

低騒音・小型化を目指した車両制御システム

Rolling Stock Control Systems

大山 滝夫
OOYAMA Takio長谷部 寿郎
HASEBE Toshio青山 育也
AOYAMA Ikuya

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車両制御装置では、最新のパワーエレクトロニクス技術を採用することで、乗り心地の改善と省エネルギー化に取り組んできた。近年、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)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。このような流れのなかで、IGBTより高耐圧で、GTO(Gate Turn-Off thyristor)よりも低損失なパワー半導体であるIEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)を適用した新幹線用変換装置も開発した。

In the field of rolling stock control systems applied to the Shinkansen, which represents rapid-transit railways, as well as to existing railway lines that support urban transportation, subways, etc., efforts are being made to improve riding comfort and energy saving by adopting the latest power electronics technologies.

In recent years, three-level conversion equipment incorporating insulated gate bipolar transistors (IGBTs) and two-level conversion equipment incorporating high-voltage IGBTs have been commercialized as product series, achieving greater comfort and lighter weight compared with previous equipment. In line with this trend, Toshiba has developed conversion equipment for the Shinkansen applying the Injection Enhanced Gate Transistor (IEGT), which is a power semiconductor that operates at a higher voltage than the IGBT and has lower loss than the gate turn-off thyristor (GTO).

1 まえがき

直流(DC)電車駆動用可変電圧可変周波数(VVVF)インバータ、交流(AC)電車駆動用コンバータ/インバータは、主スイッチング素子にIGBT素子を使用した装置が主流である。

このIGBTは、電圧定格が1.7kVから3.3kV、電流定格は各電圧定格の素子とともに、最大1.2kA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3.3kV 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と地下鉄に適用する駆動用インバータの2レベル方式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とコスト低減を実現した。

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4.5kV IEGT素子を適用することで、コンバータ/インバータ主回路の2レベル方式化の開発を進めている。

ここでは、上述の鉄道車両駆動システムにおける高耐圧半導体素子を適用した新幹線、及び在来線用2レベル主変換装置、電気機関車、海外向けVVVFインバータの最新技術の紹介、及びインバータ制御と主電動機について、今後の技術開発方針を述べる。

2 交直流電気機関車の主回路システム

東京から東北、津軽海峡(青函トンネル)、函館を經由し札幌に至る鉄道輸送ルートは、物流の動脈である。電化区間の東京 函館間では、電化方式(関東はDC、東北以北はAC)と信号保安方式の違い(青函トンネルは自動列車制御装置(ATC)が必要)、青函トンネルの特殊環境(冬期の結露対策が必要)から、途中2回の機関車付け換えが必要であった。この隘路(あいろ)解消のため、全区間スルーして走破可能とすることを目的としてEH500形式機関車が開発された(図1)。

具体的にはDC 1.5kV、AC 20kV両電気方式に対応する主回路システム、主変換装置の開発により実現した。

機関車の主回路ブロックを図2に示す。装置は、AC 1.08kV



図1. EH500形式 交直流電気機関車 DC及びAC電化区間をスルーした運転が可能であり、目的地への大幅な到達時間短縮を達成した。
Type EH500 AC/DC dual-voltage locomotive

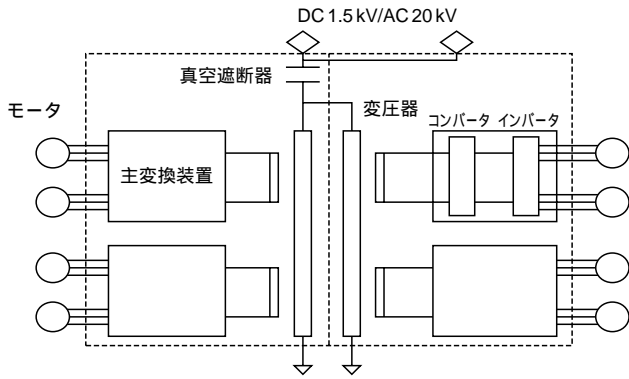


図2. 主回路の構成 交直流電気機関車の主回路構成を示し、モータ2台を制御する主変換装置(コンバータ、インバータ)計4台で機関車を駆動する。

Configuration of main circuit for type EH500 locomotive

(変圧器2次出力)をDC 1.8 kVに変換するコンバータと、DC 1.8 kVを三相交流に変換するインバータとで構成される。DC区間では、コンバータは使わず、架線のDC 1.5 kV DC電源を直接インバータ部に給電する。ベクトル制御により500 kW級モータ2個のトルク制御を行う。

