

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

電気鉄道技術特集



1999 VOL.72



FUJI
ELECTRIC

聞こえてきますか、技術の鼓動。——富士電機

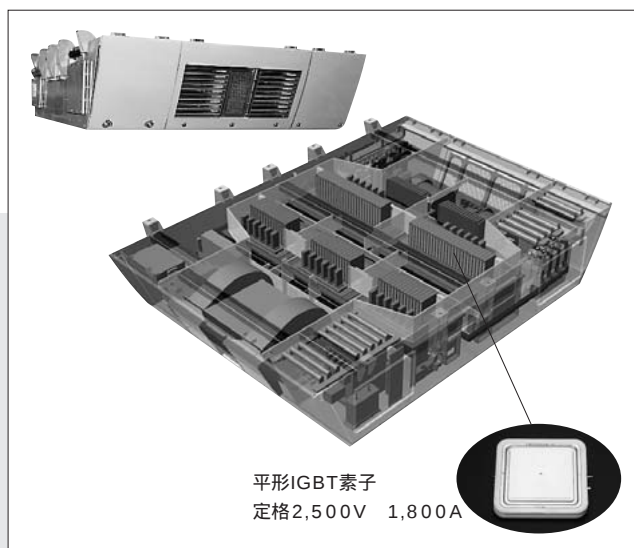
21世紀の豊かな社会に貢献する 電気鉄道技術

FUJII
ELECTRIC

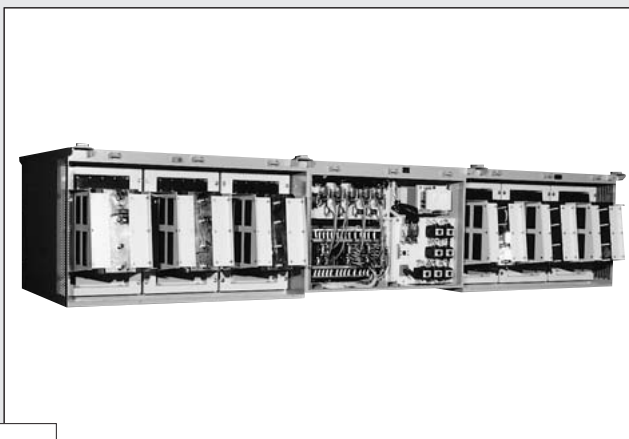
富士電機はJR各社、公営・民営鉄道各社に
車両および地上分野の各種電気品・システムを納入し、
輸送力の向上に貢献しております。



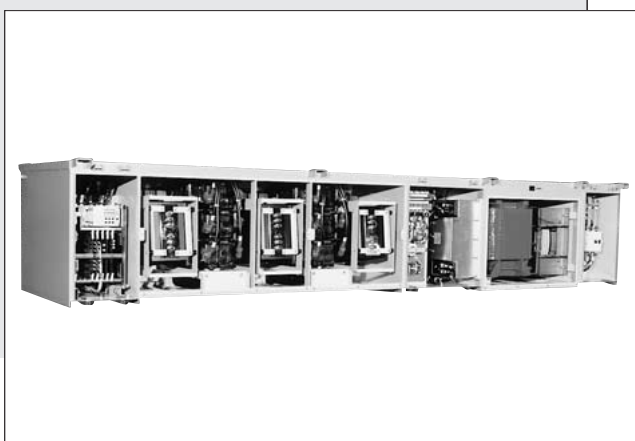
直流高速度真空遮断器



新幹線電車用IGBT主変換装置



主電動機駆動用VVVFインバータ（IGBT使用）



補助電源用インバータ（IGBT使用）

富士電機の電気鉄道用機器・システム

お問合せ先：システム事業本部 交通・特機事業部 電話(03)5435-7088

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2

1999 VOL.72

電気鉄道技術特集

目次

特集論文

大競争時代の中で 96 (2)
伊瀬 敏史

電気鉄道技術の現状と21世紀への展望 97 (3)
衛藤 福雄

電気鉄道地上システム 100 (6)
田中 滋夫

電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス応用システム 104 (10)
牧野 喜郎 ・ 小高 英明 ・ 山本 光俊

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器 111 (17)
栗飯原一雄 ・ 鈴木 伸夫 ・ 菊地 征範

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器の性能検証 118 (24)
昆野 康二 ・ 清水 直樹 ・ 菅野 朋人

鉄道車両システム 122 (28)
廣津 和則 ・ 尾崎 覚 ・ 星野 栄雄

新幹線車両用主回路システム 127 (33)
井上 亮二 ・ 土橋 栄喜 ・ 大澤 千春

在来線車両用VVVF駆動システムと補助電源システム 133 (39)
岩村 光二 ・ 岩堀 道雄 ・ 野中 政章

普通論文

直列補償形節電装置「省エネ名人」 140 (46)
石川 吉浩 ・ 山本 弘 ・ 大熊 康浩

インバータ駆動誘導電動機の軸電圧 144 (50)
奥山 吉彦 ・ 藤井 秀樹

低価格・高効率を志向した永久磁石形同期機的设计法 150 (56)
奥山 吉彦

技術論文社外公表一覧 99 (5), 110 (16), 117 (23), 132 (38)

最近登録になった富士出願 156 (62), 157 (63)

表紙写真



21世紀へ向けての電気鉄道には安全性、高速性、快適性、利便性に加えて、輸送手段としての経済性、省電力、省保守や地球環境対応など幅広い期待が寄せられている。

富士電機では、パワーエレクトロニクス技術のノウハウを駆使して電気鉄道用の各種装置・システムを開発し、納入してきている。

表紙写真は最新形の新幹線車両(700系)ならびにその駆動システムを中心である世界最大容量の平形IGBT(2.5kV/1.8kA)を適用した主変換装置と、その安定した運行を支える自動式無効電力補償装置の建屋を組み合わせたものである。

大競争時代の中で

伊瀬 敏史 (いせ としふみ)

大阪大学大学院工学研究科助教授 工学博士



パワーエレクトロニクスは今の時代に欠かせない技術である。空調機器，調理器具，照明器具などの家電機器，電気鉄道，エレベータ，電気自動車などの輸送手段，汎用から大型インバータまでの数多くの産業システム，送配電システムの制御装置，多くの人が24時間何らかの形でパワーエレクトロニクスと接している。パワーエレクトロニクス技術の発達の背景にはオイルショックに始まる省エネルギーの必要性とともに，バイポーラパワートランジスタやゲートターンオフサイリスタの大容量化，高速化，低損失化が行われ，今回の特集テーマである電気鉄道がその牽引車となって発展してきた。特に電気鉄道が発達している我が国では技術の発展がめざましく，他国の追従を許さない位置にあると考える。今後も引き続きこのような立場を維持するためには何が必要であるかを考えてみたい。

今，世界は大競争時代である。この傾向を促進したのがインターネットである。インターネットにより情報の伝達が極めて迅速に行われるようになった。今，この原稿を出張先の南アフリカで書いている。海外にいても自分のコンピュータを一旦ネットワークに接続すれば，日本のニュースや天気などの情報はインターネットで好きなように見ることができ，大学の研究室など日本との連絡にもほとんど不自由をしない。このような時代の中では情報は瞬時に知れ渡り競争を促進する。ここで，日本人にとって言語という大きな障壁がある。外国にいて感じることは，日本の状況はあまり知られていないということである。南アフリカは，歴史的，地理的にヨーロッパと強いつながりがあり，ヨーロッパのメーカーが開発している技術は知れ渡っているが，日本でも同じ事を行っていると言うことは知られていない。また，学会や任意団体の活動における報告書にも優れたものであるのに拘わらず，日本語で書かれているために知られていない。まさに歯がゆい思いをする。

有する技術は優れているが，日本人は一般に成果の発表，特に英語での発表や討論が苦手である。当地南アフリカの学生を見ていると，皆能弁であり，びっくりする。セミナーでも質問がどんどんと出る。我が国の企業が世界市場での商売に成果を挙げられ，若い技術者が欧米の技術者と対等に議論できるよう，これからは大学の講義や使用テキスト

も英語にして，英語でのコミュニケーションに慣れ，討論を積極的に行えるような教育を行う必要があると痛感する。このような技報も世界中に向けて出版すればもっと宣伝効果が上がるであろう。技術の標準化においてもヨーロッパ規格が世界規格となる場合が多く，日本の意見はなかなか通らない。日本の技術を世界にもっと良く知ってもらう必要がある。

著者の研究分野であるパワーエレクトロニクスの送配電システムへの応用分野を総称して，米国では FACTS や CUSTOM POWER などとアピールしている。また，ヨーロッパのメーカーもパワーエレクトロニクスの電力向けの応用装置を次々と出し，ビジネスに結びつけようとしている。技術的には我が国は世界のトップレベルのものを持ちながら少し世界に向けてのアピールに欠けているところがある。世界の認識として，日本の製品は高い，というイメージがある。確かに日本人は品質を追求する。しかし，世界市場ではコストが第一であり，この点の認識を新たに必要がある。大学の研究においても従来は高性能のものばかりを追求してきたが，コストや性能/コスト比を重視する姿勢を持つことの重要性を学生に教えて行かなければならないと考える。

著者の研究分野の周辺を見ると，超伝導リニア新幹線の山梨実験線や大型ヘリカル核融合実験装置などの技術の集大成とも考えられる装置が次々と実験成果を挙げている。これまでの道のりは長いものがあつたが多くの方々の血のにじむような努力によりこれらの装置が稼働している。この技術の積み重ねを大事にし，現在の新幹線と同じく，世界に誇れるものに仕上げて行く必要があると考える。このような技術をもつ我が国を良く知ってもらうために，技術的なコミュニケーションにおいては日本語にこだわらず，英語での積極的な討論ができるような訓練が必須である。コンピュータ用語をはじめとしてカタカナの日本語が飛び交っているが，このようなことは技術の世界では好ましくない。一方では，日本古来の文化や伝統を大切にしておくことも世界の人々の尊敬を得るために必要不可欠であると考えている。

電気鉄道技術の現状と21世紀への展望

衛藤 福雄（えとう ふくお）

① まえがき

電気鉄道では安全性はもとより、高速性、快適性、利便性が追求されてきた。これらに加え最近では経済性や省電力、省力、省メンテナンスなどの効率化や地球環境対応など幅広い期待が鉄道分野に寄せられており、鉄道関連部門で懸命な技術開発がなされている。

特にパワーエレクトロニクス、マイクロエレクトロニクス、情報処理制御技術や無線を含めた情報通信技術などの最近のめざましい進歩はこれらのニーズや期待の実現に大きく貢献してきた。

車両駆動装置では最新の半導体素子の一つである IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）を使用したインバータが新幹線や在来線の車両駆動用に採用され、大幅な小形軽量化を図るとともに高効率、低騒音ならびに乗り心地の向上を実現している。

また、磁気式乗車券・定期券に代わり非接触 IC（Integrated Circuit）カードが導入されようとしている。

富士電機では電力供給を主とした交通地上分野と、車両駆動用電気品を主とした車両電気システム分野でこれらのニーズにこたえるべく技術開発を行い製品を提供してきた。

本稿では交通地上分野と車両電気システム分野における富士電機の現状の取組みと21世紀へ向けての展開について紹介する。

② 交通地上設備

2.1 電力供給システム

電力の安定供給ならびに供給電力の高品質化、省電力のために富士電機は設備の小形化、省メンテナンス、低騒音、不燃化とともに地球環境を考慮した高性能で高効率な種々の電力供給システムと設備を提供している。

直流変電所の重要設備の整流器では 3,000 kW 級の整流システムを 3,000 A 級の大容量素子を採用して 1 並列で実現し、高効率の冷却システムの採用と相まって小形、高性能な整流器を提供している。フッ化炭素を冷媒とした沸騰

冷却方式を採用しているが、今後は地球環境により適した冷却媒体の適用が必要となろう。

電気鉄道（電鉄）変電所の変電設備ではガス遮断器や縮小形ガス絶縁開閉装置（GIS、C-GIS）の多回線一括輸送が可能な装置を開発し、装置の小形化、省スペース化とともに装置の信頼性と経済性向上を図っている。

き電用遮断器は高頻度開閉とともに直流大電流の遮断を要求されるが、遮断時にアークを発生しない高寿命で省保守のアークレス遮断器が切望されている。富士電機ではアークレスを狙った転流式高速度真空遮断器を開発完了しており、信頼性向上とともに保守の大幅な簡略化を実現している。

電鉄変電所設備の制御・保護にはマイクロエレクトロニクス化が進み、汎用プログラマブルコントローラ（PLC）による制御システムや、デジタル化した高機能の保護システムを提供している。

2.2 電力回生・吸収装置、電圧補償装置

車両の減速・停止時の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、電力を有効に利用するための電力回生インバータや回生失効防止のための回生電力吸収装置にも最新のパワーエレクトロニクスを適用し、高性能な装置を提供している。

単相で変動の激しい不平衡の車両負荷に対する電源電圧安定化のために、光サイリスタや GTO（ゲートターンオフサイリスタ）と制御技術を駆使して高性能な自励式静止形無効電力補償装置（自励式 SVC）を提供してきた。今後は GTO に比べて駆動回路が簡単かつ低損失で高制御性能が可能な高耐圧、大容量の IGBT を使用した小形、高効率で信頼性と経済性に優れた装置を提供していく予定である。

直流変電所の整流器や回生インバータから発生する比較的低次の高調波を効率よく補償するためにアクティブフィルタが設置されるケースも出てきており、富士電機では IGBT を使用した小形、高性能なアクティブフィルタを提供している。



衛藤 福雄

産業ならびに交通分野の電力変換装置を主とするプラント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・特機事業部長。

2.3 鉄道省電力・省力化機器

駅舎の省電力や省力化に対しても富士電機は積極的な技術開発ならびに製品開発を行っている。

駅舎の照明設備の省電力化を狙った IGBT 使用 PWM (Pulse Width Modulation) 式節電装置を開発完了しフィールドにて検証中であり、駅舎の省電力化に大いに貢献できると期待している。また、空調負荷などの省電力化にも電源のインバータ化が有効である。富士電機は産業分野での豊富な経験から最適な省電力システムを提供している。

点在する機器の集中管理や制御のために無線通信技術を採用した簡易で経済的なシステムを開発し、フィールドでの検証を完了済みで、駅務の省人化に大いに貢献できると考える。

券売機や自動改札機に、非接触 IC カードの実用化が目前にきているが、富士電機は汎用電子乗車券技術研究組合 (TRAMET) に参画し、東京都交通局地下鉄12号線で開始された IC カードの実証試験には IC カード用リーダ・ライタと残額表示機を納入している。

2.4 ホームドア

富士電機では車両用戸締め装置での実績をベースにリニアモータを採用した腰高式ホームドアを開発し製品化している。リニアモータ式ホームドアは制御性に優れ、摩耗部がなく保守がきわめて簡単な特長を有している。ATO (Automatic Train Operation) の採用とともにホームドアの設置が多くなってきており、信頼性向上と保守費の大幅低減に貢献できるものと考ええる。

③ 車両電気システム・設備

3.1 車両駆動用主変換装置

GTO や IGBT などの自己消弧形電力用半導体の出現により、近年、鉄道車両の駆動方式は高速化、小形軽量化、低騒音化、省メンテナンス化を狙った主変換装置による交流電動機駆動方式が主流となっている。特に近年は、GTO に比べて駆動回路が簡単で低損失で高速スイッチングが可能な IGBT の高耐圧、大容量化が進展し、GTO に代わって車両駆動用に使用されるようになってきた。

富士電機はいち早く車両駆動装置への IGBT 適用に着目し、IGBT の高耐圧化、大容量化を図るとともに IGBT を使用した小形軽量、高性能で主変圧器や主電動機からの電磁音の低減と高調波を抑制した車両駆動用主変換装置の製品化を進めてきた。

次世代新幹線の駆動装置用として高耐圧、大容量化に適した平形 IGBT に着目し、世界最大容量の 2.5 kV, 1.8 kA 平形 IGBT と本素子を使用した 3 レベル主回路システムを開発し、700 系新幹線の主変換装置に適用し大幅な小形軽量化を図るとともに、低騒音化、高効率化、省メンテナンスなどを実現している。素子の冷却は冷媒にフッ化炭素を使用した個別フィン形沸騰冷却方式を採用しているが、地

球環境を考えて、水冷式ユニットの製品化を推進中である。

比較的小容量の在来線や地下鉄向けインバータ装置には適用素子の経済性を含めた最適化の観点から、モジュール形 IGBT を採用している。

富士電機では 1.8 kV, 800 A などの大容量モジュール形 IGBT を開発し、3 レベルならびに 2 レベル主回路システムに適用し、小形軽量化、高性能で経済的なインバータ装置を製品化している。

主回路システムとしては低騒音と高調波の低減を狙った 3 レベル回路が 700 系新幹線や在来線に適用されているが、今後は適用素子の高耐圧化の進展に伴い 2 レベルシステムが採用され、さらなる小形軽量化と経済性が追求されていくものと考ええる。富士電機では在来線向けに 3.3 kV のモジュール形 IGBT を使用した 2 レベル主変換装置の開発を完了し、製品化レベルへ展開中であるが、今後は平形 IGBT の高耐圧化、大容量化を図り、さらなる小形軽量化と経済性を追求した装置を開発予定である。

主回路システムの制御には富士電機の「ベクトル・すべり周波数制御」と再空転抑制制御を搭載した高性能な制御装置を製品化し在来線に採用しているが、32ビットマイクロコンピュータを採用し、さらに深度化した一次磁束基準磁束制御形ベクトル制御方式を実用化し高性能化を実現するとともに、豊富な自己診断機能、故障モニタ機能や自動試験機能を搭載し、迅速な故障解析や点検の軽減を可能としている。

3.2 補助電源装置

補助電源装置においても小形軽量化、低騒音化、省メンテナンス化や低価格へのニーズから、IGBT を使用した静止形補助電源装置が主流となっており、富士電機は種々の特長ある補助電源装置を製品化している。

直流電管用補助電源装置としては、高耐圧、大容量の IGBT を使用した 2 レベル 2 段直列方式と 2 レベル 1 段方式の補助電源装置を製品化している。大容量用は 2 段直列方式を採用し、中・小容量用には 1 段方式を採用し、要求容量に最適な補助電源装置を提供している。

交流電管用にはセクション通過時にも対応可能なようにバッテリーバックアップ式の小形軽量の静止形補助電源装置を製品化している。

3.3 シミュレーション技術

ますます高度化する小形軽量、低価格化や高性能化の実現にシミュレーション技術が重要な役割を担っている。

富士電機では走行性能、温度推定と冷却性能、構造応力解析、車両制御性能、高調波や電磁ノイズ解析などに種々のシミュレーション技術を開発しており、装置の開発や製品化に有効に活用している。

3.4 直接駆動 (DDM) システム

電動機と車軸とを接続するギヤをなくし、低騒音化と省保守化を目的として DDM (Direct Drive Motor) システ

ムが開発されている。

富士電機は東日本旅客鉄道(株)と(財)鉄道総合技術研究所の直接駆動システムの開発に参画し、インナロータ式永久磁石同期電動機を製作し、現車試験で高効率、低騒音などの性能を確認してきた。また、東日本旅客鉄道(株)と引き続き共同開発を実施し、電動機の軽量化や低価格化などの深度化を図った。

3.5 リニアモータ駆動車両用閉め装置

高制御性能、高信頼性、省保守な車両用閉め装置としてリニアモータを適用した車両用閉めシステムを製品化している。TIMS(列車情報管理システム)からの制御伝送による遠隔制御、状態監視やパラメータ書換えなどを可

能としている。

④ あとがき

以上、交通地上設備と車両電気システム・設備について富士電機の主な現状の取組みと21世紀に向けた今後の展望について述べたが、高信頼性、高速性、快適性、利便性ととも到低価格、省電力、省人省保守、地球環境に対応したニーズがますます高まってくるものと考える。

富士電機はこれらのニーズを見据えて交通地上設備と車両電気システム・設備の技術開発を進め、21世紀の電気鉄道の発展に貢献していく所存である。

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
UPS の高調波対策	東京システム製作所	木田 和幸	生産と電気, 50, 11 (1998)
平型 IGBT とその応用	富士電機総合研究所 松 本 工 場	高坂 憲司 高橋 良和	OHM, 85, 11 (1998)
YAG レーザの切断への適用例	富士電機総合研究所 " " "	葛西 彪 沼田 忍 藤井 政義	レーザー熱加工研究会誌, 5, 3 (1998)
FE-SEM によるパワー半導体デバイスの欠陥形態観察	松 本 工 場 富士電機総合研究所	横山 拓也 立町 寛児	日本金属学会誌, 37, 12 (1998)
同期発電機用単独運転検出機能と等価変換手法 ---- 無効電力変動方式と無効電力補償方式 ----	富士電機総合研究所 " " "	中沢 親志 深井 裕幸 千原 勲	電気学会電力・エネルギー部門誌, 119-B, 1 (1999)
冷蔵ショーケース・トータル制御システム	富士電機総合研究所	中山 伸一	日本冷凍空調学会・学会誌, 74, 855 (1999)
3次元系統情報視覚化システムの開発	富士電機総合研究所 "	松井 哲郎 植木 芳照	平成10年電気学会電力・エネルギー部門全国大会 (1998-8)
ガス流解析による進み小電流遮断性能の評価	富士電機総合研究所 変電システム製作所 " " 富士電機総合研究所 "	杉山 修一 佐藤 賢 堤 睦生 恩地 俊行 岩井 弘美	
高速ターンオン時のキャリアの挙動	松 本 工 場 "	桐畑 文明 田上 三郎	平成10年電気学会産業応用部門全国大会 (1998-8)
誘導電動機の V/f 制御における速度変動補償法	富士電機総合研究所 " " 鈴 鹿 工 場	田島 宏一 石井 新一 米澤 裕之	
電力用半導体素子の熱挙動	富士テクノサーバイ	橋本 理	平成10年度電気関係学会東海支部連合大会 (1998-9)
高耐圧 SOI-pMOS の耐圧と電流駆動能力のトレードオフ特性改善	松 本 工 場 "	澄田 仁志 平林 温夫	電子情報通信学会秋季大会 (1998-9)

電気鉄道地上システム

田中 滋夫（たなか しげお）

① まえがき

電気鉄道は、最もエネルギー効率がよく、新たな地球温暖化防止というグローバルな視点からの省エネルギー志向にもマッチした大量・高速・安全かつ経済的な輸送手段として今後とも大いに発展を続けるであろう。

電気鉄道（電鉄）地上システムにおいては、電力の安定供給、高品質化、省エネルギーあるいは省力化などの課題がパワーエレクトロニクスやマイクロエレクトロニクス技術の急速な進展をベースにした技術革新により解決され、富士電機は顧客ニーズに合致した電鉄地上システムならびに機器を提供してきた。

本稿では、電鉄地上システムにおける富士電機の取り組みと次世紀に向けて提供していくシステムについて紹介する。

② 21世紀に向けた電気鉄道の課題

次世紀に向けた鉄道のあるべき姿とそれを実現するための技術開発課題は、表1に示す運輸省運輸技術審議会答申「21世紀に向けての鉄道技術開発のあり方について（SUCCESS21）」に網羅的にまとめられているが、これを電鉄地上システムの観点から総括すると、下記のとおりである。

- (1) 高速化や輸送力増強のための安定した電力供給
- (2) ライフサイクルコストの低減
- (3) 環境調和・省エネルギー
- (4) 利便性の向上

これらの要件に対する富士電機としての取り組みを以下に述べる。

③ 電鉄電力システム

電鉄電力システムは、高速化や輸送力増強のための安定した電力供給を最大の目的としているが、その特殊性から、供給能力だけでなく、電源側に対しても種々の考慮をしなければならない。

3.1 電鉄電力システムの技術課題と対応

(1) 電鉄電力システムの特殊性

図1に日本国内における各種電化方式を示す。電鉄電力システムは以下のような種々の特殊性がある。

- (a) 列車は変動が激しい移動性の大容量負荷である。また、力行時は負荷になり、回生制動時には電源となる。交流電気鉄道では単相負荷であるため、変電所には図2に示すようにスコット結線変圧器などのいわゆる「三相二相変換」変圧器が採用され、電源側では三相が平衡するようになっているが、前述の負荷特性と相まって瞬時瞬時には不平衡となる。

これらの負荷特性はき電系統や受電電力系統へさまざまな影響を与え、また保護リレーは特殊な特性が必要となる。

- (b) 車両や変電所の変換装置から高調波を発生する。
- (c) 帰線電流はレールを流れるが、大地から非絶縁であるため漏れ電流により通信誘導障害や電食を引き起こす。
- (d) 負荷電流と事故電流が判別しにくく、特殊な保護方式が必要となる。

(2) 電鉄電力システムの技術課題と対応

上記の電鉄電力システム上の特殊性は種々の技術課題を生み、長い歴史のなかで着実に解決されてきたが、その具体的展開を図3、図4に示す。

特徴としては、これらの課題は主としてパワーエレクトロニクス技術で解決されてきたという点である。

富士電機は、最新のパワーエレクトロニクス技術を駆使した種々の製品を提供してきたが、これまで納入してきた種々の他励式変換システムあるいは自励式変換システムの実績やフィールドでの効果については別稿（電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス応用システム）で紹介する。

3.2 電鉄変電設備の技術課題と対応

電力供給のかなめとなる電鉄変電設備を構成する機器は、鉄道特有の機器と他分野（電力、公共、一般産業など）と



田中 滋夫

電気鉄道地上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一部長。

表1 運輸技術審議会答申「21世紀に向けての鉄道技術開発のあり方について」(抜粋)

技術開発目標大区分	技術開発目標	技術開発課題
交通ネットワークの充実・強化	計画技術の高度化	予測の高精度化・簡易化
		経済効果把握手法の確立
		ネットワーク構成の最適化
		路線・施設配置計画手法の確立
	設計・施工技術の高度化	設計・施工法の高度化
		設計・施工の効率化・省力化
		未利用空間の活用
	新しい輸送システムの開発	磁気浮上鉄道の開発
		小・中量新輸送システムの開発
鉄道のサービス水準の向上	幹線鉄道の高速化	新幹線の最高速度の向上
		在来線の最高速度の向上
		表定速度の向上
	都市鉄道の混雑緩和・到達時分の短縮	輸送力向上
		表定速度の向上
	移動の円滑化・連続性の確保	交通の連続性の確保
		移動制約者対策
	快適性の向上	乗り心地の向上
		居住性の向上
		駅・車内の利便性の向上
	貨物鉄道の高度化	高速化・輸送力増強
		複合一貫輸送の推進
		システムの近代化
	コスト低減	建設・製造コストの低減
		保守・運営コストの低減
社会環境の変化への対応	快適環境の形成	沿線環境の快適化
		省エネルギー化
		廃棄物対策など
	効率的な保守運営方式へのシステムチェンジ	保守業務の効率化・省力化
		輸送業務の効率化・省力化
輸送の安全性および安定性の向上	安全性および安定性の向上	作業環境の改善
		安全性の向上
		信頼性の向上
		防災技術の向上

共通する機器があるが、き電用変圧器や変成器および列車に電力供給するき電設備には電鉄専用の機器が必要となる。また、新幹線などの大容量設備を除き、各機器は小形・軽量・低騒音・不燃化とともに、保守省力化のため、冷却ファンなどの補機のないことが必須(ひっす)条件である。

(1) 受電用機器・変圧器

電鉄用変電設備の受電電圧は、超高压(新幹線)から特別高压まで幅広い。富士電機は、小形、省保守などの顧客ニーズを満足させたこれら全クラスの開閉装置をフルラインアップ化し、ガス遮断器、縮小形ガス絶縁開閉装置(GIS, C-GIS)、真空遮断器などによりユーザーの期待にこたえている。例えば最近では、業界初の回線一体輸送ができる超高压用 GIS や多回線一括輸送ができる特別高压

図1 各種電化方式

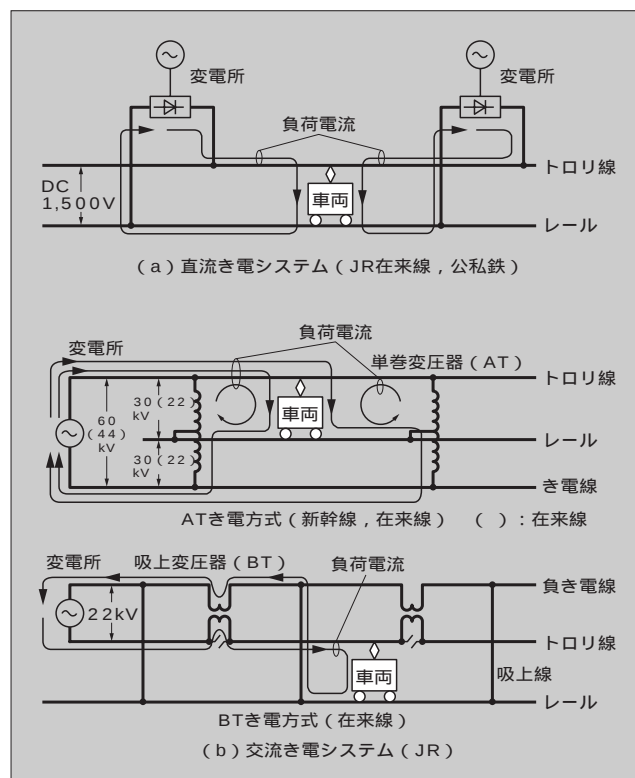
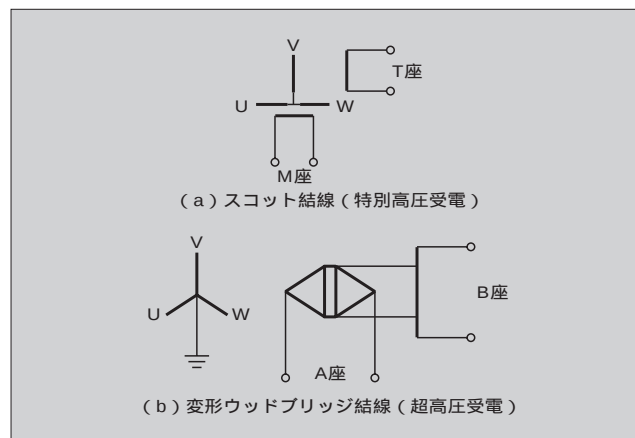


