

鉄道車両システム

廣津 和則(ひろつ かずのり)

尾崎 覚(おさき さとる)

星野 栄雄(ほしの えいお)

① まえがき

東京一極集中の緩和と地方の活性化，エネルギー問題，地球環境問題などに対応するため，省エネルギー性に優れ，輸送効率の高い鉄道に期待がかけられているなか，ニーズの多様化，高度化にこたえ発展するために鉄道車両システムの技術開発課題を明確にし，技術開発を推進することは重要である。

パワーエレクトロニクスとマイクロエレクトロニクスに支えられた鉄道車両システムは近年急速に発展してきた。このなかで，富士電機も独自の技術を展開し鉄道車両システムの技術開発を推進してきたのでここに紹介するとともに，21世紀に向けての富士電機の取組みを紹介する。

② 21世紀に向けた鉄道車両システムの技術課題

21世紀に向けた鉄道技術開発のあり方を示した運輸技術審議会答申（1994年6月）の重点技術課題は高速化，快適化，安全性向上，効率化である。これを鉄道車両システムの観点から総括すると下記のとおりである。

- (1) 高速化に対応した車両駆動システム（主変換装置，主電動機，主変圧器）と補助電源システムの小形軽量化
- (2) 騒音・振動を低減した乗り心地の向上と車両機器の情報武装化を推進した快適性の向上
- (3) 機器の信頼性と安定性のさらなる向上による安全性の追求
- (4) 設計・製造から保守までのライフサイクルコストの低減
- (5) 地球環境への適合性

これらの要件に対する富士電機の取組みを以下に述べる。

③ 鉄道車両システム

鉄道車両システムを論じるうえでパワーデバイスは重要なキーコンポーネントであるので，あえて最初に述べることにする。

3.1 パワーデバイス

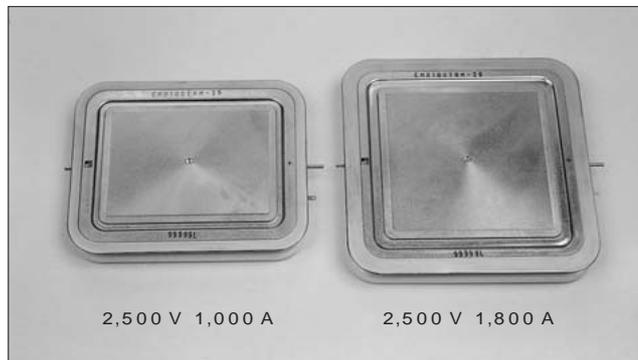
鉄道車両システムにおいて，もはやインバータによる交流電動機駆動方式は常識である。従来，GTO（Gate Turn-Off Thyristor）が採用されていたが，富士電機はGTOが主流の時代にGTOの性能限界を予測し，次世代素子の開発に着手した。フィージビリティスタディのなかで各種機能素子を検討した結果，次世代素子としてIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を選択し開発を推進した。その結果，鉄道車両用大形素子として下記の素子を早期に製品化し適用することができた。

- 高耐圧大電流モジュール形 IGBT 2,000 V/400 A
- 高耐圧大電流平形 IGBT 2,500 V/1,000 A，1,800 A（図1参照）

現在国内においては，新鉄道車両駆動用に適用されるパワーデバイスはIGBTが主流となりつつある。IGBTの適用は，高速スイッチング特性による高速PWM（Pulse Width Modulation）制御を可能とし，高調波が低減され，機器（変圧器，電動機）の騒音・振動が低減されるとともに，機器損失が低減され，その結果，機器の小形軽量化が図れる。また高速制御のメリットは，制御の高性能化と高機能化を容易に実現できる点にある。

