

直流電車駆動用VVVF(可変電圧可変周波数)インバータ, 交流電車駆動用コンバータ/インバータのモデルチェンジが進んでいる。パワーデバイスは, 高周波化によるモータおよびトランスの電磁音低減と素子周辺回路のコンパクト化をねらったIGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)が主流である。IGBTの電圧定格は2.5kV/3.3kVまでラインアップされており, 客先ニーズに応じて3レベル/2レベル方式を選択できるようにシリーズ化した。モータ制御は, 産業ドライブで確立したPWM(パルス幅変調)モードでのベクトル制御をベースに, 車両特有の高速領域の同期1パルスモードでの磁束補正型ベクトル制御の開発により, 従来のすべり周波数制御に比べ大幅な性能改善ができた。

The concept and design of variable-voltage variable-frequency (VVVF) inverters and converter/inverters for electric cars are changing. With regard to power devices, circuits are being simplified for the insulated-gate bipolar transistor (IGBT), which is the main device used for the purpose of decreasing the electromagnetic noise of motors and transformers.

Toshiba has a lineup of IGBTs with a rated voltage of 2,500V/3,300V, and has developed a series of converters and inverters to allow the choice of a 3-level circuit or 2-level circuit according to the needs of the customer. In terms of motor control, as a result of the development of flux compensation vector control for 1-pulse mode in the high-speed region, vehicle performance has been significantly improved in comparison with conventional v/f constant and slip frequency control.

1 まえがき

最近の直流電車駆動用VVVFインバータおよび交流電車駆動用コンバータ/インバータは, 従来のGTO(Gate Turn-Off thyristor)素子を使った2レベル方式に対して, IGBT素子を使った3レベル方式が主流となっている。

このIGBTは, 電圧定格1,700~3,300V, 電流定格400~1,200Aまでが, ラインアップされている。構造的に, ワイヤボンディングを多用したモジュール型とマルチチップ圧接構造による圧接型が採用されている。前者は小容量変換器, 後者は中・大容量変換器として使い分けている。また, 3.3kV IGBTの量産化により, 本来の2レベルIGBT方式の開発・標準化を進めている。

駆動用誘導電動機をトルク制御する方式は, 電車駆動では10年以上にわたって, 電圧/周波数一定, すべり周波数制御が主流であった。しかし, 過渡的なトルク制御応答が数百msと遅いため, 空転/滑走時の粘着制御などVVVFインバータに期待された成果が出ていない。世の中の交流モータ駆動分野では, すでに7~8年前からベクトル制御が主流であり, 鉄鋼・圧延分野などで確立した電流応答高速化技術を電車駆動へ適用することで大幅なレベルアップを図ることができた。

ここでは, 上述の鉄道車両駆動システムの開発経過を紹介する。

2 主回路駆動方式のコンセプト

VVVFインバータ方式, 主回路システム方式, モータ制御方式からみた鉄道車両駆動システムのコンセプトを図1に示す。

2.1 VVVFインバータ方式

GTOは, 電圧定格4,500V/2,500V, 電流定格1,000~4,000Aまでラインアップされ, インバータの容量,

	<課題>	<解決策>	<最適コンポーネント>
VVVFインバータ方式	低騒音化 高調波低減 小型・軽量化 経済性 信頼性向上	3レベル	(小容量)モジュール型IGBT (中・大容量)圧接型IGBT
		2レベル	圧接型IGBT
主回路システム方式	空転・滑走 冗長性 システム経済性 コンパクト化 オールマイティ化 (長大編成・短編成)	モータ個別制御	モジュール型IGBT
		集中制御	圧接型IGBT
		台車制御	圧接型IGBT
モータ制御方式	粘着制御向上 回生効率向上 ビートレス制御改善 センサレス制御への展開	ベクトル制御	32ビット専用プロセッサ

図1. 鉄道車両駆動システムのコンセプト 客先ニーズに対する3レベル/2レベル, 個別制御/台車制御, モジュール型/圧接型それぞれの製品コンセプトを示す。

Concept of rolling stock drive system

使いかたに合わせた最適な定格選定により最少個数で構成できる。最近、環境保全がクローズアップされており、電車駆動システムでもコンバータとトランス、およびインバータとモータの組合せによる騒音、高調波、誘導ノイズが課題となっている。このため、GTO に比べて耐圧が低い IGBT を使った高周波化と素子耐圧が低いための 3 レベル化により、PWM 波形を改善してきた。