図2 三相二相変換変圧器の結線(例)



用 GIS および C-GIS などの縮小形機器を提供し、省保守・省スペース化とともに、現地組立作業のミニマム化による信頼性向上や経済性向上に貢献している。

都市圏では、低騒音化や地下変電所をはじめとした不燃化のニーズがきわめて強い。低騒音化は、鉄心のステップラップ接合方式や制振鋼板を採用した経済的な低騒音化変圧器、不燃化については完全自冷式ガス絶縁変圧器やモールド変圧器を提供している。

(2) 変成器

直流変電所の変成器は一般にシリコン整流器が使用される。ダイオード素子は逐次大容量化を推進してきており、現在では 3,000 kW (DC1,500 V) 整流器を 3,000 A 級素子 1 並列で実現している。一方、単位素子あたりの発生熱量の増加に対応するため、冷却効率が高くかつ補機がないフッ

図3 電鉄電力システムの特徴と地上側におけるパワーエレクトロニクス技術での対策内容

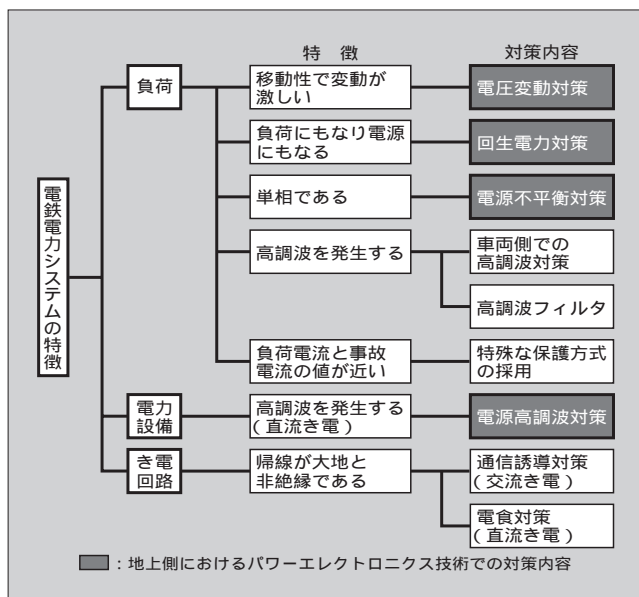
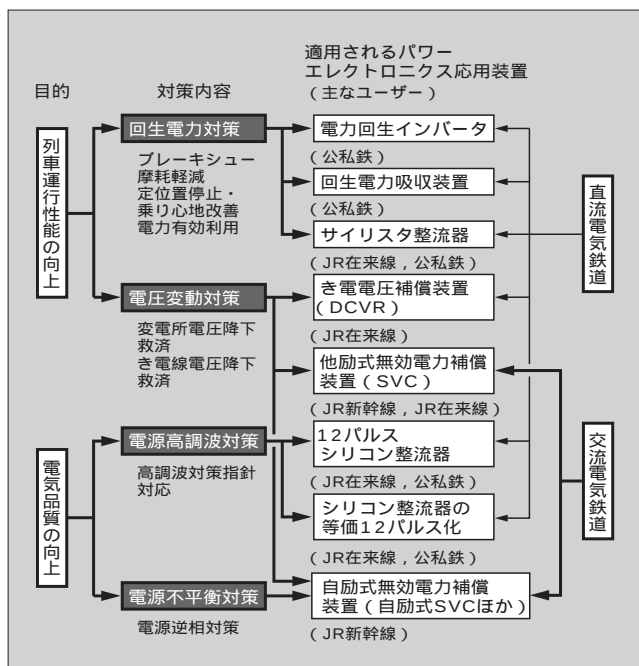


図4 電鉄地上設備におけるパワーエレクトロニクス応用装置



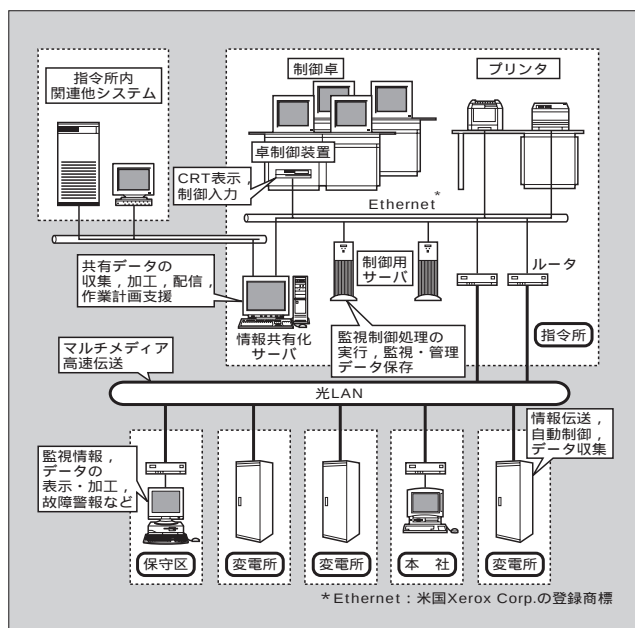
化炭素を使用した沸騰冷却方式を採用している。

(3) き電用遮断器

交流電気鉄道におけるき電用遮断器は、高速再閉路仕様の2極ガス遮断器〔AT（Auto-Transformer）き電方式〕あるいは単極真空遮断器〔BT（Booster Transformer）き電方式〕である。

直流電気鉄道のき電用遮断器は、直流高圧大電流を遮断する責務を担うが、現在でも依然として従来からの直流高速度気中遮断器が主流である。富士電機では、十数年前から半導体遮断器の開発や、高速度気中遮断器の電気保持式から機械保持式への変更による小形化などを行ってきたが、保守点検周期を大幅に改善したアークレス遮断器を新たに

図5 最近の電力管理システムの構成



開発した。詳細は別稿で紹介するが、次世紀に向けた時代の要請にマッチした最適な遮断器として提案したい。

(4) 制御・保護システム

電鉄変電所においてはいち早く制御・保護システムのマイクロエレクトロニクス化が図られ、汎用プログラマブルコントローラの採用による分散形システムや集中形システムなど、顧客のニーズにマッチしたシステムを提供している。

保護リレーでは、交流き電用距離リレーに見られるように、高調波含有率による保護領域の自動可変方式など、従来の電磁式リレーでは実現が困難であった高度な機能をデジタル化により実現している。

④ 電力情報処理システム

電力情報処理システムでは、ダウンサイジング、オープンシステム化および汎用化を追求したシステムを提供している。

図5に、分散制御形電力管理システムの例を示し、富士電機の方考え方を述べる。

(1) 指令所システム

OS（Operating System）、ウィンドウなど、汎用技術を活用した小形ワークステーションを使用し、全装置を指令室に設置している。機器室が不要なため省スペース化でき、分散化による高機能・高性能化が図れる方式である。

制御用サーバは二重化構成としているが、万が一2台とも停止した場合にも卓制御装置に子局に対するバックアップ制御機能をもたせるなど、信頼性を強化している。

各種制御システムとリンクして情報を収集・編集・加工し、保守区・本社端末に配信する情報共有化サーバを設けている。他システムとの情報連携も本サーバが行うため、制御系に影響を与えずに機能拡充できるほか、端末のアプリ

リケーションソフトウェアを不要にし、制御卓と同様な監視画面の表示や汎用ソフトウェアを使用したデータ加工が容易に行える。

(2) 光 LAN

パーソナルコンピュータ端末などとの連携容易化のため、監視制御情報伝送のほか、マルチメディア伝送にも対応できる汎用高速 LAN を適用している。

(3) 子局システム

伝送処理機能と分散制御機能を持たせることにより、定時停送電などの一斉制御の高機能化が図れ、さらに LAN を経由した隣接子局間の連絡ができるため、連携制御の分散化も可能な方式である。

⑤ 駅の省エネルギー・省力化システム

省エネルギー、省力化および利便性の向上には、駅が大きな効果を上げうると考えられる。省力化は機械化・自動化による合理化だけでなく、利便性の向上、安全性の確保もめざしたシステムが追求されていくであろう。

5.1 汎用 APR 式節電装置

動力設備においては汎用インバータによる省電力化が図られてきているが、本装置は照明設備にターゲットを絞って富士電機がいち早く市場に投入したパワーエレクトロニクス技術を応用した汎用省電力装置で、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用した PWM (Pulse Width Modulation) 式 APR (自動電力調整装置) である。10 kVA から 72 kVA までシリーズ化しており、駅舎やホームにおける照明の節電に最適である。

本装置の特長は以下のとおりである。

- (1) 入力電圧が変化しても出力電圧は設定値に保たれるため、余剰電力を安定して節減できる。
- (2) 高効率で瞬断がない。
- (3) 小形軽量かつファンレスで安価である。

5.2 無線応用システム

利便性や快適性向上のためのエスカレータ、空調設備などの増強により、これらの起動・停止、状態監視など、駅設備の管理業務が増加する。

点在する機器の駅務室での集中管理のためには構内通信インフラストラクチャの整備が必要となるが、無線通信は配線が不要で被監視設備の増設・移設に対して柔軟に対応

できるため、今後適用が期待される。駅構内に無線通信を導入する場合、他の無線通信設備に与える影響、車両・乗降客などの移動によるシャドーイング、建物構造による伝搬の減衰などを考慮した妥当性の検証が重要であるが、富士電機ではすでにフィールドで十分なデータを得ている。

5.3 非接触 IC カードシステム

磁気式乗車券・定期券に代わり、非接触 IC (Integrated Circuit) カードが実用化に向けて開発されてきているが、これにより利便性向上と鉄道事業者の業務軽減が実現できる。また、カードに電子財布機能を付加することで、精算時の煩わしさの解消による利便性の向上や自動販売機、構内コンビニエンスストアなどでの使用による事業の拡大が期待される。

実用化に向けて、1998年6月から東京都交通局地下鉄12号線において一般モニタによる IC カード定期券の実証試験が開始された。富士電機は IC カード用リーダ・ライタ、残額表示機を納入しており、これらは順調に稼働している。さらに、1999年初頭から自動販売機での物品購入実験を開始している。

⑥ あとがき

富士電機は次世紀に向けた鉄道システムのあるべき姿に向けて、半導体素子や冷却技術を含めたパワーエレクトロニクス技術のさらなる向上を図り、高調波の低減、力率や効率の向上、小形軽量化など、さらには利便性の向上や省エネルギー化などについて追求し、時代にマッチした魅力あるシステムや機器を提供していきたい。

また、省エネルギー化や省人化など、常に地球環境と人への優しさを意識して進めていく所存である。

今後ともユーザー各位の忌憚のないご意見、ご指導をお願いしたい。

参考文献

- (1) 津田信吾ほか：最近の電気鉄道用変電所向け制御・保護システム，富士時報，Vol.68，No.2，p.126-130 (1995)
- (2) 津田信吾・井上亮二：電気鉄道設備における高調波の発生とその抑制対策，富士時報，Vol.69，No.12，p.620-625 (1996)
- (3) 変電技術特集，富士時報，Vol.71，No.9 (1998)

電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス 応用システム

牧野 喜郎（まきの よしろう）

小高 英明（おだか ひであき）

山本 光俊（やまもと みつとし）

① まえがき

電気鉄道の直流電化においては水銀整流器に代わって、半導体を適用したシリコン整流器が登場して以降、地上設備に対してさまざまなパワーエレクトロニクスを応用した装置が導入されている。

電気鉄道用変電所の電源側や負荷（き電）側の各系統で発生する諸現象に対する対策機器としてもパワーエレクトロニクス応用装置は今やなくてはならない状況にある。

本稿では「高調波」「回生電力」「電圧変動・三相不平衡」対応として富士電機が納入した各種装置の概要とフィールドでの導入効果を紹介する。

② 12 パルス整流器

1994年9月に制定され、通商産業省資源エネルギー庁から通達された「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」を遵守するために、直流変電所においては整流装置の多パルス化による抑制対策が新設や更新などのタイミングで順次行われている。

変電設備における多パルス化の手段としては、変電所内

図1 直列12パルス整流器（6,000kW, DC1,500V）の外観



または変電所間での位相差30度の6パルス整流器×2台を組み合わせる方法（等価12パルス化）と、12パルス整流器を適用する方法（単器12パルス化）がある。

フッ化炭素を冷媒とした沸騰冷却式直列12パルス整流器（6,000 kW, DC1,500 V）の外観を図1に示す。

等価12パルス化の一例として自営送電系を介しての変電所間多パルス化構成を図2に、当系統での高調波電流の測定例を表1に示す。

単器12パルス化の適用例として変電所受電電圧 66 kV, 4,000 kW, DC1,500 V の整流器を納入した現地での 100 % 負荷時の受電電流高調波スペクトル測定例を図3に示す。第5次はガイドライン上限電流値（826 mA）に対し 110 mA, 第7次は同電流値（588 mA）に対し 166 mA となっている。なお、11次・13次高調波については12パルス化では低減しない。

いずれの場合も高調波低減効果が顕著に表れていること

図2 変電所間の多パルス化構成例

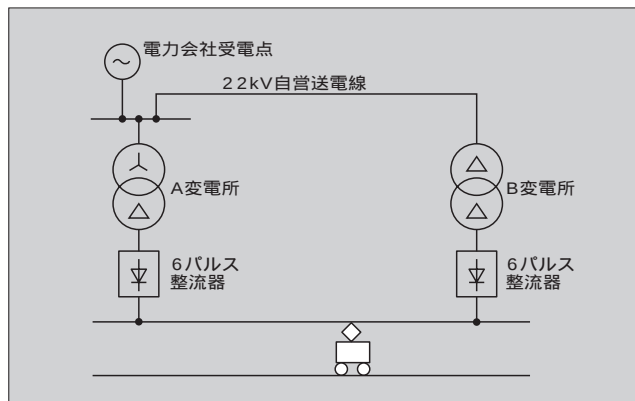


表1 変電所間の多パルス化構成による高調波電流測定例

区 分 条 件	受電電流の高調波含有率（％）				
	5次	7次	11次	13次	総合
A 変 電 所 単 独 時	17.7	10.7	6.2	3.9	23.0
A 変電所 + B 変電所	7.7	4.9	5.9	3.8	12.9

測定条件：同一季節、曜日および同一時間帯の30分平均値。



牧野 喜郎

電気鉄道用変電・制御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一部主席。



小高 英明

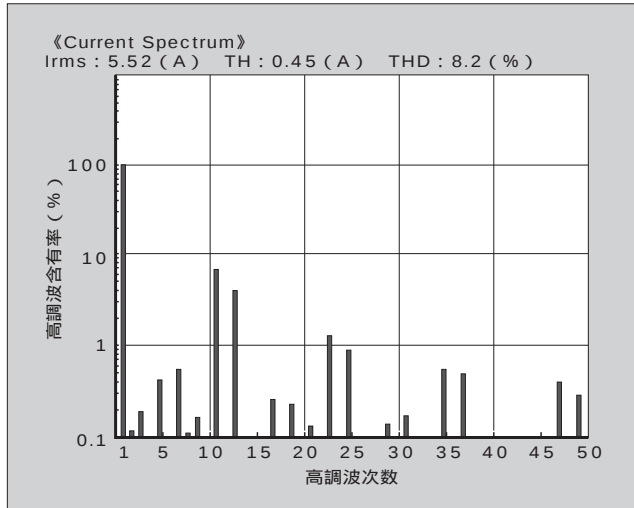
電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在、システム事業本部交通・特機事業部交通技術第一部。



山本 光俊

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。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ハイパワーシステムグループ主任技師。

図3 12パルス整流器による高調波電流測定例



が分かる。

③ 電力回生インバータとアクティブフィルタ

京都市地下鉄東西線新設工事の一環として、日本鉄道建設公団が施工した京都高速鉄道(株)の東山変電所に、電力回生インバータとアクティブフィルタを適用したパワーエレクトロニクス応用システムを納入した。図4にシステム構成を、表2に各装置の仕様を示す。

3.1 電力回生インバータの必要性

電気鉄道における電力回生車両は、減速・停止の際、その運動エネルギーを電気エネルギーに変換すべく、主電動機を発電機として運転する。その時、力行する電車が近辺に存在する場合、電力回生されたエネルギーが、運動エネルギーとして活用される。しかし、力行車が不在の場合、回生エネルギーは行き場を失い、電車線の電圧を上昇させ、回生車両は回生失効の状態となり、空気ブレーキによる制動を余儀なくされる。電力回生インバータは、直流電気車回生時の電車線電圧上昇に応じ、回生電力を交流に逆変換し、高圧配電用負荷に供給する装置である。電力回生インバータの導入で、回生失効を抑制することにより、回生電力の有効利用に加え、自動列車運転装置(ATO)運転時の定位置停止、ブレーキシュー摩耗量の低減が可能となる。特に地下鉄では、一定量の配電用交流負荷が定常的に存在すること、トンネル内温度上昇抑制などの観点から、回生車両対策の設備として、電力回生インバータが適している。

3.2 電力回生インバータの適用効果

電車運転状況において、電力回生インバータの性能試験を行った際の測定チャートを図5に示す。インバータの回生動作により、直流側電圧上昇が一定値(1,650V)以下に抑制されている。また、1日あたり約1,000kWhの電力量を高圧配電系統に回生し、省電力化に寄与していることを確認した。

図4 京都高速鉄道(株)東山変電所のシステム構成

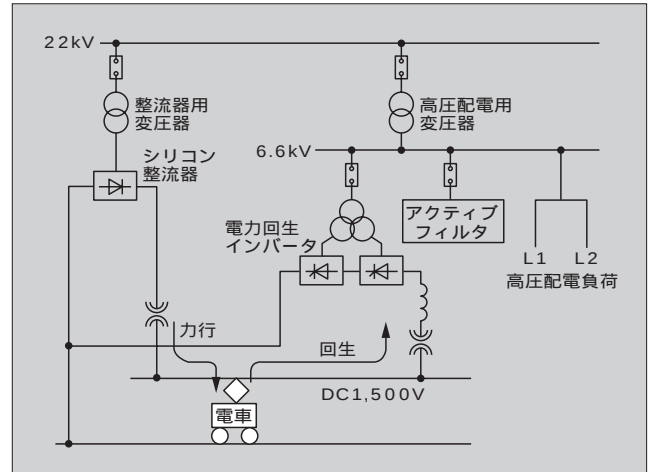


表2 電力回生インバータとアクティブフィルタの仕様

電力回生インバータ	方 式	他励式サイリスタインバータ
	結 線	三相ブリッジ直列12相
	定 格 出 力	500 kW
	定格直流電圧	1,650 V
	冷 却 方 式	ヒートパイプ自冷式
アクティブフィルタ	方 式	IGBT式電圧形インバータ
	相 数	三相3線
	定格補償容量	300 kVA
	定 格 電 圧	440 V (昇圧変圧器付属)
	冷 却 方 式	強制風冷

3.3 アクティブフィルタの必要性

電力回生インバータは、12パルス変換装置に相当するため、交流側電流に $(12n \pm 1)$ 次 $[n$ は正の整数]の理論高調波、および回路条件に応じて発生する非理論高調波成分を含有する。この高調波成分に起因して、交流側高圧配電系統に接続されるインダクタンスやキャパシタンスによって共振を誘発し、過熱・異常音など機器の障害に至る場合がある。これを防止する設備として、東山変電所ではアクティブフィルタを採用した。受動形フィルタの場合、補償対象次数が限定されるのに対し、アクティブフィルタは、不特定多数の高調波を一括補償することが可能である。また、実運用上の電力回生インバータの動作は、図5のチャートに示すように、間欠的である。したがって、受動形フィルタのように機能が高調波補償に限定される場合、回生動作時の間欠的な装置利用にとどまる。これに対し、アクティブフィルタは、無効電力補償機能を兼用できるため、進相コンデンサ設備の省略、装置の利用率向上を実現できる。図6にアクティブフィルタの補償出力の相関関係を示す。回生動作のないモードでは、無効電力補償装置として機能する。一方、回生動作時は、高調波を優先的に補償し、無効電力は余力容量分で補償する制御を行っている。

図5 電力回生インバータ性能試験結果

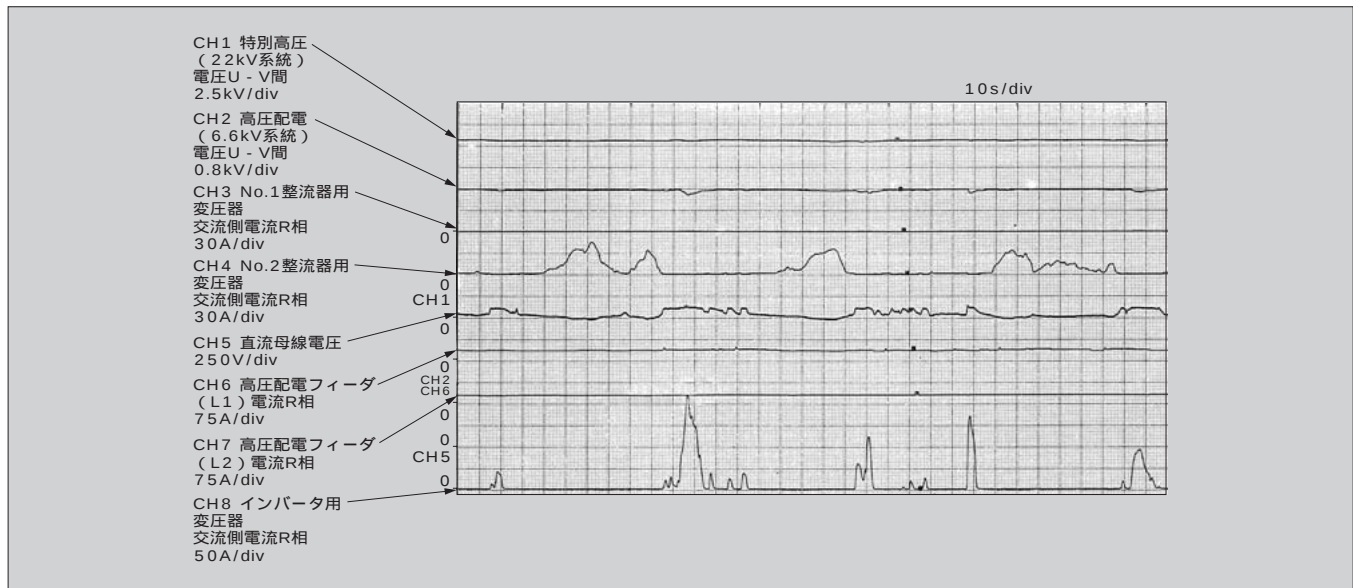


図6 アクティブフィルタの補償特性の相関

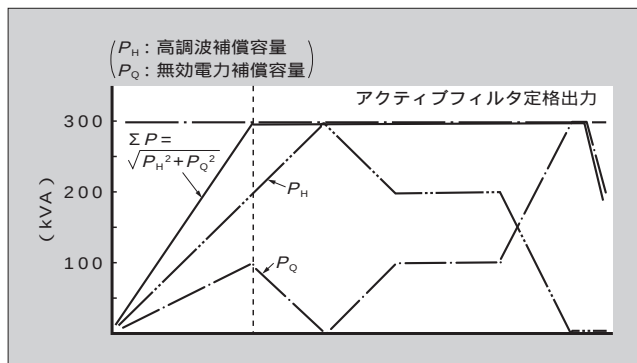


図7 回生電力吸収装置の外観



3.4 アクティブフィルタの適用効果

変電所実運用条件下で、アクティブフィルタの性能試験を行い、以下の効果を確認した。

(1) 無効電力補償

高圧配電用変圧器一次側の力率が、アクティブフィルタ停止状態で約92%のところ、フィルタ運転時は約99%に改善されていることを確認した。

(2) 高調波補償

アクティブフィルタ停止状態では、高圧配電負荷電流が共振性の波形となり、交流側回生電流約150Aの条件で総合電流ひずみ率が約58%に達する。これに対し、フィルタ運転時には、総合電流ひずみ率が約21%まで低減し、共振抑制効果を果たしていることを確認した。

4 回生電力吸収装置

回生失効の防止を目的とし、簡易に適用でき、変電所以外でも設置が可能な回生電力吸収装置は各所で長年の運転実績を積んでいる。

図7に装置の外観を、図8に主回路構成を、表3に仕様

図8 回生電力吸収装置主回路結線

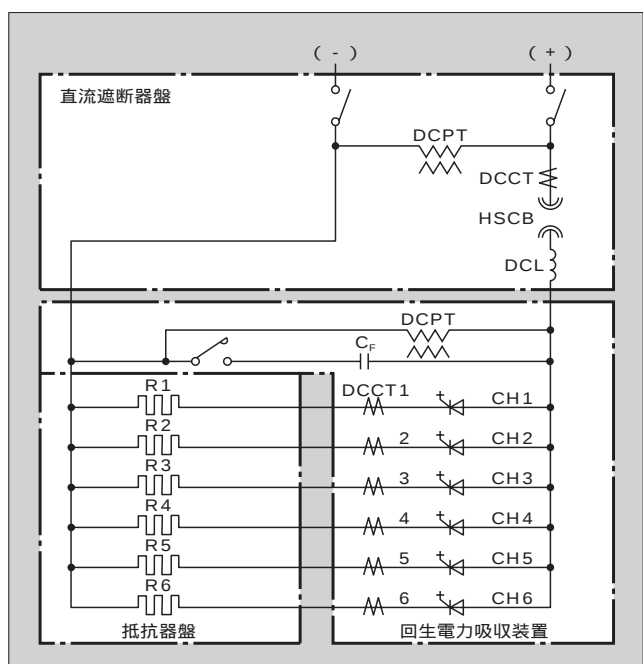
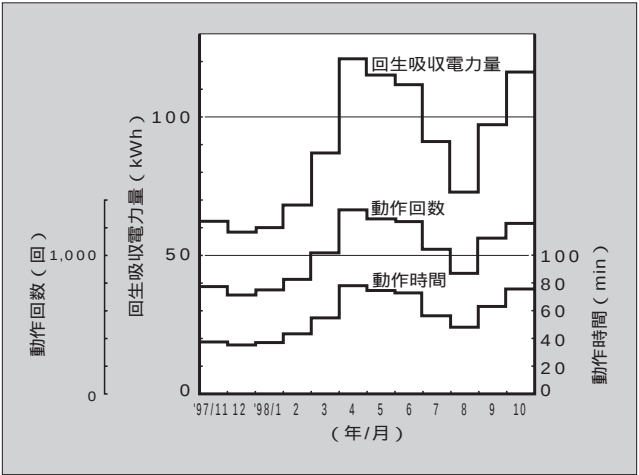


表 3 回生電力吸収装置の仕様例

項 目	内 容
定 格 電 圧	DC1,650 V
定 格 電 流	DC 3,000 A 15秒 (8分周期)
チ ョ ッ パ 相 数	6相
出力リップル周波数	360 Hz
制 御 方 式	定電圧制御方式 (電流制限付き)
冷 却 方 式	ヒートパイプ自然冷却式

図 9 1日あたりの吸収電力量、動作回数および動作時間



例を示す。

図 9 に 1996年に京阪電気鉄道(株)浜大津き電区分所に納入した装置の最近の1日あたりの回生吸収電力量、動作回数および動作時間の推移を示す。1997年11月中旬から AVR 設定電圧を 1,650 V から 1,625 V に変更しての運転状況である。

設定電圧を最適値にすることにより無負荷時に不要な電力吸収を行うことなく回生電力の吸収ができる。

⑤ 単相 SVC , 三相自励式 SVC

東海旅客鉄道(株)では、1964年の新幹線開業以来、逐次輸送力の増強 (列車本数の増加、編成車両数の増加、新形車両による高速化) を行っており、これに対応する電源設備の増強策の一環として、変電所間隔の長い区間での変電所の新設、き電方式の更新や電源電圧降下対策を行ってきた。き電電圧変動対策として納入した焼津変電所向け単相 SVC (大容量静止形無効電力補償装置) と三相側の電圧不平衡と電圧変動対策として納入した新米原変電所向け自励式 SVC の概要について紹介する。

5.1 単相 SVC

本 SVC は、き電電圧変動補償の目的で設置された光直接点弧サイリスタ式 SVC (単相 30 MVA × 2 セット) であり、従来の光間接点弧式装置に比べ点弧回路の削減などにより大幅に小形・高信頼度の装置となっている。図10に

