

2.5 kV 平型 IGBT およびその応用技術

2.5 kV Press Pack IGBT and Its Applications

日吉 道明
M. Hiyoshi

星 公弘
K. Hoshi

安岡 育雄
I. Yasuoka

特集
II

近年、IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）の高耐圧化、大電流化が急激に進み、電鉄、産業分野に目覚ましく普及している。中でも特に電鉄用インバータのスイッチング素子は高信頼性が要求されるため、ワイヤボンド、はんだ接合を必要としない平型 IGBT を開発した。従来の平型 GTO（Gate Turn-Off thyristor）と同レベルの高信頼性と IGBT の高速性の両立を実現した世界初の IGBT である。平型 IGBT で構成されたインバータは従来の GTO インバータに比べ 3~4 倍の周波数で動作可能で、運転騒音が大幅に低減できる。この優れた特性をもつインバータはすでに製品化され、新幹線、地下鉄をはじめ電気機関車の各モータ駆動用制御装置として幅広く適用されている。

The recent rapid development of IGBTs with high voltage and current capacity has enabled IGBTs to be widely applied in industrial and transportation fields. In order to provide the high reliability demanded for switching devices, especially for electric train inverters, we have developed a press pack IGBT (PPI) which has neither wire-bonding nor solder connections.

The PPI is the first IGBT in the world to have both the equivalent reliability to a GTO and the high switching speed of an IGBT. Since an inverter with PPIs can be operated about three to four times as fast as an inverter with GTOs, operation noise is significantly decreased. Inverters with these excellent characteristics have been fabricated and applied to locomotive engines and trains for the Shinkansen and subway lines.

1 まえがき

IGBT は GTO にはない高速スイッチング性、低損失スナバ回路、簡単なゲート回路など優れた特性をもつため、高速性を要求される電鉄用インバータへの適用が急速に進んでいる。

IGBT は MOS (Metal Oxide Semiconductor) 微細加工により製造される先端デバイスであり、チップサイズの大口径化は困難である。一般的には $\square 10$ mm 程度の小チップをはんだマウント、ワイヤボンドにより多数並列接続したモジュール構造がとられている。

しかしながら、上述のモジュール構造は従来の平型構造の GTO に比べ、TFT (Thermal Fatigue Test) など信頼性、防爆性の面で劣る問題があった。このため高速性を要求されながら高耐圧、大電流、高信頼性も要求される一部の電鉄用インバータにはモジュール構造の IGBT を適用することができなかった。よって、平型構造の IGBT の開発が望まれていた。

IGBT のチップを平型パッケージに封入するには、電極構造を圧接型にモディファイする必要があった。また、複数のチップを一括して均一に圧接するパッケージ技術が必要であり、容易ではなかった。

今回、われわれは、従来の平型アロイフリーパッケージ技術を踏襲し、マルチチップ圧接に適した平型 IGBT (2.5

kV-1 kA) を開発し、電鉄用インバータに要求される高速性、高信頼性の両立を実現することができた。

2 デバイス構造

図 1 に平型 IGBT の素子外観を示す。外形は従来の電極ポスト径 75 mm、定格 4.5 kV-3 kA の GTO と同一であり、従来の圧接機構にそのまま適用できるようになっている。

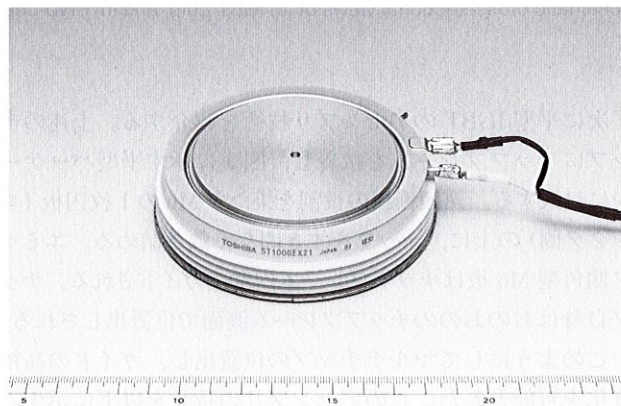


図 1. 2.5 kV 平型 IGBT 電極ポスト径 75 mm、素子最大外径 108 mm、素子厚 26 mm で、4.5 kV-3 kA の GTO と同一外形である。