富士電機は新幹線車両用として角形のIGBTチップに対応し，角形のパッケージを採用した平形IGBTを適用している。この素子はダイオード，サイリスタ，GTOから受

図1 高耐圧大電流平形IGBT



廣津 和則

パワーエレクトロニクスの開発・企画とエンジニアリング業務に従事。現在，システム事業本部交通・特機事業部交通技術第二部長。



尾崎 覚

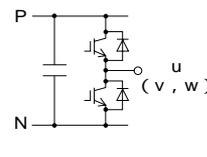
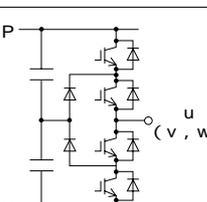
可変速駆動システムの開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ドライブシステムグループ開発マネージャー。



星野 栄雄

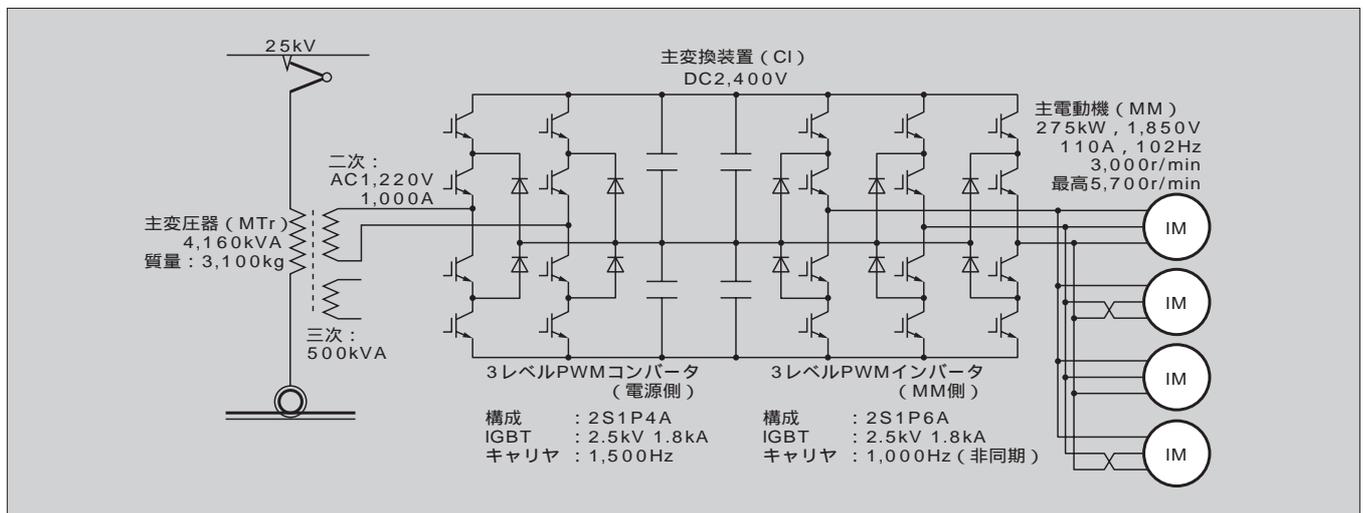
鉄道車両用電気機器の開発・設計に従事。現在，神戸工場制御設計部主査。

表1 パワーデバイス (IGBT) と主回路構成例

主回路	素子	2.0 kV 400 A 1.8 kV 800 A	2.5 kV 1,000 A 2.5 kV 1,800 A	3.3 kV 800 A 3.3 kV 1,200 A	4.5 kV 750 A 4.5 kV 1,200 A	適用
 2レベル	DC750 V	DC1,000 V	DC1,500 V	DC2,600 V	直流電圧	
	AC500 V	AC700 V	AC1,100 V	AC2,000 V	インバータ出力電圧	
	1 ~ 3 kHz	1 ~ 3 kHz	1 ~ 3 kHz	1 ~ 3 kHz	キャリア周波数	
 3レベル	DC1,500 V	DC2,600 V	DC3,000 V	DC5,000 V	直流電圧	
	AC1,100 V	AC2,000 V	AC2,300 V	AC3,800 V	インバータ出力電圧	
	1 ~ 2 kHz	1 ~ 2 kHz	1 ~ 2 kHz	1 ~ 2 kHz	キャリア周波数	

