

鉄道車両用パワーエレクトロニクス装置

Power Electronics Equipment for Rolling Stock

中沢 洋介

NAKAZAWA Yosuke

逸見 琢磨

HENMI Takuma

青山 育也

AOYAMA Ikuya

近年、新幹線、在来線、地下鉄、及び電気機関車用電力変換装置の基本コンセプトとして小型・軽量化はもちろんのこと、更に省エネルギー、環境適合性の追求、信頼性の向上が必須となっている。このような背景において、市場ニーズに合致したパワーエレクトロニクス装置を商品化するためには、コア技術の開発が不可欠である。東芝は、最新の低損失パワーデバイスとその適用技術、及びベクトル制御などの車両駆動制御技術をいち早く導入し商品化することで高い評価を得るとともに、低騒音化や乗りごち改善など環境に優しい鉄道システム作りにも貢献している。

In addition to the recent trends toward downsizing and weight reduction of power electronics equipment for the Shinkansen, commuter trains including subways, and electric locomotives, increasing importance is being placed on energy saving, consideration for the environment, and improved reliability. In these circumstances, the development of core technologies is indispensable for the commercialization of power electronics equipment that can meet the needs of the market.

Toshiba has introduced and commercialized drive technologies for trains including the latest low-loss power devices and techniques for their application, as well as vector control technology, ahead of other companies in this field. These technologies have received high evaluations for their contribution to eco-friendly railway systems by reducing noise and improving riding comfort.

1 まえがき

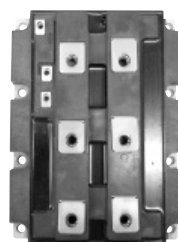
近年の鉄道車両用パワーエレクトロニクス装置は、その主スイッチング素子である高耐圧・大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子の低損失化、高周波化といった特性改善により、省エネルギーや低騒音化など環境負荷の低減という市場のニーズに適合した製品になりつつある。この IGBT 素子は、世界的にも標準化が進んでおり、国内、海外の主要メーカーのデバイスでも取付互換が可能となっている。

また、前記はいわゆるモジュール型と呼ばれているものであるが、装置の構造や冷却方式に応じて、GTO (Gate Turn-Off thyristor) 素子のパッケージで多く使用されている圧接型の素子も東芝では製造しており、新幹線電車や海外向けの変換装置などへ適用している。この圧接型 IGBT 素子の特長は、内部にはんだを使用していないため、はんだの熱疲労などによる経年劣化に対する処置が必要ないこと、また近年の無鉛化志向にもマッチしている。

代表的な高耐圧 IGBT 素子の外観を図1に示す。また、車両駆動としての高圧 IGBT 素子の主要定格は、図2に示すように大別して3種類に集約される。

このような背景において、重要な課題は、電力変換部及び駆動制御を含めたアプリケーション技術であり、市場のニーズにいかにか合致したコア技術を提供できるかに掛かっている。