External view of 2.5 kV press pack IGBT

図2に今回開発した2.5 kV IGBT/FWD (Free Wheeling Diode) チップのセル、終端部の構造断面を示す。IGBTはノンパンチスルー (NPT) 構造、FWDはpin構造とした。n層の比抵抗は宇宙線耐量を考慮しつつ、かつ厚みを最適化し、コレクタ・エミッタ間飽和電圧 ($V_{CE(sat)}$) とスイッチング損失を低減した。終端部の耐压構造をSIPOS-RESURF構造 (Semi Insulating Polycrystalline Oxygen doped Silicon-REduction in SURface Field) とし、安定した2.5 kVブロッキング耐压を得ている。

圧接型のチップの特長は、両面Al電極であることと、IGBTチップのエミッタ電極がゲート電極より高く形成され、エミッタ電極だけを圧接できることである。

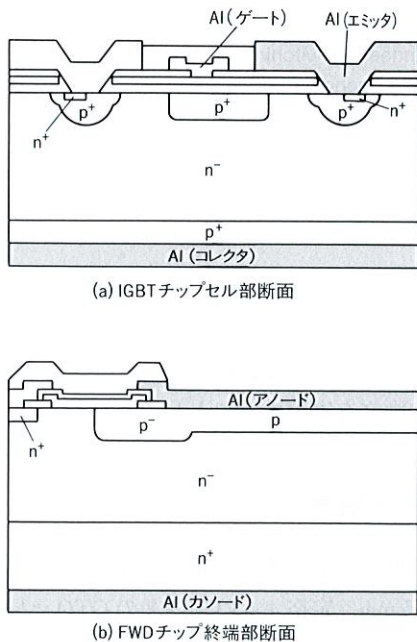


図2. 2.5 kV IGBT/FWD チップの構造断面 終端構造は両者ともSIPOS-RESURF構造とし、安定した2.5 kVブロッキング耐压を得ている。

Schematic cross-sectional views of (a) IGBT chip, and (b) FWD chip

次に平型IGBTのアセンブリ技術を紹介する。上述のチップにチップフレームを接着し、図3に示す平型パッケージに封入する。熱緩衝板の役割を果たすMoの1枚円板(コレクタ側)の上に、チップをすき間なく敷き詰める。エミッタ側Mo板はチップフレーム内壁でガイドされる。チップ自身はおおのこのチップフレーム側面で位置出しされる。

このようにしてマルチチップの位置出し、ガイドの高精度化を可能とした。このアセンブリの特長を以下に示す。

- (1) チップを高密度にアセンブリでき、素子の有効面積を最大限に利用できる。
- (2) 厚み設計の異なるチップ (IGBT/FWD) を一括して

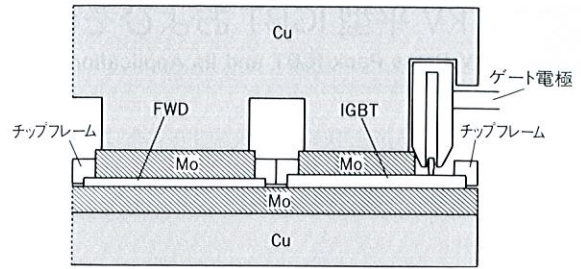


図3. 平型IGBTの構造断面 チップアセンブリの両側に熱緩衝板(Mo)を挿入し、TFTの際の熱ストレスを緩和する。はんだ接合を用いない完全圧接構造である。

Schematic cross-sectional view of press pack IGBT

圧接可能。Mo板の厚み設計を変えて調整する。薄型pin構造のFWDを使用できる。

- (3) コンパクトで高信頼性のゲート圧接電極をもっている。
- (4) エミッタ側Cu電極は、チップの非圧接部上に溝加工が施されており、各チップに対応したCuブロックがチップを圧接する。この溝がCuブロックの圧縮方向の塑性変形を促進し、ミクロンオーダーの厚み補整を行う。各チップにかかる圧力のばらつきを3%以内に低減し、均一な圧接を実現した。

