

在来線車両用 VVVF 駆動システムと補助電源システム

岩村 光二(いわむら こうじ)

岩堀 道雄(いわほり みちお)

野中 政章(のなか まさあき)

1 まえがき

鉄道における在来線車両は、その形態、動力方式、要求機能などが多岐にわたるため、搭載される機器も多様性を有している。富士電機は、長年にわたり、この分野でその時々適用可能な技術を駆使して開発を行いながら顧客のニーズに対応してきた。

最近では、人々の価値観の「量」から「質」への変化と輸送機関における鉄道の重要性を認識したうえで、「環境性」「快適性」「機能性」「保守性」を基本コンセプトとしてコストパフォーマンスの優れたシステムをめざして取り組んでいる。

本稿では、在来線車両分野における富士電機の最近の状況および今後の指向について紹介する。

2 VVVF 駆動システム

2.1 概要

電気鉄道車両の駆動方式として VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ制御による三相誘導電動機が適用されてからすでに久しいが、この間、使用デバイスは低騒音化、乗り心地向上などの快適性に対する強

い要望に対応するため、GTO (Gate Turn-Off Thyristor) から IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) へと変わってきた。

富士電機は、このようなニーズにこたえ、1995年、当時としては世界最大級の高耐圧 IGBT (2,000 V/400 A) を適用した 3 レベル VVVF インバータを開発し、その後、この成果をもとに現車での実績を作ってきた。

昨今、車両用機器に対する小形軽量、低価格、高性能、省エネルギー、メンテナンスフリーに対する要望は、一層強いものがある。富士電機は、これらのニーズに対応するため、IGBT 素子の大容量化を背景に車両駆動用 VVVF インバータシステムとして、コストパフォーマンスの優れた 2 レベル方式の開発を完了し、現在、製品レベルで展開中である。

以下に、これらの状況について紹介する。

2.2 3 レベル VVVF インバータ

実績の主なものは、1997年、山陽電気鉄道(株)向けに納入した 5030 系電車駆動システム⁽¹⁾である。図 1 に 5030 系電

図 1 5030 系電車の外観



表 1 5030系電車の諸元

車 両 編 成	3M3T					
	Tc1	M1	M2	T	M3	Tc2
電 気 方 式	DC1,500 V架空線式					
車 両 性 能	加 速 度	2.8 km/h/s				
	減 速 度	常用最大4.2 km/h/s				
	最高速度	110 km/h				
制 御 方 式	ベクトル・すべり周波数制御適用 主電動機個別制御，3レベルVVVFインバータ制御方式					
使用素子	IGBT（2,000 V，400 A）					
インバータ 冷却方式	ヒートパイプ自冷方式（水冷媒）					
主 電 動 機	定格（1時間）170 kW，1,100 V，112 A					
ブレーキ 方式	回生ブレーキ併用電気指令式空気ブレーキ， 直通予備ブレーキ付き					
開 放 運 転	主電動機2台単位の開放					