3 在来線用高耐圧 IGBT 2レベル方式インバータ

3.1 開発経緯と特長

車両駆動用インバータでは、半導体素子として従来のGTO素子からIGBT素子に替わり高周波化が図られているが、近年まで主回路は、3レベル方式が主流となっていた。

3レベル方式での、システムとしてのメリットは、次のとおりである。

- (1) 制御性能が優れている。
- (2) 高周波化による低騒音化の効果が大きい。

しかし、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。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3.3 kV IGBTを圧接型にて実用化し、国内外のインバータを適用してきたが、今回、モジュール型3.3 kV IGBTを使用し低コスト化、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。

2レベルインバータの特長は次のとおりである。

- (1) 超コンパクト・高信頼性パワーユニット
 - (a) 長寿命、低損失型 3.3 kV・1.2 kAモジュール IGBTの採用
 - (b) 走行風利用の自然冷却方式、ヒートパイプ使用(水冷媒)
- (2) 制御ユニット
 - (a) ハードウェア 32ビット1チッププロセッサユニ

ット(500セット以上の実績)

- (b) ソフトウェア オブジェクト指向APROS™の適用、インテリジェントベクトル制御による最適な粘着制御
- (3) 誘導障害対策
 - (a) 軌道回路 最適なフィルタ定数の選定、長大軌道回路へのアクティブフィルタ制御
 - (b) 自動列車停止制御装置(ATS)関連 最適なコモンモードフィルタの選定
- (4) 低騒音化 パルス幅変調(PWM)キャリア分散制御

3.2 パワーユニットの外観と構造

3.3 kV IGBTを使用したパワーユニットの外観を図3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、低騒音かつ環境に配慮をしている。

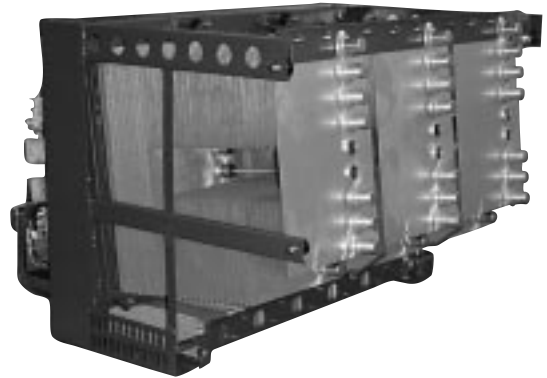


図3. 3.3 kV IGBTパワーユニット 在来線用インバータとしては、4個のモーター一括制御が可能な大容量なもので、GTO方式と比べて体積、質量ともに1/2以下(当社比)を実現した。

3.3 kV IGBT power unit

4 海外向けDC 600/750 V対応、主回路システム

当社は、ニューヨーク市JFK空港内及び郊外とのアクセス用として計画されているリアモータ(LIM)駆動電車用の主変換装置を、カナダキングストンに工場を持つ車両メーカーで、輸送システムサプライヤーでもあるボンバルディエ社から受注し、納入した。

このシステムは、第三軌条よりDC 750 Vの電力を集電し、各車両に搭載されている2台の主変換装置(図4)により各台車に臓装(ぎそう)されているLIM各々に、AC電力を供給する。この車両(ART MK II)は1両単位での運用が可能であり、最大速度は約110 km/hである。

今回LIM駆動電車としては初めてベクトル制御方式を採用しており、負荷急変まで含め全速度領域にわたり高い制御応答性を実現することができた。

営業運転は2002年4月に予定されている。



図4. 海外向け一体型主変換装置 IGBT素子を使用したインバータ部をはじめ,周辺機器である断流器,フィルタリアクトルを一括収納し,かつ,箱高さを500mmに抑えた低床タイプである。