ここでは、小型・軽量化、省エネルギー化、環境適合性、



(a) モジュール型



(b) 圧接型

図1. 高耐圧・大容量 IGBT 素子 - 使用用途と冷却方式に応じて、パッケージを選択できる。

High-power insulated-gate bipolar transistor (IGBT) module

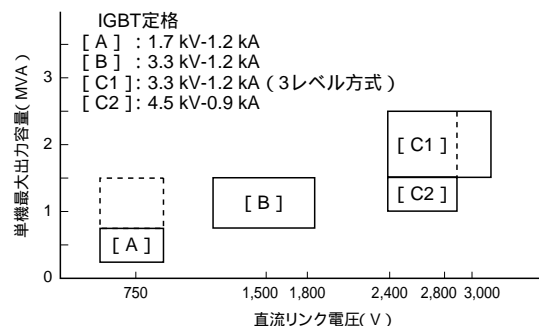


図2. 車両ドライブへのデバイス適用マップ - 出力容量は1並列で接続した場合を示し、1.5 MVA 以下は自冷方式である。

Ratings of power devices for rolling stock

快適性,信頼性向上の基本コンセプトに関する具体的コア技術について述べる。

2 基本コンセプトとコア技術

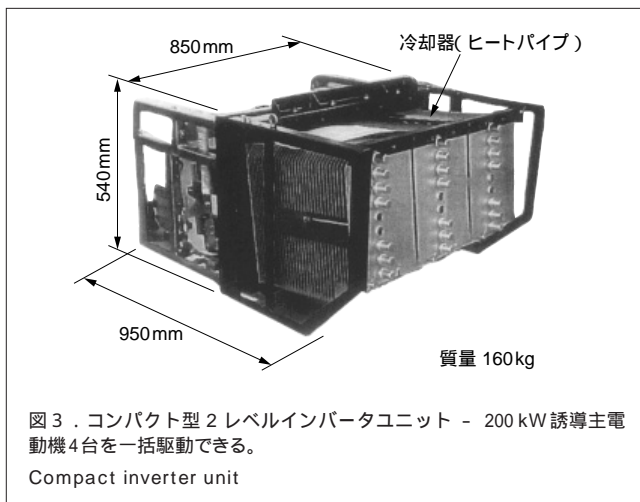
2.1 小型・軽量化(車体へのぎ装,省スペース化)

車両駆動用変換装置は,パワーユニットのスペースが1/2程度を占めるので,これを小型・軽量化すれば,ぎ装上の自由度が増え,保守性も向上する。

在来線用変換装置のように冷却器(放熱部)の熱時定数が大きい(10分程度)自冷式の場合,走行風を考慮することで,従来の設計よりコンパクト化が可能となる。

また,小型・軽量化のもう一つの課題はIGBTの低損失化であり,当社は,現行IGBT比較で同じ飽和電圧に対して,ターンオフ損失を30%低減した3.3kV-1.2kA定格デバイスを量産化した。

これらの冷却技術と低損失タイプIGBTを用いて開発したコンパクト型2レベルインバータユニットの外観を図3に示す。このユニットで200kW定格の誘導電動機4台を一括駆動できる。



2.2 省エネルギー化

省エネルギー化の施策として,機器の高効率化,軽量化及び回生電力量増大があるが,ここでは回生効率(=実回生電力量/理想的な回生電力量),つまり実運用上の回生率向上について述べる。

最近の新形式車は,大半がベクトル制御を採用している。これにより,従来のすべり周波数制御に比べて回生負荷急変時にも応答の良いフィルタコンデンサ(FC)電圧制御が可能となるので,図4における②の特性のように,回生電圧リミッタゲインを高くできる。

この考え方を力行/回生の繰返し頻度の高い地下鉄電車用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータに適用した場合の回生率の比較を表1に示すが,約7~8%