図 10 単相 SVC 全体システム構成

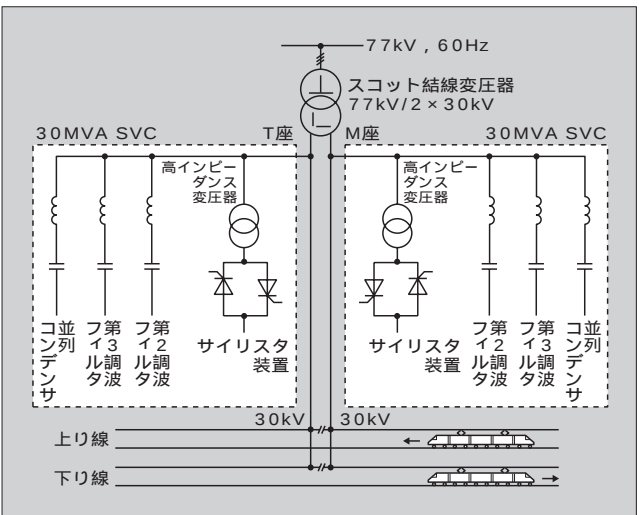
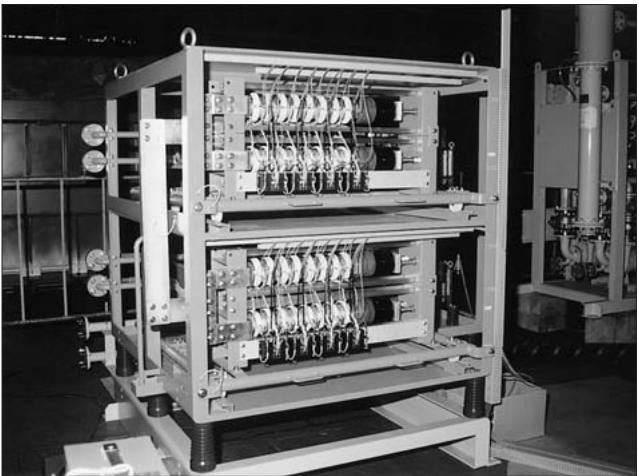


表 4 単相 SVC の仕様

項 目	仕 様
き 電 電 圧	単相, 60 Hz, 30 kV
容 量	30 MVA (18 kV, 1,667 A)
結 線	逆並列接続
使 用 素 子	光サイリスタ 4,000 V, 1,500 A 16S 1P 2A (1S冗長)
冷 却 方 式	送水風冷 (純水冷却)
インピーダンス	50 %

図 11 サイリスタ装置の外観



全体システム構成を、表 4 に SVC の概略仕様を、また図11にサイリスタ装置の外観を示す。

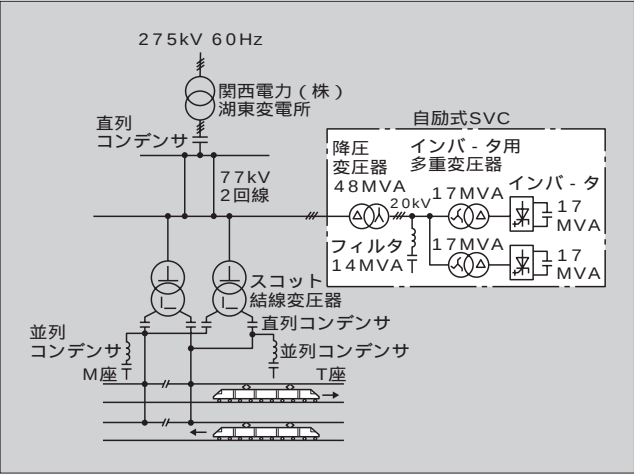
制御装置およびサイリスタの点弧・監視装置は、待機冗長形の完全二重系となっており故障時はオンラインで切替が可能で、システムとして高い信頼性を確保している。

図12に現地での性能検証結果を示す。SVC なしの改善前電圧変動は 13 % 以上であるのに対し、SVC を設置することにより電圧変動を 5 % 以下に抑制できていることが分かる。

図 12 単相 SVC の性能検証結果



図 13 自励式 SVC の全体システム構成



5.2 三相自励式 SVC

自励式 SVC は、前述のサイリスタによる SVC に対して、大容量自己消弧デバイスとして GTO (Gate Turn-Off Thyristor) を採用しており、無効電力補償による電圧変動抑制に加えて、三相個別に電流を制御することにより不平衡電力の補償が可能で、特に回生車両の導入に伴う電圧変動や三相不平衡の抑制に有効となる。

図13に三相自励式 SVC の全体システム構成を、表 5 に概略仕様を示す。自励式 SVC は、逆導通 GTO (4.5 kV，3 kA) を採用し、6 多重構成で1バンクあたり進相・遅相 17 MVA の出力が可能となっている。

自励式 SVC の運転効果を確認するために、納入時に行った実負荷試験時の各部有効・無効電力変動と 275 kV 規制点の電圧変動 (ΔV) の測定結果を図14に示す。波形から分かるように、自励式 SVC 停止時に受電点で発生していた無効電力変動は、自励式 SVC の運転により補償され、規制点で発生している最大 3 % の電圧変動を 1.5 % (規制

表 5 自励式 SVC の仕様

項 目		仕 様
系 統 電 圧		三相，60 Hz，77 kV
シ ス テ ム 容 量		進相 48 MVA～遅相 20 MVA
インバータ	変換器形式	電圧形多重インバータ (36相) 単相インバータ×3相×6多重
	変換器容量	17 MVA/バンク×2
	素 子	高周波逆導通 GTO 4.5 kV，3 kA
	冷 却 方 式	送水風冷 (純水冷却)
	制 御 方 式	3パルス PWM 無効電力，逆相電力補償制御
多 重 変 圧 器		17 MVA，三相 20 kV/1,091 V 千鳥入/△×6多重，送油風冷
降 圧 変 圧 器		48 MVA，三相 77 kV/20 kV △/△，送油風冷
高調波フィルタ		第3高調波FL 7 MVA×1 第5高調波FL 7 MVA×1 20 kV，油入自冷

目標：2 %) 以下に抑制している。

⑥ 今後の展望

近年、低次高調波低減や力率向上の観点から自励式変換装置を適用したシステムが普及している。電気鉄道の地上分野では GTO を適用した装置が主流であったが、今後は高効率、小形化などの面で有利な電圧駆動形デバイスとして IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が積極的に採用される時代と考える。

IGBT の直列接続化や高耐圧化により高電圧・大容量変換装置の構成が可能である。特に直列接続回路を構成する

図 14 自励式 SVC の性能検証結果

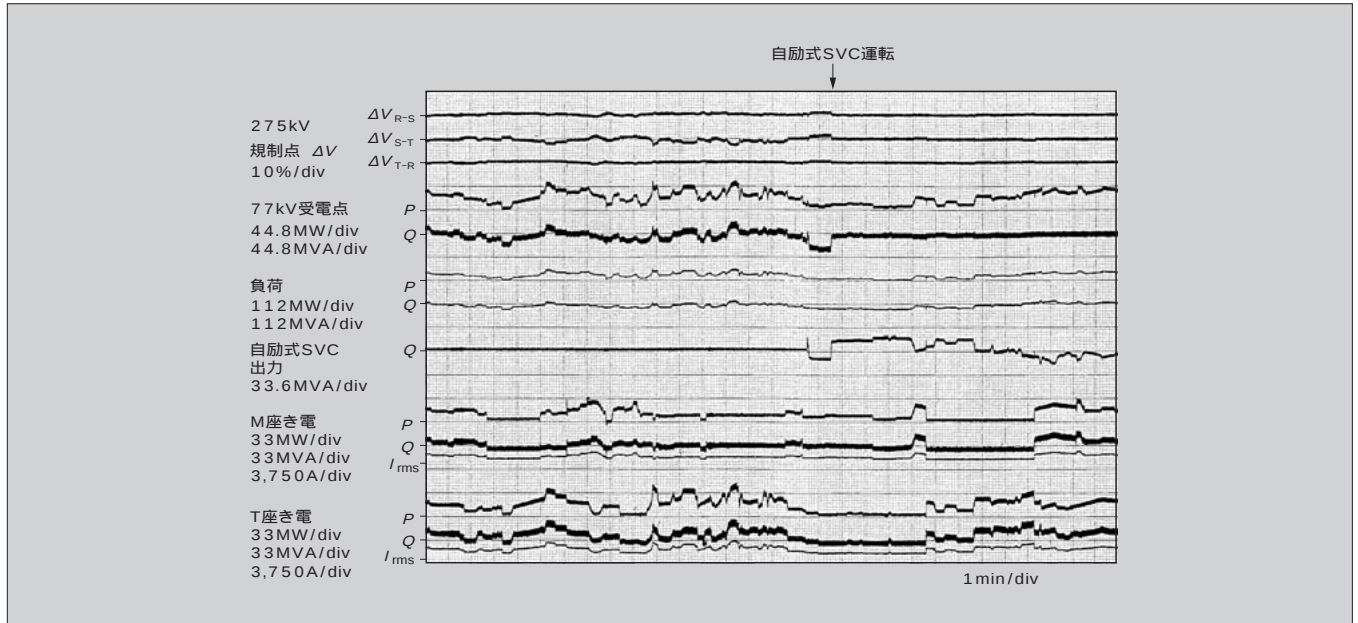


図 15 直列スタック構成例（4直列，1相分）

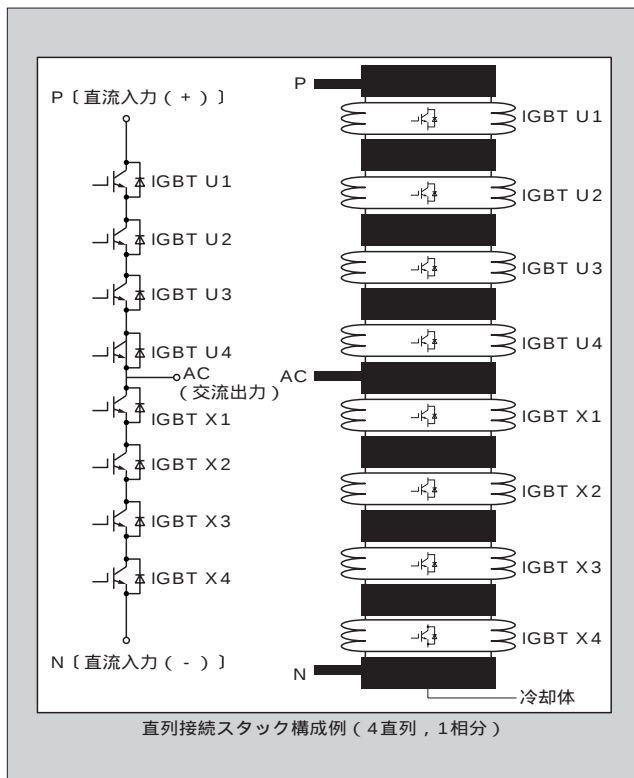
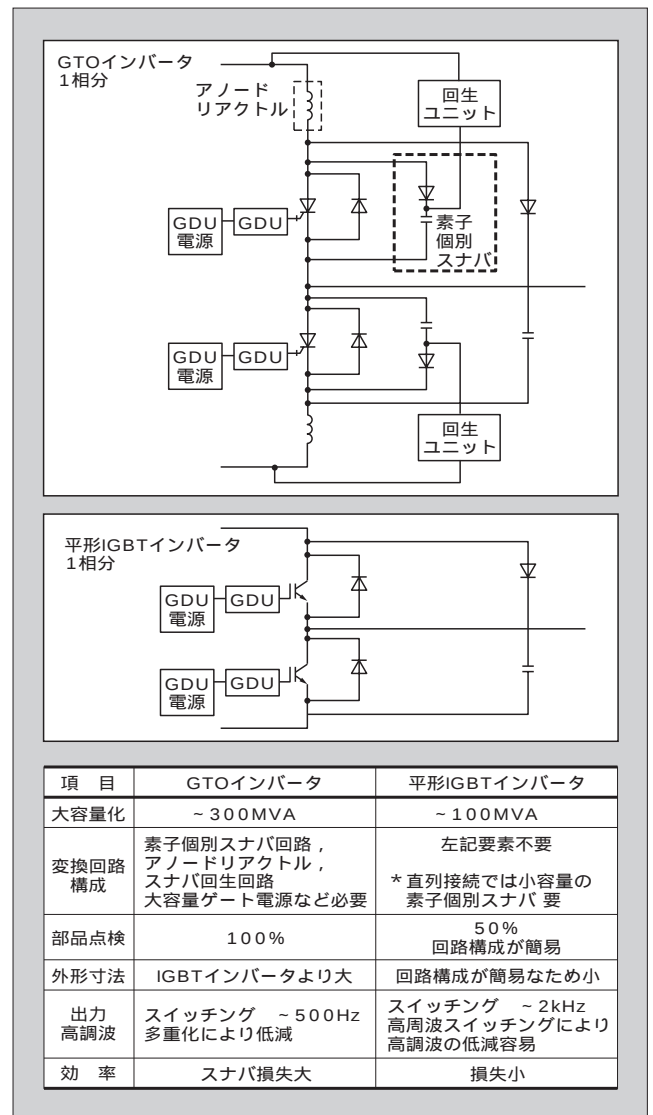


図 16 GTO インバータと平形 IGBT インバータの比較



うえでは平形圧接構造が有利である。図15に直列接続スタック構成例を，図16にGTOインバータと平形IGBTインバータの比較を示す。

平形IGBTの活用により大容量変換装置の分野においても現状よりさらに経済的で高機能，高性能なシステムが実現できる。

7 あとがき

以上のように電気鉄道の地上設備においても、さまざまな手法を駆使して諸対策や補償効果を実現している。地球温暖化防止が重要課題となっている昨今、省エネルギーで地球環境に調和した装置を創出していくことがわれわれの使命である。

今後とも電気鉄道の車両・地上両システムを十分考慮した最適システムの構築に注力していく所存である。

最後に各装置の適用に際し、ご指導・ご協力いただいた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 高調波抑制対策技術指針，JEAG9702-1995，日本電気協会，電気技術基準調査委員会（1995）
- (2) 渡辺昭良ほか：京阪電鉄大津線・GTOサイリスタ式回生電力吸収装置の運転実績，昭和62年電気学会産業応用部門全国大会（1987）
- (3) 高坂憲司・高橋良和：平型IGBTとその応用，OHM（1998-11）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
光触媒による低濃度 NOx の除去 ---- UV 強度および相対湿度の影響 ----	富士電機総合研究所 "	西村 智明 西方 聡	第39回大気環境学会年会（1998-9）
固体絶縁物表面における油中沿面放電の進展2)	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 宮本 昌広	平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会 （1998-10）
光 ICTS による酸化亜鉛バリスタ単一粒界の評価	富士電機総合研究所 "	田中 顕紀 向江 和郎	第18回電子材料研究討論会（1998-10）
変電機器への最近の熱流解析技術の適用	富士電機総合研究所 " " "	仲神 芳武 川西 敬造 杉山 修一 宮本 昌広	日本機械学会・熱工学部門講習会（1998-10）
インバータ駆動誘導電動機の軸電圧	富士電機総合研究所 "	奥山 吉彦 藤井 秀樹	電気学会回転機研究会（1998-10）
表皮効果を考慮したかご形誘導電動機の等価回路モデル	富士電機総合研究所	奥山 吉彦	
固体絶縁物表面における油中沿面放電の進展4)	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 宮本 昌広	電気学会平成10年度基礎・材料・共通部門総合研究会（1998-11）
油浸絶縁流動系における光学的電界測定と電荷挙動	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 宮本 昌広	
新しい植物絶縁油の変圧器への適用	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 川西 敬造 宮本 昌広	
	変電システム製作所 "	宮 良一 小林 弘志	
	"	高坂 正明	
	"	和田 元生	
MOSFET インバータによる大気圧誘導熱プラズマの発生	富士電機総合研究所	榊原 康史	日本電熱協会（1998-11）
SiC デバイスによる電気自動車用パワーエレクトロニクスの新展開	富士電機総合研究所	木下 繁則	応用物理学会第4回結晶工学セミナー（1998-11）
1 サイクル高速真空遮断装置の性能検証	富士電機総合研究所 " " " " 機器制御事業部	磯崎 優 昆野 康二 藤沢 浩明 柴田 和郎 菅野 朋人 石川 熙	電気学会開閉保護研究会（1998-11）

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器

栗飯原 一雄（あいばら かずお）

鈴木 伸夫（すずき のぶお）

菊地 征範（きくち まさのり）

① まえがき

21世紀に向けた電気鉄道電力設備に求められる要件は、運輸技術審議会答申「21世紀に向けての鉄道技術開発のあり方について」にあるとおり、「ライフサイクルコストの低減」「環境調和・省エネルギー」「安全性・信頼性の向上」の3要件に集約できよう。

都市圏を中心とした直流電気鉄道において、き電用変電システムを構成する各機器については着実に技術革新が行われてきた。このなかで、列車運転電力供給の要（かなめ）である直流高速度遮断器は、その技術革新をめざして十数年前から種々の方式が考案されてきたが、上記の要件に照らし合わせると一長一短であったと考えられる。

富士電機は、上記のすべての要件を満足した新形直流高速度遮断器の製品化を完了したので、そのコンセプトと概要について紹介する。

② 現行直流高速度遮断器の課題

直流電気鉄道の初期から使用されてきた直流高速度遮断器は、設備規模によって1変電所あたり2台（単線設備）から二十数台（首都圏超大規模設備）が設置されており、全国の1,200か所の直流変電所で約7,000台使用されている。

直流高速度遮断器は原理的には空気遮断器で、図1に示すような爆発的なアークを発生することにより電流を遮断するものであり、接点やアークシュートの損耗が避けられず、性能や信頼性の維持のためには頻繁な保守点検や調整作業を要し、かつ大きなアークスペースを要するため小形化が困難な機器であった。

さらに、整流器用やき電用として使用されるために主回路機器のうちで最も台数が多く、結果的に「最も台数の多い機器が最も頻繁な保守を要し、小形化も困難である」という問題を抱えていた。

表1に複数のユーザーの実態調査結果から、それを最大公約数的にまとめた直流高速度遮断器の保守点検基準を示

す。

③ 新形直流高速度遮断器の開発コンセプト

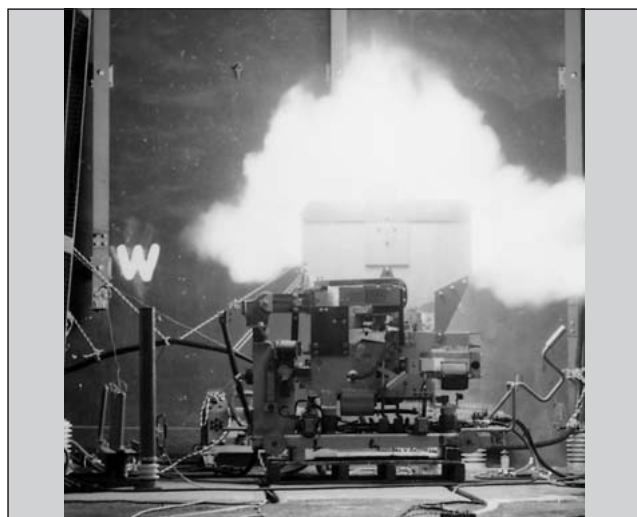
前述の3要件を満足すべく、省保守化、安全性向上および小形化の必須（ひつ）条件を「アークレス方式」に置き、経済性を含めて種々検討した結果、基本方式を転流式高速度真空遮断器とした。

製品の外観を図2に、コンセプトと各要件の実現手段を図3に示す。本装置の製品化の狙いは、ライフサイクルコストの低減と性能・信頼性および安全性の向上にある。

ライフサイクルコストは、イニシャルコスト（初期費用）、ランニングコスト（運転費用）およびリプレースコスト（更新費用）からなる。小形化は省スペース化によるイニシャルコストの低減や、今後ますます増加していく余剰スペースを活用した無停電更新工事でのリプレースコストの低減に直結する。

主接点は真空バルブで構成され、通電損失は微少であるために、ランニングコストは保守点検費用と言い換えることができる。

図1 直流高速度遮断器の遮断状況



栗飯原 一雄

電気鉄道用変電・制御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・特機事業部通技術第一部主任。



鈴木 伸夫

配電盤の開発・設計に従事。現在、神戸工場配電盤設計部主任。



菊地 征範

真空遮断器、高圧開閉器の開発設計に従事。現在、吹上工場器具設計部。

これを低減するためには、「信頼性を確保しつつ点検周期を長期化できる」ことが必須条件であり、新形直流高速度遮断器の点検周期は、細密点検周期を6年ごととし、そ

表1 現行直流高速度遮断器の保守点検基準（例）

頻 度	点検内容	
	部 位	内 容
1回/半年	消弧装置	アークシュートの損傷 吹消コイルの絶縁、鉄心との締付け
	主接触子	接触面の荒れ、ワイブ測定
	アーク接触子	接触面の荒れ、ワイブ測定、擦合せ
	主回路	ボルト類の締付け、絶縁物の損傷
	投入コイル	固定状態およびコイル、抵抗、リード線の損傷
	保持コイル	コイル・配線・絶縁物の損傷
	磁気保持回路	接触面の発錆（はっせい）、汚損 目盛調整ボルトの位置および緩み
	動作機構	連結ピンなどの摩耗、給油状態
	補助開閉器	連結レバー絶縁棒の異常 開閉器接点、配線の損傷
	操作試験	手動、電磁操作 ダッシュボット・空気吹付装置の動作
	絶縁抵抗測定	主回路 - 大地
1回/年 精密点検	投入操作試験	投入操作電圧・電流
	抵抗値測定	各種コイル・抵抗
	目盛試験	整定値における試験コイル電流・最小保持電流
	各部調整・ばね長測定	投入ばね、開放ばね 主接触子、アーク接触子間隔、ワイブ測定
	絶縁抵抗測定	主回路 - 制御回路 - 大地

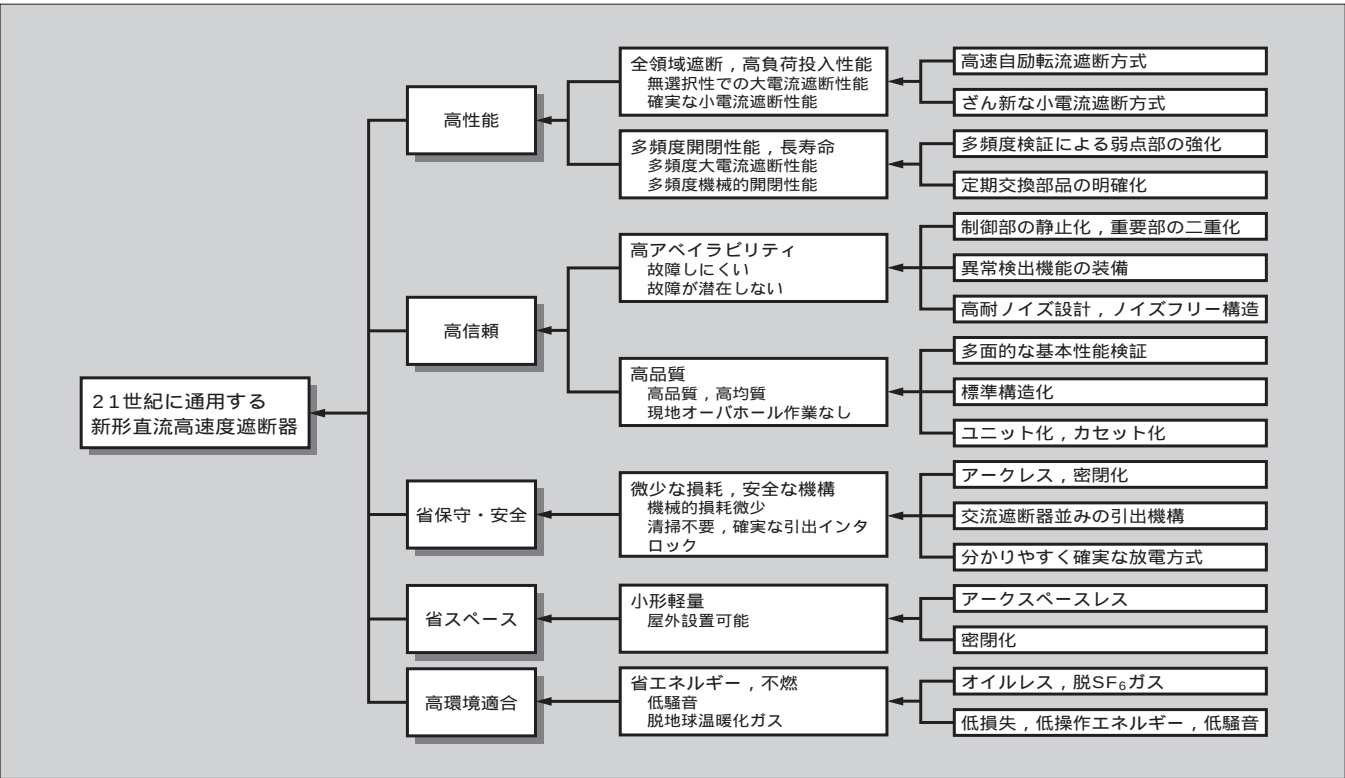
の中間期にきわめて簡易な点検を行うものとした。これは、すでに技術革新により省保守化されてきた機器（ガス絶縁開閉装置、変圧器、整流器、デジタル式制御・保護システムなど）の点検周期と整合できる可能性が高くなるため、保守点検作業の効率化はもちろんのこと、集中的な点検による機能維持レベルの向上も期待できる。保守点検の概要を表2に示す。

性能面では、高速開極による低限流値を実現しているため、選択性〔高い突進率（ di/dt ）の事故電流については、目盛値以下で電流検出することにより高速開極し、限流値を抑制する機能。反面、負荷投入性能が悪化するという短

図2 転流式直流高速度真空遮断器



図3 開発コンセプトと実現手段



所をもつ)のない条件においても、電流目盛(遮断器本体で検出して遮断動作する動作電流値をいう)12 kA で規定の遮断性能を満足する。また、列車補機などの小電流の遮断方式については独特の工夫をすることにより、結果的に

表 2 保守点検の概要

(a) 点検内容

区 分	点検内容	巡視点検	普通点検	細密点検
全 体	目視点検	○	○	○
	制御電源測定		○	○
	絶縁抵抗測定			○
目盛試験	簡易試験		○	○
	低実電流試験			○
総合動作特性試験	総合開閉特性測定			○
遮断器本体	真空度確認			○
	機構点検			○
	開閉特性測定			○
	消耗部品交換			○
	絶縁抵抗測定		○	○
検出制御装置	電源装置出力電圧測定		○	○
	消耗部品交換			○
反発駆動ユニット	消耗部品交換			○
消弧装置	端子間絶縁抵抗測定			○

(b) 点検基準

点検種別	実施基準	点検条件
巡視点検	日常	ユーザー点検
普通点検	3年ごと	ユーザー点検
細密点検	6年ごとまたは3,000回ごとの早い方	メーカー点検
臨時点検	臨時	事故遮断100回 動作回数10,000回 異常を認めた場合

確実な全領域遮断性能を実現している。

構造面では、保守の困難化につながらないように工夫をし、アークスペースをなくし、コンパクトな構成によって小形化を実現した。また、アークレスのため、直流高速度遮断器では必須であった電離ガスの換気が不要なために、装置を密閉化でき、この結果清掃が不要となり、屋外設置も可能とした。

なお、地球温暖化に結びつく六フッ化硫黄 (SF₆) ガスを使用しない不燃形コンデンサを採用することにより、不燃化だけでなく、地球環境へも配慮している。

4 動作原理

新形の直流高速度真空遮断器の基本構成を図 4 に、代表的な用語を表 3 に示す。

直流大電流の遮断原理は、「電源電圧を上回る電圧を発生して電流を消滅させる」というシンプルなものである。

表 3 主な用語

用 語	説 明
電磁反発	主バルブに接続された金属板を電磁誘導作用により反発させ、高速開極させる方式
主振動コンデンサ・リアクトル	直流電流に零点を生成するための主振動電流を発生させるコンデンサおよびリアクトル
主真空バルブ	主回路電流を通电するとともに、主振動電流により電流を遮断する真空バルブ
副振動コンデンサ・リアクトル	小電流遮断性能を向上させるために副振動電流を生成するコンデンサおよびリアクトル
副真空バルブ	主回路電流を通电するとともに、副振動回路により小電流を遮断する真空バルブ。外線との絶縁機能をもつ
消弧装置	酸化亜鉛素子で構成された回路エネルギーを吸収する装置
電流検出器	主回路電流を検出するホールCT