注 の部分が国内で電車で使用されている例である。

図2 新幹線700系電車の主回路システム



け継いだ信頼性の高いセラミックケースのハーメチックシール構造で、圧接にて使用するので高いパワーサイクル耐量が得られる。

今後、パワーデバイスは素子の性能向上（主としてスイッチング性能）と高耐圧化が進むにつれ素子適用装置側にとってはさらに使いやすい素子になると思われる。

また主回路システムとしては、簡素な構成で小形軽量化が図れる2レベル構成が主流となると予想されるが、素子性能との兼ね合いで今後しばらくは3レベル構成の主回路は残ると予測される。

パワーデバイス (IGBT) と主回路構成の例を表1に示す。

3.2 車両駆動主回路システム

3.2.1 新幹線用主回路システム

新幹線700系電車の主回路システムを図2に示す。本電車は300系より車両全体の性能を向上させるとともに、快適性の向上を目的に開発されたため大容量のIGBTの採

用が必須（ひっす）であった。富士電機は主回路を簡素化するため2,500V 1,800Aの素子を開発して対応した。

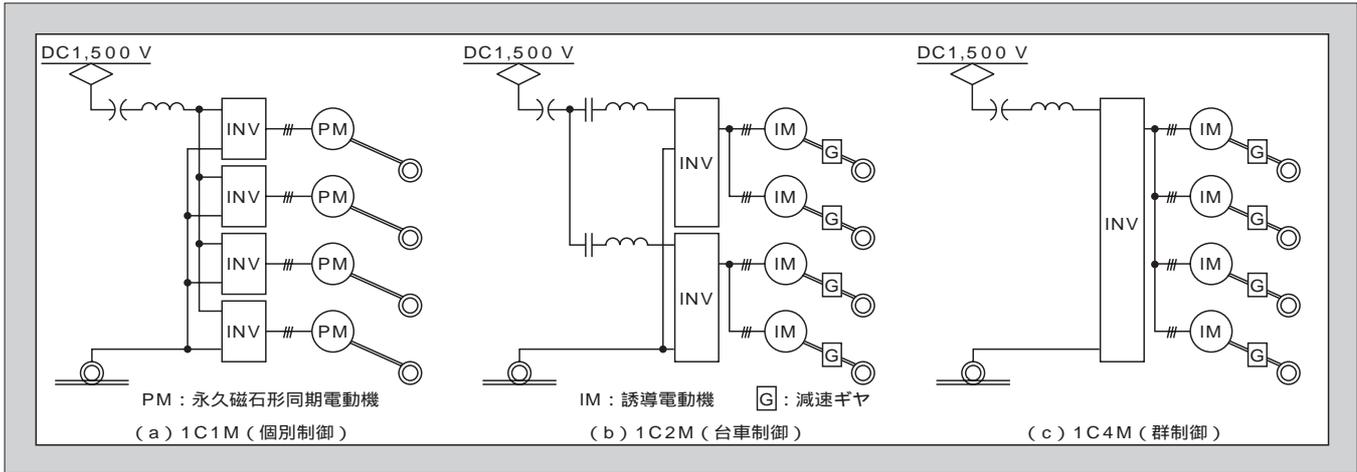
詳細は別稿（新幹線車両用主回路システム）で紹介するが、本素子により高速化に対応した機器（主変換装置、主変圧器、主電動機）の小形軽量化、騒音・振動の低減による快適性向上、主変換装置の信頼性向上による安全性向上、ライフサイクルコストの低減が図られたと自負している。

しかし、21世紀に向けてはさらなる技術開発が必要であるとする。

第一点は現在3レベル構成となっている主回路を高耐圧素子を適用することで2レベル構成にする開発である。3レベル構成から2レベル構成に変えるためには、素子性能（特にスイッチング特性）をさらに向上させる必要がある。今後耐圧2,500V、3,300Vに続く素子として4,500V素子が開発され実用化が進むであろう。

