

中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」

“M675” New IGBT Module for BEVs in China

高島 健介 TAKASHIMA, Kensuke

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

立石 義博 TATEISHI, Yoshihiro

近年、世界的に自動車の電動化が加速し特に中国では世界最大の BEV 市場が形成され、大型車両の需要が高まっており、パワーモジュールは高出力化、高電力密度化が求められている。富士電機は、140 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとして、新型 IGBT モジュール「M675」を開発した。低損失な RC-IGBT、高放熱な冷却器の組合せにより、従来品「M653」と本体サイズは同じでありながら、発生損失を 13% 低減、熱抵抗を 20% 低減し、出力電流を 30% 増加させた。その結果、高電力密度化を実現し、ターゲットとするモータ出力容量を M653 の 100 kW から 140 kW まで拡大した。

The electrification of automobiles has recently accelerated worldwide. Especially in China, where the world's largest BEV market has developed, the demand for large vehicles is increasing, so has the demand for power modules with higher output and power density. Fuji Electric has developed the “M675” new IGBT module for motors with output capacities of 140 kW class. By combining a low-loss RC-IGBT and high thermal performance cooler, it has reduced power loss by 13% and thermal resistance by 20% and has increased output current by 30%, while maintaining the same dimensions as the conventional “M653”. Consequently, it achieves a higher power density and increases the targeted motor output capacity to 140 kW compared to the 100 kW of the M653.

① まえがき

近年、気候変動問題の解決を目指し“2050 年カーボンニュートラル実現”に向けた国際的な取組みが加速している。自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として、ハイブリット自動車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）やプラグインハイブリット自動車（PHEV：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、電気自動車（BEV：Battery Electric Vehicle）のような電気モータで走行する電動車（xEV）の普及が期待されている。特に中国では、政府が BEV 普及のための政策を積極的に行っていることもあり普及率が高く、世界最大の BEV 市場を形成している。近年、車両には快適な室内空間の確保や高出力化が求められており、大型車両の需要が年々高まっている。車両の大型化に向けては、駆動モータの制御に用いるインバータユニットを小型化してエンジンルームの限られたスペースに搭載した上で、高出力化、低損失化する必要があり、“高電力密度化”が重要となる。そのため、インバータユニットの心臓部であるパワーモジュールにも高電力密度化が要求されている。

このような背景から、富士電機は、パワーモジュールの高電力密度化を行う上で必要な半導体技術および冷却技術の開発に取り組んでいる。半導体技術では、チップ搭載面積削減によるパワーモジュールの小型化に向け、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と FWD（Free Wheel Diode）の二つの役割のチップを 1 チップ化した RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）技術に取り組んできた。⁽¹⁾⁽²⁾ 冷却技術では、フィンとウォータージャケットの隙間をなくすことで冷媒の流速を増加させ冷却性能を向上させたウォータージャケット一体型フィンの開発に取り組んできた。⁽²⁾⁽³⁾ これらの技術を適用して高電力密度を実現し、

2017 年に 100 kW クラスのモータ出力容量帯をターゲットとした 6 in 1 パワーモジュール「M653」をリリースした。

今回、M653 に対し新規技術を適用することにより、同一パッケージで電力密度をさらに向上し、適用可能なモータ出力容量帯を 100 kW から 140 kW まで拡大した中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」を開発した。

② 「M675」の特徴

今回開発した M675（定格 750 V/820 A）は、三相インバータ回路を一つのモジュールに集積した 6 in 1 パワーモジュールである。図 1 に M675 の外観を示す。また、表 1 に M653 と M675 の比較を示す。さらなる高電力密度化を実現するために、チップ性能および冷却性能を向上させた結果、適用可能なモータ出力容量帯を 100 kW から 140 kW まで拡大した。また、既に M653 を使用している顧客がインバータ周辺の設計資産を流用できるように、M653 と同一の端子ケースを採用するとともに、冷却器のインバータとの取付け部を同一寸法として、M653 と

