必要である。

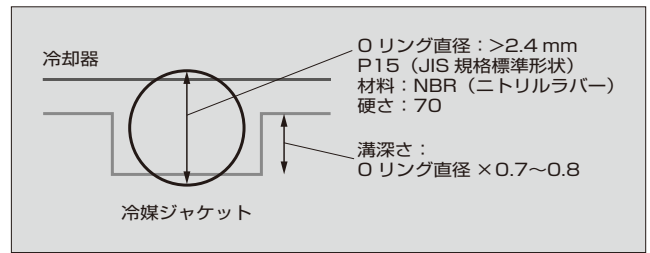


図9 Oリングを用いたシールの例

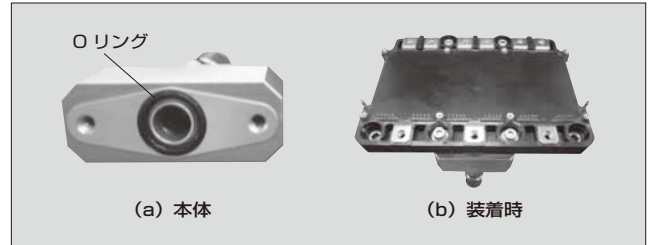


図10 フランジ接続用アダプタ

富士電機では、ユーザの評価用として、フランジと接続し冷媒を流すためのアダプタを用意している。図10にフランジ接続用アダプタの外観を示す。

## 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機能化について述べた。パワーモジュールの高機能化を実現する要素技術であるRC-IGBTとその保護技術、および直接水冷を実現する冷却器の適用技術は、ユーザのインバータ装置設計を支援するものである。今後も、さらなる技術革新を推進し、より使いやすい高機能な製品を充実させ、提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) 日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.
- (2) 安達新一郎ほか. 車載用IGBTモジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.435-439.
- (3) 高橋良和ほか. パワー半導体の現状と展望. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.234-239.
- (4) Higuchi, K. et al. "An intelligent power module with high accuracy control system". Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.39-46.
- (5) 吉田崇一ほか. 車載用RC-IGBT. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.279-282.
- (6) Adachi, S. et al. "Automotive power module technologies for high speed switching". Proceedings of PCIM Europe 2016, May 10-12, Nuremberg, p.1956-1962.
- (7) 荒井裕久ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.269-273.
- (8) 郷原広道ほか. 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.



**佐藤 憲一郎**

ハイブリッド自動車用 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。



**長畦 文男**

ハイブリッド自動車用 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 モジュール技術部課長。工学博士。電気学会会員。



**榎本 一雄**

ハイブリッド自動車用 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 モジュール技術部主査。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体





\*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。