

# 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

## High-Power IGBT Modules for 3-Level Power Converters

陳 士爽清 CHEN Shuangqing

小川 省吾 OGAWA Syogo

磯 亜紀良 ISO Akira

近年、再生可能エネルギーが注目され、特に太陽光発電や風力発電の市場が急速に伸びている。これらの分野では大容量電力変換装置を実現するため、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並列に接続して使用することが多いが、配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。富士電機は、素子を 1 パッケージ化した 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。モジュール内部の主端子ブスバーをラミネート構造とし、内部インダクタンスの低減を達成している。これにより、電力変換効率の向上と装置の小型化が期待できる。

Recently, renewable energy has been attracting attention and, photovoltaic and wind power generation markets are growing rapidly in particular. In these fields, low- and medium-power IGBT modules are often connected in parallel to realize high power converters; but this will cause high surge voltage due to wiring inductance. Fuji Electric is developing one package for high-power IGBT modules for 3-level power converters. Improvement for power conversion efficiency and miniaturization of equipment can be expected. It has also realized a laminated structure for the main terminal bus bar to reduced internal inductance.

### 1 まえがき

近年、温暖化防止やエネルギー資源の有効活用のため、再生可能エネルギーがますます重要となってきた。温室効果ガス (CO<sub>2</sub>) の発生を抑えつつ電力を供給する太陽光発電や風力発電の市場が急速に伸びている。電力エネルギーの効率的な利用を可能にするパワーエレクトロニクス技術は、発電時の CO<sub>2</sub> 排出量の抑制や再生可能エネルギーの利用拡大につながる。

富士電機は、太陽光発電や風力発電などの大容量電力変換装置用に 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。本稿では、その特徴と特性について述べる。

### 2 3 レベル電力変換方式

電力エネルギーの変換には 2 レベル電力変換方式が多く使われているが、これよりも変換効率を上げる方法として 3 レベル電力変換方式<sup>(注1)</sup>がある。この方式は、中性点を持つことで、2 レベル電力変換方式の半分の電圧でスイッチングすることにより、出力側の高調波の低減、発生損失の低減、装置の小型化などのメリットがある。3 レベル電力変換方式には 2 種類あり、スイッチング素子が直列につながっている NPC (Neutral-Point-Clamped<sup>(1)</sup>) 方式と、中間双方向スイッチングを使用する AT (Advanced T-type)<sup>(2)</sup>-NPC 方式とがある。

富士電機は、太陽光発電用機器や無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supplies) に適用するため、3 レベルモジュールの開発に力に注いでいる。これまで、

小・中容量の AT-NPC IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール<sup>(2)~(4)</sup>をラインアップし、機器の高効率化に貢献してきた。

太陽光発電 (メガソーラー) や UPS を大容量にするためには、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並列に接続して使用することが多い。しかし、IGBT モジュールの並列使用はモジュール間や、モジュールと主回路間の配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。また、IGBT モジュールの並列使用で、冷却フィン<sup>(5)</sup>の面積が大きくなる傾向もある。このような課題を解決するため、大容量 IGBT モジュールが市場から期待されている。

### 3 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールの特徴と電気特性

#### 3.1 特徴

3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールは、AT-NPC 方式または NPC 方式の変換回路とサーミスタを 1



図1 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

〈注1〉 3 レベル電力変換方式: 277 ページ「解説1」参照

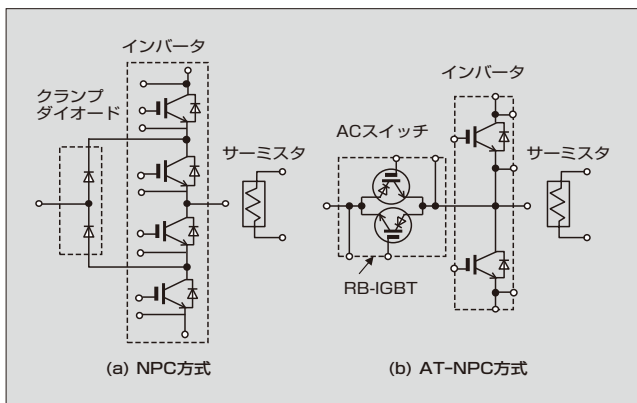


図2 IGBTモジュールの等価回路

パッケージ化した大容量 IGBT モジュールである。図1に IGBT モジュールの外観を、図2に等価回路を示す。

スイッチング素子の最大定格は AT-NPC 方式で 1,200 V/900 A、NPC 方式で 1,200 V/600 A であり、「V シリーズ」チップと RB (Reverse Blocking) -IGBT チップを使用している。また、電磁相互誘導作用を利用し、IGBT モジュールの内部インダクタンスを低く抑えている。