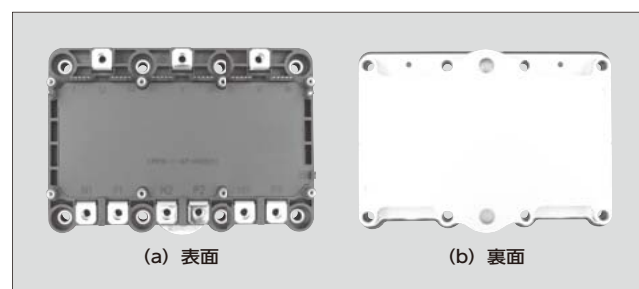
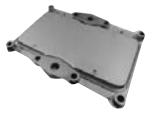


図 1 「M675」

表1 「M653」と「M675」の比較

項目		M653 (従来品)	M675 (開発品)
外観	表面		
	裏面		
モータ出力容量帯		100 kW	140 kW
コレクタ・エミッタ間電圧		750 V	750 V
チップ技術		第7世代 RC-IGBT	第7世代 RC-IGBT (M675向け)
冷却器構造		波フィン構造	ピンフィン構造
パッケージサイズ (mm)		W162×D116×H24 (同一パッケージ)	

の互換性を確保した。このパワーモジュールの特徴の概要を M653 と比較して次に示す。

(1) チップ技術

M653 で使用していた第7世代 RC-IGBT に対し、フィールドストップ (FS) 層の最適化によるチップの薄型化および新規ライフタイムコントロール手法の適用により、低損失化を実現した。この新型チップはチップサイズが従来と大きく変わらないため、M653 と同一パッケージへの搭載が可能である。詳細は[3]章で述べる。

(2) 冷却器構造

従来のウォータージャケット一体型フィンのコンセプトは維持し、冷却器内部のフィンの形状を従来の波フィン構造からピンフィン構造とすることにより、熱抵抗を低減した。また、水路穴やモジュール締結穴位置を M653 と共通にすることで、既存モデルからの置換えを容易にした。詳細は[4]章で述べる。

[3] 第7世代 RC-IGBT の性能向上

3.1 「M675」向け RC-IGBT の改良点

M675 には、第7世代 RC-IGBT をさらに性能向上させた新規設計のチップを搭載している。図2に、M675 向

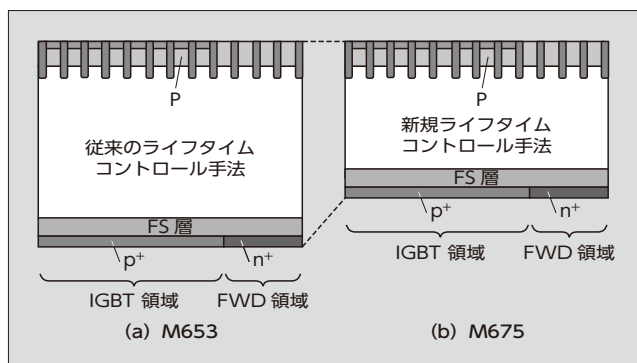


図2 第7世代 RC-IGBT の断面図の比較

け第7世代 RC-IGBT と従来の第7世代 RC-IGBT の断面図の比較を示す。M675 向け RC-IGBT の改良点を次に示す。

(1) FS 層の最適化によるチップの薄型化

RC-IGBT では、チップの薄型化により導通損失およびスイッチング損失を低減できるが、チップを薄くすると耐圧が低下してしまい、損失低減と耐圧はトレードオフの関係にある。M675 向け第7世代 RC-IGBT では、このトレードオフの関係を改善するため FS 層の不純物濃度と分布を最適化し、高い耐圧を実現した。これにより、従来チップと同等の耐圧を確保しつつチップを薄型化し、導通損失およびスイッチング損失を低減した。

(2) 新規ライフタイムコントロール手法の適用

RC-IGBT は、IGBT と FWD を1チップ化することにより小面積化しているが、それぞれのチップ特性の最適化は製造上難しい。例えば、FWD の逆回復電流調整のために結晶欠陥を導入するライフタイムコントロールを行えば、FWD の逆回復損失 E_{rr} は低減できるが、導通損失となる IGBT のコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ や、FWD のダイオード順方向電圧 V_F は増加してしまう。この問題を解決するため、ライフタイム分布を最適化する新規ライフタイムコントロール手法を開発し、M675 向け RC-IGBT チップに適用した。この新規手法により、 E_{rr} と導通損失の双方を低減することができた。