Power converter for linear induction motor drive system

5 新幹線用主変換装置

5.1 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3.3kV程度までのため,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としている。電力変換装置としてのニーズは小型・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い。

今回,4.5kV定格のIEGT素子を用いて2レベル制御での新幹線用主変換装置を開発した。

5.2 主回路構成及び装置諸元

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改造をした。主回路構成を図5に示す。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は表1に示す。

5.3 制御性能の確認

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

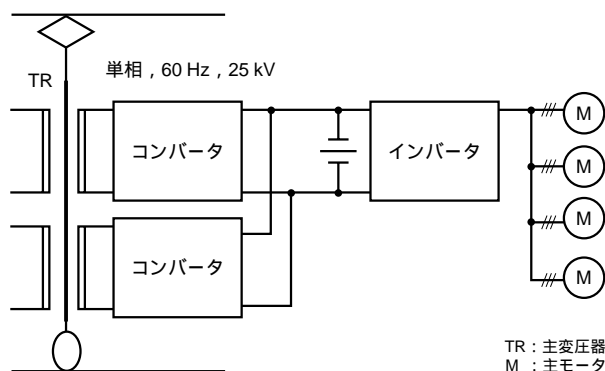


図5. 主回路の構成 新幹線駆動用電力変換装置の主回路構成を示し,2台のコンバータ,1台のインバータ,4台の主モーターで構成されている。

Configuration of main circuit for Shinkansen

表1. 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)
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(非同同期モード)
	主素子	IEGT 4.5kV・1kA(2並列接続) FWD: IEGTに含入

(60Hz電源時)に対して,電流リップルは低減し,主変圧器の磁気歪みや高調波成分損失の低減に効果がある。

6 インバータ制御,主電動機の技術開発

6.1 インバータ制御技術の開発

6.1.1 速度センサレスベクトル制御 車両駆動用としてセンサレス制御を適用することにより,主電動機のメンテナンス性向上や容量増加などの利点がある。一方,惰行からの再起動や粘着制御など車両特有の制御にかかわる技術開発が必要であった。当社では,構内試験線での現車試験により,センサレス制御実用化への開発・検証を実施した。車両駆動用にセンサレス制御を適用した場合の構成を図6に示す。

6.1.2 LIM駆動電車の制御革新 前記4章で述べたLIM駆動電車には,当社が開発した“最大推力動作点追従

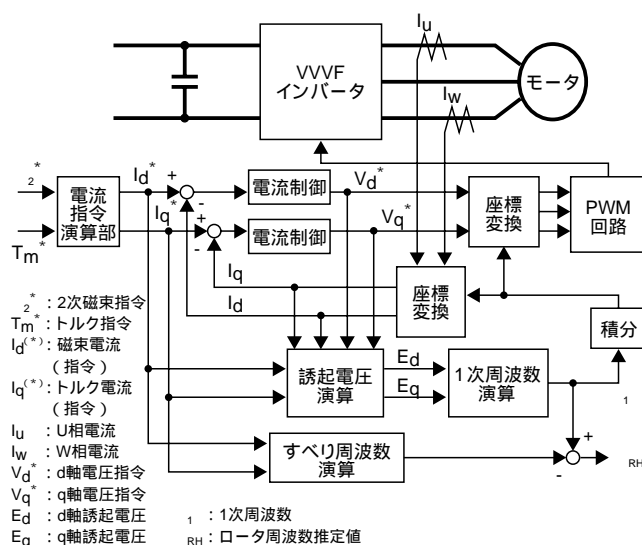


図6. 速度センサレスベクトル制御の構成 電流・トルク制御と速度推定が独立して調整可能な特長がある。

Configuration of speed-sensorless vector control system

制御”を適用した。リアクションプレートの構造・材質の変化やギャップの変化により、モータ特性が変化しても、大きな推力を得る制御方式である。現車にて従来制御と比べて約20%の推力を増加できることを確認した。