岩村 光二

鉄道車両システムの技術企画業務に従事。現在、システム事業本部交通・特機事業部交通技術第二部主席。



岩堀 道雄

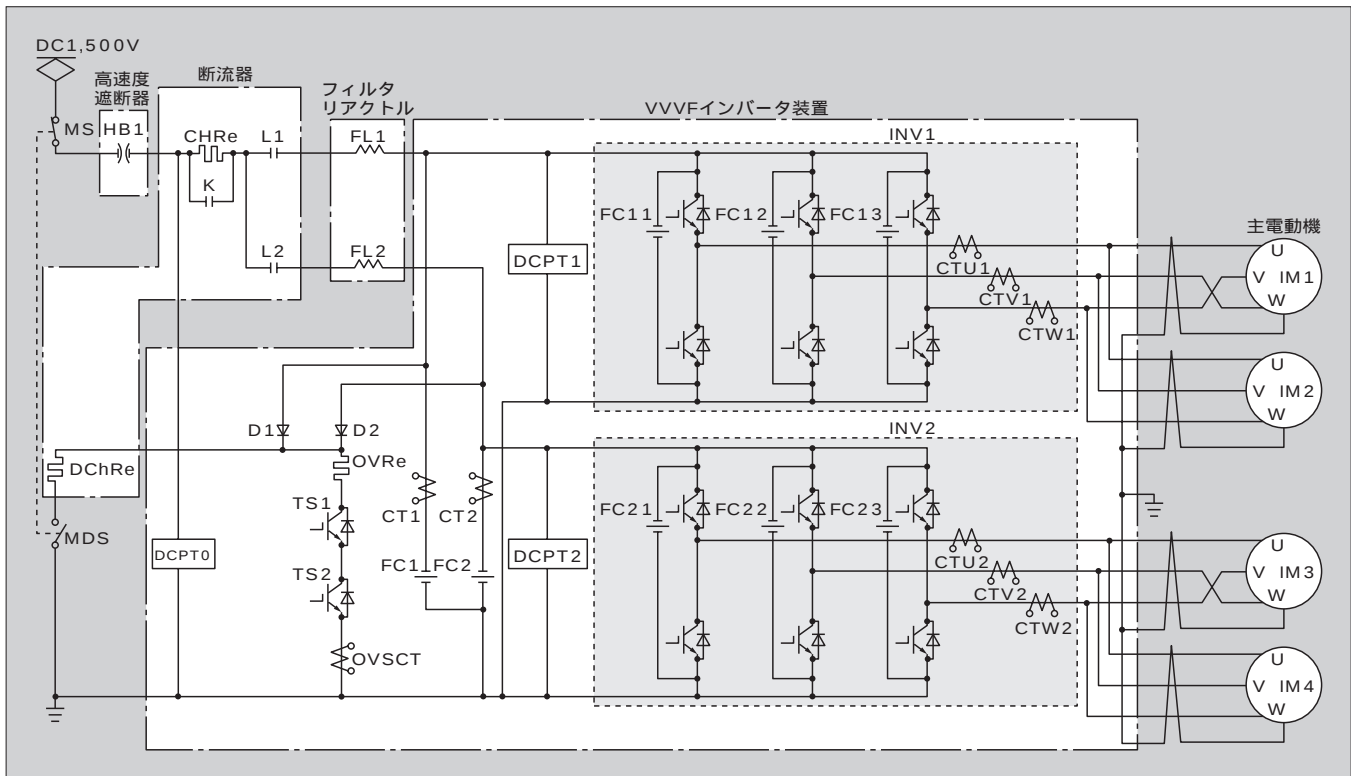
パワーエレクトロニクス応用装置、車両駆動システムの開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ドライブシステムグループ主任技師。



野中 政章

鉄道車両補助電源装置の開発、設計に従事。現在、神戸工場制御設計部。

図2 VVVFシステム主回路接続図



車の外観を、表 1 に 5030 系電車の主要諸元を示す。主回路構成は 4 台の主電動機をそれぞれ 1 台の IGBT 3 レベルインバータで駆動する方式で、冗長性を向上させるため、2 台のインバータを 1 群として、故障時には群単位（台車単位）で開放可能なシステムとしている。

このほかに、同様のシステムを四国旅客鉄道(株)(120 kW × 4)およびニューヨーク地下鉄(125 kW × 2、回生・発電ブレーキ併用)へ納入した。

2.3 2 レベル VVVF インバータ

2.3.1 基本コンセプト

基本コンセプトとして留意した点は次の4項目である。

(1) 環境性

IGBT の高速スイッチング制御により低騒音化を実現している。EMI (Electromagnetic Interference) 対策としては、軌道回路への影響が実用上問題のないレベルとなるよう、フィルタ定数、スイッチング周波数を選定している。また、直達ノイズ対策にも配慮している。

（2）低価格化

低価格を志向するため、2レベル方式の1インバータ2電動機駆動システム（1C2M）を採用している。

(3) 制御性能

前述した3レベル方式で現車実績のある富士電機の「ベクトル・すべり周波数制御」をさらに深度化し、1C2Mにも適用可能な制御方式を開発した。

(4) 保守性

メンテナンスを極力低減させるため、前述の3レベル方式と同様、完全ファンレス・エアレスとしており、また、

モニタ機能を充実させている。

2.3.2 主回路方式

図 2 に主回路接続図を示す。

2 台の主電動機を 1 台の 2 レベルインバータで制御しており、各インバータの入力に接触器 L1, L2, フィルタリアクトル FL1, FL2 を設けている。故障時は台車単位で開放する方式としている。

2.3.3 機器の特徴

(1) インバータユニット

デバイスとして高耐圧モジュール形 IGBT (3.3 kV/800 A) を使用しており、素子を冷却体の片面に配置し、2 台の主電動機分 (6 アーム) を 1 台のインバータユニットに収めたコンパクトな構造としている。また、スナバレス構造とし、従来の 3 レベル方式に比べて一層の小形・軽量化を達成している (体積・質量とも当社比約 50 %)。

図3にインバータユニットの外観を、表2に仕様を示す。主電動機特性にもよるが、このユニットで220 kW程度の電動機2台を運転できる。また、図4にインバータの出力電圧と出力電流の波形例を示す。

(2) 制御装置

(a) 構成

運転・保護制御および高速演算が必要な電動機制御には高速処理の可能な32ビット RISC (Reduced Instruction Set Computer) マイクロコンピュータ (マイコン) を適用している。また、高集積化に威力を発揮する FPGA (Field Programmable Gate Array) や表面実装技術を取り入れてプリント基板枚数を大幅に削減している。