第二点は素子冷却システムで、現在は冷媒としてフロンカーボンが使用されているが、今後は地球環境問題を考慮して、冷媒として不凍液を使用した冷却システムなどの開

図3 在来線電車の主回路システムの例



発，実用化が進むであろう。

3.2.2 在来線用主回路システム

DC1,500V 架線電車のインバータにはモジュール形 IGBT を適用することが多く，素子の冷却は走行風を利用した冷却方式の採用が多い。

1,800V 素子を 3 レベル構成にする方式と，3,300V 素子を 2 レベル構成にする方式があるが，21世紀に向けては 3,300V 素子の性能が向上し，簡素な 2 レベル構成の方式の採用が主流になると予測される。

IGBT 素子の電流量拡大により 1C1M (1 インバータ 1 モータ) 制御から 1C2M (1 インバータ 2 モータ) 制御，1C4M (1 インバータ 4 モータ) 制御が可能となり，富士電機は電車編成としての冗長性を考慮して選択適用している。

主回路システムの例を図3に示す。

今後，主回路システムとしては小形軽量，低コスト，省保守などをめざして開発を推進する。

在来線交流電車で主回路システムは，新幹線用主回路システムと在来線直流電車で主回路システムの融合技術となるので本稿では割愛する。

3.3 制御装置と制御機能

3.3.1 制御装置

現状の制御装置は 32 ビットマイクロコンピュータまたは 32 ビット DSP (Digital Signal Processor) が多く採用されて高性能と高機能が得られている。また，ゲート駆動アンプへの信号伝送は光ファイバで行われることが一般化している。

GTO の場合は不完全オン信号防止のためにゲート駆動アンプに微小パルスの発生を阻止する対策を要したが，IGBT の場合には素子自身の特性にこの機能があるため，必要最小限の回路構成が可能である。ゲート駆動アンプのインテリジェント化のために保護機能を付加し，制御装置へ返送信号をフィードバックするシステムが採用されることもある。

ゲート駆動アンプまたは素子自身のどちらに保護機能を

付加するかは意見の分かれるところではあるが，システムとして信頼性が確保できれば簡素化された方式を採用することが好ましいといえる。

上位装置との情報伝送はシリアル伝送が一般的で今後車両システムのさらなる情報化に向けて情報量が増加していくものと考えられるので，十分な容量の伝送路が確保されるべきである。また，鉄道車両専用でなく汎用的に使用される標準伝送システムをマイナーチェンジして使用することが拡張展開の自由度の点で有利であると考えられる。装置から外部に送り出される情報により，故障診断はもとより，予防保全を行い省保守が図られていくことも必要である。

富士電機は車両駆動制御システムの高性能化，高機能化を目的とし，以下のコンセプトに基づく新制御システムを開発し，実用化を推進している。

- (1) 高性能 RISC (Reduced Instruction Set Computer), DSP の適用
- (2) 高速光シリアル伝送技術を適用した I/O インタフェースによる絶縁と省線化
- (3) 最新の EDA (Electronic Design Automation) 技術に対応した制御システム

図4に制御システムの構成例を示す。

各種のアナログ・デジタル信号の入出力，ゲート信号，PG 信号入力は光シリアル伝送で演算処理部とリンクされている。また市販のカード PC および PCMCIA カード用スロットを具備し各種通信規格に容易に対応を可能とし，保守監視機能の高度化にも対応できる。

汎用の制御系設計 CAD である MATLAB^{注1} /Simulink^{注2} にて開発した制御アルゴリズムは EDA ツールで直接実行可能なオブジェクトコードに変換されて RISC/DSP にダウンロードされる。Simulink で記述した制御プログラム例を図5に示す。