6.2 主電動機の開発

車両の駆動用電動機(以下、主電動機)には、長い間DC電動機が使われてきたが、ここ20年の間に新製された車両のすべてが誘導電動機に移行した。それに伴い、大幅なメンテナンスの低減と、小型・軽量化が達成された。このようななかで、車両用としての誘導電動機の最適設計も一段落し、次のステップとして車両の様々なニーズに合わせて新しい方式の主電動機開発がなされている。

車両用に限らず、電動機の開発の方向としては、①小型・軽量化、②メンテナンスの低減、③低騒音化、④高効率化の4点に集約される。

これらの目的に対して、大きく3種類の開発を進めている。以下に、その概要について述べる。

6.2.1 永久磁石励磁同期電動機 近年の永久磁石の発達により、主電動機のような高温環境下でも実用に供し得る材料が開発されたことに伴い、小型・軽量化と高効率化に有効な永久磁石励磁同期電動機(PMSM)が注目されてきている。更に、ベクトル制御と電磁解析技術の融合により、磁極の突極性を生かしたリラクタンストルクの有効利用も進んできており、次に述べる車輪直接駆動電動機や、全閉型主電動機などに適用されつつある。

6.2.2 車輪直接駆動電動機 現在の鉄道車両駆動システムでは、減速歯車を介して車輪に動力を伝達する平行カルダン方式が一般的である。しかし、高速回転に伴う騒音や減速歯車のメンテナンス、効率の悪化低減のために車輪直接駆動電動機(DDM)の開発が進められている。DDMには大きくアウトロータ式(主電動機の外側が回転)とインナロータ式の2種類がある。アウトロータ式では(財)鉄道総合技術研究所と共同で軌間可変試験電車(GCT)用として現在試験車両での耐久評価試験中(図7)であり、インナロータ式では東日本旅客鉄道(株)と共同で在来線車両用として開発評価中である。

6.2.3 全閉型電動機 従来の主電動機では、電動機の内部に車外の冷却風を導入する通風冷却方式が一般的であるが、冷却風には塵埃(じんあい)が含まれているため、定期的な分解、清掃が必要である。特に、在来線では、高速回転時のファン騒音が大きくなる問題点もある。そこで、産業用では一般的な全閉自冷方式の鉄道車両への適用開発が行われている。

誘導電動機の適用により小型・軽量となったとはいえ、通風冷却と全閉自冷では差が大きく、高効率化を図り冷却構造と軸受け構造に工夫をこらした誘導電動機タイプと、更に高効率がねらえるPMSMタイプにて開発を進めている。誘

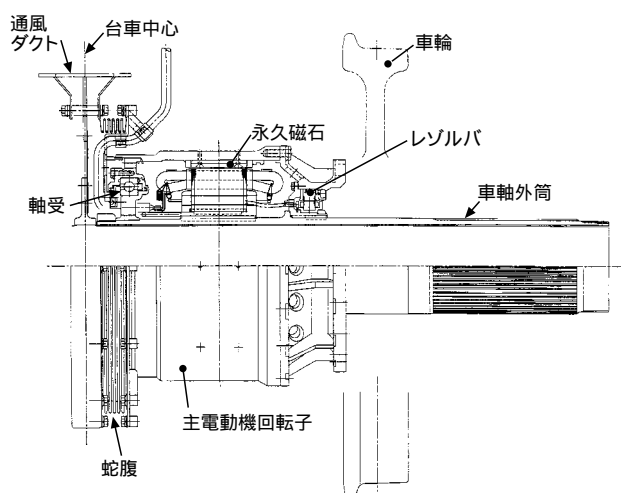


図7. アウトロータ式車輪直接駆動電動機 新幹線と在来線という異なる軌間幅を持つ路線を、一体となった車輪と主電動機が蛇腹の部分で平行移動することにより、連続走行できる構造である。
Direct-drive motor with gauge change system

導電動機タイプについては、現在フィールドにて評価試験中である。

7 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3.3kV 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4.5kV 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・低騒音化を図るための素子開発、製品のシリーズ化、及びセンサレス制御などの最新インバータ制御を適用した装置の製品化を進めていく。



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部長。車両システムの技術開発に従事。
Transportation Systems Div.



長谷部 寿郎 HASEBE Toshio

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参事。車両システムの技術開発に従事。電気学会会員。
Transportation Systems Div.



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.