多電動機駆動システムなど、インバータと電動機のい

図3 インバータユニットの外観

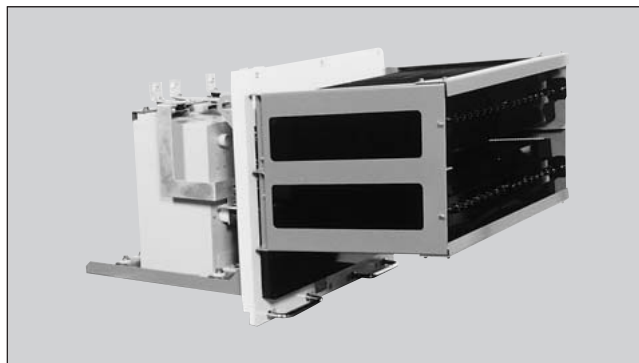
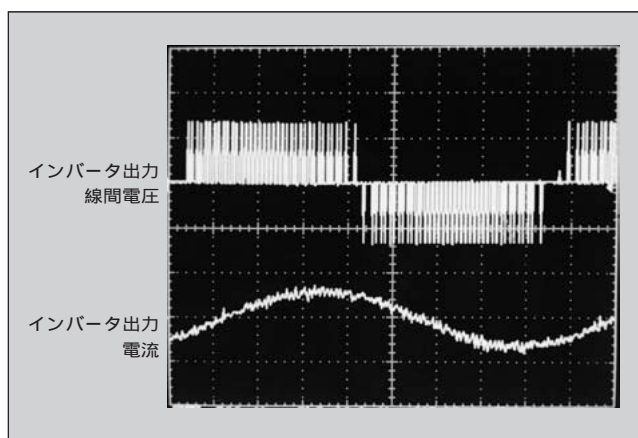


表2 インバータユニットの仕様

項目	仕様
IGBT定格	3.3 kV/800 A
IGBT個数	6
最大電流	430 A
冷却方式	ヒートパイプ自冷

図4 インバータの出力波形例



ろいろな組合せに対しても、プリント基板枚数の変更により対応可能なハードウェア構成となっている。

b. 機能

RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 機能

豊富な自己診断機能により運転状態、故障状態などを速やかに把握できる。さらに、故障履歴や故障発生前後の制御データの記録も充実しており、これらはパーソナルコンピュータにデータ表示できるとともに、伝送により上位モニタ装置にデータを送信できる。これにより、迅速な故障解析が可能となる。

故障モニタ機能・自動試験機能

RS-485 通信機能を標準装備しており、運転台のモニタとの伝送を用いて運転台ディスプレイへの故障情報表示および自動試験機能を有する。自動試験は、運転台のモニタディスプレイからの入力により各種試験が可能であり、日常点検・定期点検の保守軽減が図れ

る。

2.3.4 制御方式

空転制御による高粘着および外乱に対する安定な回生制御を実現するためには、主電動機の発生する力行・回生トルクを高応答で精度よく制御する必要がある。VVVF インバータを用いて誘導電動機を高性能に制御する方法としてベクトル制御があり、富士電機では産業分野での豊富な実績をもとに1C1M 構成における車両駆動用として前述したように「ベクトル・すべり周波数制御」を現車に適用してきた。今回の開発では、この技術をさらに深度化し、1C2M 制御用「一次磁束基準磁束制御形ベクトル制御方式」を実用化した。その基本制御ブロック図を図5に示す。その特徴は以下のとおりである。

(1) 1C2M 制御

主電動機の台数に関係なく、共通の状態量である電動機の一次磁束（インバータの出力電圧に相当）に着目し、これを基準に制御を行う。二次側に流れ込む有効・無効電流成分の制御を併用することでベクトル制御における励磁分とトルク分を、より確実に制御することができる。

また、並列に接続された電動機のうち、最も負荷の重い（すべりの大きな）電動機を制御上の基本としている。

これにより、車輪径差がある場合でも、トルクがバランスするよう機能し、また、1軸空転などの過渡状態でも制御の安定化が容易である。

(2) 1パルスモードでの制御

制御の電圧出力が制限にかかる（1パルス領域に相当）、励磁分とトルク分の二つのベクトル成分を保ちながらその時の皮相電力（変換器利用率）が最大となるように電圧ベクトルを制御する。

(3) 二次抵抗の温度変動補償

本方式では、二次抵抗の誤差が誘導電動機の誘起電圧の無効分として現れるので、制御上、これがゼロとなるようにすべり周波数を補償すれば、その時の補償量が二次抵抗誤差に相当することになり、その変動分を補償したことになる。