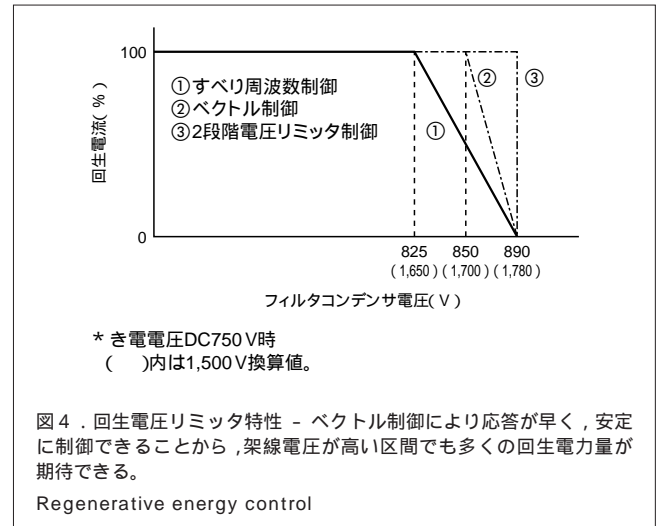


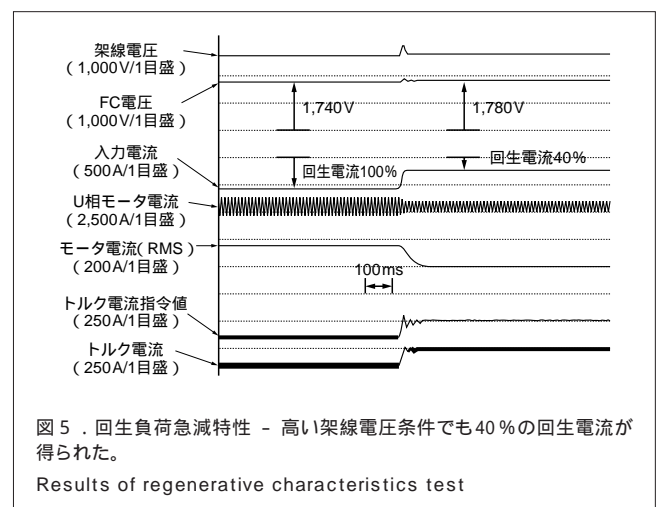
表1 回生率の比較

Comparison of regenerative ratios

項目	すべり周波数制御			ベクトル制御		
	M1車	M2車	M3車	M1車	M2車	M3車
走行距離(km)	47,372			23,163		
力行(kWh)	197,350	210,353	200,966	93,764	94,386	95,927
回生(kWh)	52,610	52,032	54,942	31,499	31,337	32,740
回生率(%)	26.7	25.8	27.3	33.6	33.2	34.1

の改善効果が得られた⁽¹⁾。更に,PI(比例と積分)制御による2段階電圧リミッタ制御を採用することで,図4の③に示すフルスクエア特性が実現できる。

ダイナミックシミュレータでの回生負荷急減試験結果を図5に示すが,FC電圧が最大値に張り付いても,従来のように回生電流は0にならず,負荷に見合う電流を回生できるので,き電系の送り出し電圧が高い区間や時間帯では,更に回生率の向上が期待できる。

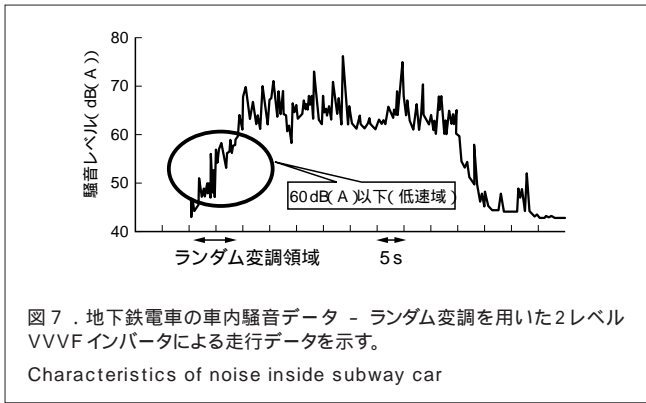
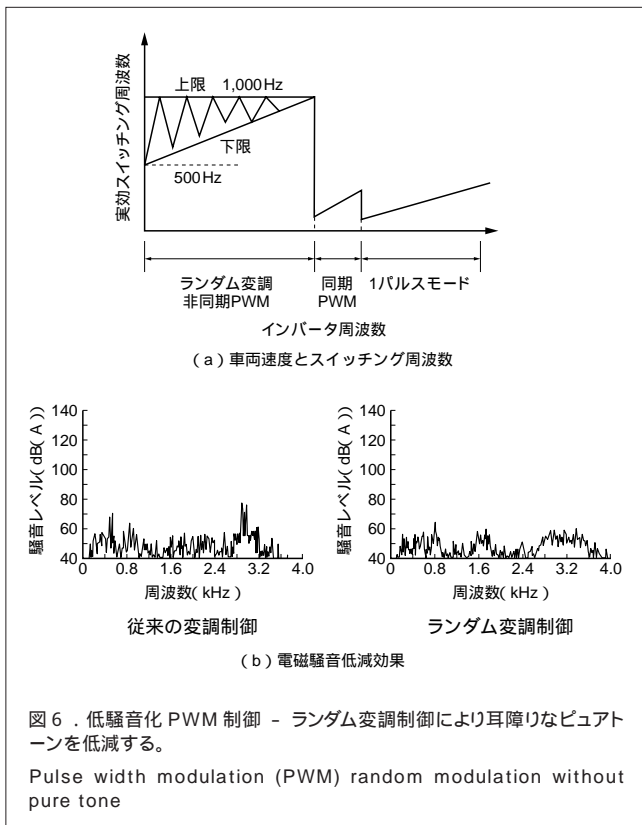


2.3 環境適合性(低騒音化)

鉄道車両からの発生騒音としては、走行時に発生するレールと車輪の摩擦音、車両の風きり音、モータやトランスの騒音、プロアやクーラの送風音などがある。

特に、VVVFインバータで主電動機を駆動する車両や、電源装置にCVCF(Constant Voltage Constant Frequency)インバータを搭載する車両では、パワーデバイスのスイッチングに伴うモータやトランスからの電磁音が発生し、耳障りな騒音源となっている。