しかし、3 レベル方式は、2 レベル方式に比べて素子数が 2 倍で、スナバ回路も複雑である。したがってトータル損失、部品点数が増えるので、小型化、コンパクト化、経済性の面で制約が多い。図 2 に、IGBT VVVF インバータとして DC 1,500 V 架線へ適用した場合の 3 レベル方式と 2 レベル方式の比較を示す。

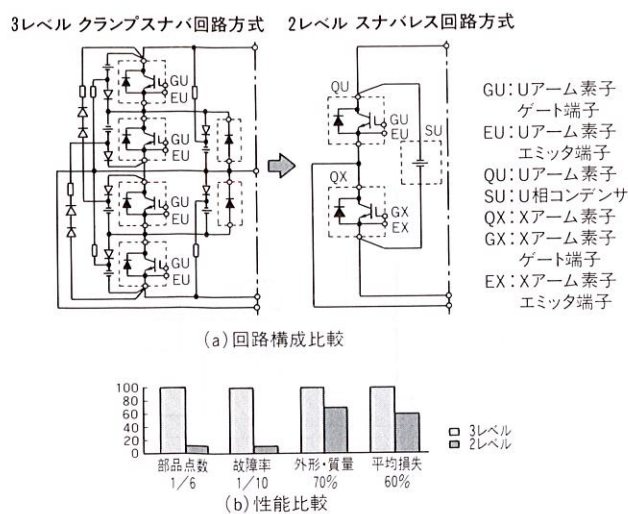


図 2. 3 レベルインバータと 2 レベルインバータの回路構成比較 2 レベル IGBT 方式では、個別スナバが不要となり、シンプルな回路構成ができる。

Comparison of 3-level circuit and 2-level circuit

2 レベル方式は、図 3 に示すように損失面からキャリア周波数として 800~1,300 Hz が最適と考えられる。これによる耳ざわりのモータ電磁音を 3 レベル並みに抑制するためにキャリア周波数分散式 PWM を採用している。

図 4 に従来のキャリア周波数固定方式と分散方式のモータ電磁音の比較データを示す。当社は、客先ニーズおよび回路電圧に応じて、図 5 のように 3 レベル/2 レベルの両方式をシリーズ化している。

2.2 主回路システム方式

1991 年に当社が開発したモータ個別制御は、電動車比率の低減、短編成車両での冗長性向上、空転時の乗りごこち改善というコンセプトでスタートした。その後、小容量インバータ素子として GTO から IGBT モジュールの適用で、高周波化および CVCF (定電圧・定周波) インバータダウン

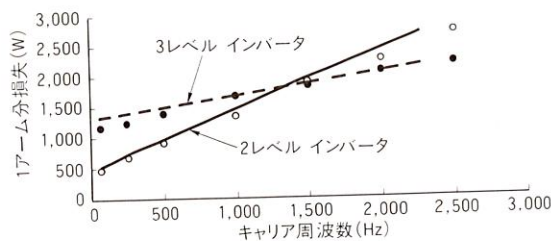


図 3. 2 レベルインバータと 3 レベルインバータの損失比較 インバータ 1 相分での比較で、素子あたりのスイッチング損失は 2 レベルのほうが大きいため、キャリア周波数を上げていくとインバータとしても逆転する。

Comparison of inverter loss

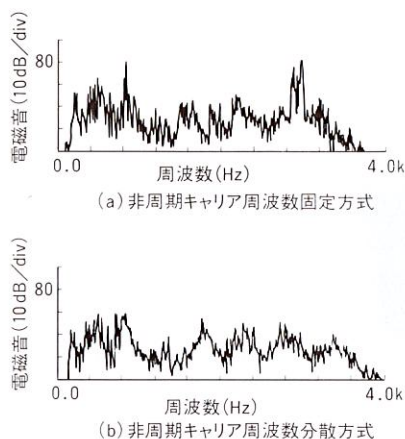


図 4. 低騒音化 PWM 制御の効果 キャリア周波数固定方式では 3 kHz 付近にピークがあり耳ざわりの音質となっているが、キャリア周波数分散方式では平均化している。

