

小型低損失化が進む交通用パワーエレクトロニクス装置

Power Electronics Equipment for Rolling Stock Using IEGTs and IGBTs

大山 滝夫
OOYAMA Takio

安岡 育雄
YASUOKA Ikuo

青山 育也
AOYAMA Ikuya

交通システムや鉄道車両において、高速鉄道の代表である新幹線、都市交通を支える在来線・地下鉄などに適用される装置では、最新のパワーエレクトロニクス技術を採用することで乗りごちの改善と省エネルギー化への取り組みを実施してきた。近年、IGBTによる3レベル変換装置、高耐圧IGBTを採用した2レベル変換装置の製品シリーズ化により、従来に比較して、更に快適性や軽量化が達成されている。

当社は、このような流れのなかで、IGBTより更に高耐圧で、GTOよりも低損失なパワー半導体であるIEGTを適用した新幹線用変換装置を開発した。また、直流(DC)電鉄変電所向けに、冷媒に水を使用した、環境に優しいヒートパイプ冷却方式の整流器を開発した。

Efforts are being made to improve riding comfort and energy saving by adopting the latest power electronics technologies in equipment applied to rolling stock for the Shinkansen ("Bullet Train"), which represents rapid-transit railways, as well as existing railway lines and subways that support urban transportation. In recent years, greater comfort and lighter weight have been realized compared with previous equipment by developing a series of products; namely, three-level conversion equipment utilizing insulated-gate bipolar transistors (IGBTs), and two-level conversion equipment utilizing high-withstand-voltage IGBTs.

In the midst of this trend, Toshiba has developed conversion equipment for the Shinkansen applying the Injection Enhanced Gate Transistor (IEGT), which is a power semiconductor with higher withstand voltage than the IGBT and lower loss than the gate turn-off thyristor (GTO). Moreover, for direct-current electric railway substations, Toshiba has developed a rectifier with an eco-friendly heat-pipe cooling system using water as a coolant.

1 まえがき

DC電車駆動用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ、交流(AC)電車駆動用コンバータ/インバータ、及び静止型補助電源用インバータ(SIV: Static Inverter)は、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)素子を主スイッチング素子に使用した装置が主流である。

このIGBTは、電圧定格が1,700~3,300V、電流定格は各電圧定格の素子共に最大1,200Aクラスまでが車両用として実用化されている。特に、当社は、3,300V IGBTとしてモジュール型と圧接型の双方を量産化しており、新幹線以外の在来線、地下鉄に適用する駆動用インバータの2レベル方式^(注1)化にいち早く対応するため、開発・標準化を進めてきた。この効果として、装置の小型・低損失化、コスト低減を実現し、製品の拡販を図っている。

また、新幹線電車などに使用される大容量電力変換装置についても、IGBT素子よりもいっそう高耐圧な4,500V IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)素子を適用す

(注1) インバータの主回路を構成するスイッチング素子に高耐圧品を使用し、主回路を構成する素子数を最小にできる回路方式で、3レベル方式に対して素子数は1/2になる。インバータの出力電圧として、入力DC電圧に等しい電圧と、0Vの2電圧を出力できるので2レベル方式と呼ぶ。

ることで、コンバータ/インバータ主回路の2レベル方式化の開発が進んでいる。

ここでは、上述の鉄道車両駆動システムにおけるモジュール型3,300V IGBTを適用した在来線用2レベルVVVFインバータと、4,500V IEGTを適用した新幹線用2レベル主変換装置、及びDC電鉄変電所向けヒートパイプ冷却方式の整流器について述べる。

2 在来線用高耐圧IGBT 2レベル方式インバータ

2.1 開発経緯

車両駆動用インバータでは、半導体素子として従来のGTO(Gate Turn-Off thyristor)素子からIGBT素子に変わり、高周波化が図られているが、近年までは主回路は3レベル方式^(注2)が主流となっていた。

3レベル方式では、次のようなシステムとしてのメリットがあり、また、素子定格電圧の制約から、3レベル方式で主回路を構成せざるを得ない理由もあった。

- (1) 制御性能が優れている。

(注2) 2レベル方式に比べて素子数が2倍必要となるが、2レベルの2電圧のほかに、入力DC電圧の1/2が出力できるので3レベル方式と呼ぶ。

(2) 高周波化による低騒音化の効果が大きい。

しかし、一方、回路が複雑となり、部品点数も多いことから、小型・低損失化の点で不利であった。

当社では、高耐圧3,300 V IGBTを圧接型にて実用化し、国内外向けのインバータに適用してきたが、今回、モジュール型3,300 V IGBTを使用し、低コスト・軽量化をターゲットとした2レベルインバータを開発・製品化した。モジュール型3.3 kV IGBT素子外観を図1に示す。