図 4 直流高速度真空遮断器の基本構成

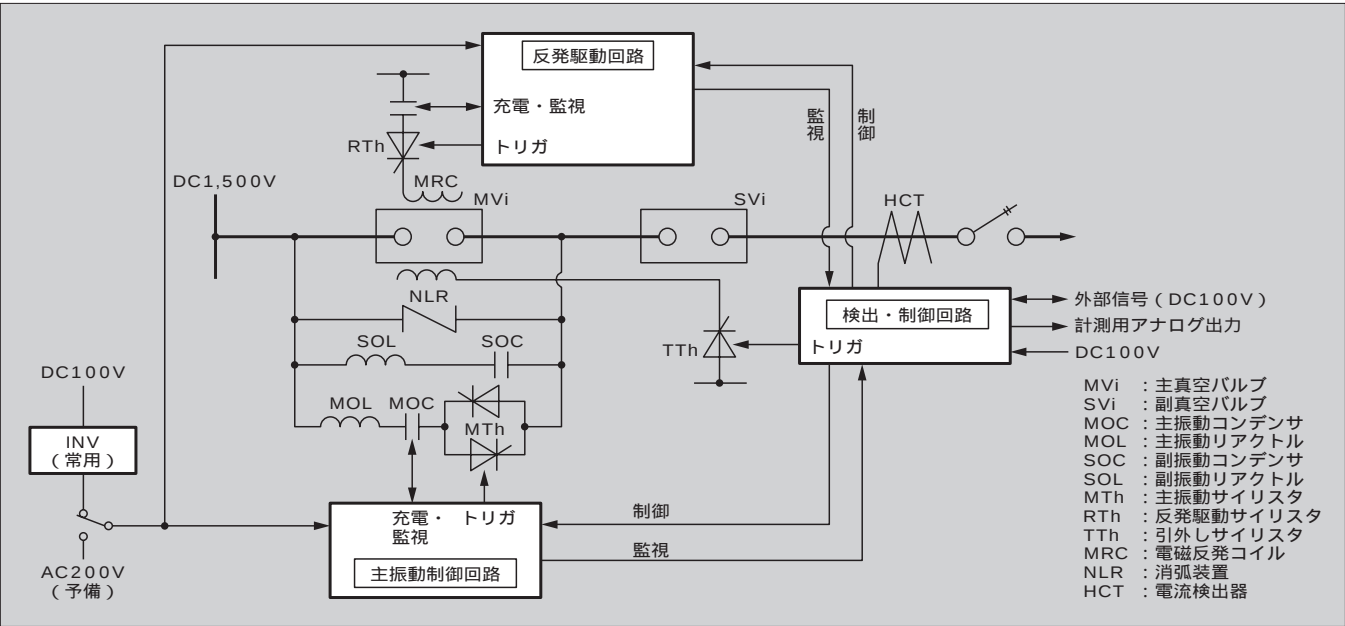
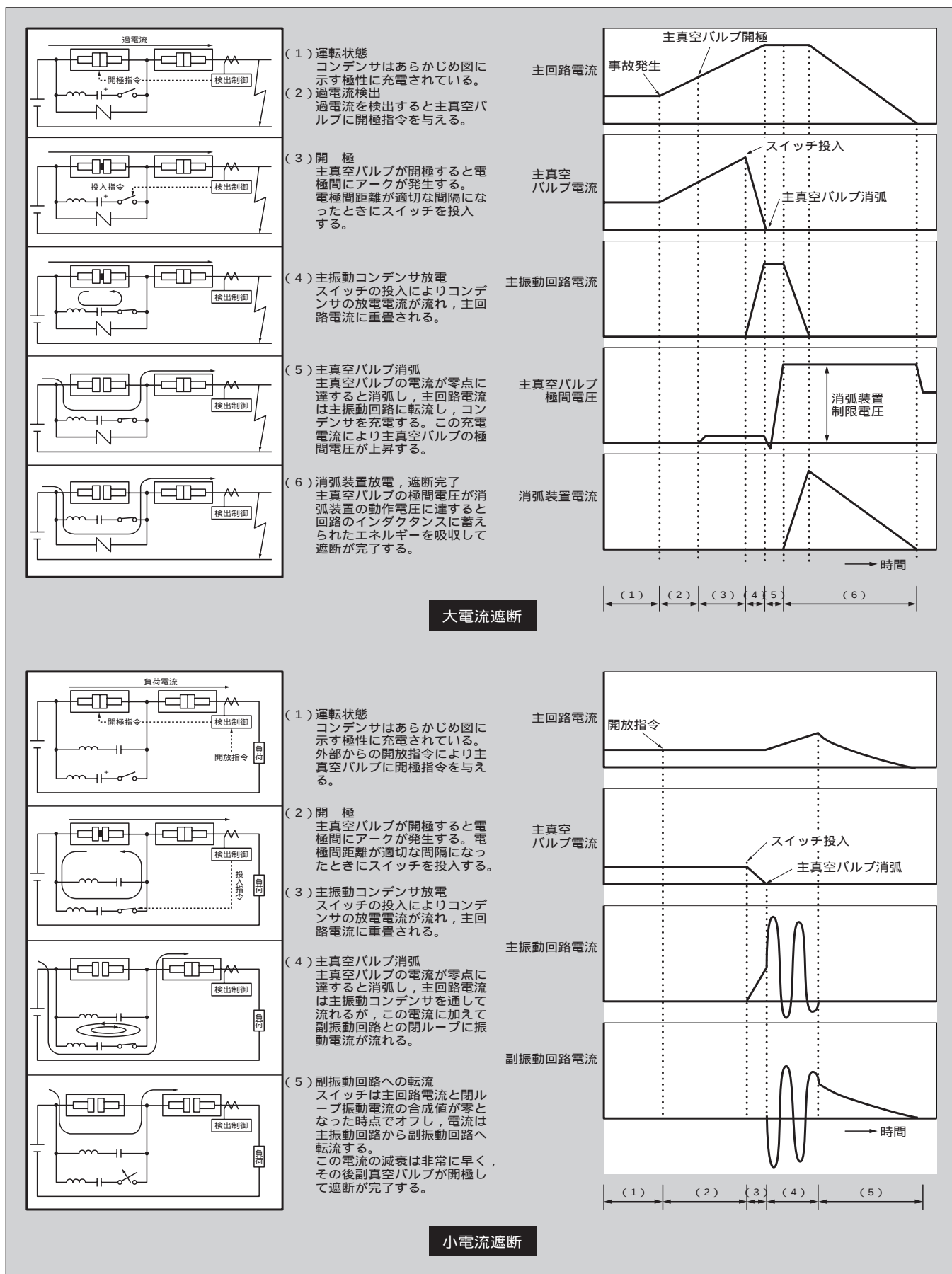
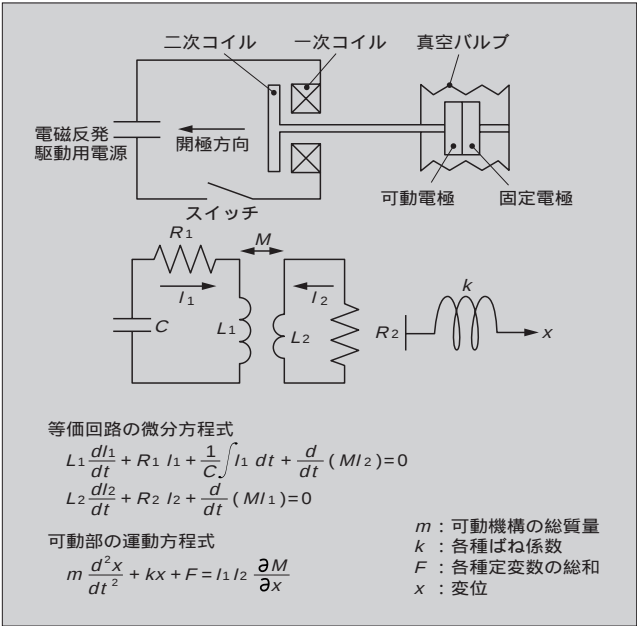


図5 遮断原理



直流高速度遮断器では高いアーク電圧を発生させることにより電流を遮断しているが、本装置では消弧装置の制限電圧によりこれを実現している。

図6 電磁反発駆動方式のモデルと等価回路



一方、小電流を遮断する場合は回路エネルギーが小さいために消弧装置が動作しない領域があり、工夫が必要となる。本装置では副振動回路の機能によって主回路電流を素早く減衰させ、副真空バルブで開放する方式を採用している。また、本バルブは外線との断路機能ももっている。

遮断原理を図5に示す。最大 $3 \times 10^6 \text{ A/s}$ という高い突進率の事故電流を遮断するには、検出後 1 ms 程度での高速な開極が必要であり、一般の交流遮断器の引外しコイルによる開極方式では到底間に合わない。このために図6に示す電磁反発方式を採用している。

なお、電磁反発方式は高速化できる反面、主接点が即時に戻る特性があるため、機械的な保持機構により、安定した開極特性を実現している。

5 仕様

仕様を表4に、検出制御回路の機能を表5に示す。適用規格である JEC-7153 は半導体遮断器について規定されたものであるが、動作原理やエネルギー処理方式が類似しているため、本装置への準用が認められている。

なお、直流高速度遮断器の規格である JEC-7152、さらに実用性能面から旧日本国有鉄道規格 (JRS) も十分配慮

表4 仕様一覧

項目		内容		
装置名称		自動転流式直流高速度真空遮断器		
適用規格		JEC-7153-1991「電気鉄道変電所用直流高速度ターンオフサイリスタ遮断器」		
構造		屋内（外）用キュービクル形スイッチギヤ（CW）（引出形、主回路シャッタ付き）		
保護等級		IP2X		
装置形式		VDC015-P（BC1,500 V）またはVDC008-P（DC750 V）		
遮断器本体形式		HX5001Y-20Mf-D	HX5001Y-30Mf-D	HX5001Y-40Mf-D
動作方式	投入操作方式	電動ばね方式		
	開極方式	電磁反発駆動による高速開極方式		
	転流方式	振動電流の注入によるコンデンサ転流方式		
	消弧方式	酸化亜鉛素子によるエネルギー吸収方式		
電流検出方式		正方向過電流検出（逆流リレー機能内蔵）または両方向過電流検出		
定格電圧		DC1,500 V または DC750 V		
定格電流		2,000 A	3,000 A	4,000 A
定格遮断容量・動作責務		50 kA（電流突進率： $3 \times 10^6 \text{ A/s}$ ） O - 10秒 - CO		
定格遮断電流		25 kA以下		
定格制限電圧		4,000 V 以下（DC1,500 V）または 2,500 V 以下（DC750 V）		
定格短時間耐電流		75 kA 1秒		
電流目盛		4 ~ 12 kA, 2 ~ 6 kA, 1 ~ 3 kA		
最終選択率		50%（使用/除外設定可能）		
保証動作回数	機械的の開閉	10,000回		
	短絡電流遮断	100回		
耐電圧	主回路	AC5,500 V 1分間 インパルス20 kV		
	制御回路	AC1,500 V 1分間 インパルス4.5 kV		
定格制御電圧		DC100 V		
定格補助電源電圧		AC200 V/100 V		

表 5 検出制御回路の機能

機 能	概 要	
遮断制御機能	電磁反発・主振動・引外しの各タイミングを制御する機能	
	過電流自動遮断	主回路電流を電流目盛および選択特性と照合して遮断する機能
	逆流遮断	主回路電流が一定値以上の逆流の場合に遮断する機能
	指令遮断	外部から開放指令が入力された場合に遮断する機能
充電制御機能	複数回線同時遮断時にコンデンサを順序充電する機能	
異常検出機能	制御電源異常検出機能	
	電流検出器異常検出機能	
	コンデンサ充電異常検出機能	
保安確認機能	コンデンサ放電確認機能	
計 測 機 能	電流計測値出力機能	
インタフェース機能	変電所制御システムとのインタフェース機能	

図 7 装置内部



図 8 遮断器本体機構

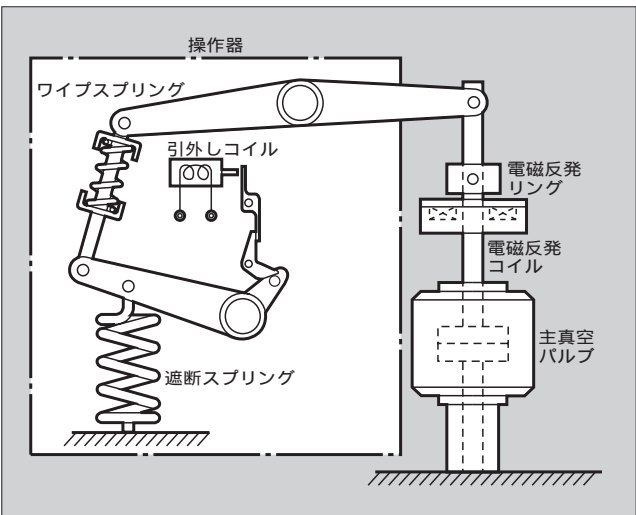
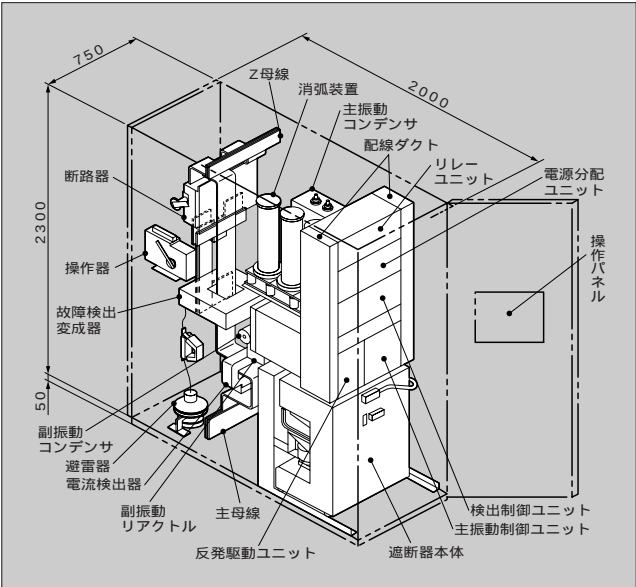


図 9 内部構造



⑥ 構 造

して設計・検証している。

性能上のポイントは以下のとおりである。

- (1) 限流値が非常に低い。規格上の限流値（25 kA）に対して実力値は非常に低く、事故電流による他機器へのダメージが軽減される。
- (2) 確実な全領域遮断性能をもっている。
- (3) 逆流リレー機能を内蔵している。
- (4) 電流目盛範囲が広い。750 V から 1,500 V への昇圧時や将来の負荷増における電流目盛の変更に柔軟に対応できる。
- (5) 短絡電流遮断は 100 回を保証している。これは、高速低限流遮断のために真空バルブ中のアークエネルギーが非常に小さく、短絡遮断を 100 回行っても接点がほとんど消耗しないことによる。

装置内部写真を図 7 に、遮断器本体機構の概念を図 8 に、装置全体の構造を図 9 に示す。投入操作機構は省略しているが、交流遮断器と同様に電動ばね操作方式を採用している。装置の構造上の特長は以下のとおりである。

- (1) 従来の直流高速度遮断器盤に比較して体積比は 50 %（当社比）である。
- (2) 構成機器の機能別ユニット化、および固定部とシステムごとの可変部との構造的区分により、保守点検を容易化するとともに製品の均質化や短納期化を実現している。
- (3) 主回路保護用シャッタ、容易で確実なコンデンサ接地・放電方式などにより保安度を向上させている。
- (4) クリーン回路（DC24V 以下の弱電制御回路）とダーティ回路（DC100V などの強電制御回路）との配線交差を避け、かつそれぞれを独立配線ダクトに収納すること

により、クリーン回路へのノイズ侵入を防止している。

- (5) 消弧装置の容量は最大電流目盛に依存するため、本数調整できるようにしている。

7 あとがき

パワーエレクトロニクス技術の進歩による電動機駆動のインバータ化などにより、鉄道車両はもちろんのこと、世の中の技術は急速に交流化に向かいつつある一方、都市圏の電気鉄道のき電方式は将来とも直流が主流であろう。

本稿で紹介した新形の直流高速度真空遮断器は直流変電所の次世代化の要となる機器であるとともに、技術的には真空遮断器の高速駆動技術、パワーエレクトロニクス技術および電子制御技術を融合した特徴のある製品である。今後とも技術革新はあらゆる分野で急速に進むことが予想され、信頼性はもちろん、保守性、安全性および小形化に優

れ、さらに地球環境に優しい製品を提供していく所存である。

最後に、性能の検証・評価および改良への提言を賜った(財)鉄道総合技術研究所および保守点検の実態調査にご協力いただいたユーザー各位に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 昆野康二ほか：直流遮断器の小電流遮断に関する検討，平成9年電気学会全国大会，No.1599（1997）
- (2) 昆野康二ほか：直流遮断器用エネルギー吸収装置の開発，平成9年電気学会全国大会，No.1601（1997）
- (3) 昆野康二ほか：直流遮断器の電流遮断特性，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.617（1997）
- (4) 水間豊ほか：新形直流高速度遮断器の製品化，平成10年電気学会開閉保護研究会，No.SP-98-44（1998）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
最新パワー半導体デバイスの動向 最新 IGBT の特長とその使い方	松 本 工 場	桜井 建弥	パワーエレクトロニクス研究会（1998-11）
高圧回転機の絶縁診断技術	富士電機総合研究所	中山 昭伸	第128回電気材料技術懇談会（1998-11）
環境調和型水素製造技術	富士電機総合研究所 "	中田 栄寿 西方 聡	平成10年度資源・素材関係学協会合同秋季大会（1998-11）
半導体素子冷却用平板フィンの沸騰伝熱特性	富士電機総合研究所 "	安達 昭夫 糸山 武秀	1998年機械学会 熱工学講演会（1998-11）
燃料電池の産業への普及展望	技 術 開 発 室	中島 憲之	省エネルギーセミナー（1998-12）
最近のマイクロアクチュエータの動向と磁気応用	富士電機総合研究所	中澤 治雄	第58回スピニクス研究会（1998-12）
電力系統運用におけるインテリジェント化技術	富士電機総合研究所	植木 芳照	計測自動制御学会（1998-12）
半導体素子を用いた無誘導解消型電力用限流器の分散電源への適用	富士電機総合研究所 "	磯崎 優 森田 公	電気学会静止器研究会（1998-12）
変圧器巻線の診断方法の検討	変電システム製作所 " 富士電機総合研究所	松山 亮 和田 元生 江上 悌治 川西 敬造	
油入変圧器セクション間モデルにおける誘電率整合効果	富士電機総合研究所 " 変電システム製作所	彦坂 知行 浅田 規 宮本 昌広 高坂 正明	
当社における電磁波解析システムの適用事例	生産・システム企画 室	外園 洋昭	第5回電磁波解析システムセミナー（1998-12）
直列形コモンモード電位変動抑制回路の低損失化の検討	富士電機総合研究所	五十嵐征輝	電気学会半導体電力変換研究会（1998-12）
原子力発電所の個人線量測定の動向	東京システム製作所	山村 精仁	第23回アイソトープ放射線総合会議（1998-12）
半導体素子の熱挙動	富士テクノサーバイ	橋本 理	MES 98 第8回マイクロエレクトロニクスシンポジウム（1998-12）

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器の性能検証

昆野 康二 (こんの こうじ)

清水 直樹 (しみず なおき)

菅野 朋人 (かんの ともひと)

① まえがき

新形直流高速度遮断器（以下、直流真空遮断器という）は、電磁反発駆動機構をもった真空遮断器本体、強制的に電流零点をつくるための主振動回路、回路に蓄えられた電磁エネルギーを処理するための非線形抵抗、過電流を検出し、これらを制御するための検出制御ユニットなどから構成されており、機械的に動作する遮断器部と電子回路を複合化した装置である。

適用規格は JEC-7153「電気鉄道変電所用直流高速度ターンオフサイリスタ遮断器」であり、本装置のような自励転流式の直流遮断器に対して準用してもよいことが認められているが、本規格はゲートターンオフサイリスタを使用した完全静止形の遮断器を対象としているため本装置のように機械式遮断器を有するものには完全に適合しない面がある。このような状況から、規格に規定されている性能を満足させることはもとより、関連する規格を参考にしながら種々の検証試験を実施した。ここでは検証にあたっての考え方、検証試験結果について述べる。

② 検証の考え方

直流真空遮断器は、ゲートターンオフサイリスタ遮断器（以下、GTO 遮断器という）とは下記のように大きく異なる点がある。

- (1) 交流真空遮断器と同様な機械式遮断部を備えている。
また、電磁反発駆動によって高速度に動作する。
- (2) 電流零点をつくるための逆電流を供給するコンデンサをもち、それを充電するために一定の時間を要する。
また、GTO 遮断器において標準動作責務「O（遮断する動作）-10 秒-CO（投入に引き続き直ちに遮断する動作）」で性能的に影響を受けるものは非線形抵抗（規格上の名称：消弧装置）だけであり、JEC-7153 においては標準動作責務に従って行う試験は消弧装置が消費するエネルギーに関する試験のみとなっている。このような GTO 遮断器と直流真空遮断器の違いを考えると、JEC-7153 の項目を

満足するだけでは十分ではない。特に機械的な開閉性能、標準動作責務に従った短絡電流遮断などは十分に検証されるべき項目である。したがって、実的な性能の検証という目的から JEC-7152「電気鉄道変電所用直流高速度気中遮断器」、旧日本国有鉄道規格（JRS）などを参考にし、直流真空遮断器特有の項目も洗い出して検証項目として取り入れた。また、本装置の制御回路には電子回路を使用しているため耐ノイズ性に関しても検証項目として取り入れた。内容としては JEC-2500「電力用保護継電器」、電力用規格 B-402「デジタル保護継電器および継電装置」などを参考とした項目のほかに、最近急速に普及している携帯電話機についても検証項目として取り入れた。

検証試験を実施した項目と準拠、参考とした各規格を表 1 に示す。各項目のなかには規格で定められている検証方法だけでは必ずしも直流真空遮断器の性能を評価できない項目もある。例えば、本装置の実現のポイントとして真空バルブの高周波遮断性能に適合した主振動回路定数の選定、1 万回開閉のための弱点部の抽出と強化などがあげられるが、これらを的確に評価できるように試験方法を定めた。

③ 検証試験結果

本装置は表 1 に示す検証試験項目すべてについて良好な結果が得られている。ここでは遮断性能に関連する検証試験結果について紹介する。

遮断性能は短絡発電機と整流器を組み合わせた直接短絡試験法によって検証した。規格では 10 Hz 程度以下の交流電源を使った交流等価試験法も認められているが、消弧装置が消費するエネルギーに等価性を持たせることが難しいため、遮断性能試験はすべて直接法で行った。試験回路を図 1 に示す。

3.1 短絡試験

短絡試験は推定短絡電流 50 kA、突進率 3×10^6 A/s の回路条件における遮断性能の検証試験である。JEC-7153 では表 1 のなかで「突進電流に関する遮断試験」に該当す



昆野 康二

真空遮断器、および関連機器の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所開閉装置開発グループ副主任技師。



清水 直樹

配電盤の試験に従事。現在、神戸工場品質保証部。



菅野 朋人

高圧真空遮断器の開発に従事。現在、吹上工場器具設計部。

表 1 検証試験項目一覧

試験項目	試験細目	準拠, 参考規格
構 造 検 査	構造検査	JEC-7153 JEC-7152 社内規定
	コイル抵抗値測定 (投入, 電磁反発, 引外し)	
	絶縁抵抗測定	
消弧装置特性試験	JEC-7153による	JEC-7153
商用周波耐電圧試験	JEC-7153による	JEC-7153
雷インパルス耐電圧試験	JEC-7153による	JEC-7153
温 度 上 昇 試 験	温度上昇試験	JEC-7153 社内規定
	主回路抵抗測定	
保護特性および動作試験	電流検出器出力確認	JEC-7153 社内規定
	目盛試験	
	逆流検出試験	
開 閉 試 験	開閉特性試験	JEC-7153 JEC-7152 社内規定
	連続開閉試験	
	手動開閉試験	
	主回路抵抗測定	
	各信号のタイミング確認	
	主振動電流波形の測定	
漸進過電流による遮断試験	JEC-7153による	JEC-7153
負 荷 投 入 試 験	JEC-7153による	JEC-7153
突進電流に関する遮断試験	JEC-7153による	JEC-7153
アークエネルギーに関する短絡試験	JEC-7153による	JEC-7153
制御電源装置入力 の測定	制御電源の負担測定	JEC-7153 社内規定
	操作電源の負担測定	
	操作電源による充電時間測定	
	操作電源停電時の放電時間測定	
消弧装置放電耐量試験	JEC-7153による	JEC-7153
短 絡 試 験	JEC-7152による	JEC-7152
小 電 流 遮 断 試 験	JEC-7152による	JEC-7152
逆 流 遮 断 試 験	社内規定による	社内規定
200回定格電流 開閉試験	旧JRSによる	旧JRS
耐 ノ イ ズ 試 験	社内規定による	社内規定

るが、動作責務に関しては規定がない。この試験は JEC-7152 を参考にして標準動作責務「O-10 秒-CO」に従って行った。オシログラム例を図 2 に示す。目盛 12 kA、選択性なしの条件である。「O」および「CO」でそれぞれ遮断電流最大値 17.2 kA、17.3 kA で遮断に成功しており、安定した遮断性能を示している。

3.2 小電流遮断試験

小電流遮断試験については JEC-7153 では規定されていない。しかしながら、本装置のような自動転流式の遮断方式の場合、遮断電流が小さいほど遮断時間が長くなるという特性を示す。本装置は特に小電流遮断時間を短縮するた

図 1 遮断試験回路

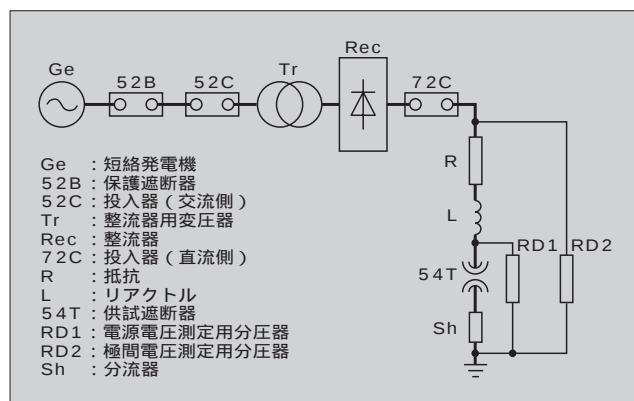
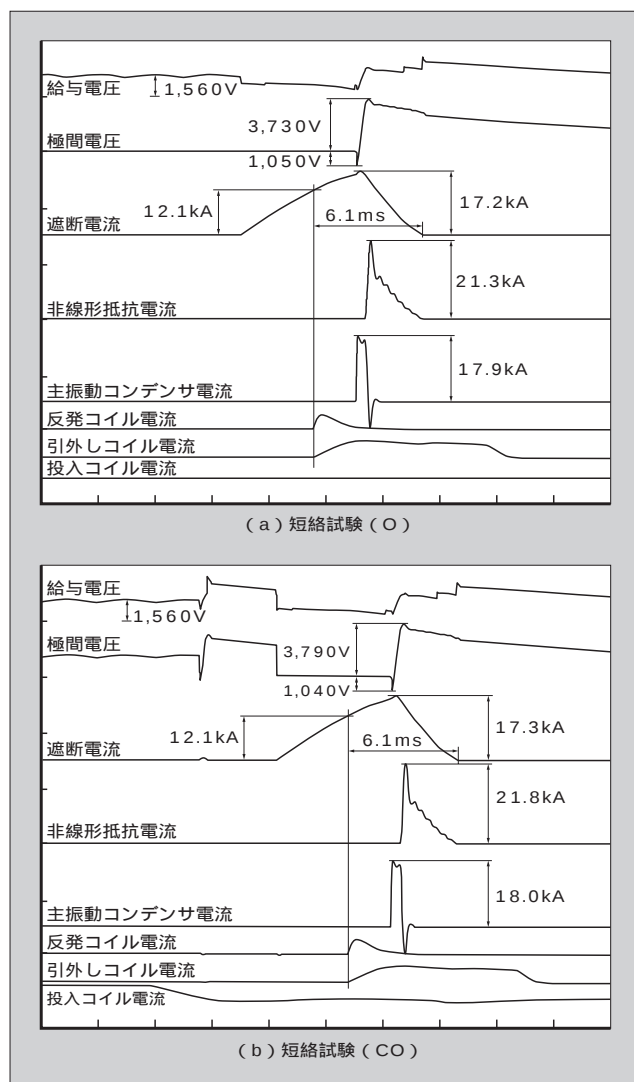


図 2 短絡試験オシログラム例 (社内試験)



めに副振動回路を設けている。

遮断試験は電流 5 ~ 500 A の範囲で行った。小電流遮断時のオシログラム例を図 3 に示す。同一の回路条件で副振動回路がない場合、遮断時間は約 90 ms であり、副振動回路によって遮断時間が 21.5 ms にまで短縮されていることが示されている。

図3 小電流遮断試験オシログラム例

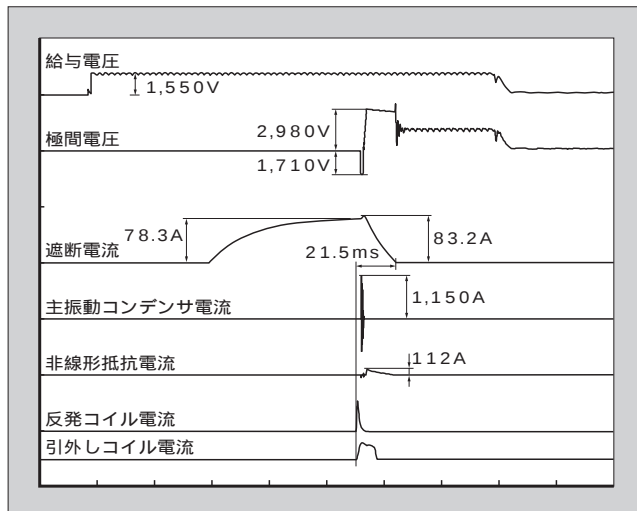
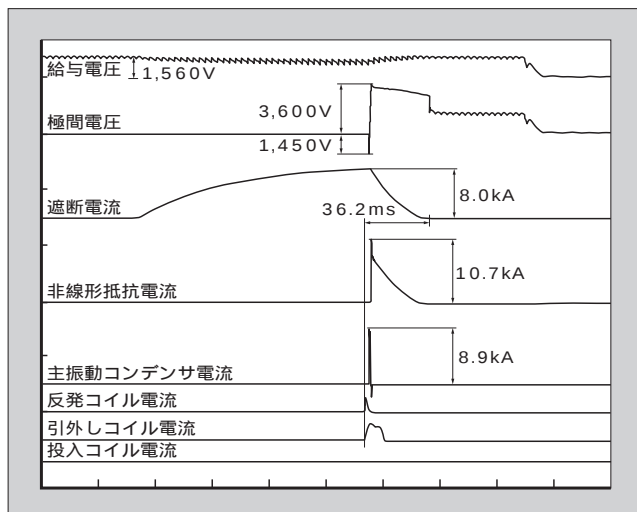