2.3.5 定置組合せ試験結果

今回、試作した機器（第一次試作機）を組み合わせ、ダイナミックシミュレータ（慣性負荷試験装置）による実負荷試験を実施した。図6に加減速時のオシログラムの一例を示すが、主電動機電流が指令値に追従して良好に制御されている。

2.3.6 適用例

本方式の適用例として、現在、下記のを製作中である。

(1) 車両メーカー向け低コスト車両用

DC1,500V 回路用で185 kWの主電動機4台を2組のインバータで制御するもの（1C2M 制御）である。1999年3月に納入され、その後、現車試験を実施する予定である。

これは、川崎重工業（株）との共同開発で取り組んでいるものである。ぎ装面での作業合理化を図るため、車体と機器箱の合体、機器箱の統合化、走行風利用の冷却方式など

図5 VVVFシステム基本制御ブロック図

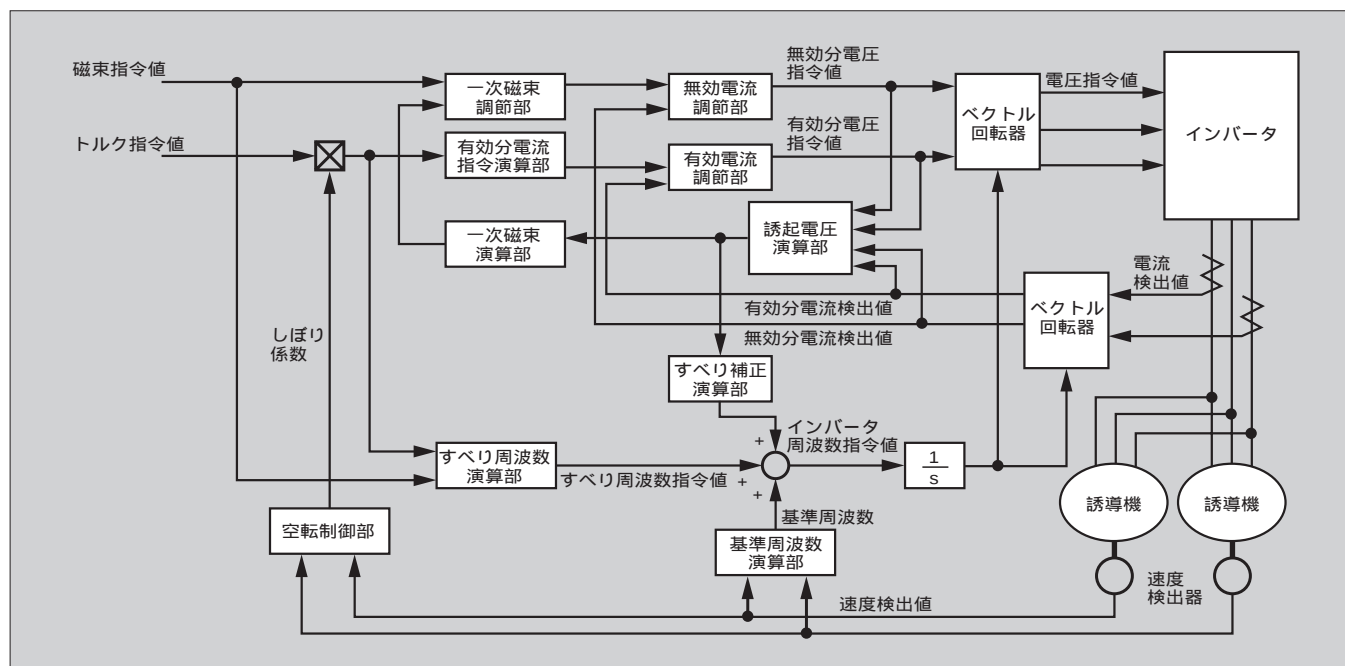
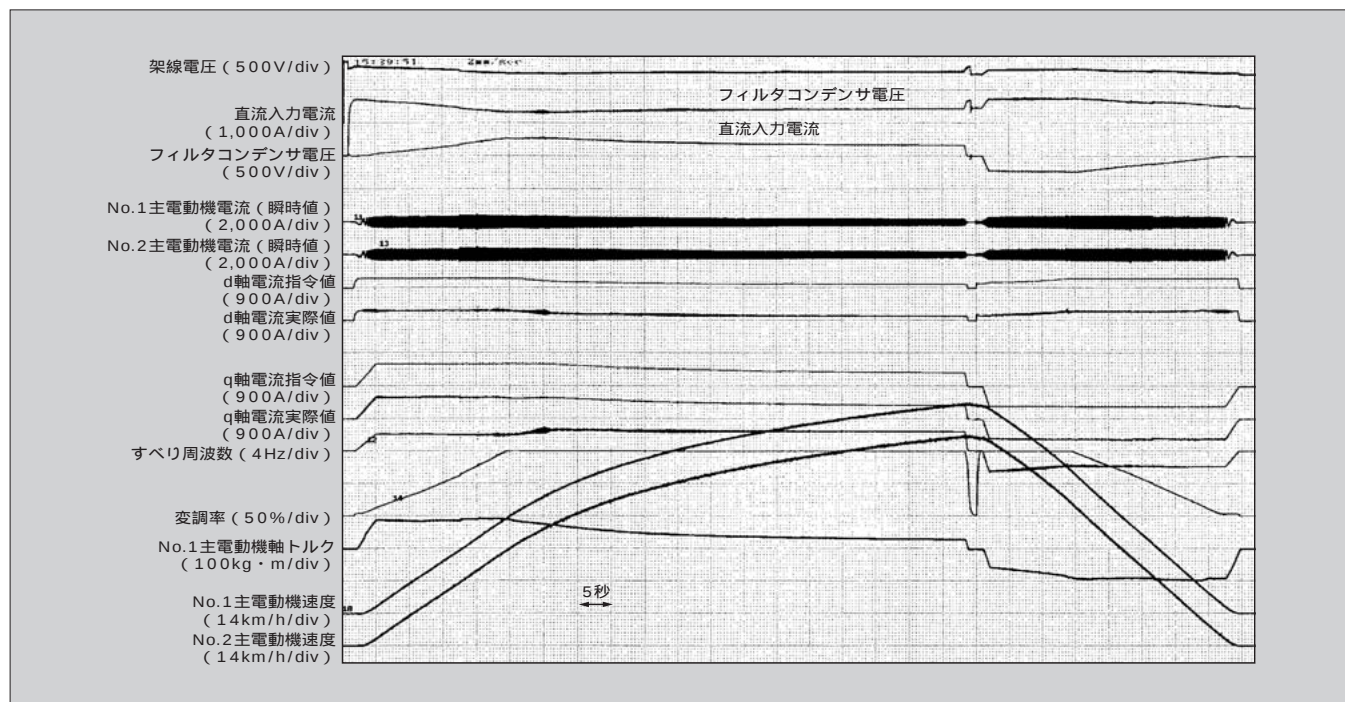