小・中容量の IGBT モジュールを並列接続で使用する場合に比べて、この IGBT モジュールは次のメリットがある。

- (a) 1パッケージ化により、内部インダクタンスが小さくなる。
- (b) IGBT モジュールの実装面積が省スペースで、冷却フィンの面積が小さくなるので、装置の小型化が期待できる。

IGBT モジュールは、AT-NPC 方式と NPC 方式が同じ外観になるように開発を進めている。AT-NPC 方式の IGBT モジュールは、インバータ部の耐圧が2レベルと同様で、かつ電流を通過する素子数が NPC 方式より少ないので、導通損失が抑えられる。一方、NPC 方式の IGBT モジュールのスイッチング素子は直列につながれているので、素子の耐圧が2レベルの半分になり、高圧分野に向いている。それぞれの IGBT モジュールに共通した特徴を次に示す。

- (a) スwitching電圧が2レベル電力変換回路の場合の半分になるので、変換器のスイッチング損失が低減できる。
- (b) スwitching波形が階段状になるので、2レベル電力変換回路に比べて高調波の低減ができ、フィルタが小さくなるため装置の小型化が可能である。

### 3.2 IGBT モジュールの電気特性

3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールの概要を表1に示す。DC バス電圧 1,000 V 向けの AT-NPC 方式の IGBT モジュールには3種類の定格電流がある。一方、DC バス電圧 1,500 V 向けに NPC 方式の IGBT モジュールの開発も進めている。

使用しているチップの特徴を次に示す。

- (1) AT-NPC 方式の IGBT モジュールのインバータ部と

表1 IGBTモジュールの概要

方式	型式	パッケージ寸法	定格電圧	定格電流
AT-NPC	4MBI450VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	450 A
	4MBI650VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	650 A
NPC	4MBI900VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	900 A
	4MBI600VC-120-50	L250×W89×H38(mm)	1,200 V	600 A

#### NPC 方式の IGBT モジュール

最新の「V シリーズ」IGBT および FWD (Free Wheeling Diode) チップを採用している。

- (a) フィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲート構造の最適化によりオン電圧  $V_{CE(sat)}$  とスイッチング損失を低減している。
- (b) ゲート抵抗  $R_g$  によりターンオン  $di/dt$  の制御性を向上している。

- (2) AT-NPC 方式の IGBT モジュールの AC スwitch部富士電機独自の逆耐圧を備えた分離層を持つ RB-IGBT<sup>(6)</sup>を採用し、双方向スイッチングを可能にした。

- (a) 逆耐圧性能を持つため、逆並列に RB-IGBT を接続することで双方向スイッチングが可能である。
- (b) ゲートにしきい値以上の順電圧を印加し、FWD として逆回復動作が可能である。

図3に IGBT チップと RB-IGBT チップの断面構造を示す。RB-IGBT の断面構造は、スクライプ領域においてダイシング面を覆うような深い  $p^+$  分離層を形成することによって、逆バイアス印加時に空乏層がダイシング面に達す