また、インバータ用パワーユニットの仕様を表1に示す。

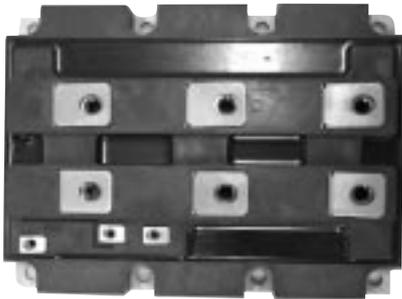


図1. モジュール型3.3 kV IGBT素子 3.3 kV, 1.2 kAの高耐圧, 大電流容量のIGBT素子を示す。
Module type 3.3kV IGBT device

表1. インバータ用パワーユニットの仕様
Specifications of power unit for traction inverter

項目	仕様
変換方式	三相, 2レベル方式PWMインバータ
出力	三相AC 1,100V - 800A(最大), 0 ~ 200Hz
PWMキャリア周波数	1,050Hz(非同同期モード)
主素子	IGBT 3,300V - 1,200A(1S1P接続) FWD: IGBTに含入

PMW: Pulse Width Modulation 1S1P: 1 series, 1 parallel
FWD: Free Wheeling Diode

2.2 パワーユニットの外観・構造

3.3 kV IGBTを使用したパワーユニットを図2に示す。冷却は、ヒートパイプ自然冷却方式、冷媒は水を使用することで、低騒音かつ環境への配慮をしている。

3 新幹線用 IEGT 主変換装置

3.1 開発経緯

現在、実用化されているIGBT素子の定格電圧は最大3,300 V程度までであり、新幹線電車などに使用される大容量電力変換装置は、主回路を3レベル制御方式とした回路構成である。電力変換装置のニーズは小型・軽量・低騒音・低コストであり、主回路の簡素化のためには高周波2レベル制御とすることが望ましく、このためには主回路素子の

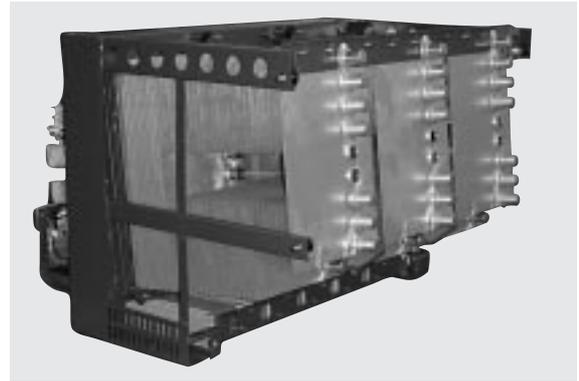


図2. 3.3 kV IGBTパワーユニット 在来線用としては4個モーター一括制御が可能な大容量なもので、GTO方式と比べて体積、質量ともに1/2以下を実現した。
3.3kV IGBT power unit

高耐圧化が必要となってくる。主回路素子に使用するIGBT素子は高電圧時のオン電圧が高くなる傾向があり、中間DC主回路電圧の高い大容量電力変換装置では素子損失の関係から、2レベル制御での実用化が困難であった。

IEGTは、IGBT素子の高周波性能を維持し、かつ高耐圧化してもオン電圧を低く抑えた新開発素子である。今回、4,500 V定格のIEGT素子を用いて、2レベル制御での新幹線用電力変換装置を開発した。

3.2 主回路構成

今回、開発したIEGT式主変換装置は、新幹線試験車両に搭載されているGTO式主変換装置をベースにパワーユニット部、制御装置部などについての改造を実施した。主回路構成を図3に示す。