図6 加減速運転時のオシログラム例



の新しい試みがなされている。前述の車体と機器との合体方式における防水構造などについて特許を共同出願中である。

また、主電動機は、固定子には産業用で使用されている丸線を、回転子にはアルミ導体を使用して現車試験により実用化の検証を行う。

(2) シンガポール地下鉄車両用

川崎重工業(株)および日本車輛製造(株)からの受注品であり、主回路電圧は DC750V で 175 kW の主電動機 4 台を 2 組のインバータで制御するもの(1C2M 制御)である。

ブレーキは回生・発電併用方式である。

1999年4月以降、車両メーカーに納入される予定である。

2.4 直接駆動（DDM）システム

現状の鉄道車両駆動では、高速回転の電動機軸と低速回転の車軸の間をギヤを介して動力を伝達するシステムとなっているが、ギヤの騒音やメンテナンスが問題となっている。これを解決する手段として、近年、電動機で直接、車軸を駆動するシステムが開発されつつある。

富士電機は、東日本旅客鉄道(株)および財団法人鉄道総合技

図 7 DDM システム用電動機の外観

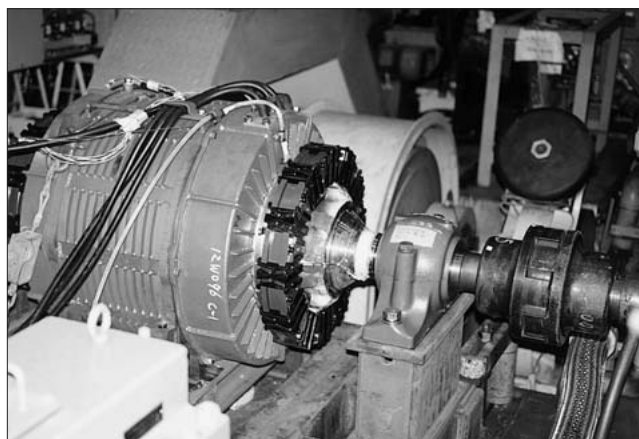


表 3 DDMシステム用電動機の仕様

項 目		仕 様
種 類		永久磁石式同期電動機
通風方式		全閉走行風冷却
極 数		10
定 格	種 類	連続
	出 力	102 kW
	電 圧	535 V
	電 流	124 A
	周 波 数	27 Hz
	回転速度	324 r/min
絶縁種別		H種