3 電気特性

今回開発した平型IGBTは、表1に示すように2.5 kV-1 kAの大電流、高耐压のIGBTでありながら、フルスクエアのターンオフスイッチング安全動作領域(RBSOA)を保証できる。これはRBSOAに有利なNPT構造の採用と、素子内のチップの特性をそろえた成果である。図4に直流電圧 $V_{CC}=1,800$ V、ピーク電圧 $V_{CP}=2,620$ V、遮断電流 $I_{CP}=2,100$ A、ケース温度 $T_c=125^\circ\text{C}$ のターンオフ波形を示す。

また、NPT構造の採用により $V_{CE(sat)}$ は高温になると増

表1. 2.5 kV 平型IGBTの電気特性 ($T_c=125^\circ\text{C}$)

Electrical characteristics of 2.5 kV press pack IGBT

| 項目 | 記号 | 条件 | 特性 |
|----------------|---------------|--|-----------------|
| ゲート・エミッタ間電圧 | V_{GES} | $V_{GE}=0$ V | ± 20 V Max. |
| コレクタ・エミッタ間電圧 | V_{CES} | | 2,500 V Max. |
| コレクタ電流 | I_C | | 1,000 A |
| ゲート・エミッタ間しや断電圧 | $V_{GE(off)}$ | $V_{CE}=5$ V, $I_C=1$ A | 4.3 V |
| コレクタ・エミッタ間飽和電圧 | $V_{CE(sat)}$ | $I_C=1,000$ A, $V_{GE}=15$ V | 5.5 V |
| 順電圧 | V_F | $I_F=1,000$ A, $V_{GE}=0$ V | 2.7 V |
| ターンオン時間 | t_{on} | $I_C=1,000$ A $V_{CC}=1,500$ V $R_c=5$ Ω , 誘導負荷 同上 | 2.2 μ s |
| 下降時間 | t_f | | 0.5 μ s |
| 回復時間 | t_{rr} | $I_F=1,000$ A, $V_{GE}=-15$ V | 0.6 μ s |

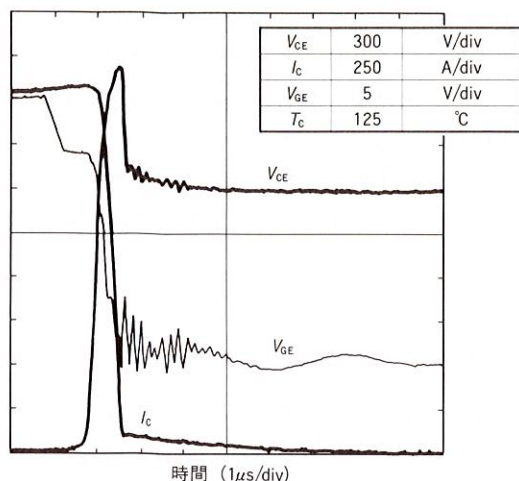


図4. ターンオフスイッチング波形 ノンスナバ、誘導負荷におけるターンオフ波形を示す。 $T_c=125^\circ\text{C}$ で定格電圧、 $2\times$ 定格電流の遮断能力をもつ。

Turn-off waveforms

大し、高温高速動作時に特定チップへの電流集中、熱暴走を自己回避する特長をもっており、マルチチップ並列接続に有利な構造といえる。

4 信頼性

平型 IGBT はチップの全電極が完全圧接型であり、ワイヤボンダ、はんだ接合をいっさい使用していない。

よって、電鉄用インバータに要求される高 TFFT 耐量を実現できた。 ΔT_j (ジャンクション温度差) $=90^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_c=60^\circ\text{C}$ 、 $n=50,000$ サイクルの耐量を確認している。使用条件によって異なるが、30 年以上の長期寿命を期待できる世界初の IGBT デバイスである。

また、セラミック気密型素子の特長はそのまま、耐湿性に強く、DC 電圧ブロッキング信頼性も高い。 $V_c=2,000\text{V}$ 、 $T_c=125^\circ\text{C}$ 、 $t=2,000\text{h}$ の条件下で安定したリーク電流を維持する。防爆耐量も従来 GTO と同一で非常に高く、破壊時に周辺機器を拡大破損するおそれが少ない。