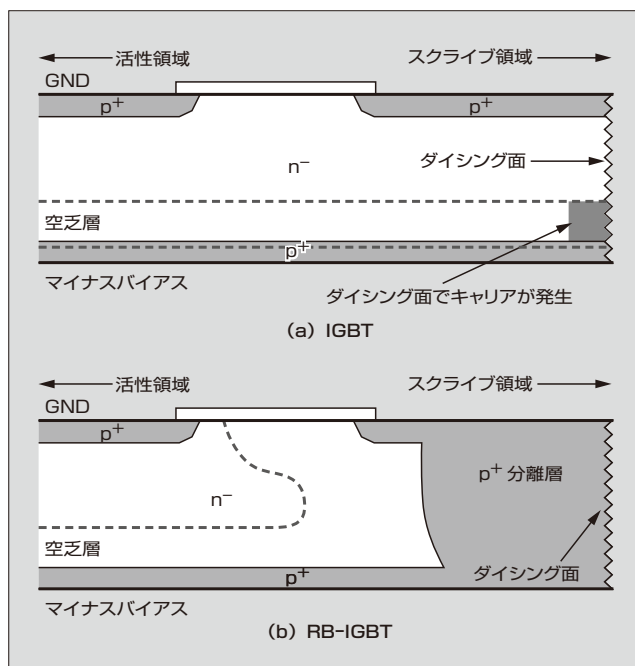


図3 IGBTチップとRB-IGBTチップの断面構造

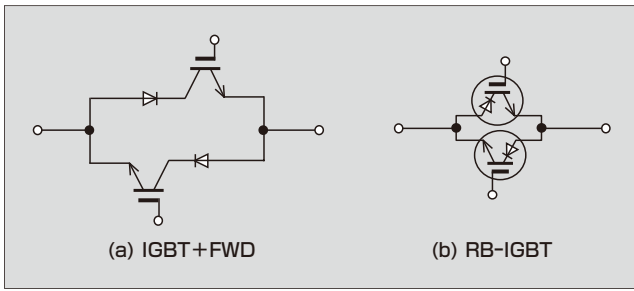


図4 双方向スイッチの構成

るのを阻止することで、逆方向耐圧を確保している。

図4に双方向スイッチの構成を示す。双方向スイッチはRB-IGBT 以外に IGBT+FWD の方法もある。しかし、通常の IGBT は逆バイアスが印加された際に電圧を支える pn 接合がダイシング面に接しているため、逆印加するとダイシングによって生じた高密度結晶欠陥により大量のキャリアが発生し耐圧が確保できないので、ダイオードを直列に接続する必要がある。したがって、オン電圧が増加するという問題がある。これに対して、RB-IGBT は逆方向耐圧を持つ構造のため、オン電圧が IGBT+FWD より少ない。オン電圧が少なくなると定常損失が少なくなる。

太陽光発電分野では、DC バス電圧 1,000 V が主流になりつつある。3レベル電力変換方式によるインバータで DC バス電圧 1,000 V の場合、500 V でスイッチングするので、AT-NPC 方式の 600 V 耐圧の中間素子では過電圧の可能性はある。一方、中間素子の耐圧を 1,200 V までに上げると、IGBT モジュールの定格電流が下がり、定常損失も増える。

そこで、富士電機は太陽光発電分野において DC バス電圧 1,000 V 向けに 900 V RB-IGBT を開発している。図5に、IGBT モジュールの定格電流が 450 A の 900 V RB-IGBT と 1,200 V IGBT+FWD のチップ出力特性を示す。900 V RB-IGBT のオン電圧は、1,200 V IGBT+FWD より 30% 低減する。

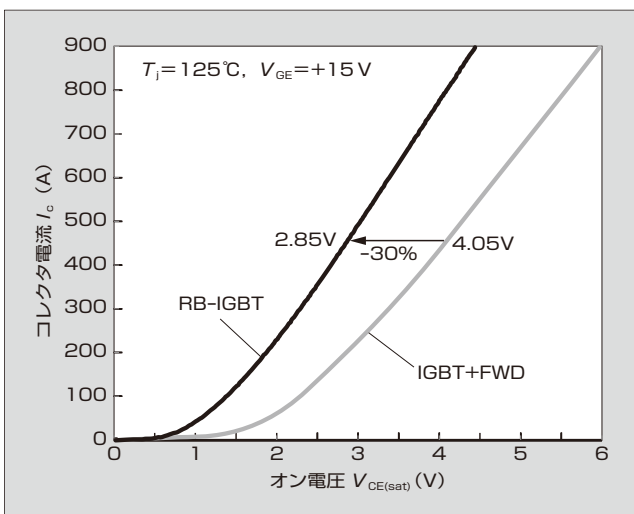


図5 900 V RB-IGBT と 1,200 V IGBT+FWD のチップ出力特性

### 3.3 スイッチング波形

富士電機の AT-NPC 方式の IGBT モジュールには二つのスイッチングモードがある。IGBT がスイッチングして RB-IGBT が逆回復する A モードと、RB-IGBT がスイッチングして FWD が逆回復する B モードである。

図6と図7にプロトタイプ IGBT モジュール (4MBI 650VB-120R1-50) を用いて測定したスイッチング波形を示す。図6は、 $V_{CC}$  が 500 V、 $I_C$  が 650 A、 $R_{g(IGBT)}$  が +3.3/-0.56  $\Omega$ 、 $T_j$  が 125  $^{\circ}\text{C}$  における A モードのスイッチング波形であり、スイッチング損失はターンオンで 21.7 mJ、ターンオフで 85.4 mJ、逆回復時で 76.4 mJ である。いずれも良好な波形を示している。