術研究所が行った開発に参画し、1996年から1997年にかけて電動機を製作して現車試験を実施し性能を確認した⁽²⁾。本方式の特徴は次のとおりである。

- (1) 電動機はインナロータ式永久磁石同期電動機で損失が少なく高効率である。
 - (2) 電動機は全閉自冷で分解清掃が不要な構造である。
 - (3) ギヤがなく低速回転であり、また、全閉自冷によるファンレスのため、従来方式より騒音は約 10 dB 低減した。
 - (4) 車軸を電動機の中空軸に貫通させてゴム継手で接続する装荷方式として、ばね下荷重の低減を図り、レールへの衝撃の減少と従来の車軸・車輪の使用を可能にした。
- 1998年、東日本旅客鉄道(株)とともに引き続き共同開発を実施し、本システムの一層のレベルアップを図った。試作電動機の外観を図 7 に、仕様を表 3 に示す。単体試験および 2 レベル IGBT インバータによる定置組合せ試験により性能を確認して以下の成果を得た。
- (1) V/f 特性の終端速度を高速域に設定して鉄心を軽くし、他の方策も実施して電動機を約 25 % 軽量化した。
 - (2) 鉄心の積層から鉄塊化、また、磁石大形化による個数削減などで製作工程の短縮・コストの低減を図った。
 - (3) 全閉自冷、グリース給油不要化などにより13年間無保守を図った。

表 4 直流電車用補助電源インバータの仕様

項 目		仕 様
方 式	主回路方式	直列2多重インバータ
	主回路素子	IGBT (1,800 V 800 A)
	電圧制御	多重PWM (マイコン制御)
	冷 却	自然冷却 (ヒートパイプ)
入 力	定格電圧	DC1,500 V
	入力電圧範囲	DC900 ~ 1,800 V
	入力電圧急変	DC1,500 $\pm$ 300 V
出 力	出力電圧	AC三相440 V 60Hz
	出力容量	210 kVA, 力率0.85 (遅れ)
	過負荷容量	200 % 瞬時
	電圧精度	$\pm 5 \%$
	波形ひずみ率	5 % 以下
	周 波 数	60 Hz $\pm 1 \%$
効 率		92 % 以上
騒 音		67 dB 以下 (A レンジ)
周 囲 温 度		-10 ~ +40
制御電源定格電圧		DC100 V

③ 補助電源システム

3.1 概 要

在来線鉄道車両において、補助電源システムはその車種(電気車、気動車、客車)により種々のものが存在するが、そのニーズは共通で小形・軽量、低騒音、メンテナンスフリー、省エネルギー、低価格などである。

富士電機は、これまでに、パワーエレクトロニクス技術を応用した静止形システムを早くから適用して、この分野におけるニーズに対応してきた。

ここでは、最近の主な適用例について述べる。

3.2 直流電車用補助電源装置

架線電圧が一般的に 1,500 V である直流電車において、補助電源装置の静止化は適用デバイスの進歩と密接な関係にあった。主回路システムと同様、「快適性」に対する要求からデバイスは GTO から IGBT へと変わっている。富士電機は、このニーズにこたえて、1995年、高耐圧 IGBT を適用した装置を開発・系列化して、今日までに多数の製品を納入してきた。

最近の主なものとして、東日本旅客鉄道(株) 209 系 950 代電車への搭載品がある。容量は 210 kVA で床下設置形としては富士電機として最大のものである。表 4 に仕様を、図 8 に主回路接続図を、図 9 にインバータ本体の外観を示す。