Effect of low-noise PWM control

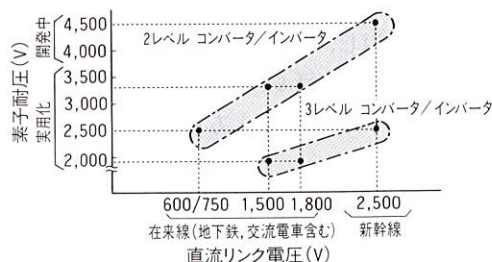


図 5. 3 レベル方式と 2 レベル方式の適用マップ 直流、交流および新幹線の直流リンク回路電圧に対して、3 レベルと 2 レベル各方式での IGBT の最適構成を示す。

Application map

時、個別 VVVF インバータの一群を CVCF インバータ運転させるデュアルモードシステムとして付加価値を高めてきた。

しかし、長大編成では編成として冗長性が確保されているので、経済性の点からインバータユニット数は少ないほうがよい。そして、前述した大容量圧接型 IGBT の開発により、素子の並列接続なしで 220 kW 級モータを 2 個以上駆動できるようになった。さらに、後述するベクトル制御の適用により個別制御と台車制御での粘着制御上の大差がなくなってきたことから、電車システムに応じた個別制御、台車制御、集中制御の選定の自由度が出てきた。

表1. VVVF インバータ システムの比較
Comparison of VVVF inverter systems

システム方式	個別制御		台車制御		集中制御
モータ容量	220 kW		150 kW×2 個	220 kW×2 個	200 kW×4 個
インバータ方式	3 レベル	2 レベル	2 レベル		2 レベル
IGBT 素子	1,800 V-400 A モジュール型	3.3 kV-400 A モジュール型	3.3 kV-1,200 A 圧接型		3.3 kV-1,200 A 圧接型
特徴	デュアルモードタイプ	個別VVVF 単独タイプ	直接フィン 冷却	ヒートパイプ 冷却	大容量タイプ
粘着制御	モータ単位でのトルク 絞り		2 個モータごとのトルク 絞り		4 個モータごとの トルク絞り
外形・質量	ユニット数が多い		集中制御並みのコン パクト化が可能		ユニット 数最小
冗長性	モータ単位での開放		2 個モータごとの開放		4 個モータご との開放

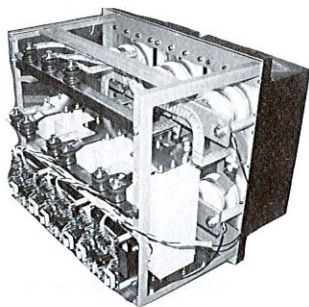


図6. 直接フィン方式2レベルインバータユニット フロリナードあるいは純水のような冷媒を使わないパワーユニット。2レベル方式で、損失を最小化することで実現した。

Inverter unit with natural air cooling

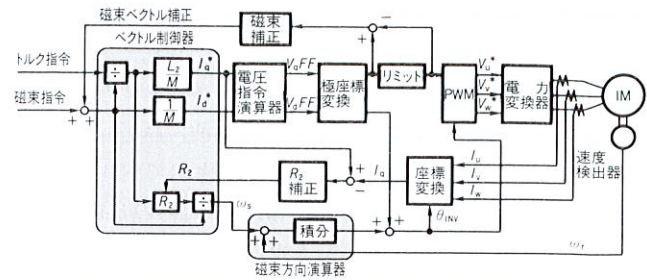
表1に示すように、それぞれの方式に応じて最適なパワーデバイスを採用し、コンパクトなパワーユニットのシリーズ化を進めている。図6に150 kW モータ2個を駆動できる直接フィン冷却(冷媒レス)方式2レベルインバータユニットを示す。

2.3 ベクトル制御とすべり周波数制御

産業ドライブでは80年代にベクトル制御が主流になったのに対して、電車駆動の実用化の遅れの理由として、次のことが挙げられる。

- (1) 車両のイナーシャが大きく、鋼鉄、圧延のような高速制御応答、電流制御応答を必要としなかった。
- (2) インバータ周波数が0~200 Hzと広範囲のため、スイッチング周波数の制約があり、また電圧利用率から同期1パルスモードを使わざるを得ないため、産業用ベクトル制御そのものの適用は難しい。