図4 アークエネルギーに関する短絡試験オシログラム例

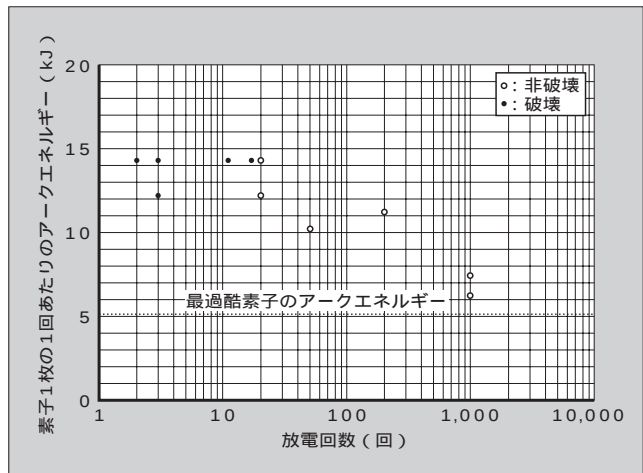


3.3 消弧装置の責務と寿命

消弧装置の責務はGTO遮断器の場合と同様であり、これに関してはJEC-7153に従った検証を行った。規格では標準動作責務「O-10秒-CO」において電流目盛で決まる最大エネルギーを消費させ、動作開始電圧の変化率が10%以下であることが規定されている。オシログラム例を図4に示す。この例では規格で決められた最大エネルギーの103%に相当するエネルギーを消費させている。動作開始電圧の変化率は1%以下であり、消弧装置の特性にはほとんど変化がないことを確認している。

消弧装置に関しては寿命に関する検証項目がある。JEC-7153には参考試験として「消弧装置放電耐量試験」として規定されている。すなわち、1回で消費させるエネルギー量とそれを何回消費できるかを検証する試験である。消弧装置は酸化亜鉛素子を多数枚並列接続して構成されているが、1枚で代表して検証してもよいことが規格で認められている。しかし、わずかではあるが素子ごとに動作開始電圧にばらつきがあるため、最も責務が過酷となる素子のエ

図5 消弧装置の放電寿命試験



ネルギー量をシミュレーションによって確認し、検証試験を行った。試験結果を図5に示す。この図から分かるように、最大エネルギーを1,000回以上処理することができる。

4 特殊試験

装置の能力の限界、信頼性を確認するために下記の試験を実施した。

(1) 短絡遮断寿命試験

真空バルブの短絡遮断寿命を検証する試験であり、突進率 $3 \times 10^6 \text{ A/s}$ の短絡電流に対して100回の遮断試験を行った。遮断試験後の接点消耗量はごくわずかであり、100回以上の遮断寿命を有していることを確認した。

(2) アーク電流通電試験

万が一、真空バルブ中で大電流アークが継続した場合に、真空バルブの破壊などが生じないかの試験を行った。真空バルブを開極し、主振動電流を注入しない状態で35kAの電流を80ms以上通電した。その結果、真空バルブの破壊、その他の不具合が生じず、上記電流通電後も正常に遮断が可能であることを確認した。

5 (財)鉄道総合技術研究所における評価試験

本装置の評価試験を(財)鉄道総合技術研究所にて実施した。試験状況を図6に示す。項目としては小電流遮断試験、短絡試験(突進率 $3 \times 10^6 \text{ A/s}$ における試験)、および高突進率の電流による過責務試験を実施した。短絡試験のオシログラム例を図7に示す。社内での検証試験結果と同等の遮断電流最大値16.9kAで遮断に成功している。

限界性能を確認する目的で推定短絡電流と突進率がそれぞれ75kA、 $7.5 \times 10^6 \text{ A/s}$ と100kA、 $10 \times 10^6 \text{ A/s}$ の2種類の回路条件において、前者の条件では目盛12kA選択性あり、後者の条件では目盛6kA選択性ありの条件で試験を実施した。両条件とも遮断に成功し、定格遮断容量以上の性能があると評価された。

図6 試験状況

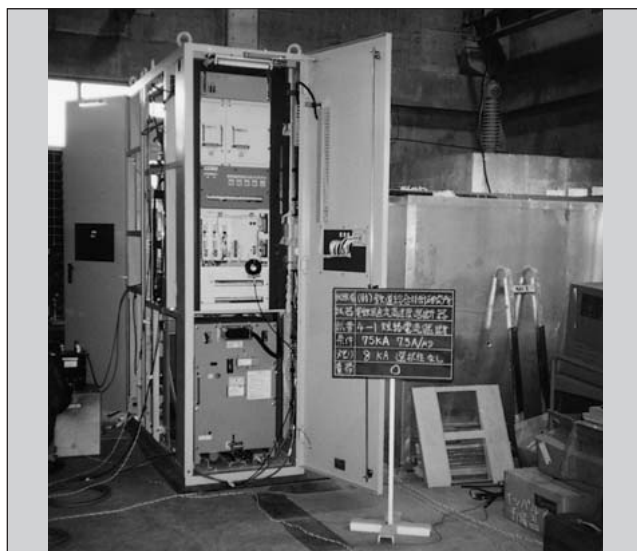
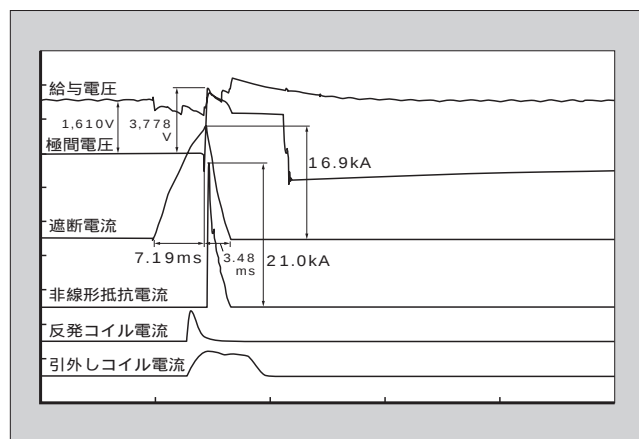


図7 短絡試験オシログラム例〔(財)鉄道総合技術研究所における試験〕



⑥ 受入試験の考え方

受入試験は品質を満足し、なおかつ試験の効率化を助案して最大公約数の試験項目とする必要がある。②章と同様に JEC-7153 に規定されている項目だけでなく、各規格、本装置の特性を考慮に入れて試験項目を抽出した。特に本装置が遮断性能を十分に発揮するためには、過電流検出から決められたタイミングに従って各構成要素が確実に動作する必要があり、その点に重点をおいている。受入試験項

表2 受入試験項目一覧

試験項目	試験細目	準拠、参考規格
構造検査	構造検査	JEC-7153 JEC-7152 社内規定
	コイル抵抗値測定 (投入、電磁反発、引外し)	
	絶縁抵抗測定	
消弧装置特性試験	JEC-7153による	JEC-7153
商用周波耐電圧試験	JEC-7153による	JEC-7153
主回路抵抗測定	社内規定による	社内規定
保護特性および動作試験	電流検出器出力確認試験	JEC-7153 社内規定
	目盛試験	
	逆流検出試験	
開閉試験	開閉特性試験	JEC-7153 JEC-7152 その他
	手動開閉試験	
	主回路抵抗測定	
	各信号のタイミング確認	
	主振動電流波形の測定	
制御電源装置入力 の測定	制御電源の負担測定	JEC-7153 社内規定
	操作電源の負担測定	
	操作電源による充電時間測定	

目の一覧を表2に示す。

⑦ あとがき

新形直流高速度遮断器の性能検証の考え方、検証試験結果について述べた。本装置は規格を上回る実力を有しており、省保守化、省スペース化、環境適化の流れのなかで次世代に向けて普及していくものと期待している。

最後に、本装置の評価試験を実施いただいた(財)鉄道総合技術研究所に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 昆野康二ほか：直流遮断器の小電流遮断に関する検討，平成9年電気学会全国大会，No.1599（1997）
- (2) 昆野康二ほか：直流遮断器用エネルギー吸収装置の開発，平成9年電気学会全国大会，No.1601（1997）
- (3) 昆野康二ほか：直流遮断器の電流遮断特性，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.617（1997）
- (4) 水間豊ほか：新形直流高速度遮断器の製品化，平成10年電気学会開閉保護研究会資料，SP-98-44（1998）

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型軽量化
- (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と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

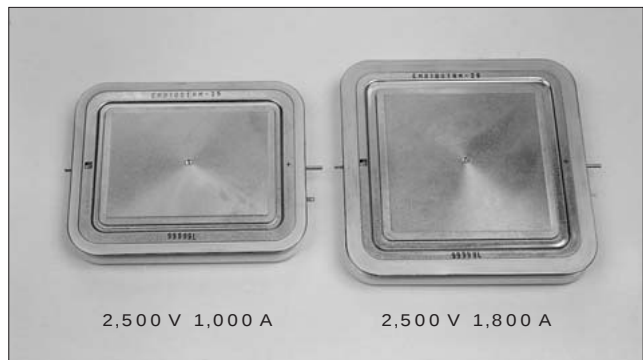
鉄道車両システムにおいて，もはやインバータによる交流電動機駆動方式は常識である。従来，GTO（Gate Turn-Off Thyristor）が採用されていたが，富士電機はGTOが主流の時代にGTOの性能限界を予測し，次世代素子の開発に着手した。フィージビリティスタディのなかで各種機能素子を検討した結果，次世代素子としてIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を選択し開発を推進した。その結果，鉄道車両用大形素子として下記の素子を早期に製品化し適用することができた。

- 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，機器の小型軽量化が図れる。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

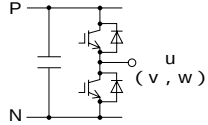
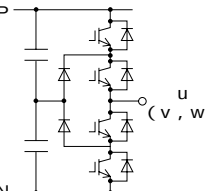
可変速駆動システムの開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ドライブシステムグループ開発マネージャー。



星野 栄雄

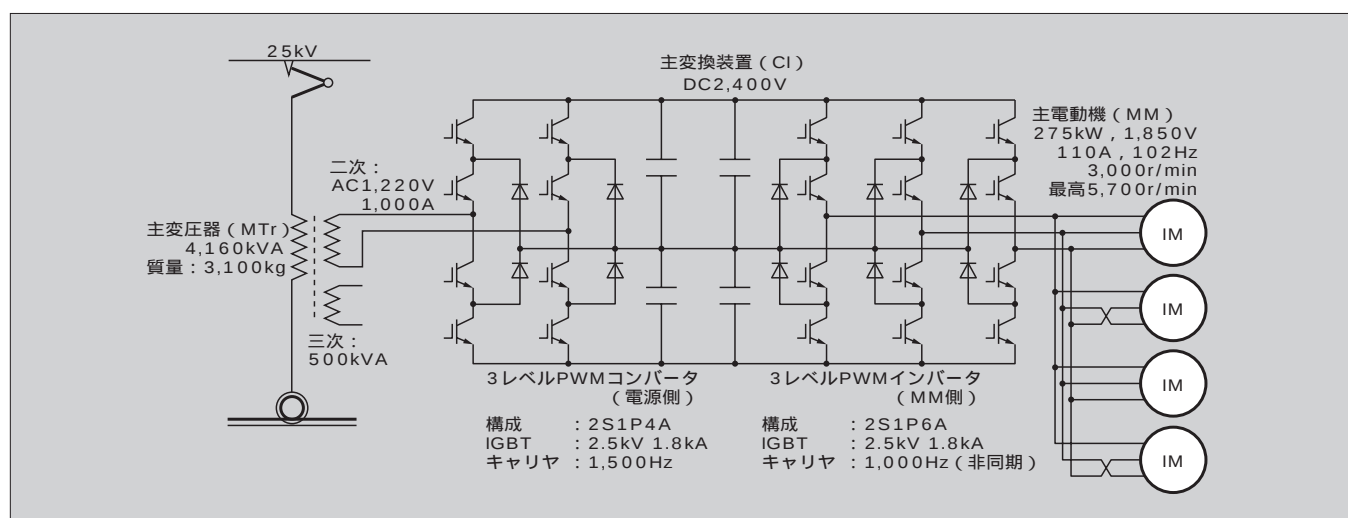
鉄道車両用電気機器の開発・設計に従事。現在，神戸工場制御設計部主査。

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に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を得られる。

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。

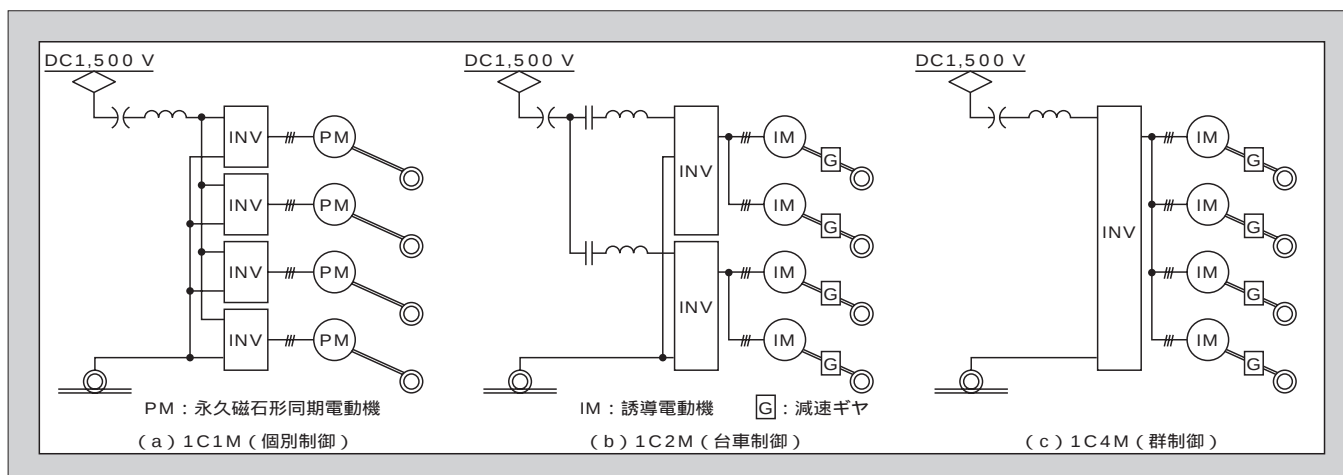
詳細は別稿（新幹線車両用主回路システム）で紹介するが、本素子により高速化に対応した機器（主変換装置、主変圧器、主電動機）の小形軽量化、騒音・振動の低減による快適性向上、主変換装置の信頼性向上による安全性向上、ライフサイクルコストの低減が図られたと自負している。

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

DC1,500 V 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。

1,800 V 素子を 3 レベル構成にする方式と，3,300 V 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 3,300 V 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。

在来線交流電車用主回路システムは，新幹線用主回路システムと在来線直流電車用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

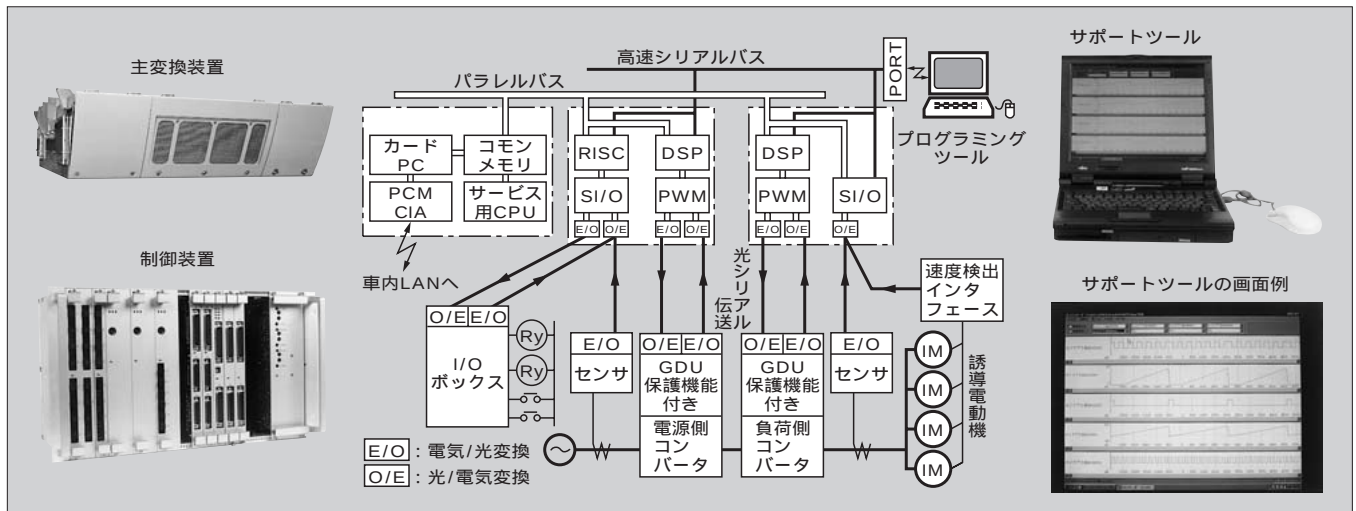
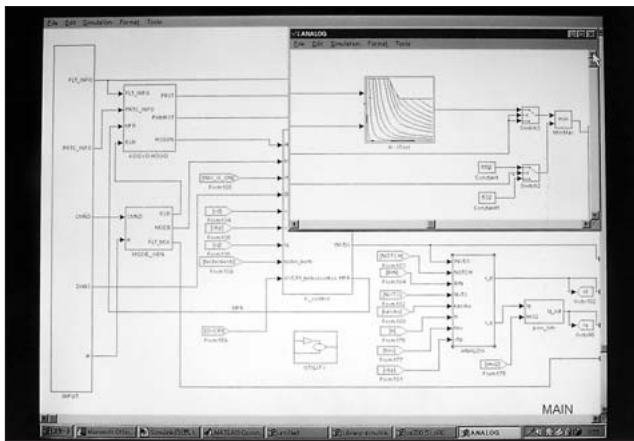


図5 制御プログラムの例



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。

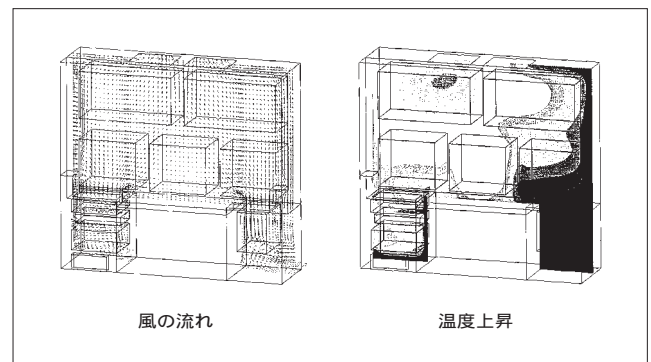
PWMインバータ制御（モータ側）では近年ベクトル制御が一般化し1C1M制御から始まったベクトル制御は適用範囲が広がり現在は1C2M制御、1C4M制御も実現された。

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。

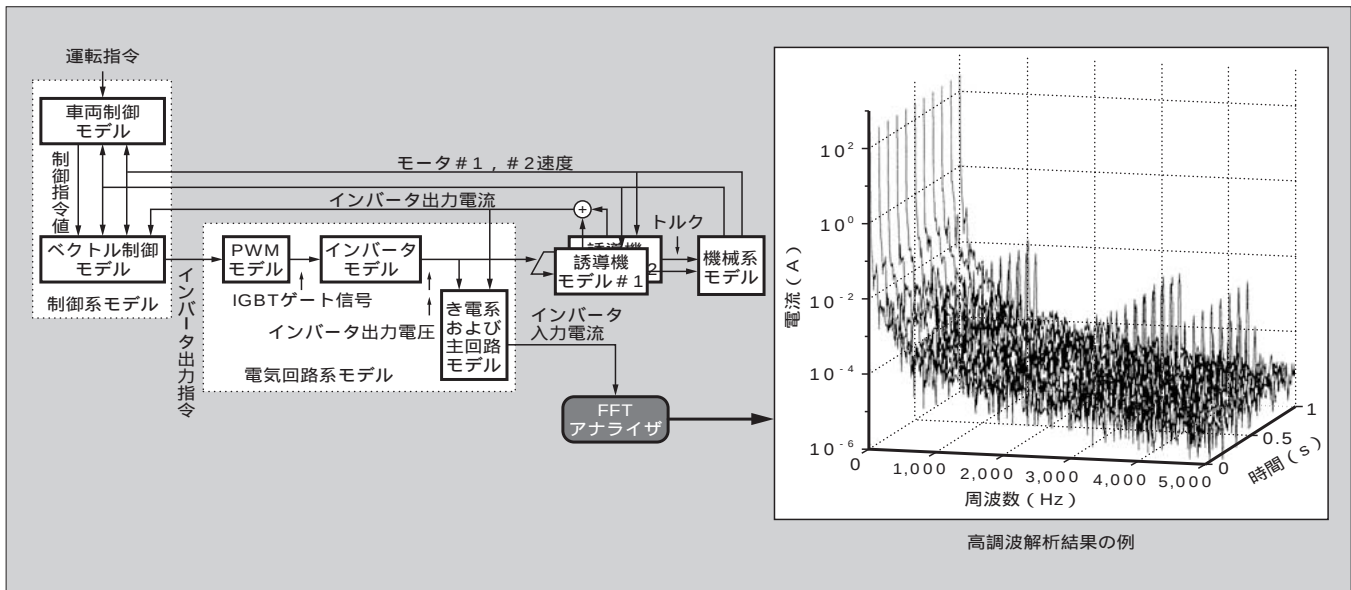
駆動電動機が有すべき性能は、乗客の乗り心地を良くするための低騒音化、高速度対応のための小形軽量化、省エネルギー化のための高効率化の3点である。

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の水冷却、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

DC1,500V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用の例は別稿（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。

新幹線車両用主回路システム

井上 亮二 (いのうえ りょうじ)

土橋 栄喜 (つちはし ひでのぶ)

大澤 千春 (おおさわ ちはる)

① まえがき

新幹線車両用主回路システムは、東海道新幹線の1964年開業当初から運用されている0系車両に始まり、安全性、信頼性、経済性に対する要求はもちろんのこと、その後の高速化、省エネルギー化、省メンテナンス化、乗り心地・快適性の向上、環境問題への対応といった時代の要請にこたえながら、技術革新を実現してきた(図1)。直流電動機に代えて交流誘導電動機駆動方式を採用することにより、主回路電気品の小形軽量化、主電動機の無整流子化による高速化・保守性への対応、主回路の無接点化による保守の大幅低減、交流回生ブレーキ方式の採用による省エネルギー化と経済性の向上によって、鉄道システムの発展に貢献してきた。その技術進歩は、主電動機を制御する変換器の主

回路用パワーデバイスの高性能・高耐圧・大容量化とそれらを制御するマイクロプロセッサの高性能・高速化といったパワーエレクトロニクス技術のめざましい進歩に負うところが非常に大きい。今後も、より快適で安全性・信頼性・経済性の高いシステムが追求されていくであろう。

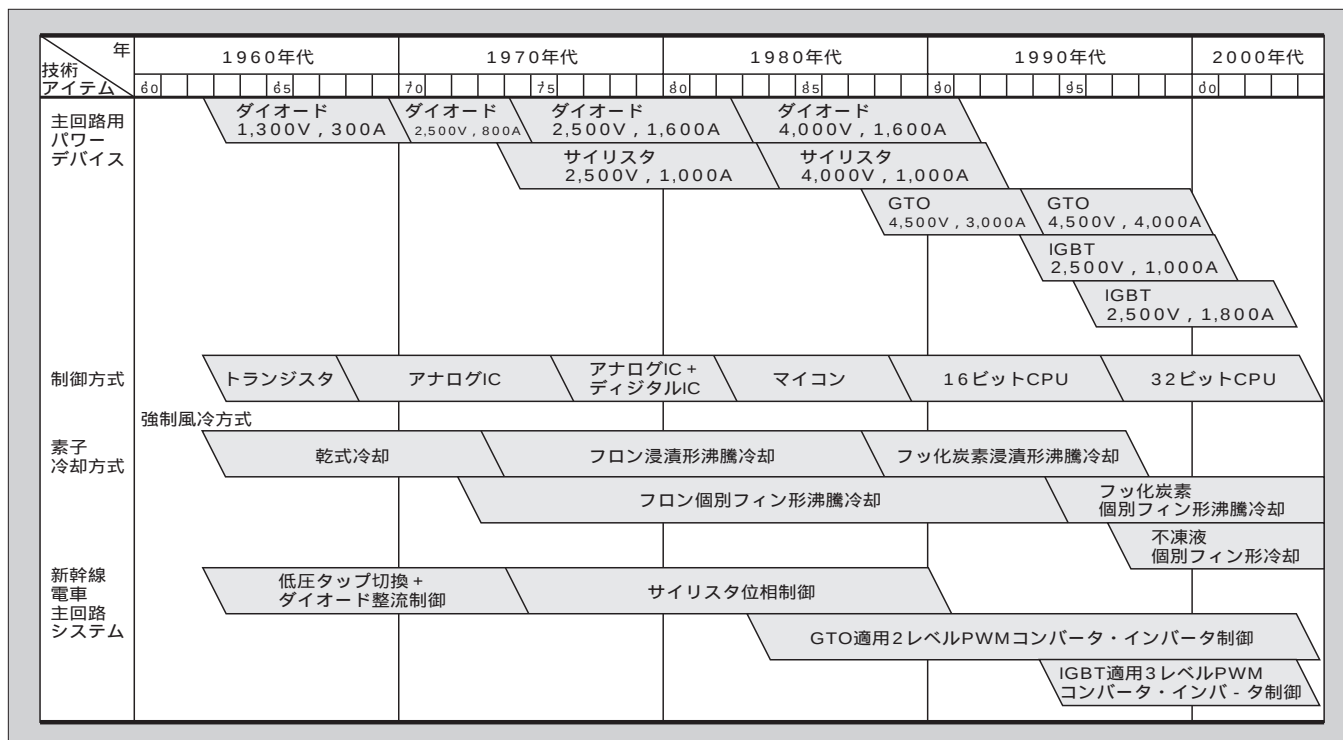
以下に新幹線車両用主回路システムの技術変遷における現状と主回路システム電気品の今後の技術動向について紹介する。

② 主回路システム

2.1 主回路システムの変遷

交流25kV電の新幹線車両において、東海道新幹線開業時(1964年)から運用されている初代車両である0系

図1 新幹線車両用主回路システム技術の変遷



井上 亮二

電気鉄道車両用電気品の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JR担当課長。



土橋 栄喜

鉄道車両用パワーエレクトロニクス応用機器の開発・設計に従事。現在、神戸工場制御設計部。



大澤 千春

パワーエレクトロニクス制御システムおよびその応用製品の研究開発に従事。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。

図2 300系新幹線車両用主回路システム

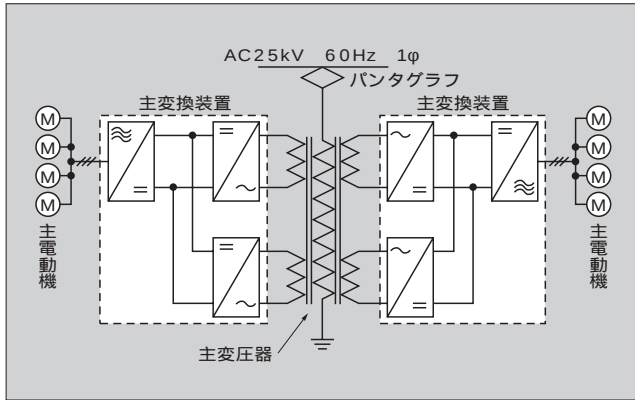


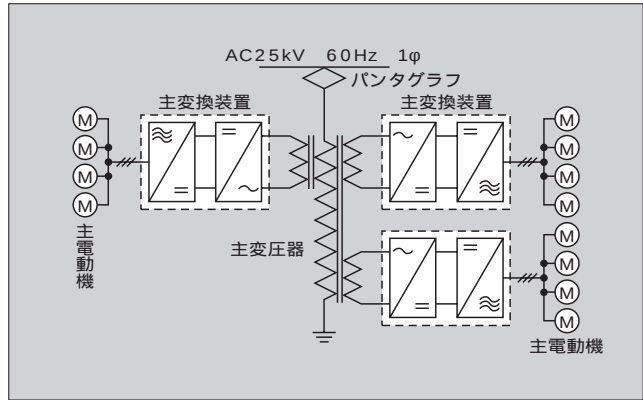
図3 700系新幹線車両の外観（写真提供：JR東海）



車両は、主変圧器二次側のタップ切換により交流電圧を制御し、ダイオード整流器により直流電動機を駆動する方式で、ブレーキは抵抗器で制動エネルギーを消費する発電ブレーキ方式であった。その後、パワーデバイスの進歩により、ダイオード整流器からサイリスタ整流器へと移行し、1981年に開業した東北・上越新幹線用車両として開発された200系車両には、主変圧器二次巻線を不等6分割とした、サイリスタ整流器によるパーニア位相制御方式が採用された。さらに、1985年に営業運用後約20年を経た東海道・山陽新幹線用の0系車両の後継車両として、また日本国有鉄道（国鉄）最後の新幹線車両として開発された100系車両には、サイリスタの高耐圧・大電流化（4,000V、1,000A）により実現された主変圧器二次巻線を4等分割した連続位相制御方式が採用された。