図7は、 $V_{CC}$  が 500 V、 $I_C$  が 650 A、 $R_{g(RB-IGBT)}$  が +3.3/-20  $\Omega$ 、 $T_j$  が 125  $^{\circ}\text{C}$  における B モードのスイッチング波形であり、スイッチング損失はターンオンで 31.6 mJ、ターンオフで 136.8 mJ、逆回復時で 35.3 mJ である。いずれも良好

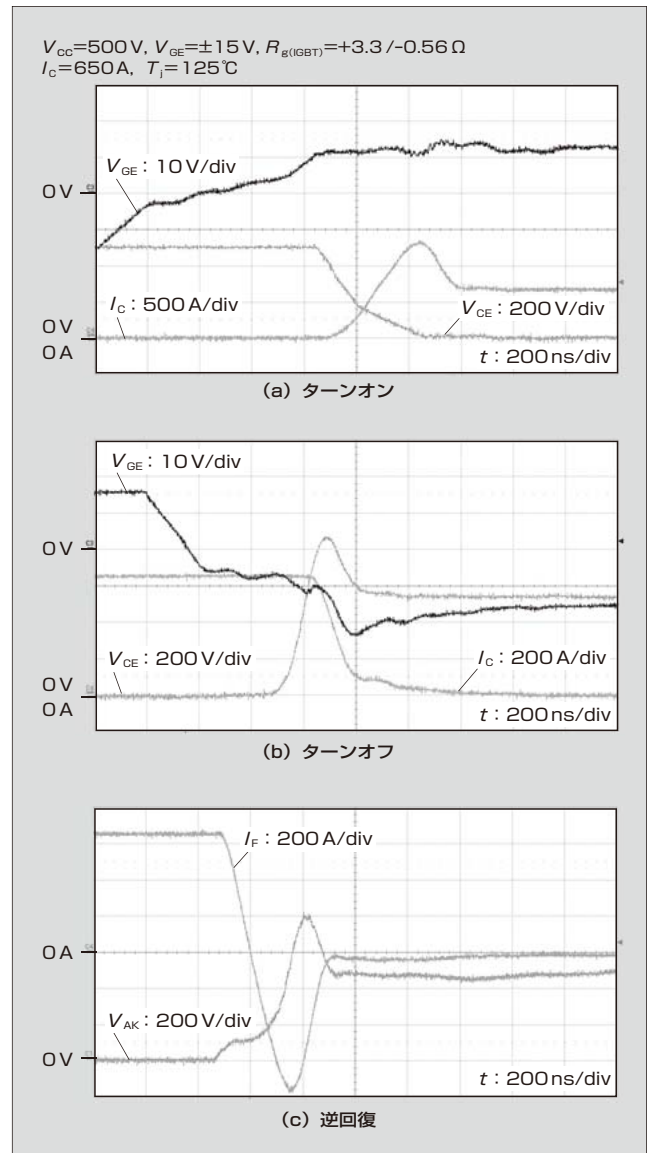


図6 プロトタイプ IGBT モジュールの A モードのスイッチング波形

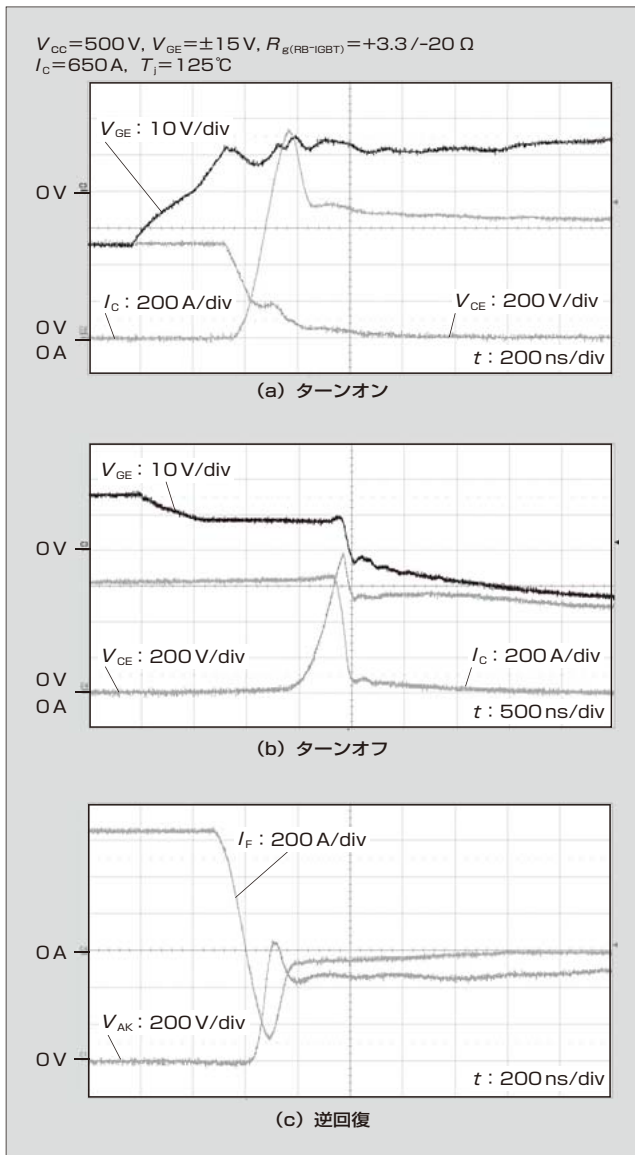


図7 プロトタイプ IGBT モジュールの B モードのスイッチング波形

な波形を示している。

### 3.4 パッケージ構造

パッケージ構造の特徴を次に示す。

(1) 主端子 P, M, N 配列

サージ電圧を低減するためのスナバコンデンサを配置しやすい配列 (P-M 間, M-N 間) である。

(2) 環境対策

鉛フリーはんだ材を適用し、RoHS 指令<sup>(注2)</sup>に適合している。

(3) 高耐圧パッケージ

入力 AC690V に対応したパッケージ構造であり、絶縁耐圧  $V_{iso}$  保証は AC 4kV/min が可能である。

(4) 超音波接合

本 IGBT モジュールは、超音波接合法による銅端子と銅

<注2> RoHS 指令：電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU (欧州連合) の指令

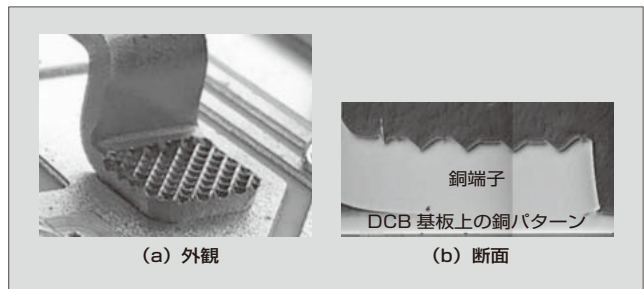


図8 DCB 基板と銅端子の超音波接合

回路パターン<sup>4)</sup>の直接接合を実施している。これは接合面の熱膨張係数差がないので、高い信頼性を達成することができる。従来のはんだ接合では、温度サイクル試験 (試験条件:  $-40$  から  $+150^\circ C$  の繰り返し) で 300 サイクル後、初期に比べて約 50% 引張強度が低下する。これに対して、超音波接合では、引張強度の低下がほとんどみられない。図8に、DCB (Direct Copper Bonding) 基板と銅端子の超音波接合の外観と断面を示す。

(5) 低インダクタンス

P-M 間, M-N 間を並列に配置し、電磁相互誘導作用によって低インダクタンスを実現した。既存の M403 パッケージに対してモジュールの大きさは約 2.36 倍大きくなるが、内部インダクタンスは最大 30nH, 最小 18nH である。電流が流れる経路によっても異なるが、M403 パッケージの 33nH に対して低減を達成している。