本装置の特徴は次のとおりである。

3.2.1 小形・軽量

高耐圧 IGBT の適用、ヒートパイプ式冷却方式の採用により小形・軽量化を実現している。

図8 直流電車用補助電源インバータ主回路接続図

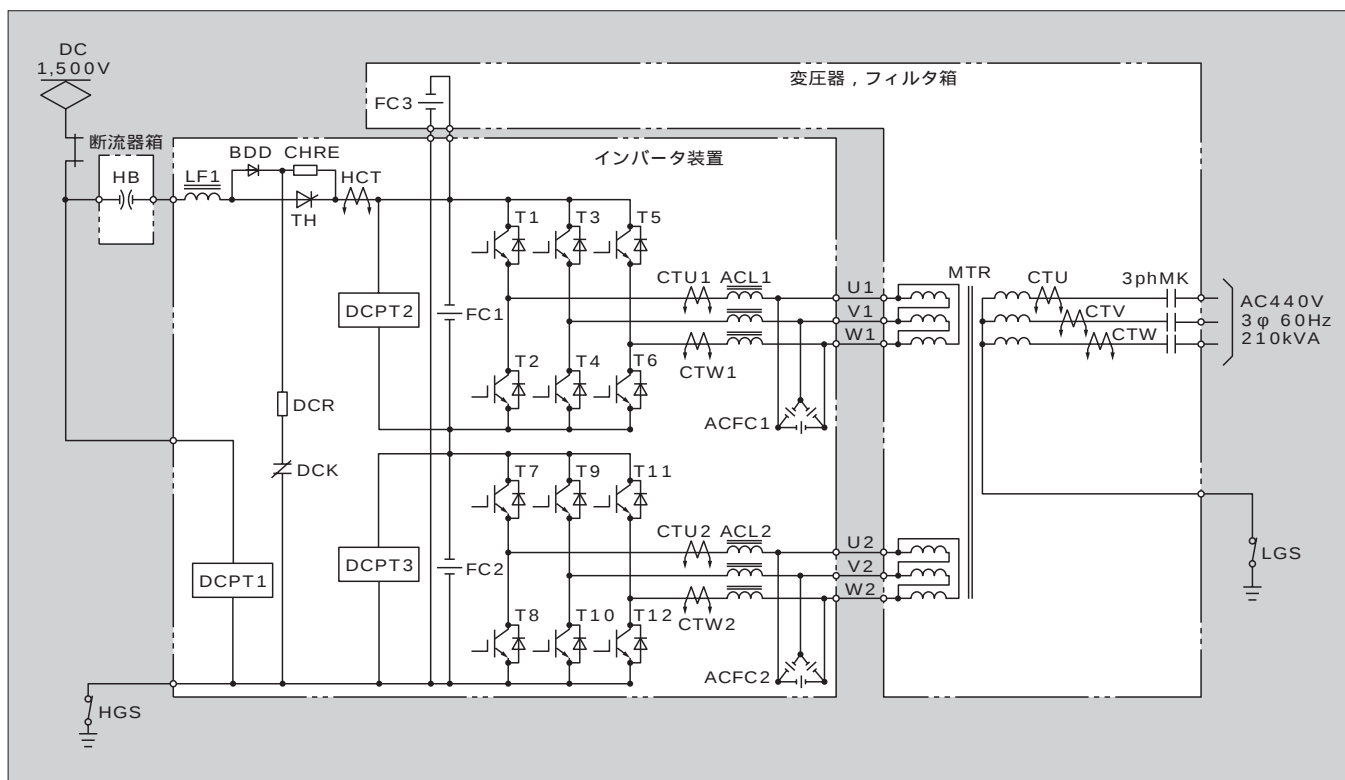
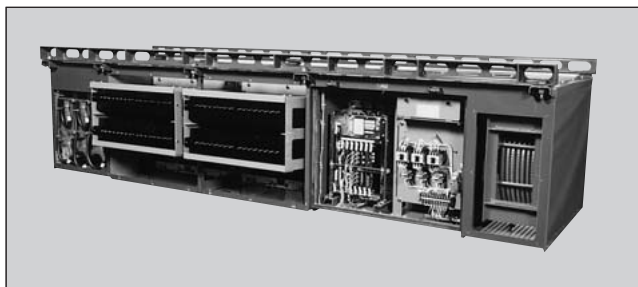


図9 直流電車用補助電源インバータの外観



3.2.2 高効率

架線電圧を直接インバータで交流電圧に変換する回路方式とスイッチング損失の少ないIGBTの採用によりシンプルで効率のよいシステム構成とした。

3.2.3 低騒音

スイッチング周波数の高周波化、多重結合、波形整形フィルタの設置により変圧器一次電圧の高調波成分を低減させ、変圧器からの発生磁気騒音を低減させている。

3.2.4 メンテナンスフリー

電磁操作式高速度遮断器の採用、ヒートパイプによる完全自冷、マイコン化による接点の大幅減少などにより保守労力の低減を図った。

3.2.5 高性能

レギュレーション補償制御・入力コンデンサ電圧フィードフォワード制御の採用、スイッチング周波数の高周波化などにより、出力過渡応答特性を向上させた。

3.2.6 高機能

マイコン適用による制御状態の把握、モニタ機能・自己

診断機能の充実、通信機能（TIMS伝送）による運転台との信号授受などの機能を備えている。

また、最近では高耐圧IGBTの適用により、120kVA程度のものであればインバータユニット一重で対応し、小形・軽量・低コスト化を図っている。

3.3 交流電車用補助電源装置

交流電車において冷暖房装置、空気圧縮機など容量の大きい負荷は主変圧器の三次巻線から供給できるので、その他の負荷（AC100V、DC100V）用として補助電源を設ける場合でも、容量は比較的少なく済む（合計で30kVA以下の場合が多い）。また、交流電車特有の現象として交流交流セクション通過時に必ず電力中断が発生するため、その対策が必要となる。富士電機はこのニーズに対応して1988年、北海道旅客鉄道（株）向けにバッテリーによるバックアップ式の小形・軽量の静止形補助電源装置を初めて納入して以来、国内JRのほとんどすべての新製交流車両にこの方式による装置を納入してきた。