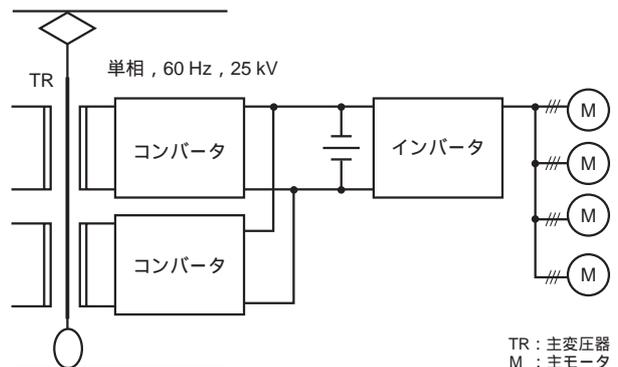


図3. 主回路の構成 新幹線駆動用電力変換装置の主回路構成を示し、2台のコンバータ、1台のインバータ、4台の主モーターで構成されている。

Configuration of main circuit for Shinkansen

3.3 装置諸元

主変換装置は、コンバータ2群、インバータ1群で構成され、各々の仕様を表2に示す。

表2 . 主変換装置の仕様

Specifications of conversion equipment for Shinkansen

項目	仕様	
コンバータ部	変換方式	単相電圧型PWMコンバータ(2レベル制御)
	入力	単相AC 955V・1,120A(最大), 60Hz×2回路
	出力電圧	DC 2,050V
	キャリア周波数	1,140Hz, 1,500Hz(60Hz・19P, 25P)
	主素子	IEGT 4,500V・1,000A(2並列接続) FWD: IEGTに含入
インバータ部	変換方式	三相電圧型PWMインバータ(2レベル制御)
	出力	三相AC 1,580V・946A(最大), 0~236Hz
	キャリア周波数	1,000Hz(非同期モード)
	主素子	IEGT 4,500V・1,000A(2並列接続) FWD: IEGTに含入

3.4 パワーユニットの外観・構造

IEGTを搭載した、コンバータ・インバータユニットの外観を図4に示す。冷却は液体沸騰冷却強制通風方式を採用し、IEGT素子とスナバ抵抗(サージ吸収回路)を冷却している。



図4 . IEGTパワーユニット IEGTを使用した2レベル方式コンバータ及びインバータユニットを搭載した新幹線駆動用電力変換装置を示す。

IEGT power unit

3.5 評価試験

当社での装置評価結果を以下に示す。

- (1) IEGTの遮断特性と電流分担 駆動システムで使用するIEGTの試験として、IEGTを2並列単位にて電流遮断試験を実施した。遮断時の素子電圧と素子電流の代表波形を図5に示す。ここでは、直流電圧2,050Vに対して、跳ね上がり電圧の最大は800V程度で、スナバ回路の効果で跳ね上がり電圧は十分抑制している。
- (2) 2段ゲート駆動方式 IEGT素子を駆動するゲート回路に、2段ゲート回路を採用した。低インピーダンス特性の第2のゲート回路を設け、素子へのオン及びオフゲート電圧を与えることにより、ターンオン時のスイ

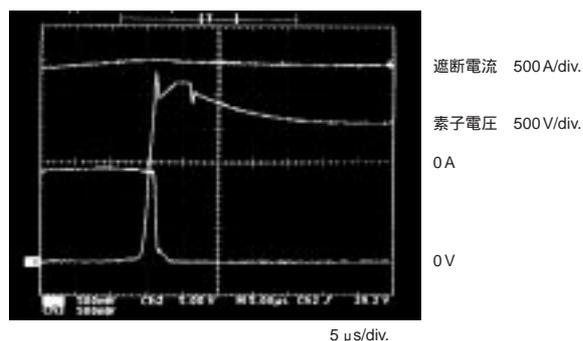


図5 . IEGT素子遮断波形 4.5kV, 1.0kA IEGTを2個並列接続した試験結果で、DC電圧2,050Vにて良好な遮断特性が得られている。Interception waveform of IEGT

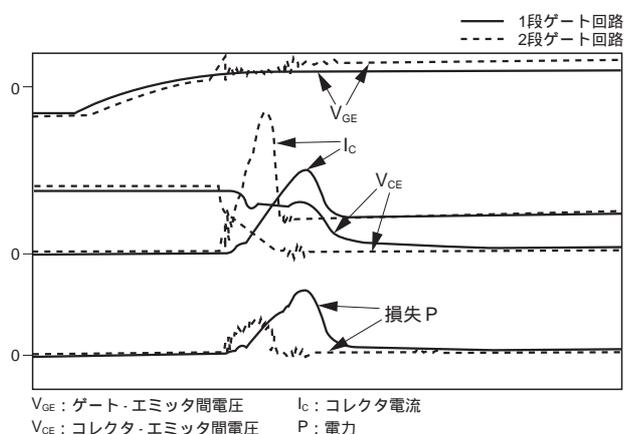


図6 . ターンオン波形(例) 1段ゲート回路に比べて、2段ゲート回路では損失Pが小さくなっている。Turn-on waveforms of IEGT

チング損失の低減と、他素子オン時の急峻な電圧上昇率(dv/dt)に起因するノイズゲート電圧の抑制に効果がある。ターンオン時の波形を図6に示す。

(3) 制御性能の確認

- (a) 入力電流波形 コンバータ側のキャリア周波数は、試験時においては1,150Hzに設定した。従来のGTO式2レベル制御での420Hz(60Hz電源時)に対して、電流リップルは低減し、主変圧器の磁気ひずみ音や高調波成分損失の低減に効果がある(図7)。
- (b) 制御性能確認 試験設備を使用し、主変圧器、主電動機を用いた制御性能の確認試験を実施した。代表的な力行特性試験チャートを図8に示す。