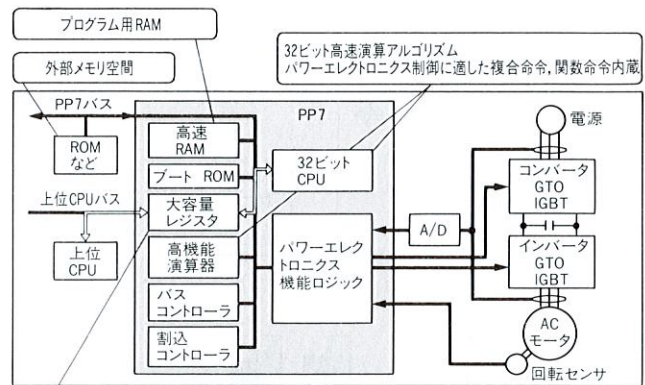
これに対して、産業、昇降機、車両のパワーエレクトロニクス部門で共同開発したベクトル制御専用32ビットプロセッサの採用で、インバータ制御、保護機能をワンボード化し、PWM制御モードはもとより1パルスモードでも磁束ベクトルを補正し、電圧位相をフィードフォワード制御することにより全速度域ベクトル制御を実現した。図7に1パルスモードベクトル制御の構成を、図8にプロセッサの概要を、図9にインバータ制御ボードと制御ユニットの外観



L_2, M, R_2 : IM等価回路定数 I_d^* :トルク電流指令 I_m^* :磁束電流指令 ω_s :すべり角速度 θ_{INV} :インバータ電気角 V_qFF :q軸電圧ベクトル V_dFF :d軸電圧ベクトル I_d :トルク電流 V_u^* :u相ゲート信号 V_v^* :v相ゲート信号 V_w^* :w相ゲート信号

図7. 1パルスモードベクトル制御 通常のベクトル制御に対して、電圧指令ベクトル(V_qFF , V_dFF)に対する磁束補正ベクトルを付加している。

1-pulse-mode vector control



PP7: Power electronics Processor for various inverter control integration

図8. ベクトル制御専用32ビットプロセッサ 産業用駆動、昇降機用駆動、車両用駆動共通仕様で開発。

Vector control processor

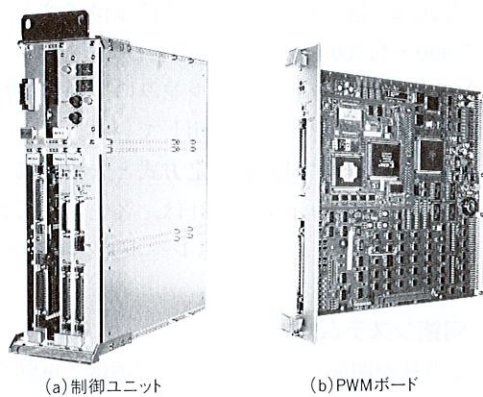


図9. インバータ制御ボードと制御ユニット このボード一枚に、VVVFインバータ動作に必要な制御、保護などを一式を装備している。この制御ユニットで、2台のインバータが制御できる。

Inverter control board and control Unit

を示す。

図 10 にベクトル制御と従来制御のトルク応答比較を示す。すべり周波数制御時の 100~200 ms に対して、1パルスモードベクトル制御では 10~20 ms 以下の高速応答を達成した。

このトルク応答の高速化により、空転/滑走時の粘着制御性能が大幅に改善できた。図 11 に 35%こう配起動時の散水走行特性を示す。現行制御に対して、ベクトル制御方式では、すべり速度量が 1 km/h 以下に制御でき、乗りごちがよく、車輪のきしみ音が小さいなどの成果が得られた。