## 4 あとがき

本稿では、富士電機が開発している 3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールについて述べた。本 IGBT モジュールは、大容量、低インダクタンス、高信頼性、低損失の特徴を持ち、新エネルギー分野への応用が期待できる。

今後も、さらなるニーズに応えられるように半導体技術およびパッケージ技術のレベルを高め、太陽光発電用機器や UPS などの高効率化に貢献する製品開発を行っていく所存である。

### 参考文献

(1) Nabae, A. et al. "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter". IEEE Trans. on industrial applications. 1981, vol.1 A-17, no.5, p.518-523.

(2) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters". IPEC '10 proceedings, 2010, p.523-527.

(3) 小松康佑ほか. アドバンストNPC 回路用IGBT モジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.

(4) 小松康佑ほか. アドバンストNPC 回路用IGBT モジュールの系列化. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.299-303.

(5) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using Advances Three-level Topology". PCIM'10 Europe, Proceedings. 2010, p.550-555.

- (6) Wakimoto, H. et al. "600 V Reverse Blocking IGBTs with Low On-state Voltage". PCIM'11 Europe. Proceedings, 2011, p.317-322.



**陳 士爽清**

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産業モジュール技術部。



**小川 省吾**

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産業モジュール技術部チームリーダー。



**磯 亜紀良**

IGBT モジュールの構造開発・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事業統括部産業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。