電磁音を抑制する技術の一つとして、PWM(Pulse Width Modulation)キャリア周波数のランダム変調制御がある。これは図6に示すように、キャリア周波数を上限と下限の間であるランダム関数に基づいて周波数変調することで高周波スペクトルを分散し、特定の高調波成分を出さないようにしてピュアトーンを低減する制御方法である。周波数変調幅はおおむね500~1,000 Hz程度である。当社が開発した高速演算プロセッサの適用により、前記のランダム変調が容易となり、制御周期やA/D(アナログ/デジタル変換)割込みタイミングをPWMキャリアに同期させることができるために、ビートを生じることなく、安定した制御系が構築できる。適用事例として、地下鉄電車用2レベルVVVFインバータ駆動による走行試験での車内騒音データを図7に示す。車両速度が低いPWMランダム変調制御の適用領域では、車内騒音が60 dB(A)以下に抑えられており、低騒音化の効果が出ている⁽²⁾。



2.4 快適性(オール電気ブレーキによる停止)

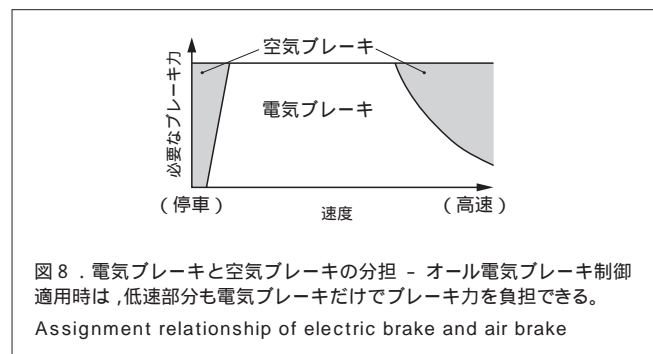
ベクトル制御導入により、車両が極低速でも安定したトルク制御が可能なシステムとなっている。オール電気ブレーキ制御は、このインバータ制御技術の一つであり、速度ゼロまで電気ブレーキだけで電車を停車させる技術である。

従来は、極低速でのモータトルク制御が困難であり、電車の停車間際に空気ブレーキに切り替えて停車していた。一般的なインバータ制御電車のブレーキは、モータにより電気ブレーキ(自動車のエンジンブレーキに相当)力を発生させ、エネルギーを電源へ回生する手段、及び空気圧によりブレーキシューを車輪にあて、摩擦によりブレーキ力を得る手段の両方を備えている。

ここで電気と空気双方のブレーキ力は、速度域ごとに分担が変化している。図8に示すように、電気ブレーキ主体ではあるが、高速域と停車間際の極低速域では空気ブレーキを補足し、電車編成全体としてのブレーキ力を確保している方式が一般的である。オール電気ブレーキ制御は、停車間際の極低速域でも空気ブレーキを補足せず電気ブレーキだけで速度ゼロまで制御し、その後、空気ブレーキを駐車ブレーキとして作用させるものである。

この制御を採用する効果として、空気ブレーキ切替え時の乗りごち悪化を軽減、電車が止まる際の、ブレーキシューの鳴き音(キーキー音)の抑制、ブレーキシュー摩耗の低減によるシュー保守周期の延長などが挙げられる。

図9は、オール電気ブレーキ制御により高速から駅停車し



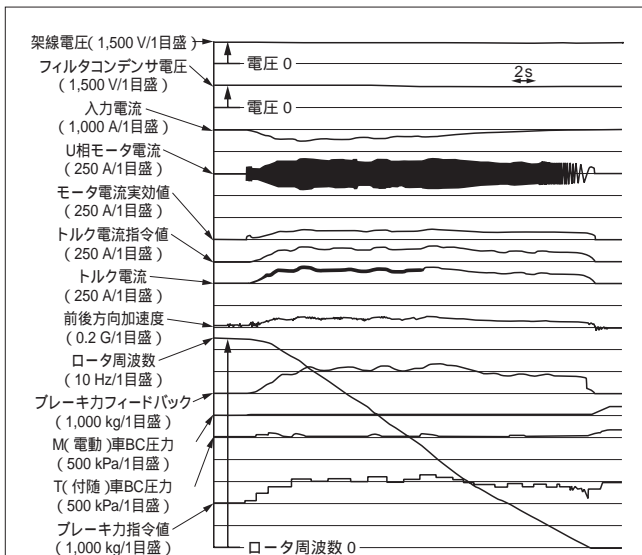


図9．営業車におけるオール電気ブレーキ制御例 - 停車後にM車，T車とも空気ブレーキシリンダ(BC)圧力が入っていることから，電気ブレーキのみで停車まで良好に制御できていることがわかる。