これら二つの改良により、M675 向けの RC-IGBT では、従来の第7世代 IGBT と比較して耐圧を維持しつつ、損失を低減した。

3.2 損失低減

図3に、M653 と M675 の出力特性の比較を示す。M675 では搭載チップの改良により、同じコレクタ電流 I_C において、 $V_{CE(sat)}$ を15%低減している。

図4に、M653 と M675 の動特性波形とスイッチング損失を示す。M675 のスイッチング損失 (ターンオン損失 E_{on} + ターンオフ損失 $E_{off} + E_{rr}$) は136.2 mJ となり、M653 の127.9 mJ に対し6%低減した。

次に、M675 と M653 を三相インバータにて同一の条

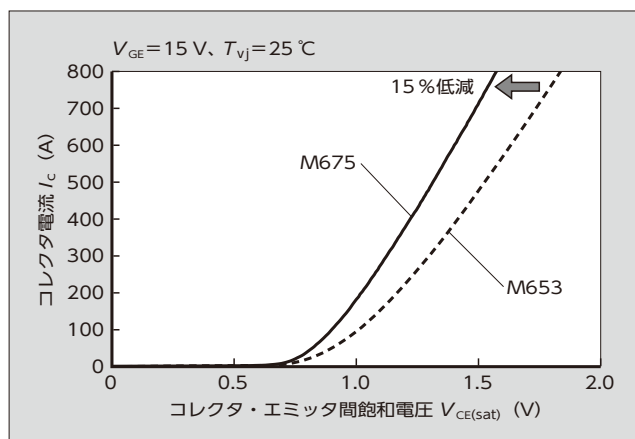


図3 「M653」と「M675」の出力特性の比較

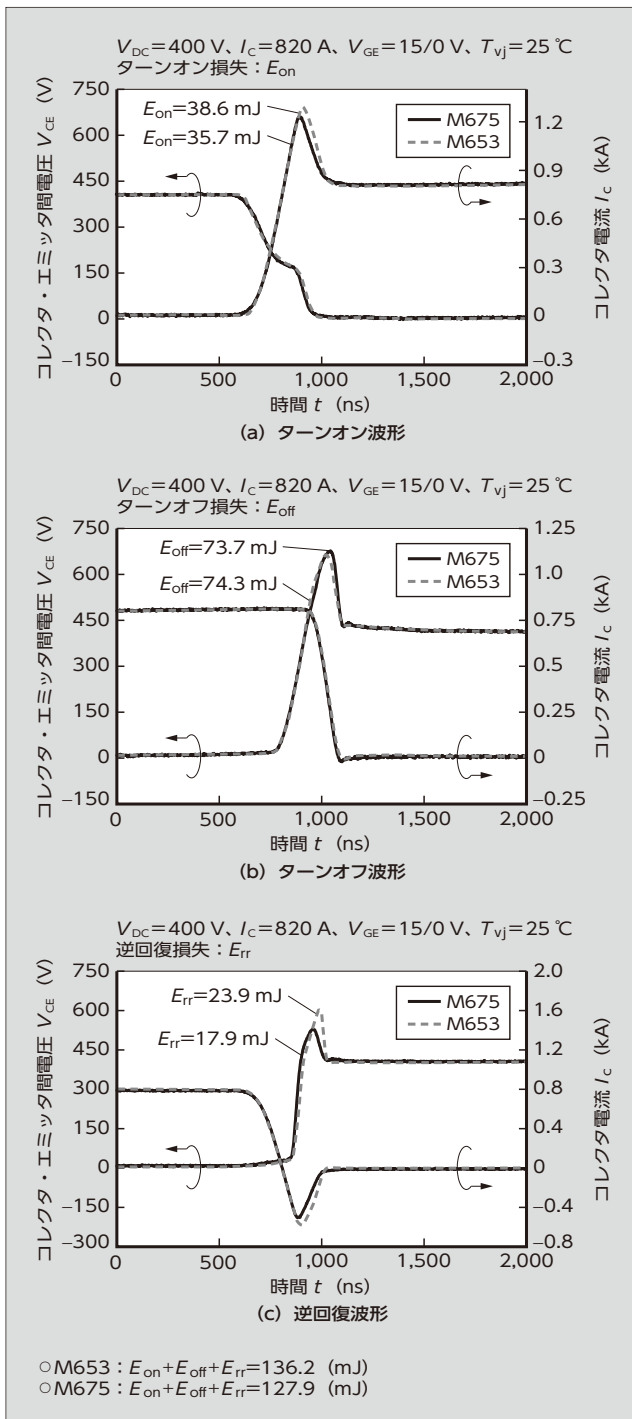


図4 動特性波形とスイッチング損失

件で運転したときの発生損失を試算した。図5に示すとおり、M675では導通損失およびスイッチング損失が改善され、トータルの発生損失を13%低減できる。