そのほか、トルク電流を高速制御することにより、再生中の負荷遮断時の失効レス化、また交流電車用として直流

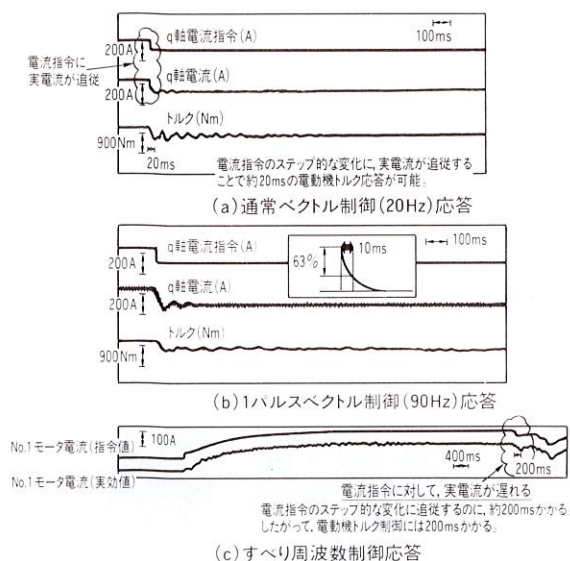


図 10. ベクトル制御応答とすべり周波数制御応答の比較 PWM モードの通常ベクトル制御と 1パルスモードベクトル制御では 10~20 ms 以下の高速応答が可能である。

Comparison of response

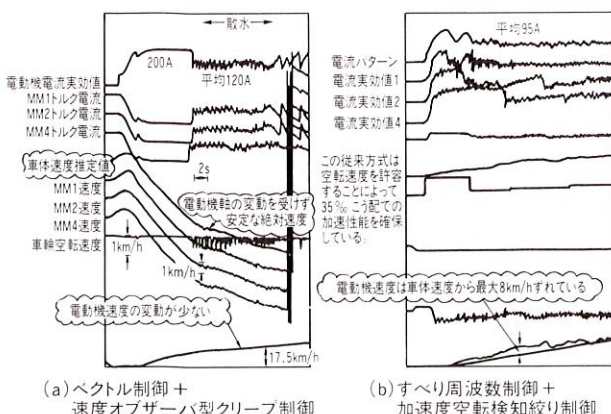


図 11. 空転時の粘着制御性能の比較 35%こう配での散水走行条件でのベクトル制御とすべり周波数制御との比較で、すべり速度量が顕著な効果があった。

Comparison of re-adhesion

リンク電圧脈流とインバータ周波数とのビートによるトルクリプル抑制などの点でベクトル制御の効果は大きい。

3 製品化状況

3.1 IGBT コンバータ/インバータ, VVVF インバータ

現在フィールドで稼働中の IGBT 2 レベル/3 レベル方式コンバータ/インバータおよび VVVF インバータは、合計約 100 台になる。前述したように、IGBT としてはモジュール型と圧接型を使用している。圧接型 IGBT は、約 900 個使用しており、98 年度には 3.3 kV IGBT を主体に 2,000 個以上の使用を予定している。

3.2 ベクトル制御

現在稼働中のベクトル制御電車は、新幹線、在来線も含め 5 機種、約 30 台であるが、98 年度には 100 台以上の出荷を予定している。

4 あとがき

鉄道車両駆動用 VVVF インバータ方式として IGBT を使った 2 レベル/3 レベル方式、主回路方式として個別制御/台車制御/集中制御、そして、それぞれについてのコアコンポーネントである IGBT パワーユニットとベクトル制御ユニットの開発を終了し、機種ごとの標準化を進めている。さらに、交流電車駆動用コンバータについても、2 レベル/3 レベル方式の標準化を図っていく。また、駆動用モータ制御も他分野と同様にベクトル制御が主流になりつつあり、今後は、さらにオートチューニング化、センサレス化など高機能化を検討していく。

文献

- 1) I. Aoyama, et al: The Individual-Axle-Control Traction System for Electric Railcars, IPEC-Yokohama 95, pp.801-806 (1995)
- 2) Y. Nakazawa, et al: One Pulse Mode Vector Control for Traction Drive, IEEE Work Shop on Power Electronics in Transportation, pp.135-141 (1996)
- 3) I. Yasuoka, et al: Improvement of Re-adhesion for Commuter Trains with Vector Control Traction Inverter, PCC Nagaoka (1997)
- 4) 日吉道明, 他: 2.5 kV 平型 IGBT およびその応用技術, 東芝レビュー, 52, 2, pp.43-46 (1997)



安岡 育雄 Ikuo Yasuoka

府中工場 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 Works



大山 滝夫 Takio Ooyama

府中工場 交通システム部主幹。
車両システムの技術開発に従事。

Fuchu Works