21世紀に向けては，パーソナルコンピュータに使用されるデバイス (プロセッサ，メモリなど) の性能向上に連動

注1 MATLAB : The MathWorks Inc. の登録商標

注2 Simulink : The MathWorks Inc. の登録商標

図4 制御システムの構成例

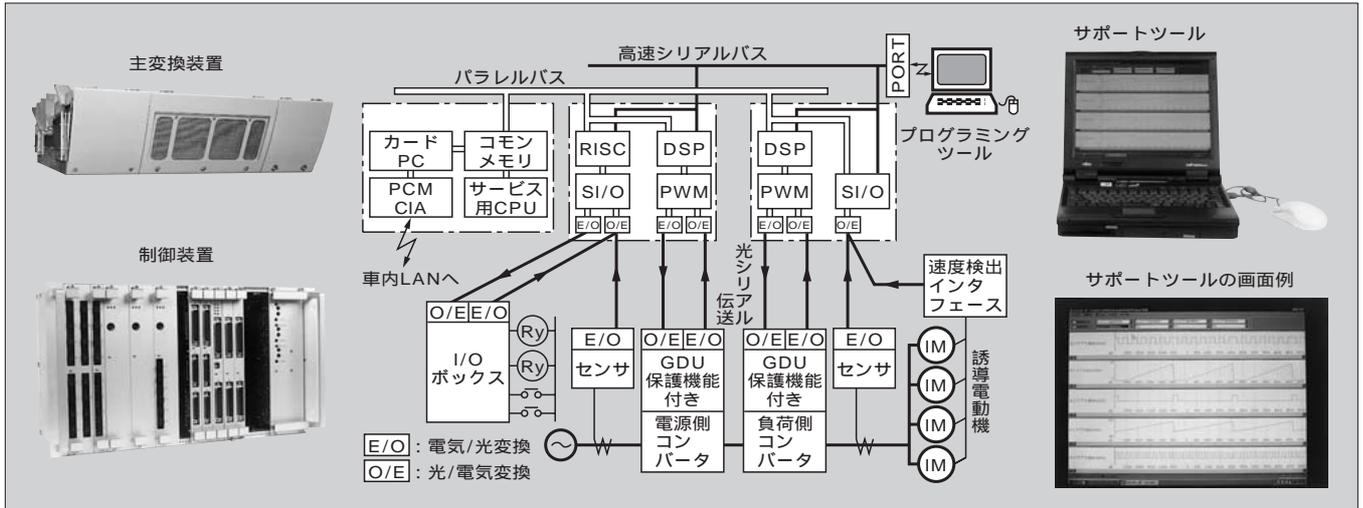
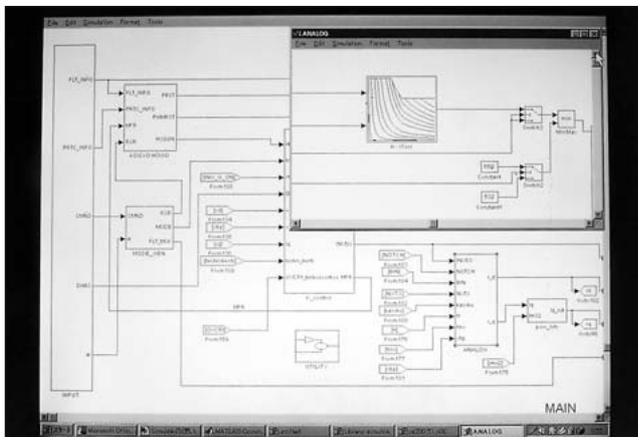