5 応用技術

新しく開発された平型 IGBT を装置に適用する際には、スナバ回路やゲート回路などの素子周辺回路を新たに開発する必要がある。また、平型 IGBT を並列接続して電流を大きくとる場合には、各素子の電流バランスが保たれるような電氣的、構造的なくふうが必要となる。

図5 は 300 系新幹線の主変換装置の 1 相分を示した回路構成で、平型 IGBT が 2 並列接続されている。この回路を実際の装置として組み立てたスタックと呼ばれる構造体を

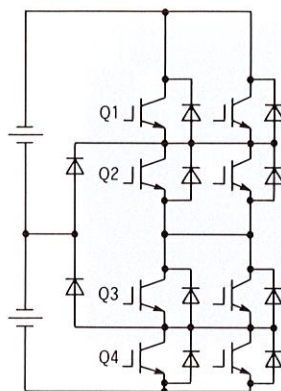


図5. 並列接続した3レベルインバータ1相分 平型 IGBT を並列接続して構成したインバータの1相分を示す。

1 phase of 3-level inverter with PPIs connected in parallel

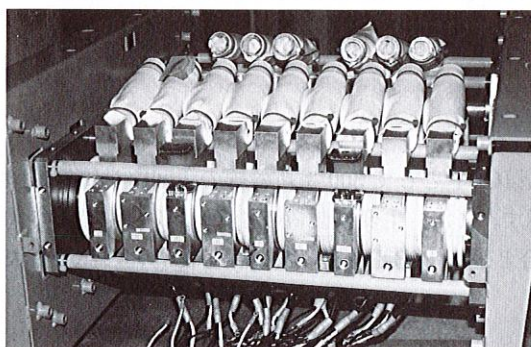


図6. 平型 IGBT スタックの外観 平型 IGBT を圧接して冷却する機能をもつ構造体(スタック)で、300 系新幹線に使用されている。

External view of PPI stack

図6 に示す。

このスタックには、マルチチップで構成された平型 IGBT を均等に圧接する機能や平型 IGBT の発生する熱を冷却する機能を備えている。さらに、このスタックで重要な要素は 2 並列接続された平型 IGBT の電流バランス、特にターンオン、ターンオフの時の電流バランスが保たれるように、素子の特性をそろえるだけでなく、接続配線のインダクタンスを考慮した構造にしている。

また、スタックに取り付けられるスナバ回路の配線は、モジュール型 IGBT と比べて遮断電流が大きいことや、取付け構造が異なることなどの理由で、できるだけ低インダクタンスとなるようにくふうした。

さらに、ゲート回路ではターンオン、ターンオフ過電圧とスイッチング損失のバランスを考慮したゲート抵抗値の最適化を図った。

図7 は上述の開発要素を取り入れて製作した図6の回路の変換装置を PWM (パルス幅変調) 運転したときの出力電圧と電流波形であり、出力電圧 2 kV、電流 1 kA の所定の出力波形が得られている。

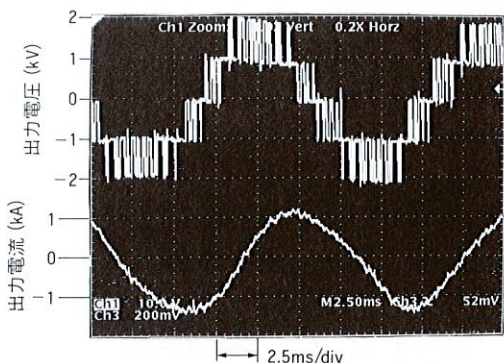


図7. 3レベルインバータの出力電圧と電流波形 平型IGBTで構成した3レベルインバータの試験結果で出力電圧2kV、電流波形1kAの所定の出力波形が得られている。

Output voltage and current waveforms of 3-level inverter

6 適用例

平型IGBTとして300系新幹線の主回路単線結線図を図8に示す。また、主変換装置の仕様をGTOを使って構成した場合と平型IGBTを使って構成した場合の比較を表2に