1980年代後半に新幹線車両の高速化の研究が進められ、そのなかで、騒音、振動などの環境対策および高速安定走行のために主回路システムには大容量化・小形軽量化が要求された。これらの要求を実現するためにGTO（Gate Turn-Off Thyristor）を適用したPWM（Pulse Width Modulation）制御コンバータ・インバータによる誘導電動機駆動方式と交流回生ブレーキ方式が開発され、国鉄分割民

図4 700系新幹線車両用主回路システム



営化（1987年）後の東海旅客鉄道（株）（JR東海）にて1990年に開発された300系車両で新幹線車両として初めて実用化された。

300系車両の主回路システムは、図2に示すように主変圧器二次4分割で4,500V、3,000A GTOを適用した2レベルコンバータが4台接続され、2台のコンバータ出力を並列接続し、フィルタコンデンサを有する直流回路を介して、GTO VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）インバータに電力を供給し、並列接続された4台の誘導電動機をVVVF駆動している。PWMコンバータ方式により、力率1の制御が可能になるとともに、高調波電流が各コンバータ間でのPWMキャリア位相差運転により、サイリスタ位相制御方式に比べ大幅に低減された。

2.2 主回路システムの現状

300系車両の実用化以降、新幹線主回路システムとしてGTOの2レベルコンバータ・インバータ方式が各JR新幹線車両に適用されてきた。さらなる高速化のために主回路システムの大容量化が要求され、JR東海が高速走行試験用として1995年に開発した300X系試験車両には、高速走行性能を満足するために主電動機が大容量化され、4,500V、4,000AのGTOが適用された。

このように、新幹線車両用主回路システムの技術革新は、主回路素子つまりパワーデバイスの高性能化・大容量化技術によるところが非常に大きい。近年では、GTOに比べより高速スイッチングが可能なパワーデバイスであるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）の高耐圧・大電流デバイスが開発され、新幹線車両用主回路システムへの適用が可能となり、実用化されている。

新幹線車両の質的向上をめざすために、PWM制御の波形ひずみの影響による主変圧器、主電動機の電磁騒音の低減が課題とされ、富士電機は、1996年、JR東海と共同で300系車両用に2,500V、1,000A 平形IGBTを適用した3レベル主変換装置を開発し、世界で初めて本線走行試験を行い、波形改善効果による電磁騒音の低減と高調波の抑制が確認された。

その成果をベースとして、JR東海の次期主力新幹線車両として700系車両（図3）が1997年に開発された。700

注 交流から直流に電力を変換するシステムとしては、順変換器、電源側コンバータなどが適正な技術用語であるが、本稿では慣用に従い、単に「コンバータ」と記す。

系主回路システムは、4両で1ユニットを構成しており、図4に示すように主変圧器二次巻線を3分割して3台のIGBT適用3レベルコンバータが接続され、フィルタコンデンサを有する直流回路を介して、IGBT適用3レベルVVVFインバータに電力を供給し、並列接続された4台の誘導電動機を駆動している。

③ 主回路電気品

3.1 主回路システムの大容量化・小形軽量化

新幹線車両における主回路システムの課題は、高速安定走行のために大容量化と小形軽量化の相反する要求を満たすことにある。これまでに述べてきたように大容量化と小形軽量化を両立させて達成するために、1990年代にPWMコンバータ・インバータシステムが実用化され、さらなる大容量化と小形軽量化および機能・性能向上が図られている。

新幹線車両駆動用主回路システムを構成する主変圧器、主変換装置（PWMコンバータ・インバータ）、制御装置および主電動機のそれぞれの特長、小形軽量化施策、低騒音化施策などについて以下に説明する。

3.2 主変圧器

主変圧器は、二次多分割巻線と三次巻線を有し、パンタグラフにて集電した電力を降圧して、車両を駆動制御する主回路システムと、補助電源や空調装置などの補助回路システムへ供給する。

新幹線車両用主変圧器に、小形軽量化が要求されるのは当然であるが、一般的には車体床下にぎ装されるため、寸法の制約、特に高さ寸法が厳しい。

また、新幹線車両に適用されるPWMコンバータ用主変圧器としては、PWM制御の安定性および高調波抑制の面から以下に記すような特性・設計を考慮しなければならない。

(1) 二次巻線の高インダクタンス化

PWM制御にて発生する高調波を抑制するためにコンバータに適用されるパワーデバイスのスイッチング特性を考慮し、高インダクタンス特性とする。

(2) 二次巻線間の疎結合化

主変圧器二次の多分割巻線に接続されるPWMコンバータ間で相互干渉を発生させないように、巻線間が互いに疎結合となるような巻線配置にする。

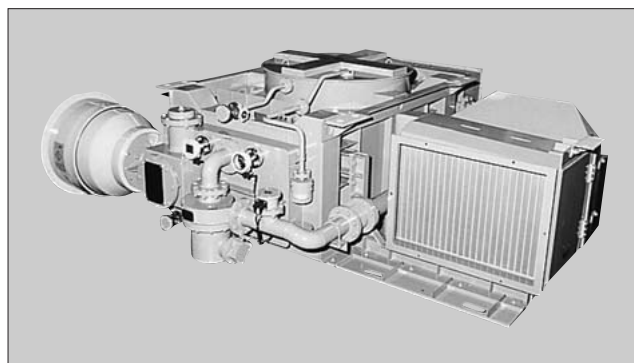
(3) 高調波損失の考慮

PWMコンバータにより発生する高調波電流の発生損失を考慮する。

PWMコンバータ用主変圧器二次多分割巻線のリアクタンスマトリックスの所要値を確保するために、最適なコイル配置にするとともにギャップ鉄心をコイル間に設置している。

また、小形軽量化のために、編成内主回路ユニット数の集約に伴う主変圧器の集約・大容量化により編成内主

図5 700系新幹線電車（量産車）用TTM3A形主変圧器



A M182044

変圧器合計質量の低減を図り、また、主回路システムにIGBT3レベルPWM方式を採用して高調波損失を低減させている。さらに、以下に記す主変圧器新技術により小形軽量化を図っている。

- (1) アルミコイル使用
- (2) コイル素線絶縁へのポリイミドフィルム使用
- (3) ガラスエポキシ材使用

これらの軽量化技術を盛り込んだ700系量産車用TTM3A形主変圧器の外観を図5に示す。

また、主変圧器騒音としては、GTOによる2レベルPWMコンバータにおいては、キャリア周波数が420～450Hz程度と低いため、低次高調波成分による主変圧器電磁騒音がやや大きく、また人の聴感上から耳触りと感じられる1～2kHz付近に騒音周波数成分のピークが現れる。そのため、電磁騒音低減施策としては、IGBTによるキャリア周波数の高周波化と3レベルPWM化による波形改善により、低次高調波成分を低減し、1～2kHz付近の騒音周波数成分を抑制することにより大幅な電磁騒音を低減し、その効果は確認されている。

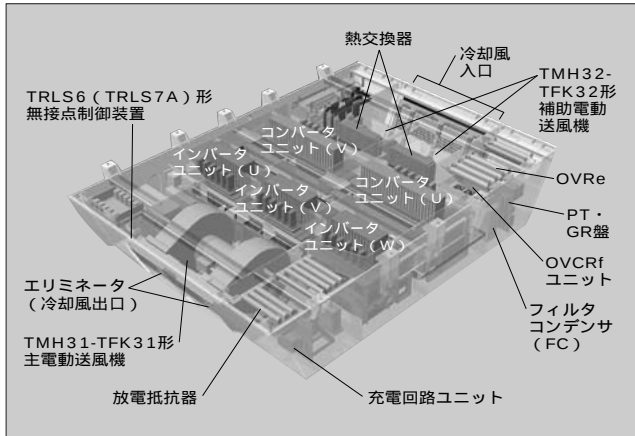
3.3 主変換装置

主変換装置は、PWMコンバータとVVVFインバータから構成され、インバータには主電動機4台を並列接続し、コンバータおよびインバータ制御を行う制御装置も内蔵されている。

従来の4,500V、3,000～4,000AクラスのGTOを適用した主変換装置の場合には、GTOのスイッチング性能および損失面からスイッチング周波数は500Hz程度以上には高くできないため、前述のように入出力波形ひずみの影響による主変換装置（コンバータ、インバータ）の電源である主変圧器および負荷である主電動機の電磁騒音の低減が課題となっていた。

IGBTの高耐圧化・大電流化により、車両用主変換装置への適用が可能となった。IGBTはGTOに比べて、スイッチング性能および損失面において優れており、新幹線用主変換装置に適用することにより、次のようなメリットを実現することができた。IGBTは700系車両に本格的に採用され、今後の主流になりつつある。700系量産車用TCI2A形主変換装置の外観を図6に示す。

図6 700系新幹線車両(量産車)用TCI2A形主変換装置構造



(1) 低騒音化

3レベルPWM方式で高周波スイッチングを採用したことにより、主回路の入出力高調波が低減し、主変圧器および主電動機の騒音の低減が達成された。

(2) 高効率化

ゲート駆動回路およびゲート電源の小形化、スナバ回路の低損失化・簡素化、アノードリアクトルの省略などにより、装置の変換効率を従来の約90%から約94%に高めることができた。

(3) 小形軽量化

大容量平形IGBT(2,500V, 1,800A)の採用により、コンバータ、インバータともに素子の1並列接続構成が可能となり、IGBTスタック構造の簡素化を図るとともにパワーユニット全体構造のコンパクト化を図った。さらに冷媒にフッ化炭素を使用し、平形IGBTの両面冷却構造に適した個別フィン沸騰冷却強制通風方式と組み合わせることにより、装置の小形軽量化を達成した。

(4) 高信頼性化

従来のGTO回路では異常な過電流時の保護動作として回路内の全GTOを一斉点弧するが、IGBTでは、その特性を利用して、異常な過電流時にはコレクタ電圧を検出してゲート遮断による全アーム一斉消弧を行う短絡保護回路(図7)をゲートアンプに内蔵し、装置の高信頼性を確保した。

(5) 省メンテナンス化

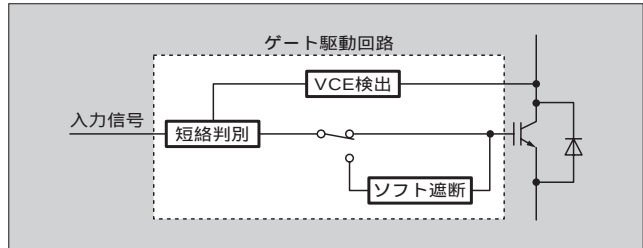
機器室内密閉循環冷却方式と車体側面のみで日常保守できる側点検方式の採用により、防じん・防水性を向上させ、信頼性の向上と省メンテナンス化を図った。

3.4 制御装置

3.4.1 コンバータ制御

コンバータ制御は、直流定電圧制御、交流電流制御、および中性点電位制御に大きく分けられる。特に3レベル変換器では、運転条件によっては正側のフィルタコンデンサと負側のフィルタコンデンサを還流する電流に差が生じると中性点電位が変動し、特定の素子に過大な電圧が印加されるおそれがあるため、中性点電位制御はさまざまな方式

図7 短絡保護機能内蔵ゲートアンプ回路構成



が提案されている。富士電機は電力や電流の極性に依存しない、主素子のスイッチングの休止期間の制御による中性点電位制御を開発し、その有効性を実機組合せ試験で確認した。

本方式は、正負のフィルタコンデンサの充放電電荷量を直接制御しているため、中性点電位の制御応答の高速化が可能となり、中性点電位の変動幅を低減することができる。さらに、コンバータの扱う電力や交流電流の極性による制御系の切替動作を必要としないため、交流電流のゼロクロス付近でも安定した制御を実現できる。

3.4.2 インバータ制御

安定したトルク出力、空転・滑走時の高粘着制御を実現するためには、主電動機の力行・回生トルクを高速応答・高精度で制御する必要がある。富士電機は、産業分野での豊富な実績をもとに、従来はベクトル制御の適用が困難であるとされていた1インバータ4モータ制御においても良好な制御特性を発揮する一次磁束基準形ベクトル制御を実用化した。以下に本制御方式の概要を述べる。

(1) 1インバータ4モータ制御への適用

従来のすべり周波数形ベクトル制御は、1インバータ1モータ制御において、空間ベクトルとして互いに直交関係にある励磁電流成分とトルク電流成分を誘導電動機の等価モデルとすべり周波数に基づいて、独立に制御する方式である。これに対して、一般的に新幹線車両の主回路システムは、1インバータ4モータ制御方式であり、これに対応するために富士電機は主電動機の並列台数に関係なく、共通の状態量である主電動機的一次磁束(インバータ出力電圧に相当する)を基準にして制御を行っている。

(2) 1パルスモード制御

車両用主電動機駆動制御では、インバータの電圧利用率が最大となる1パルスモード運転を含むため、全速度領域でPWMを行うために電圧制御余裕が必要となる従来のベクトル制御をそのまま適用することはできない。これに対して、一次磁束基準形ベクトル制御は、1パルス領域で励磁分とトルク分の二つのベクトル成分の関係を保持しながら、そのときの皮相電力(電圧利用率)が最大となるように電圧ベクトルを制御する。これにより、1パルスモードにおいても、ベクトル制御の本質を損なうことなく優れた特性を実現することができる。

(3) 主電動機二次抵抗の温度変動補償

主電動機二次抵抗は運転中の温度変化により大きく変化するが、ベクトル制御を行ううえでモデルの二次抵抗との

図8 加減速特性オシログラム

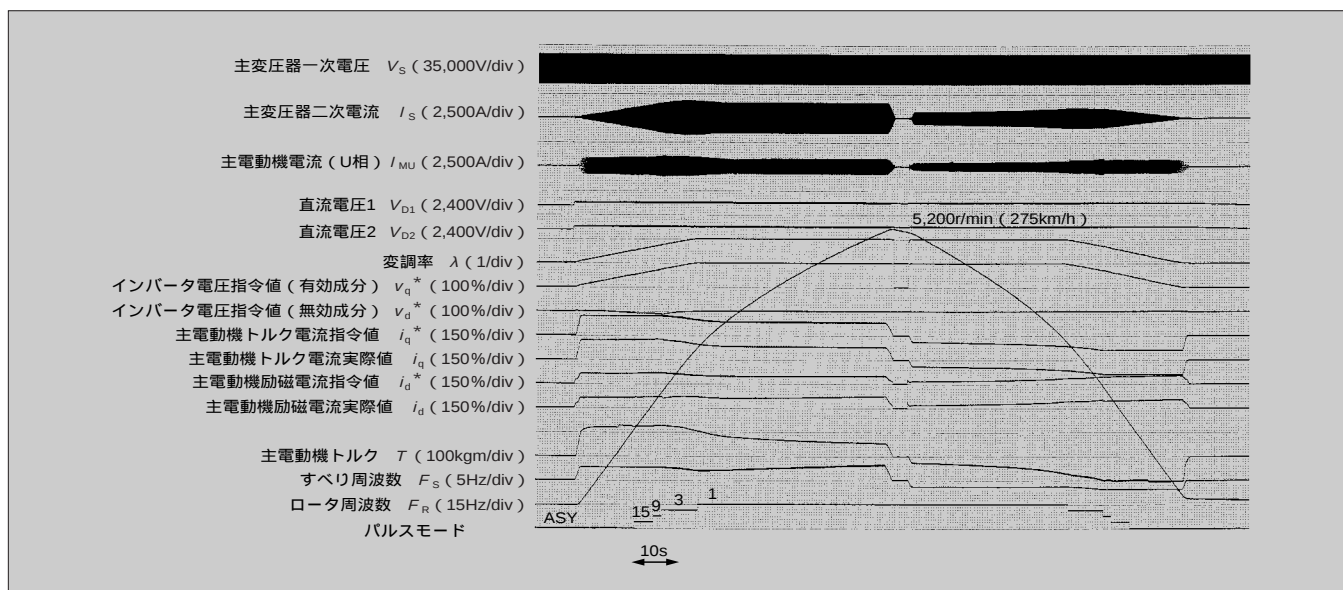


図9 E2系, E3系新幹線車両用 MT205 形主電動機



乖離 (かいいり) が大きくなると電圧ベクトル管理を正しく行うことが困難となる。一次磁束基準形ベクトル制御では、二次抵抗誤差が、電動機誘起電圧の無効分として現れるため、これをゼロとするようにすべり周波数を補正すれば、その補正量は二次抵抗誤差に相当する、すなわち主電動機二次抵抗の温度変動を補償することになる。

富士電機独自の制御方式を適用した制御装置と新幹線電車両主回路電気品との組合せ試験にて、性能検証した加減速特性オシログラムを図8に示す。

3.5 主電動機

新幹線車両用誘導電動機 (図9) の軽量化には、鉄心体積の削減が有効であり、その場合は磁束量を減少せざるを得ないので必要なトルクを得るための主電動機電流は大きくなる。したがって主電動機の軽量化はインバータの電流容量、すなわちインバータ用パワーデバイスの電流容量と V/f パターン (電圧/周波数特性) を併せて検討し、システムの最適化を図っている。

さらに構造設計において、以下に記す主電動機の小形軽

量化施策を実施し、経済性を考慮した実用化レベルで最軽量化が達成されているといえる。

- (1) フレームレス構造
- (2) アルミブラケット構造
- (3) 軸受小径化

軸受には電食防止のために外輪周上に絶縁皮膜をもつ絶縁軸受や長寿命グリースを採用し、保守性の向上を図っている。また、IGBT インバータ駆動用主電動機においては、高周波スイッチングに対応した巻線構造と堅ろうな回転子構造設計としている。

VVVF インバータ駆動時の主電動機騒音については、その発生要因として次の二つがある。

- (1) 低速走行時のインバータパルス切替時に発生する音色変化が人に与える耳障り感
- (2) インバータ出力電圧の低次高周波成分による電磁力モードと主電動機固定子の固有振動数とが共振することによって発生する電磁騒音

これらの耳障り感や電磁騒音の低減には、IGBT の高周波スイッチング性能を生かし、インバータ非同期 PWM 領域を高速域まで拡大することにより同期 PWM モードでの音色変化が抑制され、耳障り感をなくすることができる。さらに3レベルPWM化により低次高調波成分が抑制され、電磁騒音の低減が可能となる。

④ 主回路システムの将来動向

パワーデバイスの高機能・高性能・大容量化の進歩とともに新幹線電車両主回路システムは進展してきた。車両用主回路システムのパワーデバイスの主流となりつつある IGBT は、さらに高周波化され、より一層の低騒音化、高調波低減に貢献すると期待される。また、IGBT の高耐圧化が進められ、新幹線電車両においてもパワーデバイスの少ない2レベル制御の主変換装置と、冷却性能向上および環境

対策としての水冷却方式が実用化されるであろう。

⑤ あとがき

新幹線車両用主回路システムの技術開発経緯と主回路電気品の概要および今後の動向について紹介した。

今後ともパワーエレクトロニクス技術の有力な応用分野の一つとして、将来を見据えた新幹線車両用主回路システムの開発を推進していく所存である。

最後に、これまでご支援、ご指導、ご協力を賜った関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 上野雅之ほか：700系新幹線電車用主変換装置の開発，鉄道サイバネティクス国内シンポジウム，Vol.34，p.175-178（1997）
- (2) 萩原善泰ほか：700系新幹線電車用主回路システムの開発，鉄道サイバネティクス国内シンポジウム，Vol.35，p.147-150（1998）
- (3) 大澤千春ほか：3レベル電力変換器の中性点電位制御方式，平成8年電気学会産業応用部門全国大会，p.171-174（1996）
- (4) 奥山吉彦・森安正司：PWMインバータ駆動誘導電動機の電磁騒音，平成10年電気学会全国大会，Vol.5，p.87-88（1998）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
変圧器の逆励磁エネルギーを用いたフォワードコンバータの零電圧スイッチング	富士電機総合研究所 "	片山 靖一 黒木 一男	電気学会半導体電力変換研究会（1999-1）
An Investigation of Small Capacitive Current Breaking Performance Using an Analysis of the Restoring Breakdown Voltage	富士電機総合研究所 変電システム製作所 " 富士電機総合研究所 "	杉山 修一 佐藤 賢 堤 睦生 恩地 俊行 岩井 弘美	International Conference on Electrical Engineering（1998-7）
The R&D Trends of Micro-Actuator Technology	富士電機総合研究所	中澤 治雄	第4回国際マイクロマシンシンポジウム（1998-10）
Investigation of Flat-Pack IGBT Reliability	松 本 工 場 富士電機総合研究所 " 生産・システム企画	桐畑 文明 高橋 良和 脇本 博樹 新野 文達	IEEE-IAS（1998-10）
Development of Advanced PAFC Stack for 1st. commercial-type 100 kW Plant	技 術 開 発 室 " " "	花澤 真人 瀬谷 彰利 杉山 智弘 山本 修	Fuel Cell Seminar（1998-11）
Development and Business Promoting of On-site PAFC Power Plant at Fuji Electric	技 術 開 発 室 "	鴨下 友義 原嶋 孝一	
Propagation of Creepage Discharge on Solid Insulator in Insulating Oil(3)	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 宮本 昌広	ACED 98（Asia Conference on Electrical Discharge）（1998-11）
Micro-parts Conveyance Unit	富士電機総合研究所 " " " "	中澤 治雄 渡辺 泰正 森田 修 江戸 雅晴 米澤 栄一	IWMF 98（International Workshop on Microfactories）（1998-12）
Processes and Devices for SiC	富士電機総合研究所 " "	上野 勝典 辻 崇 浅井 隆一	US-Japan Conference on Wide Band Gap Semiconductor Technology for Next Generation Electron and Photonic Devices（1998-12）
Analysis on The Self-Clamp Phenomena of IGBTs	松 本 工 場 "	武井 学 藤平 龍彦	ISPSD 99（International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC）（1998-12）
The Influence Heat Treatments on Polymer Electrolyte Solution for Fuel Cell	富士電機総合研究所 "	人見美也子 ト部 恭一	The Gordon Research Conference on Electrochemistry（1999-1）

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である。図 1 に 5030 系電

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					

図 1 5030 系電車の外観



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

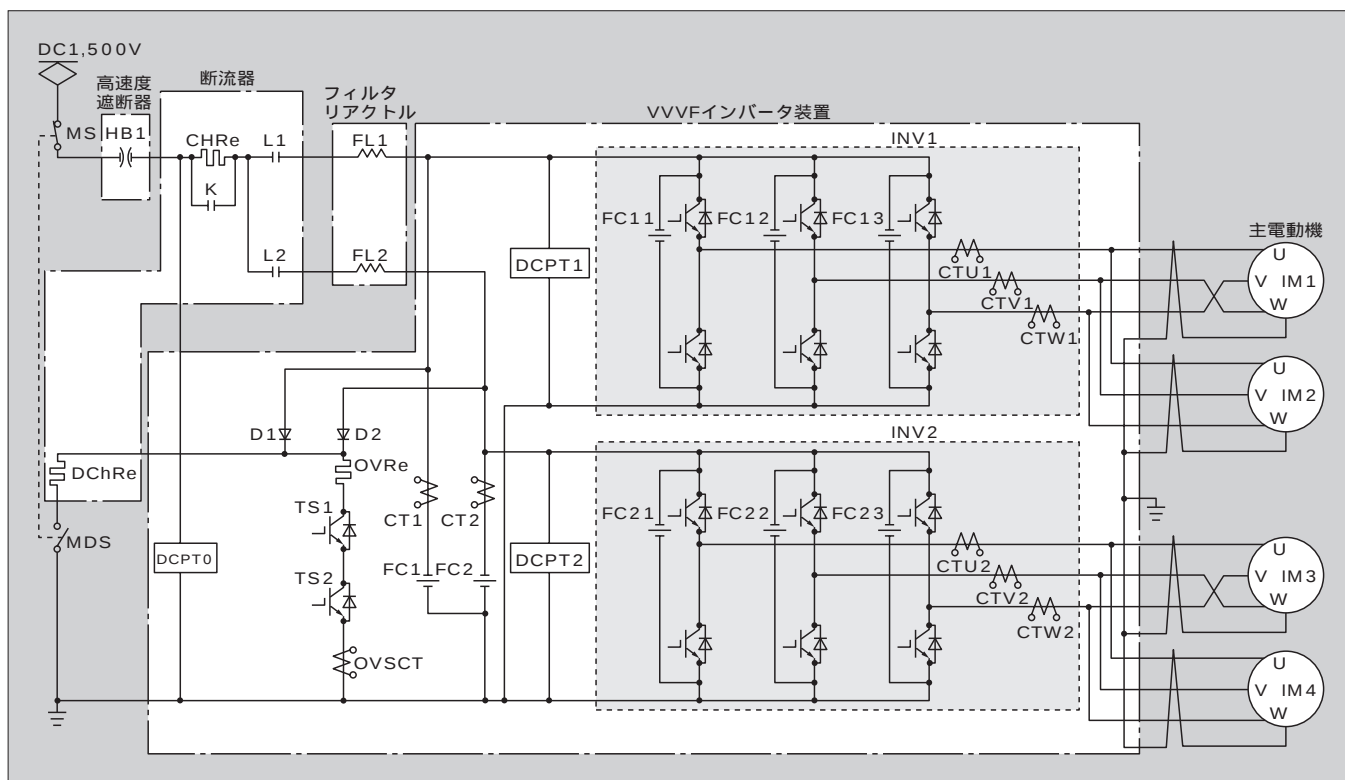
パワーエレクトロニクス応用装置、車両駆動システムの開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ドライブシステムグループ主任技師。



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

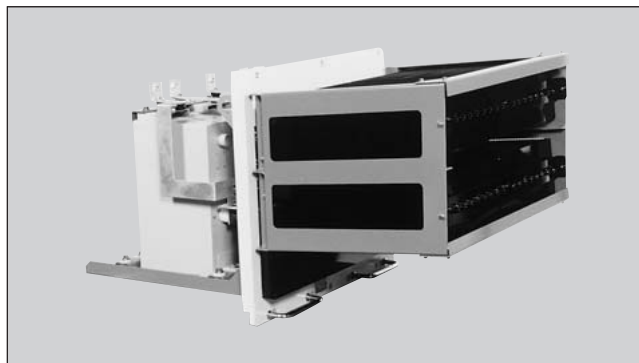
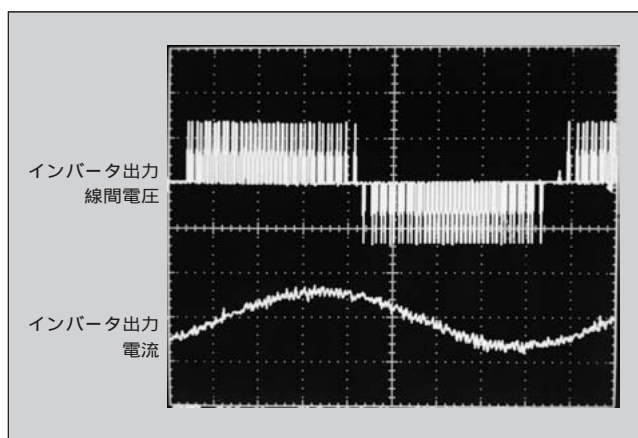