3.6 まとめ

定置試験において、IEGT式主変換装置の実用化への評価が完了し、良好な結果が得られた。現在、新幹線試験車両に搭載して、騒音・高調波などの環境試験やベクトル制御による空転試験などを実施中である。

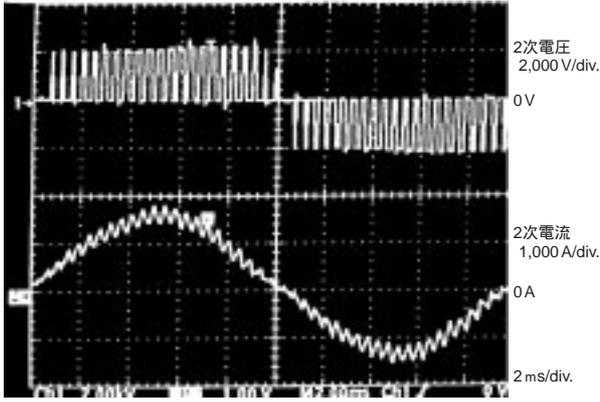


図7．コンバータの電流波形 キャリヤ周波数1,150 Hzの採用により、2レベル方式においても電流リップル低減、トランスからの騒音、発生損失の低減が図れている。
Converter current waveforms

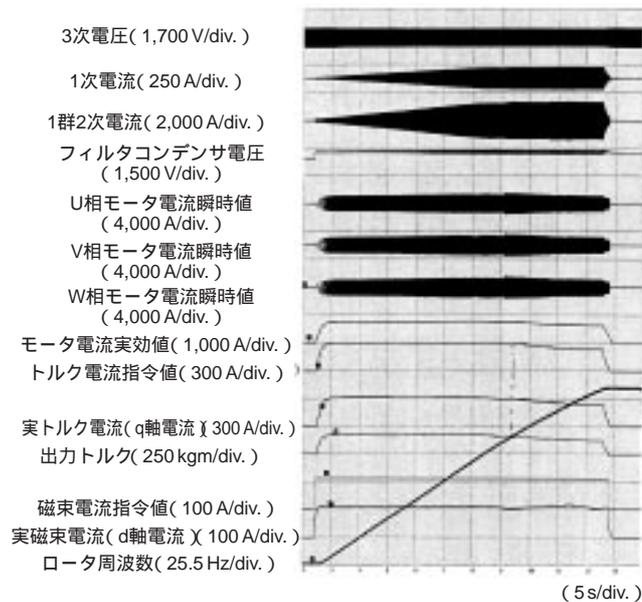


図8．力行特性試験 モータ4台を並列駆動し、良好な制御性能が得られている。
Results of powering characteristics test

4 環境に優しいヒートパイプ冷却整流器

DC電鉄変電所向けに、ヒートパイプ冷却方式の整流器を開発した。従来は、冷媒としてパーフロロカーボン(代替フロン)を使用した沸騰冷却方式であり、環境負荷が大きいと言われている。これに対し、ヒートパイプでは冷媒が水と水蒸気だけなので環境に優しい。従来製品と据付け面積を同等とし、簡単にリプレースできるよう、ヒートパイプを縦置きする技術を開発し整流器に適用した。12パルス化対応も開発済みであり、高調波低減の観点から、電源環境にも優しい製品となっている。代表製品の外観を図9に示す。



図9．ヒートパイプ冷却方式整流器 冷媒として環境に優しい水を使用し、また、従来製品と同等の据付け面積で、リプレースを容易にしている。
Rectifier with heat-pipe cooling system

製品シリーズとしては、1,000 kW ~ 6,000 kW, 6パルス, 12パルス(直列接続・並列接続)が対応可能である。

5 あとがき

鉄道車両駆動用VVVFインバータ方式として、用途に応じてモジュール型、圧接型それぞれの高耐圧3.3 kV IGBT素子を使用した2レベル方式のパワーユニットを製品化し、営業車への適用を進めている。

更に、新幹線電車駆動用として4.5 kV IEGT素子を使用した2レベル方式コンバータ、インバータの実用化への評価が完了し良好な結果が得られた。現在、試験車両に搭載して、長期耐久試験などを実施中である。

今後は、よりいっそうの小型低損失化を図るための素子開発、及び製品のシリーズ化を進めていく。



大山 滝夫 Ooyama Takio

情報・社会システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部主幹。
車両システムの技術開発に従事。
Transportation Systems Div.



安岡 育雄 Yasuoka Ikuo

情報・社会システム社 府中情報・社会システム工場 ドライブシステム部主幹。
車両ドライブシステムの開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Information and Industrial Systems & Services



青山 育也 Aoyama Ikuya

情報・社会システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部主査。
車両ドライブシステムの技術開発に従事。電気学会会員。
Transportation Systems Div.