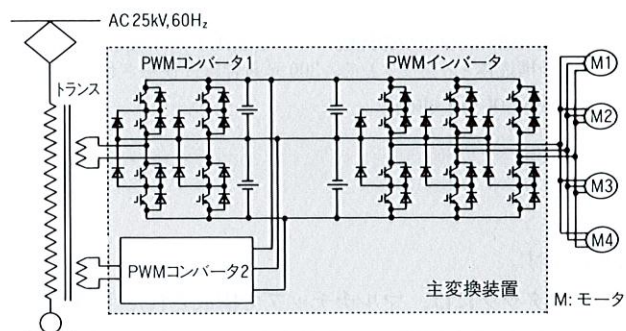


図8. 300系新幹線の主回路単線結線図 平型IGBTを初めて使用した300系新幹線のモータドライブ用主回路で、その結果、騒音が大幅に低減された。

One-line diagram of 300 series Shinkansen train

表2. GTOと平型IGBT構成の主変換器比較表
Comparison of inverters with GTOs and PPIs

| 項目 | 機器名 | 300系(GTO)主変換装置 | 300系(IGBT)主変換装置 |
|-------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 変圧器 | | 一次: 25 kV, 二次: 885 kV, 容量 3,380 kVA | |
| 主変換装置 | コンバータ | 2レベル単相電圧形PWMコンバータ | 3レベル三相電圧形PWMコンバータ |
| | | 入力: 885 V, 800 A (最大 955 A) | |
| | キャリア周波数 420 Hz | キャリア周波数 1,500 Hz | |
| | インバータ | 2レベル三相電圧形PWMインバータ | 3レベル三相電圧形PWMインバータ |
| 出力: 1,430 V, 620 A (最大 880 A) | | | |
| | | 出力周波数 0~200 Hz | |
| | | キャリア周波数 360 Hz (非同期) | キャリア周波数 1,500 Hz |
| 主素子 | | 平型GTO 4.5 kV, 3.5 kA | 平型IGBT 2.5 kV, 1 kA×2 並列 |
| 主電動機 | | 300 kW×4 | |

示す。表2で明らかなように相違点はその周波数の違いである。平型IGBTを使用することにより周波数を高くすることができ、その結果、騒音は大幅に低減され乗客に快適な環境を提供できるようになった。

札幌市交通局地下鉄電車用に並列接続のないタイプの変換装置も製品化済みであり、さらに機関車用変換装置などへ幅広く適用されている。

7 あとがき

平型IGBTの開発で確立したマルチチップ圧接パッケージ技術の特長の一つに、製品展開が容易であることがあげられる。チップレイアウトのフレキシビリティが高く、多様なチップ組合せが可能である。上述の逆導通平型IGBT以外にもFWDだけを封入した大容量平型FRD (Fast Recovery Diode: 1 kA-2.5 kV)を同時開発した。また、MOSゲート制御が大きな魅力で将来インテリジェント化が可能である。

応用装置から見ると、GTOに比べ約3~4倍の高い周波数がとれるのでインバータの騒音を大幅に低減できる。また、IGBTなのでスナバ回路やゲート回路を低損失、小型にできるだけでなく、GTO並みの高信頼性、防爆性も期待できる。

今後の展開としては、現在3.3 kV-1.2 kA平型IGBTを開発中である。このデバイスが実現すると、在来線DC1,500V架線では、現状の3レベルインバータから2レベルインバータ化が可能となり、大幅な装置の簡素化、小型・軽量化が期待できる。

文献

- (1) M. Hiyoshi, et al: A 1,000 A-2,500 V PRESSURE MOUNT RC-IGBT, EPE'95, 1, pp.51-55 (1995)
- (2) 三浦和敏, 他: 車両用圧接型IGBTインバータの開発, 平成8年電気学会産業応用部門全国大会, pp.419-422 (1996)



日吉 道明 Michiaki Hiyoshi

多摩川工場大型電力素子技術部主務。
大型電力素子の開発に従事。
Tamagawa Works



星 公弘 Kimihiro Hoshi

重電技術研究所エレクトロニクス技術開発部主査。
パワーエレクトロニクス装置の主回路研究開発に従事。電気学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



安岡 育雄 Ikuo Yasuoka

府中工場ドライブシステム部主幹。
車両用ドライブシステムの開発設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Works