図5 制御プログラムの例



して、これらのデバイスを駆使した富士電機の制御装置がさらに高性能、高機能となることは明白である。

3.3.2 制御機能

制御装置の高性能化に伴い制御の高性能化，高機能化が精力的に進められている。

車両駆動の制御はPWM インバータ制御（モータ側），PWM コンバータ制御（電源側），および車両制御から構成されている。

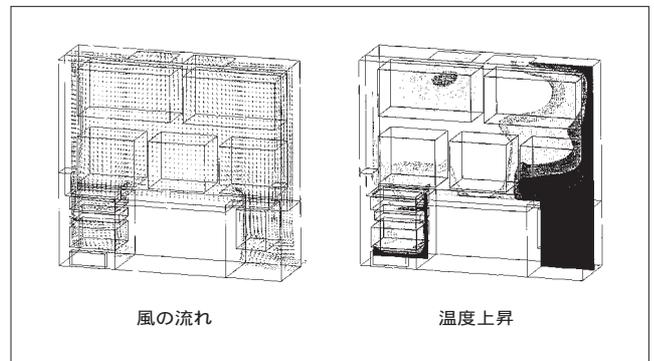
PWM インバータ制御（モータ側）では近年ベクトル制御が一般化し1C1M 制御から始まったベクトル制御は適用範囲が広がり現在は1C2M 制御，1C4M 制御も実現された。

富士電機は当初からベクトル制御に注力し開発を進め，産業用として開発された速度センサレス制御機能や，オートチューニング制御機能の追加などで高性能化を図っている。モータ駆動においては騒音・振動を低減するPWM インバータ制御の最適化で快適性の向上を追求している。

モータ駆動がベクトル制御で高性能化するに伴い空転滑走制御，軽負荷回生制御，発電・回生制御などの車両制御も高性能化，高機能化されてきている。

今後は乗り心地改善のため編成全体での制御の開発も，

図6 シミュレーション結果（風の流れと温度上昇）



情報伝送を活用して推進する。

PWM コンバータ制御（電源側）においては変圧器の騒音・振動を低減させる制御の最適化とともに，編成全体を考慮した高調波を低減させる制御などを開発推進する。

3.4 駆動用電動機

車両駆動電動機として，新幹線・在来線にかかわらずインバータ駆動交流電動機の採用がますます進むであろう。

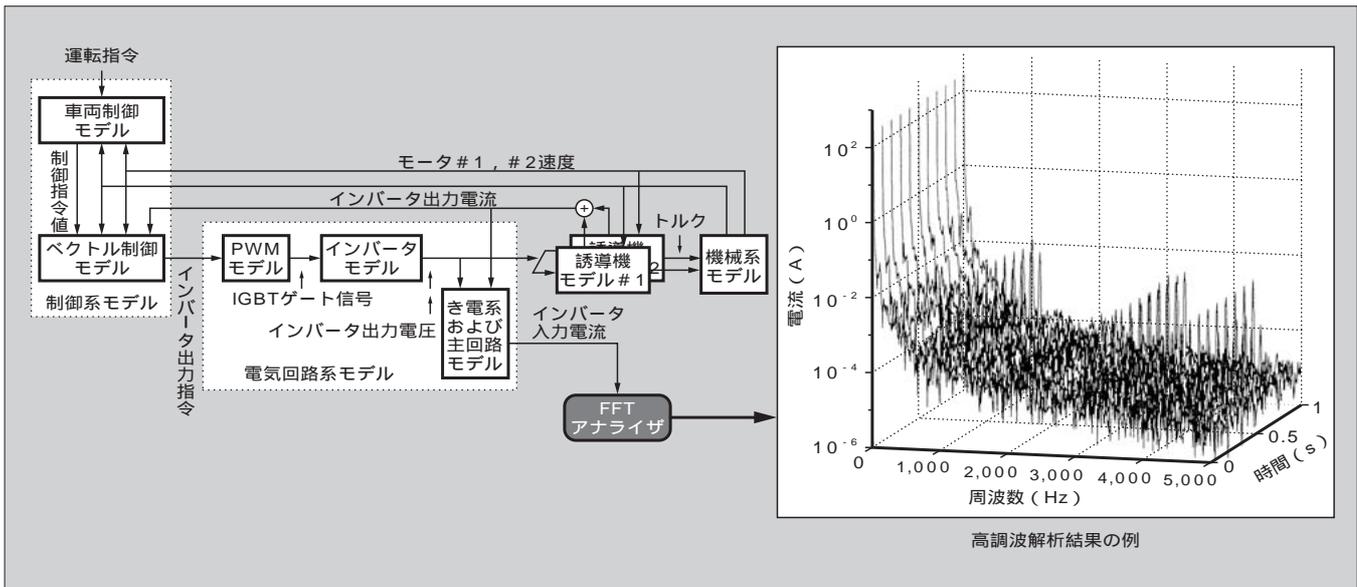
駆動電動機が有すべき性能は，乗客の乗り心地を良くするための低騒音化，高速度対応のための小形軽量化，省エネルギー化のための高効率化の3点である。