表2 インバータユニットの仕様

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

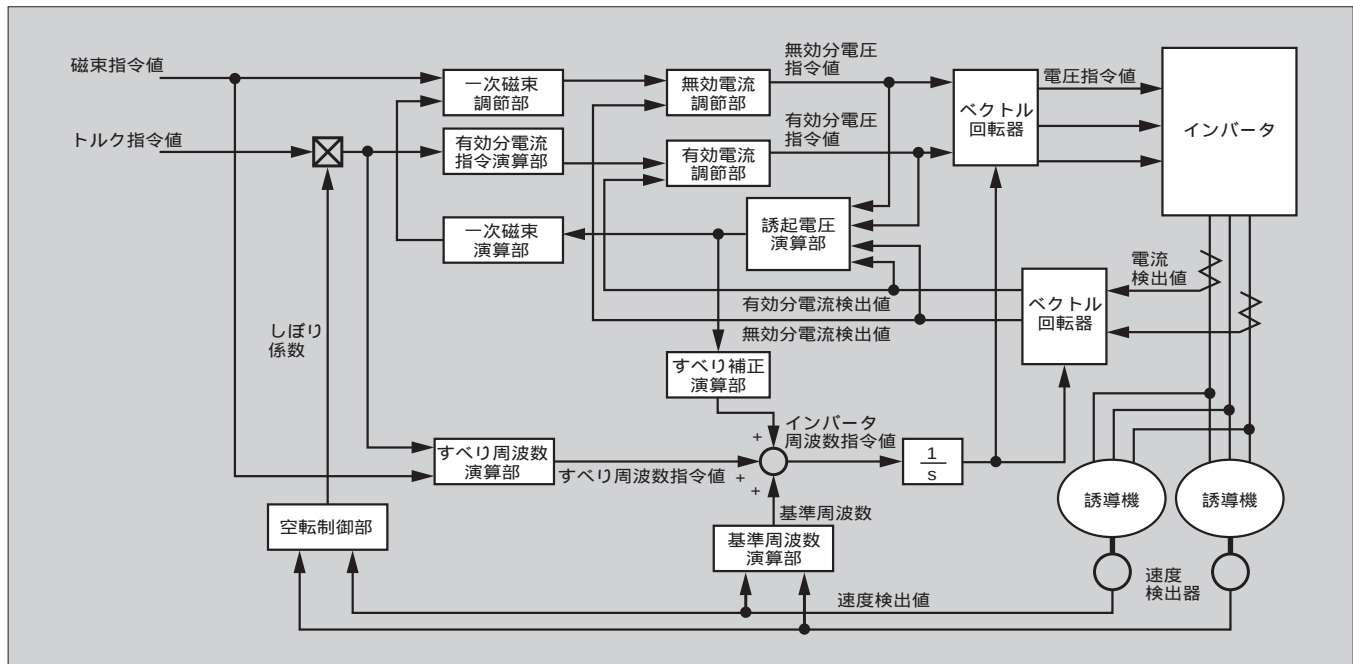
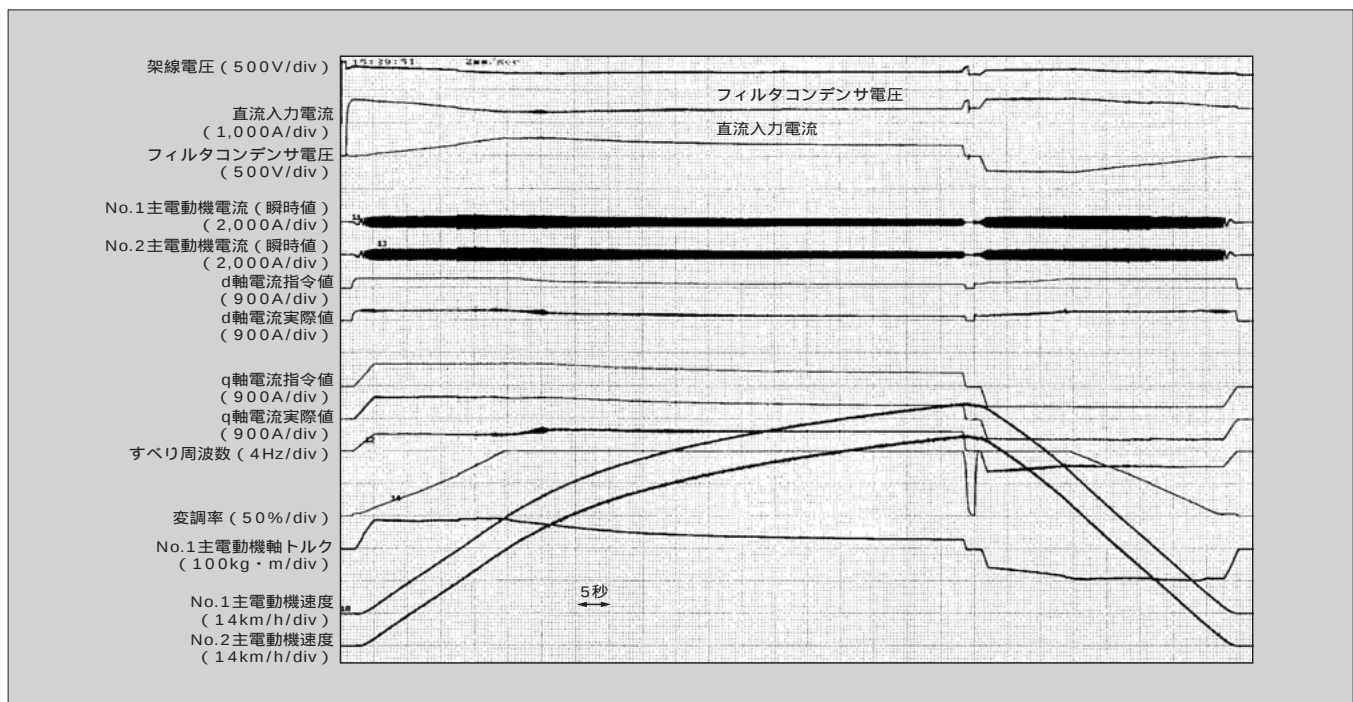


図6 加減速運転時のオシログラム例



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175kW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)鉄道総合技

図 7 DDM システム用電動機の外観

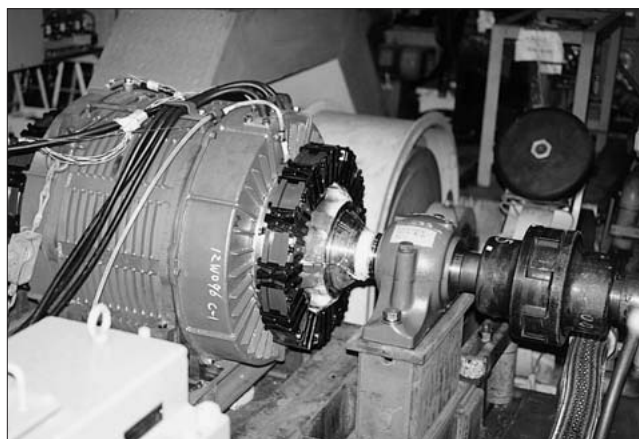


表 3 DDMシステム用電動機の仕様

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

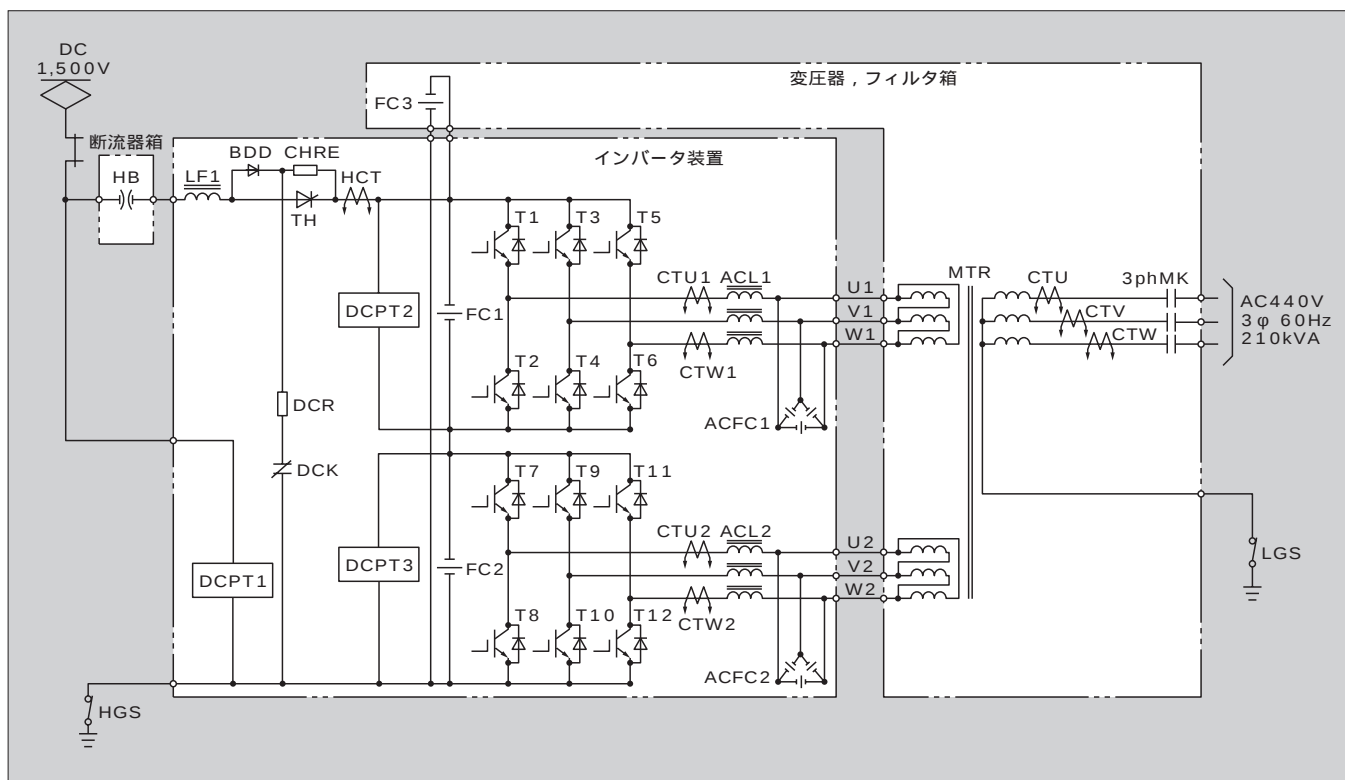
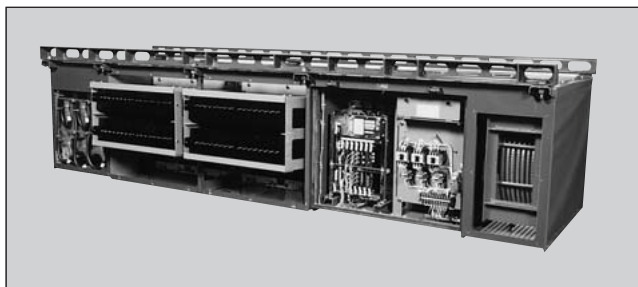


図9 直流電車用補助電源インバータの外観



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

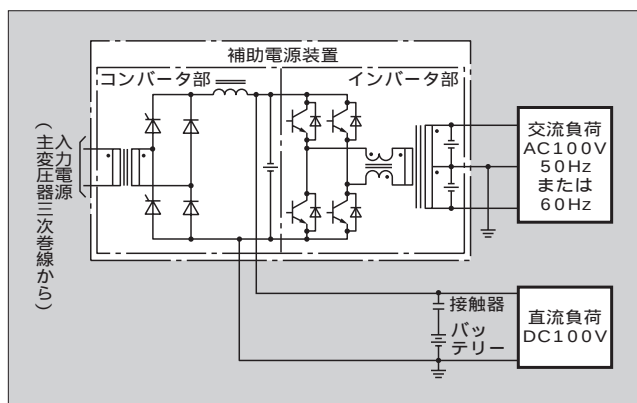
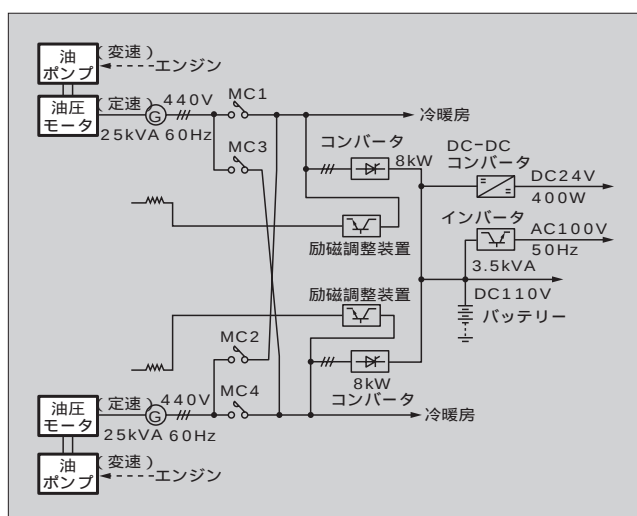


図11 キハ201系電気系統図



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）

直列補償形節電装置「省エネ名人」

石川 吉浩(いしかわ よしひろ)

山本 弘(やまもと ひろし)

大熊 康浩(おおくま やすひろ)

① まえがき

1997年12月、地球温暖化防止対策として二酸化炭素排出量の削減目標が定められた。これに伴い、産業界ではエネルギー消費構造の見直しによる省エネルギーや二酸化炭素排出量を削減できる燃料への代替などの取組みが一齐に始まった。一方、24時間営業をはじめとして夜間の営業時間を延長する店舗や事務所が増加しており、電力消費量は年々増加傾向にある。これらの店舗などで、照明電力の使用量を節減することで二酸化炭素排出量の削減に寄与できる節電装置が注目されており、広く導入され始めている。節電装置は、照明器具の電力量が器具の入力電圧の2乗または電圧に比例して低減する特性を利用して、供給電圧を適正な電圧に下げることによって節電効果を生む装置である。現在導入されている節電装置の多くはタップ切換方式であり、電源電圧の変動に伴いあらかじめ用意された複数のタップを切り換えることで照明器具の入力電圧を調節している。そのため、十分な節電効果が得られない範囲が存在する。

このような背景のもと富士電機では、交流チョッパ技術と高周波スイッチング技術により電解コンデンサがなくても交流電圧を制御できる多機能電源⁽¹⁾（MPS：Multi-function Power System）と直列補償回路技術を適用した、直列補償形節電装置「省エネ名人」を製品化した⁽²⁾（特許出願中）。この省エネ名人は、新回路方式の採用により高い電力変換効率を実現する。さらに、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を用いた高周波スイッチングにより、電源電圧変動にかかわらず照明器具への入力電圧を適切な値に一定制御するため、常に最大限の節電効果が発揮できる。

以下では、省エネ名人の特長、仕様、回路構成および試験結果について紹介する。

② 特 長

今回製品化した省エネ名人（24 kVA）の外観を図1に示す。この省エネ名人は、下記の特長を持っている。

2.1 小形・軽量

省エネ名人は、MPSの採用により電解コンデンサが不要となったこと、高周波スイッチングによる交流フィルタ容量の低減、さらに直列補償回路技術によりMPSの容量を節電容量とすることができ、装置容量に対して大幅に容量低減ができたことなどの効果により、小形・軽量化を実現している。そのため、店舗事務所内の電灯用分電盤近くへの設置を可能としている。

2.2 高性能

MPSと直列補償回路の組合せによって、下記の性能を得ている。

(1) 高効率

負荷率30%以上の広範囲で、装置変換効率は98%以上の高効率を実現している。

(2) 高節電率

高周波PWM（Pulse Width Modulation）制御を用いた出力電圧一定制御により、入力電圧が変化しても、負荷電圧を一定に制御できる。そのため、余剰電力を最大限に節減でき、高い節電効果が発揮できる。

図1 省エネ名人の外観（単相3線，24 kVA）



外形（W×D×H）：600×250×600（mm）
質量：60 kg

A7360-18-381



石川 吉浩

ミニUPS、UPSの商品開発・商品企画業務に従事。現在、システム事業本部社会システム事業部商品企画室主任。



山本 弘

無停電電源装置の開発・設計に従事。現在、東京システム製作所パワーエレクトロニクス技術部。



大熊 康浩

交流直接変換技術を応用した電力変換装置の開発に従事。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コンポーネントグループ副主任技師。

表 1 仕様と容量系列

定 格 容 量		12 kVA	12 kVA	24 kVA	24 kVA	48 kVA ^{*2}	72 kVA ^{*2}
定格出力電流		60 A	120 A	120 A	120 A	240 A	360 A
入 力	線数（単相），電圧 ^{*1}	3線 101±6/ 202±12 V	2線 101±6 V	3線 101±6/ 202±12 V	2線 202±12 V	3線 101±6/ 202±12 V	3線 101±6/ 202±12 V
	周 波 数	50/60 Hz±5%					
	入 力 力 率	負荷力率と同じ					
出 力	線数（単相），電圧 ^{*1}	3線，95/190 V	2線，95 V	3線，95/190 V	2線，190 V	3線，95/190 V	3線，95/190 V
	周 波 数	50/60 Hz					
	線間電圧アンバランス	±1.5%以内（100%不平衡負荷時）					
	効 率	98%以上	97%以上	98%以上			
その他	冷 却 方 法	自然空冷（屋内仕様）					
	騒 音	45 dB（A）以下					
外形寸法〔W×D×H〕（mm）		600×250×600	600×250×600	600×250×600	600×250×600	700×300×800	800×350×800
質 量 （kg）		55	55	60	60	100	160

*1：入力電圧は100/200 V±10%で問題なし。また，出力電圧は入力電圧の0～10%で調節可能。

*2：48/72 kVAは標準系列。上表以外の容量への対応可能。

（3）不平衡負荷に対して小さい電圧アンバランスを実現

単相3線，100%不平衡負荷時において，出力電圧アンバランスは±1.5%以下を実現している。

2.3 低騒音

高周波スイッチングによりフィルタリアクトルから発生する電磁騒音が大幅に低減したこと，装置冷却を自冷としたことにより，45 dB（A）以下の低騒音化を実現した。これにより，ユーザーは設置環境を選ばずに装置を導入することができる。

2.4 優れた保守性・操作性

主回路部品として，電解コンデンサや冷却ファンなどの寿命部品を使用していないので，定期交換部品は不要である。また，過電流時の自動直送切換，自動復帰機能，異常時の自動直送機能や節電電力量の表示機能（オプション）を装備している。

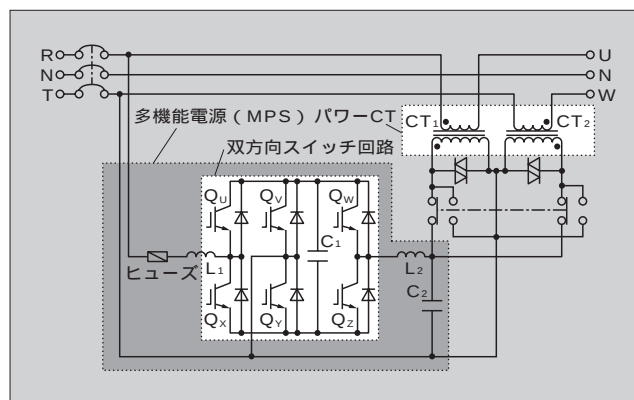
③ 製品仕様と系列

表1に仕様と容量系列を示す。単相2線12kVA，24kVAと単相3線12kVA，24kVAを標準系列，単相3線48kVA，72kVAを準標準系列として，それぞれ系列化している。いずれも照明設備負荷を前提とし，単相3線時の線間電圧アンバランス率を仕様化している。また，入力力率は負荷力率と同じであり，節電装置の設置による電源容量を変更することなく接続できるように配慮した仕様としている。

④ 回路の構成と動作

以下では，省エネ名人に採用した主回路と制御回路の構成，回路動作について紹介する。

図2 主回路構成



4.1 主回路構成

図2に単相3線24kVAの主回路構成を示す。主変換回路部であるMPSは，双方向スイッチ回路を用いた高周波PWM制御形交流チョッパ回路，スナバコンデンサ（C₁），交流リアクトル（L₁）と交流フィルタ（C₂，L₂）で構成されている。また，MPSの出力電圧を電源に対して直列に挿入し電源電圧を補償するパワーCT（変流器，CT₁，CT₂），過電流時や異常時に直送切換をするための交流スイッチ，補助継電器を備えている。

この回路構成により，電解コンデンサが不要となるとともに，MPSの自己容量が電源容量のパワーCTの変流比分の1となるため損失も大幅に低減でき，節電装置全体の高効率化が実現できる。

4.2 制御回路構成

省エネ名人はMPSの出力電圧を制御することで，パワーCTを介して負荷電圧を調整する。図3に制御回路ブロック図を示す。主回路からの検出項目は，電源電圧（V_{RT}），MPS出力電圧（V_{CT11}，パワーCT一次電圧），MPS出力

図3 制御回路ブロック図

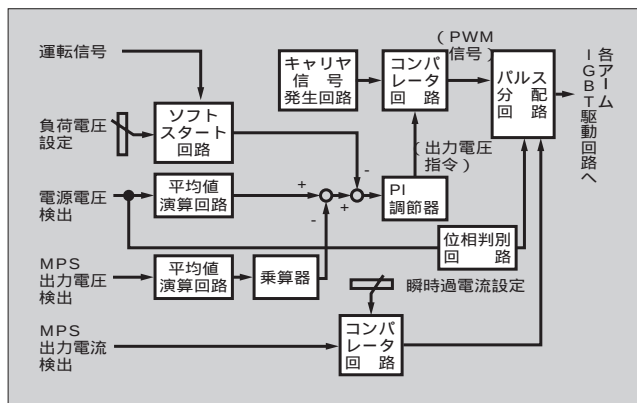
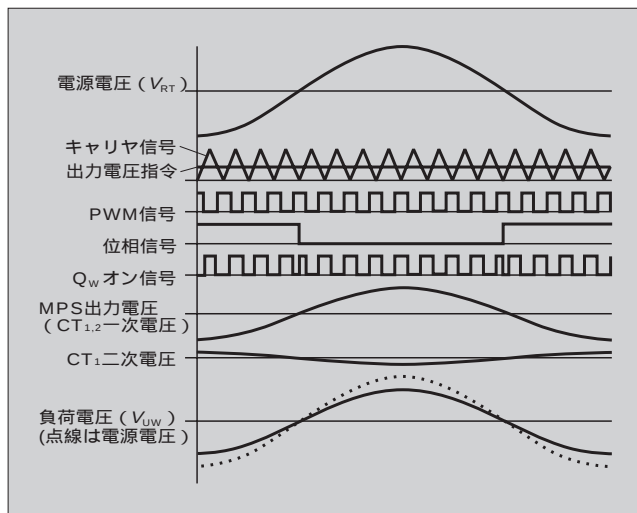


図4 各部動作波形



電流の3点である。電源電圧の平均値から、MPS出力電圧の平均値をパワーCTの変流比で乗算した結果を、減算することで負荷電圧を演算する。この演算結果が負荷電圧設定値となるようにIGBTを高周波でオンオフ制御する。このとき、IGBTの駆動信号は電源電圧に同期した位相判別回路の出力信号により、電源に同期して与えられる。キャリア信号としては三角波を用い、その周波数は16kHzである。また、MPS出力電流検出による瞬時過電流制御を備えている。

この制御方法により、負荷には電源電圧と同期したひずみの少ない正弦波を供給することができる。

4.3 回路動作

図4に各部動作波形を示す。図2に示した各IGBTは、以下の信号によりオンオフ動作する。まず、 Q_v と Q_x は電源に同期した位相信号で、 Q_u と Q_y はその反転信号で電源電圧に同期してオンオフ動作を行う。 Q_w はPWM信号と位相信号の論理演算により得られる Q_w オン信号で、 Q_z はその反転信号でオンオフ動作をする。例えば、電源電圧が正の半周期で Q_u と Q_y がオンしているときに Q_w オン信号により Q_w がオンすると、 Q_w がオンしている期間、電源電圧の一部が出力される。次に、 Q_w がオフして

図5 出力電圧波形例

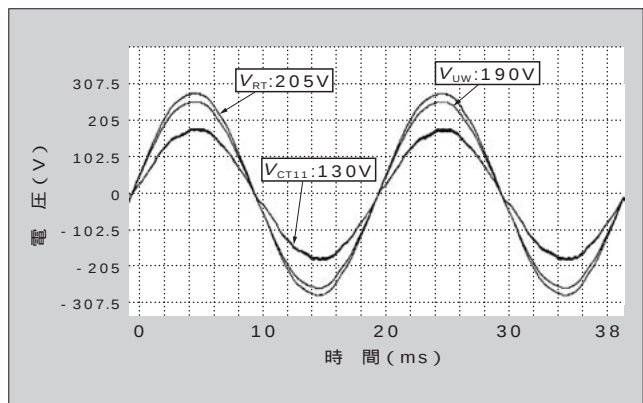
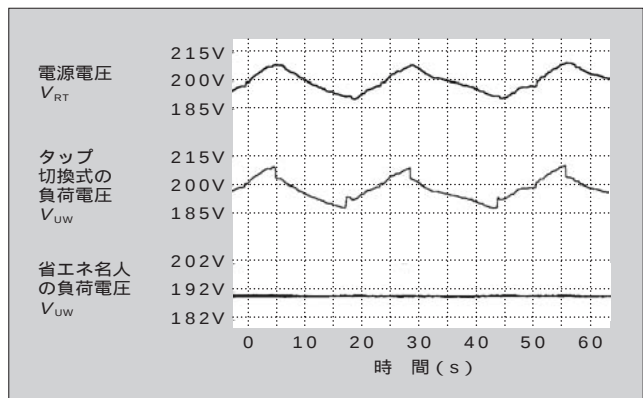


図6 定電圧制御特性



Q_z がオンすると電源電圧の出力は零となる。この動作を16kHzの高周波で繰り返し行い出力の交流フィルタで平滑すると、電源電圧と同相で振幅が小さくなったMPS出力電圧が得られる。

このようにして得られたMPSの出力電圧は、パワーCTにより電源電圧を低減するように注入される。その結果、負荷電圧は電源電圧と同相で所定の電圧値に制御された正弦波電圧となる。

5 試験結果

表1に省エネ名人の仕様を示したが、ここでは単相3線24kVA製品試作器の代表的な試験結果と諸特性を記す。

5.1 電圧波形

図5に出力電圧波形例を示す。試験条件は負荷率100%（120A）、負荷力率0.8である。波形は単相3線の200V線間での波形の一例で、直列補償動作が良好に行われていることが確認できる。また、負荷電圧のひずみ率は電源電圧のひずみ率と同等の2%以下となっており、規格値5%を十分満足している。

5.2 定電圧特性

省エネ名人は、タップ切換方式と異なり電源電圧の変動に関係なく、常に負荷電圧を一定の電圧値に制御すること

図7 変換効率特性

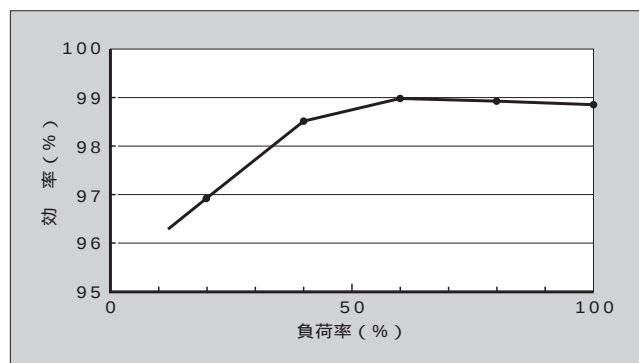
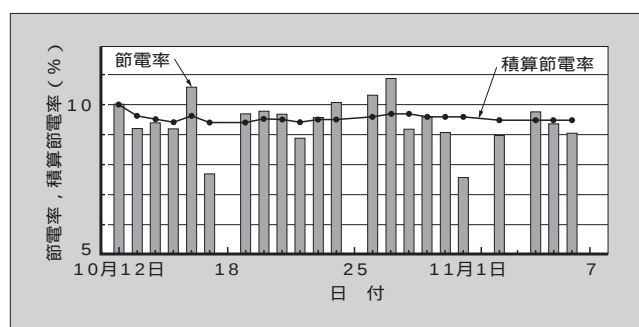


図8 節電効果



ができる。図6にそれぞれの定電圧特性を示す。データは、電源電圧を190Vから210Vの範囲で変化させ測定した。ここで、出力電圧設定は省エネ名人が190V、タップ切換方式が192Vである。また、タップ切換方式のタップは0%、-3%、-6%の3タップとした。タップ切換方式では、負荷電圧は電源電圧に依存して変化するとともに、タップ切換時に負荷電圧の急変が生じている。一方、省エネ名人は、電源電圧変動によらず、常に出力電圧設定値の190Vを保っており、良好な定電圧特性が実現できている。

5.3 変換効率

直列補償回路技術の採用により、主変換回路部であるMPSの装置容量は、パワーCTの変流比分の1とすることができる。そのため、損失も変換装置容量と同様に低減でき、節電装置の効率を大幅に改善することができる。図7に変換効率特性を示す。測定条件は、単相3線の線間200Vラインにおいて電源電圧 V_{RT} を210V、負荷電圧 V_{UW} を190V、定格時の負荷力率を0.8とした。負荷率100%(120A)時の変換効率は98.8%で、タップ切換方式と同等の効率が得られている。また、負荷率10%以上で96%以上の高い変換効率を満足しており、節電装置として実用的な装置といえる。

5.4 節電効果

この省エネ名人は、定電圧制御と直列補償回路技術によ

る高効率により、高い節電効果を発揮する。図8に節電効果のグラフを示す。同図は、富士電機工場内設計部居室に、実際に節電装置を設置して蛍光灯負荷の使用電力量と節電電力量を1998年10月12日から11月7日までの約1か月間測定した結果である。棒グラフは1日ごとの節電率を、折れ線グラフは積算での節電率を示している。測定場所での電力消費のピークは11時から16時の間に集中しており、深夜の電力消費はごくわずかであり、24時間営業のコンビニエンスストアに比べて1日あたりの節電効果は小さいと考えられる。さらに、電源電圧の平均値が102Vと電圧低減効果の少ない状況であるにもかかわらず、試算値どおり10%近い節電効果が得られている。

⑥ あとがき

主変換回路部に交流チョッパ技術と高周波スイッチング技術により実現した多機能電源MPSを適用し、直列補償回路技術と組み合わせることで、高い節電効果を得ることができる容量系列12kVAから72kVAまでの、省エネ名人を紹介した。この装置は、店舗の事務室や分電盤近くに設置できるように、低騒音化と小形・軽量化を図るとともに、分電盤のブレーカ容量と同一の電流容量で装置容量の選択ができる製品である。また、単相3線電源における100%アンバランス負荷時においても十分な負荷電圧精度を確保している。

今後、地球温暖化防止対策としての二酸化炭素排出量削減が目的の省エネルギーは、ますます盛んになると思われる。その一方で、夜間営業の店舗が増加する傾向にあり、期待どおりの削減効果が得られないことが予想される。この問題を解決するためには、ここで紹介した節電装置の設置が有効な手段であり、期待にこたえられる内容の製品に仕上がったと自負している。

今後とも、信頼される電源装置の製品化に、より一層注力していく所存であり、関係各位のご支援、ご鞭撻をお願いする次第である。

参考文献

- (1) 大熊康浩ほか：交流チョッパ技術に基づく多機能電源の諸特性，電気学会全国大会論文集，第4分冊，No.4，p.68-69（1998）
- (2) 大熊康浩ほか：交流チョッパによる多機能電源を用いた直列形電圧補償装置，電子情報通信学会技報，EE98-15，p.13-18（1998）
- (3) 大熊康浩ほか：新方式SMRコンバータ，電気学会論文誌D，Vol.114，No.5，p.544-550（1994）