Characteristics of full-time electric brake control

た場合のオシログラムであり，ブレーキ指令に応じて停車まで安定した制御が行われている。

2.5 信頼性向上

現在製品化されているベクトル制御車両は，モータの回転数を検出する速度センサを必要としている。このセンサは，モータの反駆動軸側に歯車とペアで設置されており，モータ本体の大きさを制限する要素となっているうえ，その使用環境は温度，振動，ノイズの点で高い信頼性を要求される。

当社は，産業ドライブで実績が得られているdq軸誘起電圧演算方式を用いた速度センサレスベクトル制御をベースとして，実車走行試験をとおして，1パルスモードでの安定化，空転再粘着制御，回生負荷遮断，勾配(こうばい)での後退起動制御などの車両駆動用アルゴリズムを確立した⁽³⁾。

速度推定基本演算式(1)は，二次磁束 ψ_2 に直交する誘起電圧 E_q がQ軸に一致するようにインバータ周波数 ω_1 を制御する。

$$\omega_1 = \frac{E_q}{\psi_2} - G(S) \times E_d \quad (1)$$

ω_1 とすべり周波数指令 ω_s から，速度周波数 ω_R を算出し，この変化率によって空転検出を行う。

$$R = \omega_1 - \omega_s \quad (2)$$

ここで， E_d ， E_q はd軸，q軸の誘起電圧を， $G(S)$ は伝達関数を示す。

当社では，モータ個別制御，台車制御のみならず，1台のインバータで4個のモータを一括駆動するシステムに関しても実用化試験を完了した。図10は，一括駆動システムにおい

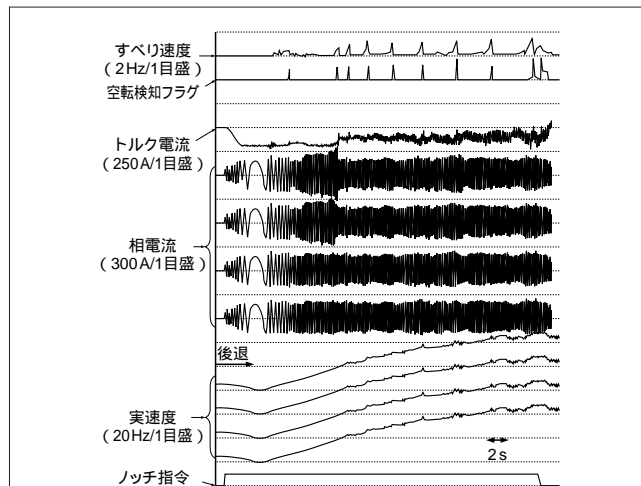


図10．勾配散水起動試験(速度センサレス制御) - 勾配で後退時に散水させながら良好な起動加速特性が得られた。

Characteristics of speed sensorless control

て20%の勾配で散水しながら実車走行したときの後退起動特性である。空転検知遅れ，すべり速度，トルク絞り量とも従来の速度センサ付きベクトル制御と同等の特性が得られた。

3 あとがき

鉄道車両は公共性の高い製品分野であり，ここで述べた環境に優しい車両用パワーエレクトロニクス装置を目指したコンセプトとコア技術を，新幹線，在来線，機関車など多くの車種に適用拡大していきたい。

文献

- (1) 戸田伸一，ほか，“電気鉄道におけるベクトル制御による省エネルギー化の一方法”，平成11年電気学会全国大会，p.5-264 - 5-265。
- (2) 野田智史，ほか，“台車制御IGBT 2レベルVVVFインバータ装置”，平成12年電気学会全国大会，p.5-2289 - 5-2290。
- (3) 結城和明，ほか，“速度センサレスベクトル制御の電鉄への適用について”，平成13年半導体電力変換研究会資料，SPC.01.67。



中沢 洋介 NAKAZAWA Yosuke

電力・社会システム社 電力・産業システム技術開発センター パワエレ応用システム担当グループ長。パワエレ応用システムの研究・開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



逸見 琢磨 HENMI Takuma

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 交通ドライブシステム開発担当グループ長。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 - Industrial and Power Systems & Services



青山 育也 AOYAMA Ikuya

電力・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.