そのシステム構成を図10に示す。通常運転時、バッテリーは浮動充電されており、セクション通過時はバッテリーから電力が供給される。

最近の製品ではインバータ部分をIGBT化し、小形・軽量、低騒音化を図っている。

3.4 気動車用電源装置

気動車に搭載されている機器に電源を供給するためには、走行用の主エンジンを駆動源として発電することが基本となる。専用のエンジン発電装置を設ける方式はコスト面、

図10 交流電車で補助電源システム構成

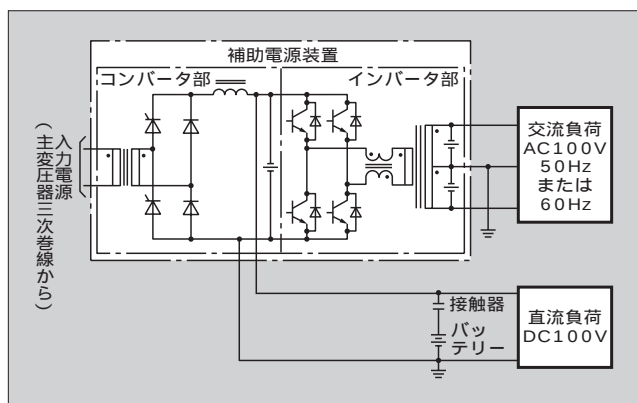
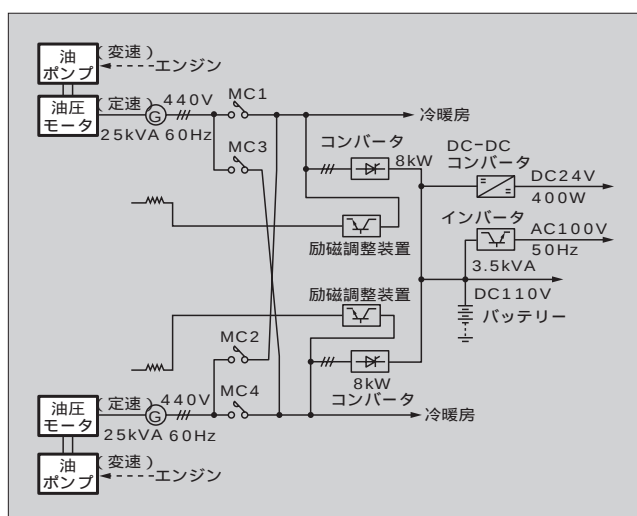


図11 キハ201系電気系統図



ぎ装面で問題があり、最近の気動車での適用例は少ない。走行用エンジンは当然のことながら回転速度が変化するため、接続される発電機の出力電圧を一定に制御することは容易にできるが、出力周波数を一定に制御することは技術的に可能でも実用レベルでは難しいものがある。

1996年、北海道旅客鉄道(株)は油圧機構を適用して走行用エンジンから定電圧・定周波電源を得るシステムを開発

した。富士電機はこれに参画し電気システムの開発を担当した。このシステムは次のようなものである。走行用エンジン（変速）で油圧ポンプを駆動し、発生する流体エネルギーを制御することで油圧モータを定速回転させる。その機械エネルギーで発電機を駆動し、電気エネルギーを発生させるものである。このシステムはキハ283系特急車で初めて実用化され、その後、キハ201系近郊車に適用された。最近ではキハ261系特急車（プロト車）に採用されている。

図11にキハ201系における電気系統図（1両あたり）を示す。電気系統は冗長性を考慮して2系統で構成されている。直流電源としては2台のサイリスタ整流器を並列接続して出力している。出力電圧は電車との併結を考慮しDC100Vにしている。エンジンが停止した場合でも運転に必要な機器のためにバッテリー駆動のインバータを設けており、また、エンジン関連機器用電源としてDC24Vのコンバータを設けている。

4 あとがき

以上、在来線鉄道車両分野における富士電機の状況について紹介した。今後、ますます多様化、高度化するニーズに対応するため、技術向上に一層の努力をする所存である。最後に、この分野でこれまでにご指導・ご鞭撻をいただいたユーザーをはじめ関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 金谷明彦ほか：ベクトル制御適用駆動システムの高性能化，第34回サイバネティクス利用国内シンポジウム，No.519（1997）
- (2) 松岡孝一ほか：次世代通勤電車用車輪直接駆動システム，平成9年電気学会産業応用部門全国大会，No.185（1997）
- (3) 難波寿雄ほか：283系特急気動車用油圧駆動電源システム，第34回サイバネティクス利用国内シンポジウム，No.502（1997）



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。