小形軽量化の手段としては，絶縁階級のさらなる向上，インバータ水冷化に歩調を合わせた駆動電動機的水冷化，回転子導体のアルミ化による軽量化である。低騒音化としては，インバータ搬送周波数の適切な選定または適時変更などによる低騒音化が容易に達成できるであろう。また高効率化は，年ごとに低価格が達成されている高性能希土類磁石を使用し，回転子に損失を発生しない永久磁石形同期電動機が採用されると予想される。

3.5 補助電源装置

DC1,500 V 架線電車の補助電源装置用インバータについては，富士電機は簡素化を狙いIGBT 適用2レベル2段ま

図7 シミュレーションモデルと高調波解析結果



たは2レベル1段方式を製作している。3,300V素子の性能向上が進んで簡素な2レベル1段方式が多用される時流は主回路と同じである。

直流電車用、交流電車用および気動車の例は別稿（在来線車両用VVVF駆動システムと補助電源システム）で紹介する。

3.6 シミュレーション技術

車両システムの開発・設計・製作においては走行シミュレーションをはじめとする各種シミュレーションが活用されている。シミュレーションの高精度化のためには実機と数学モデルとの等価性が重要であるが、実機による検証が困難な場合は実機モデル、相似モデルを用いてシミュレーション精度を向上させている。シミュレーションの例を以下に紹介する。今後はさらなる開発・設計・製作の効率化をめざしてシミュレーションの適用範囲拡大と高精度化を推進する。

3.6.1 主変換装置機器室の冷却シミュレーション

機器室は汚損防止のため極力密閉構造とするのが好ましいが、内部収納機器の発熱のため困難なことが多い。機器室内部各部分をメッシュに区分（セル数：111,384）して、風の流れと温度上昇をシミュレーションした結果を図6に示す。

同時に実機モデルを製作して実験を行いシミュレーション条件の改良を実施し、最後に実機の温度測定とシミュレーションが合致することを確認した。

その結果に基づき、700系用変換装置の機器室内冷却方式は熱交換器と補助送風機とし、その能力を決定した。

3.6.2 高調波電流のシミュレーション

直流電車駆動VVVF（Variable Voltage Variable Fre-

quency）システムにおいて、機械系を含む各種運転状態での帰線電流高調波をシミュレーションし評価を行った。システム全体は下記のサブモジュールから構成される。

- (1) き電系と主回路モデル（架線、フィルタリアクトル、フィルタコンデンサほか）
- (2) インバータモデル
- (3) 電動機モデル
- (4) 機械系モデル
- (5) 制御系モデル
- (6) PWMモデル

各モデルは汎用性の高いMATLAB, Simulinkを使用しているため評価対象に合わせ、システム構成や評価条件を容易に変更可能である。図7にシミュレーションモデル全体構成と高調波解析結果例を示す。

本シミュレーションを用いることで静的な周波数解析のみならず、実際の運転状態に近い動的な解析、動的な条件設定による過渡現象解析、制御応答や機械系の振る舞いを含めた総合的な条件下での解析が可能となった。また本解析結果は定置試験の結果とも合致している。

4 あとがき

鉄道分野の発展のために、鉄道車両システムの技術開発は重要であるので、今後さらに顧客のニーズにこたえるべく技術開発をより一層強力に推進する所存である。

特に人と地球環境に優しい21世紀をめざした鉄道車両システムの発展に貢献していく所存である。

最後に日ごろからご指導をいただいている関係各位に厚くお礼を申しあげる。



*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。