4 新型冷却器構造

4.1 「M675」向け冷却器の改良点

パワーモジュールの高電力密度化を実現するには、チップの低損失化に加え、冷却性能の向上も有効である。M675では、従来の冷却器に比べて大幅に冷却性能を向上した新型冷却器を開発し適用した。新型冷却器では、冷

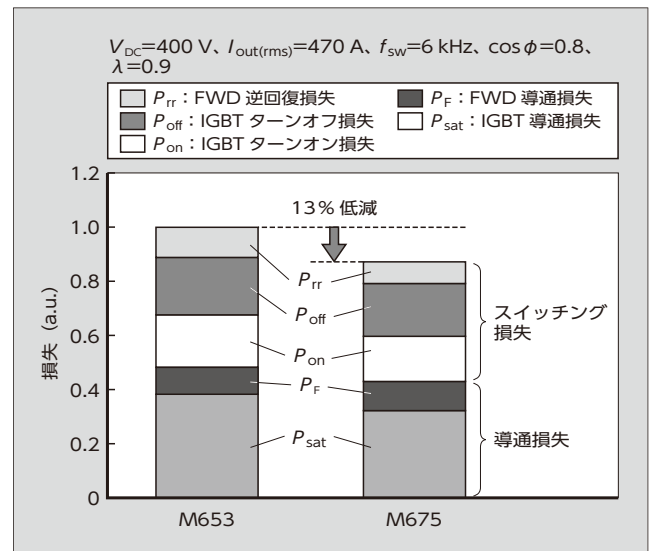


図5 損失比較

却器内部のフィン構造を改良した。

図6にM653およびM675に適用している冷却器の内部構造を示す。M653の冷却器内部は波フィン構造を採用していたが、M675搭載の新型冷却器ではピンフィン構造を採用した。このピンフィン構造では、波フィン構造に比べて冷媒の流路が限定されないため熱を逃がしやすく、さらに冷媒とフィンの接触面積を増加させることにより冷却性能を向上している。

4.2 冷却性能向上

図7に新型冷却器と従来の冷却器の圧力損失と熱抵抗のトレードオフ関係を示す。一般的に冷却器の圧力損失と熱抵抗はトレードオフの関係にあるが、新型冷却器構造を採用したM675ではフィン形状の改良により、このトレードオフ関係を改善した。同じ圧力損失条件で比較すると、M675はM653と比べて熱抵抗が20%低減しており、圧

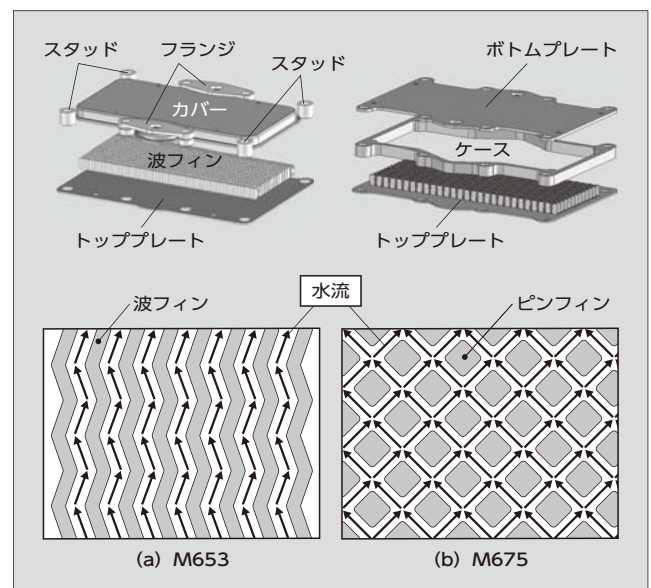


図6 冷却器の内部構造

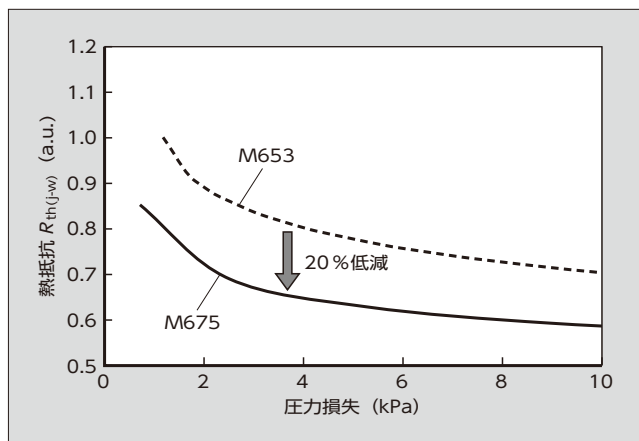


図7 圧力損失と熱抵抗のトレードオフ関係

力損失を M653 と同等に維持しつつ、高出力化が可能である。一方、M675 は M653 に対して低い圧力損失で同じ熱抵抗を実現しており、車両の電動ウォーターポンプの消費電力削減による電力効率向上に貢献する。

これに加え、M675 に搭載している新型冷却器は、従来の冷却器と同じウォータージャケット一体型構造を採用しており、顧客側でのウォータージャケットが不要であり熱設計を容易としている。また、冷却水の水路穴位置やモジュール締結穴位置も同一設計としており、M653 との置換えが容易な構造とした。

⑤ 出力電流の向上

図8に、M653とM675の出力電流とチップ接合温度の関係を示す。第7世代RC-IGBTに改良を加えたチップと新型冷却器構造の適用により、M675はM653に比べて、同一チップ接合温度において出力電流が30%増加した。これにより、適用可能なモータ出力容量帯を100kWから140kWに拡大した。

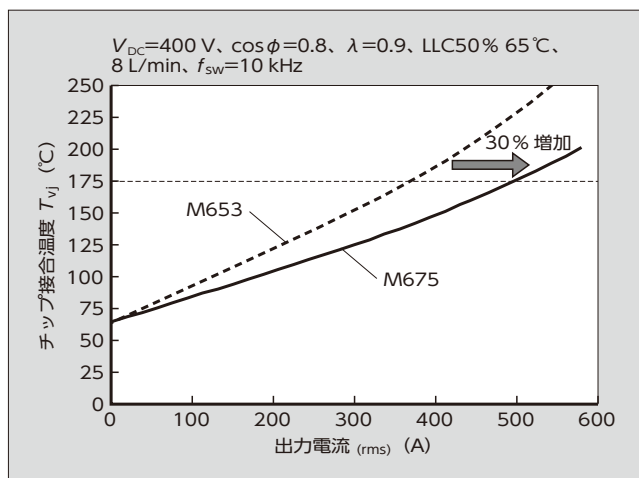


図8 出力電流とチップ接合温度の関係

⑥ あとがき

本稿では、性能向上した第7世代RC-IGBTチップおよび新型冷却器構造を採用した「M675」モジュールについて述べた。今回開発した車載用IGBTモジュールM675は、従来品「M653」に比べて適用電流を30%増加し、適用可能なモータ出力容量帯を100kWから140kWに拡大した。

今後も電動車インバータシステムの高電力密度化の要求に応じて電動車の普及を後押しし、カーボンニュートラル実現に貢献していく所存である。

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) Gohara, H. et al, "Next-Gen IGBT module structure for hybrid vehicle with cooling performance and high temperature operation". PCIM Europe 2014, p.1187-1194.
- (4) Adachi, S. et al, "Automotive power module technologies for high speed switching". PCIM Europe 2016, p.1956-1962.
- (5) Adachi, S. et al, "Ultra-Compact Automotive Power Module for 100 kW xEV Application". PCIM Europe 2022, p.1035-1038.



高島 健介

電気・ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。



吉田 崇一

車載用パワー半導体素子の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。



立石 義博

車載用IGBTモジュールのパッケージ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部。



＊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。