インバータ駆動誘導電動機の軸電圧

奥山 吉彦(おくやま よしひこ)

藤井 秀樹(ふじい ひでき)

1 まえがき

PWM (Pulse Width Modulation) インバータの技術進歩により、誘導電動機の可変速運転はますます増加傾向にある。省エネルギーを目的とする用途や、従来直流電動機が用いられていた用途にまで PWM インバータと組み合わせた誘導電動機が採用されている。

その反面、PWM インバータ電源に起因する電動機への特有の問題が生じてきている。特に、インバータサージ⁽¹⁾による電動機絶縁の早期劣化や軸電圧の増加などがこれに相当する。これらの現象は、電動機の信頼性にかかわる重要な問題である。

本稿では後者の軸電圧について発生機構を明らかにし、軸電圧に関する等価回路を導き、測定結果と比較してこの発生機構の正しさが証明できたので紹介する。

2 PWM インバータと電動機巻線電位⁽²⁾

商用電源の場合には、各相の電圧の和は常に零であり、巻線中性点電位は大地電位となる。しかし、PWM インバー

タの場合は巻線中性点電位は零にはならず、有限の値をとる。この電圧をコモンモード電圧という。軸電圧はこのコモンモード電圧に起因している。

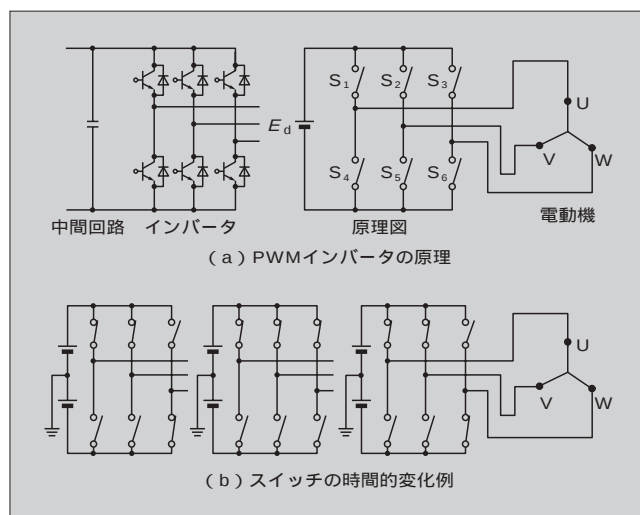
2.1 電動機巻線の中性点電位

PWM インバータは、コンバータ部で順変換された直流電圧をインバータ部でパルス幅変調をして可変電圧可変周波数の交流電源を得る装置である。

図 1(a)には、PWM インバータの原理を示す。6 個の半導体素子を $S_1 \sim S_6$ のスイッチで示してある。この 6 個のスイッチを一般的には、三角波の搬送波と正弦波の信号波の大小関係により開閉し、中間回路の直流電圧 E_d のパルス幅を適切にすることにより等価的な基本波正弦波電圧を得ている。図 1 b にはスイッチ開閉の時系列的変化例を示す。この図の右端の状態では、U、V 相端子の電位は $+1/2E_d$ 、W 相端子は $-1/2E_d$ であるので、電動機巻線中性点電位は $+1/6E_d$ となる。

図 2 は、過変調方式が採用された場合の中性点電位のパターンを示すもので、中性点電位は $-1/2E_d$ 、 $-1/6E_d$ 、 $+1/6E_d$ 、 $+1/2E_d$ の値を取り、3 倍の基本波周波数で時間的に変化する。

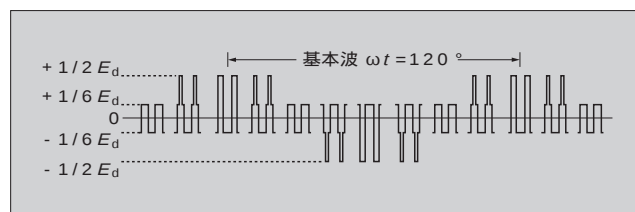
図 1 PWM インバータの原理と巻線電位



2.2 電動機内部の電位分布と等価回路

電動機巻線と大地間にはいろいろな電気部品がある。巻線中性点電位が大地へ至る回路は二つある。一方は巻線→固定子鉄心→フレームであり、もう一方は巻線→固定子鉄心→回転子鉄心→軸→軸受→ブラケットである。これらの部品は電氣的に静電容量や抵抗で結合されており、図 3 は

図 2 中性点電位のパターンと時間的变化



奥山 吉彦

誘導機の電気設計、回転電気機械の技術開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所主幹技師。



藤井 秀樹

誘導電動機の開発設計に従事。現在、三重工場回転機設計部。

図3 軸電圧に対する電動機の回路

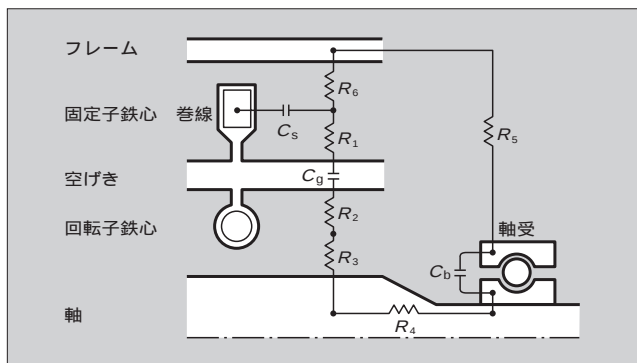
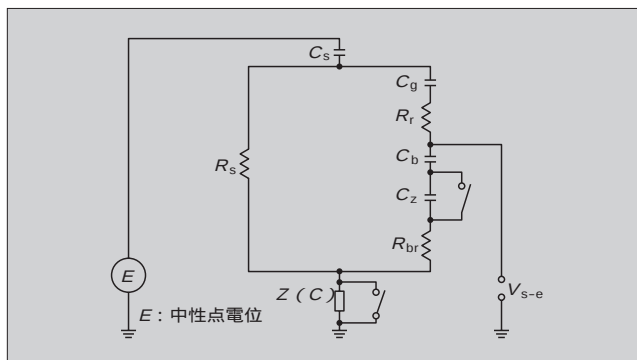


図4 軸電圧に対する等価回路



この様子を示すものである。

図中 C_s は固定子巻線と鉄心間の静電容量, C_g は固定子鉄心と回転子鉄心間の静電容量, C_b は軸受の内輪と外輪間の静電容量, $R_1 \sim R_6$ は各点を結ぶ抵抗を表している。したがって, 電動機の軸電圧に対する等価回路は, $R_1 \approx 0$, $R_2 + R_3 + R_4 = R_r$, $R_5 = R_{br}$, $R_6 = R_s$ とすると図4で表される。図中スイッチの記号を付けた C_z (軸絶縁) や C (フレーム - 定盤間の絶縁物) は, 軸電圧検証用の静電容量である。

R_s は積層されたケイ素鋼板とフレームの抵抗であるので, C_g , R_r , C_b , R_{br} で構成されるブランチの全インピーダンスに比較して十分小さく, 式(3)の仮定が成り立つとすると, C_z や C は短絡されている場合の軸 - 大地間電圧 (V_{s-e}) と軸 - ブラケット間電圧 (V_{s-br}) は次式で表せる。

$$V_{s-e} = E_s \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_{s-br} = E_s \frac{\frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ここで, } E_s = \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}}$$

$$\text{仮定: } R_s \ll R_r + R_{br} + \frac{1}{j\omega C_g} + \frac{1}{j\omega C_b} \quad \dots\dots\dots(3)$$

図5 試験装置結線図

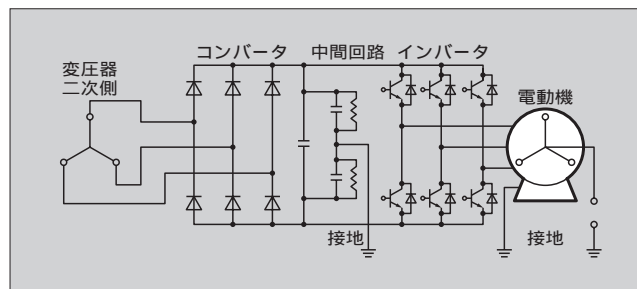
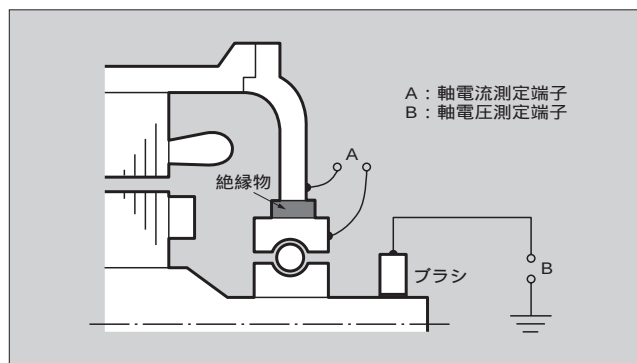


図6 軸電圧・軸電流測定装置



③ 軸電圧の測定⁽²⁾

②章ではPWMインバータ駆動誘導電動機の軸電圧の発生機構と等価回路について述べた。この考え方の妥当性を検証するために, 3.7 kW, 200 V, 50 Hz, 4 極機, 密封形玉軸受使用の全閉かご形誘導電動機を用いて軸電圧の測定を行った。

3.1 試験装置の概要

軸電圧を測定した試験装置の概要を図5に示す。被試験機, PWMインバータ, 変圧器の仕様を以下に記す。

3.1.1 被試験誘導電動機の仕様

発生機構の証明や等価回路定数の決定のため, 被試験機には次の処置をした。

- (1) 中性点電位を測定するために巻線中性点を引き出した。
- (2) 軸電流測定用として図6に示すような軸絶縁を施し, 軸受外輪とブラケットから端子を引き出した。
- (3) 電動機の非接地状態を作るためにエポキシガラス積層板を用いた (フレーム脚と定盤間に挿入)。

3.1.2 PWMインバータの仕様

出力: 33 kVA, 搬送波周波数: 15.6 kHz, 出力電圧: 200 V, 中間回路電圧: 280 V_{dc} のインバータを使用した。

なお, PWMインバータの直流中間回路の平滑用コンデンサには, 図5に示すように2個のコンデンサを直列接続し, その中点を接地して電位の基準点とした。

3.1.3 変圧器仕様

出力: 10 kVA, 変圧比: 400 V/200 V, 三相, 二次側結線: Y 結線, 出力電圧: 200 V である。

図7 電動機端子部線間電圧

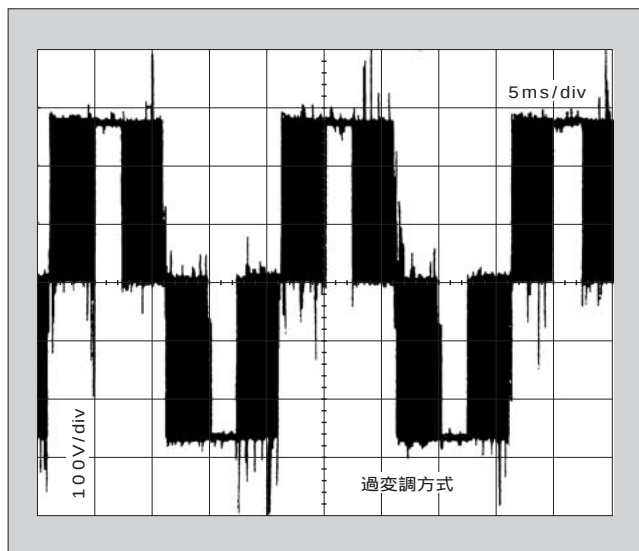


図9 電動機巻線中性点電位

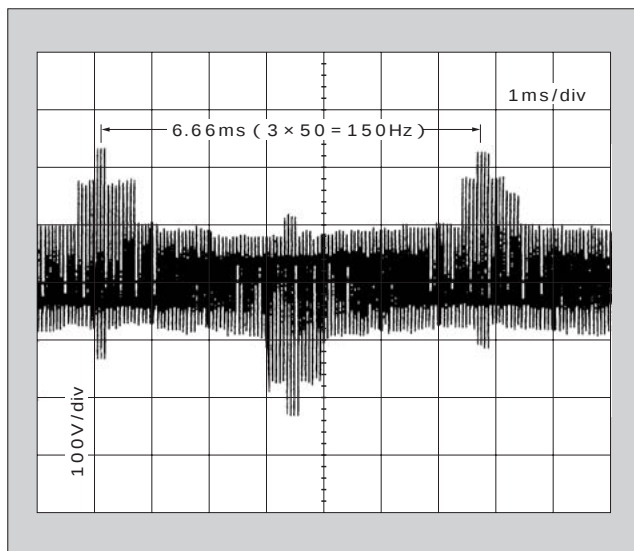


図8 インバータ中間回路電圧

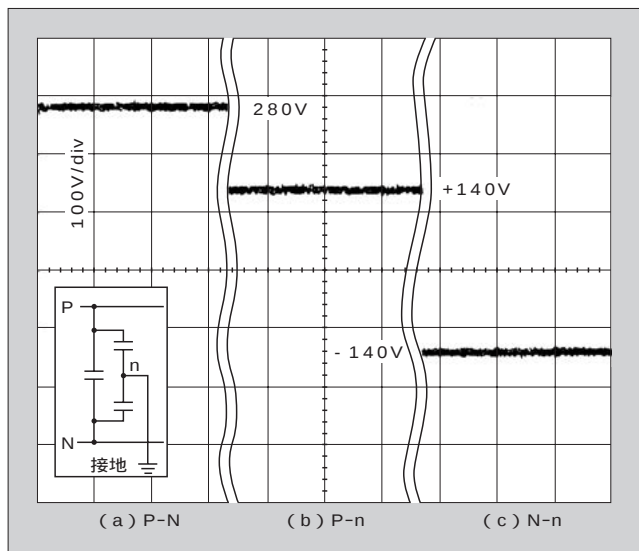
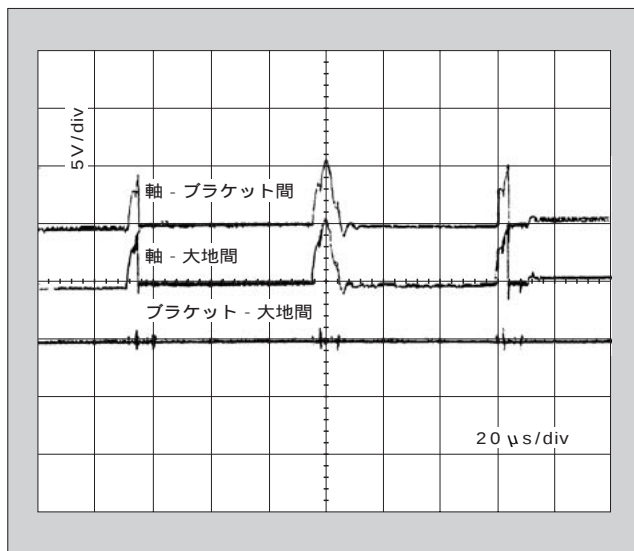


図10 軸 - 大地, 軸 - ブラケット, ブラケット - 大地間電圧



3.2 測定項目

測定項目は以下の5項目である。

- (1) 電動機端子部線間電圧の測定
- (2) 直流中間回路電圧の測定
- (3) 巻線中性点電位の測定
- (4) 各種条件時の軸電圧の測定
- (5) 軸電流の測定

3.3 測定結果

測定は電動機単体ですべて基本波周波数 50 Hz にて実施した。

3.3.1 電動機端子部線間電圧

図7は線間電圧のオシログラムで髭(ひげ)状電圧はインバータサージである。サージを除く波高値は約 280 V になっており、インバータ入力電圧 200 V の $\sqrt{2}$ 倍に一致している。

3.3.2 直流中間回路電圧

図8(a)は中間回路 P-N 間電圧で、理論どおり 280 V である。図8(b)は P-n 間、図8(c)は N-n 間の電圧であり、正しく 2 等分されている。

3.3.3 巻線中性点電位

図9は巻線中性点電位のオシログラムである。中性点電位の包絡線の周波数は 3×50 Hz で最大値は 140 V になっており、図2の理論値とよく一致している。ただしインバータサージが発生しており、髭状のピーク値は 200 V 以上になっている。

3.3.4 各種条件時の軸電圧の測定

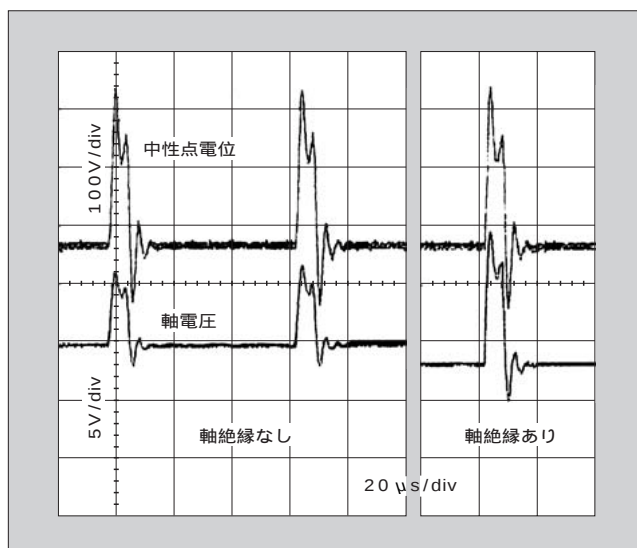
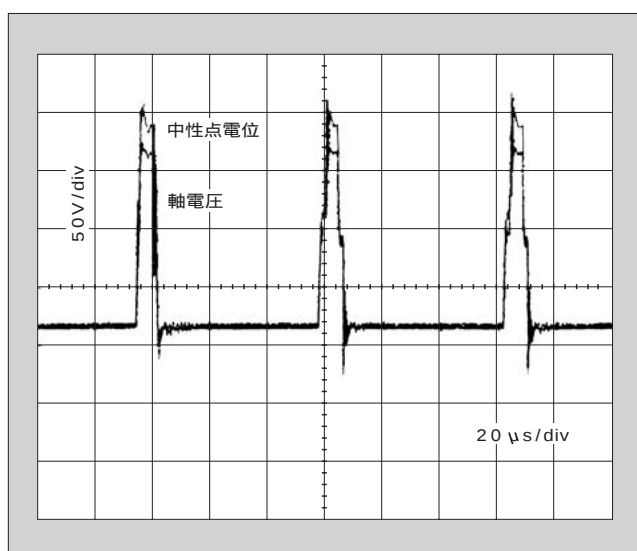
- (1) V_{s-e} , V_{s-br} , V_{br-e}

図10は軸絶縁を短絡し、電動機は接地した状態での V_{s-e} , V_{s-br} , V_{br-e} (ブラケット - 大地間電圧) を測定したオシログラムである。 V_{s-e} と V_{s-br} は約 5.4 V, V_{br-e} は約 1 V である。

- (2) 軸絶縁挿入有無による軸電圧

電動機は接地し、軸絶縁を挿入したときと短絡したとき

図 11 軸絶縁挿入有無による軸電圧

図 12 インピーダンス $Z (=1/\omega C)$ 挿入時の軸電圧

の軸電圧のオシログラムを図11に示す。同一の中性点電位に対し、軸絶縁挿入時の軸電圧は短絡時の軸電圧の約2倍になっている。

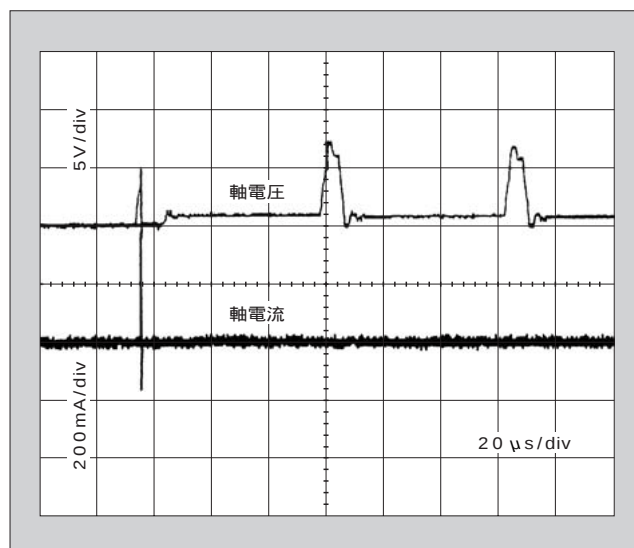
(3) 電動機非接地状態における軸電圧

3.3.1 項の³⁾に述べたエポキシガラス積層板を電動機フレームと定盤間に挿入し、軸絶縁は短絡して軸電圧を測定した。図12は、この軸電圧と中性点電位を同一オシログラム上で示した測定結果である。中性点電位の約90%弱の軸電圧となっている。

3.3.5 軸電流の測定

図13は電動機を接地し、軸絶縁も短絡した状態における軸電流のオシログラムである。図には軸電圧も同時に示しているが、軸受の潤滑剤であるグリースの絶縁性が維持されているときには約40mAとわずかしき流れない。しかし局所的に潤滑剤の絶縁が破壊されたり、メタルコンタクトが発生すると、瞬間的に1A近い軸電流が観測され、このときには軸電圧は短絡され消滅する。図の軸電圧の左

図 13 軸電流と軸電圧



側が小さくひずみ、軸電流が髭状に約400mAも流れているのは、この現象を示すものである。

4 測定結果の考察⁽²⁾

上記の測定結果を基にして、軸電圧の等価回路の妥当性と回路定数の値について以下に検討する。

検討にあたって下記の仮定を置いた。

- (1) 静電容量の C_s , C_g , C_b , C_z (軸絶縁), C (エポキシガラス積層板) は計算値を採用する。なお、 C_b としては、0.2 nF/個を採用する。
- (2) 静電容量のインピーダンス計算の周波数としては、素子 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の立上り時間を 0.1 μs として、 $f = 2.5$ MHz を採用した。

4.1 PWM インバータ駆動時軸電圧の発生機構

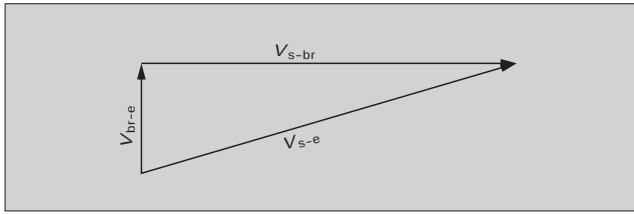
電動機と定盤間に静電容量を挿入することにより、測定結果(図12)が示すように、接地されたときに比較し軸電圧が非常に大きくなる。これは図4の等価回路から容易に推定される。すなわち、挿入静電容量 C のインピーダンス (250 Ω) が R_s (1.4 Ω) に比較して非常に大きいため、中性点電位の大部分をこの C が分担するからである。この事実は2.2節に述べたPWMインバータの軸電圧発生機構が正しいことを証明している。

4.2 各静電容量

図4の等価回路定数の静電容量は、 $C_s = 4.08$ nF, $C_g = 1.02$ nF, $C_b = 0.4$ nF である。なお、軸絶縁の静電容量 $C_z = 0.104$ nF, 電動機と定盤間に挿入するエポキシガラス積層板の静電容量は $C = 0.254$ nF である。

したがって、それぞれのインピーダンス値は $f = 2.5$ MHz とすると $1/\omega C_s = 16$ Ω, $1/\omega C_g = 63$ Ω, $1/\omega C_b = 160$ Ω, $1/\omega C_z = 610$ Ω, $1/\omega C = 250$ Ω となる。これらの回路定数は既知として各種条件時の軸電圧測定結果から抵抗

図 14 軸電圧ベクトル図



値を以下に求める。

4.3 抵抗値 R_{br}

図10の測定結果から、 R_{br} が特定できる。すなわち、 V_{s-e} (約 5.4 V 強)、 V_{s-br} (約 5.4 V 弱)、 V_{br-e} (約 1 V) は、等価回路から図14のベクトル図となる。したがって、次式が成り立つので既知の $(1/\omega C_b)^2 = (160)^2$ を代入すると、 R_{br} が求まる。

$$\frac{R_{br}}{\sqrt{R_{br}^2 + \frac{1}{(\omega C_b)^2}}} = \frac{1}{5.4} \quad R_{br} = 30 \, \Omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

4.4 抵抗値 R_r

図11は軸絶縁を挿入したときの軸電圧 (11.3 V) と短絡したときの軸電圧 (6.7 V) の測定結果である。式3の仮定が成り立つとすると、両軸電圧の比は次式となる。既知の定数 $R_{br} = 30 \, \Omega$ と、4.2 節の静電容量から $R_r = 180 \, \Omega$ が求まる。

$$\frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_z}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_z} + \frac{1}{j\omega C_g}} \cdot \frac{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}}{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}} = \frac{11.3}{6.7} \quad R_r = 180 \, \Omega \quad \dots\dots\dots (5)$$

4.5 抵抗値 R_s

R_{br} と R_r が求まったので、 C_z を短絡したときの軸電圧 6.7 V (図11) を式1に代入し $R_s = 1.4 \, \Omega$ が求まる。

$$V_{s-e} = \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} \cdot \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} = 6.7 \, V \quad R_s = 1.4 \, \Omega \quad \dots\dots\dots (6)$$

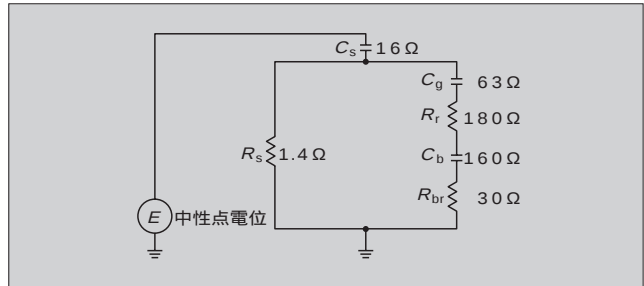
R_s と並列回路を作るもう一つのブランチのインピーダンスに比べ R_s は非常に小さく、式3の仮定が満足していることが証明された。

4.2 節および 4.3 ~ 4.5 節で回路定数が求まり、被試験機の軸電圧の等価回路は図15となる。

4.6 等価回路および定数の妥当性

図15の等価回路を用いエポキシガラス積層板 ($Z = 1/\omega C$) を電動機フレームと定盤間に挿入したときの軸電圧 120 V (図12) は、次式を用いた計算値 132 V とほぼ一致し、この等価回路と回路定数が現象を正しく表しているこ

図 15 被試験機の等価回路と定数



とが証明された。

$$V_{s-e} = E_z + E_s \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $E_z = \frac{Z}{Z_{sc} + Z_s + Z} E$

$$E_s = \frac{Z_s}{Z_{sc} + Z_s + Z} E$$

$$Z_{sc} = \frac{1}{j\omega C_s}$$

$$Z_s \approx R_s$$

5 寿命試験

商用電源で誘導電動機を駆動したとき、主に磁気回路の磁気不平衡により大なり小なり軸電圧が発生する。この軸電圧の許容値は一般的に 0.3 V (実効値) 程度である。一方、PWM インバータで駆動したときの軸電圧は前述のように 6.7 V (ピーク値) とけた違いに高いが、両者の値を単純には比較できない。商用電源駆動時の軸電圧の周波数は商用周波数の数倍であるのに対し、インバータ電源駆動の場合は数十 kHz ~ MHz のオーダーとなるため、軸受潤滑剤のグリースや潤滑油の高周波絶縁耐力が大きく異なるからである。

すでに多数の PWM インバータ駆動誘導電動機がフィールドで健全に運転されている。しかし、より信頼性の高い電動機とするためだけでなく、近い将来インバータの高電圧化が予想されるので、富士電機では高周波の軸電圧に対する耐力と対策の効果を調査把握するために、16 台の電動機にて寿命試験を行っている。その内訳は電圧 (200 V, 400 V)、接地条件 (接地の有無)、被駆動機模擬条件 (ポンプなど)、対策 (接地ブラシ、フィルタなど) などの条件を組み合わせた 16 台である。図16にその外観を示す。

現在まで 2 年弱を経過しているが、いずれも異常音などの発生もなく運転を継続中である。

6 結 論

PWM インバータ駆動時の誘導電動機の軸電圧発生機構

図 16 寿命試験の外観



- を述べ軸電圧に対する電動機等価回路を提案し、実機による測定結果によってその妥当性を証明した。結論として、
- (1) PWM インバータ駆動時の軸電圧は、電動機巻線の中性点電位が電動機を構成する部品間の静電容量や抵抗にて分担することにより発生し、図 4 の等価回路にて解析することができる。
 - (2) 固定子鉄心とフレームの抵抗 R_s は高周波に対し 1.4 Ω 程度である。この値は発生する軸電圧に大きく影響する。式 2 の軸電圧 V_{s-br} を低減するには、軸絶縁などの挿入により R_s 回路と並列のブランチのインピーダンス

を増加する方法も有効である。

- (3) 接地抵抗 Z は軸電流の抑止に大きく影響する。すなわち、 Z が大きいと軸電流は小さくなる。
- (4) 商用周波数に対してはインピーダンスが小さく十分な接地となり、高周波に対してはインピーダンスが大きくなる作用をするリアクトルを接地用に使用することは一つの対策であるが、電動機のフレームの電圧が上昇する。

7 あとがき

PWM インバータ駆動誘導電動機の軸電圧について述べた。本稿が誘導電動機設計技術者や電動機を使用される方々に多少でも役立てば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、関東学院大学森安正司教授にご援助いただいたことに深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 奥山吉彦・藤井秀樹：インバータサージの挙動解析，富士時報，Vol.69，No.11，p.598-602（1996）
- (2) 奥山吉彦ほか：インバータ駆動電動機の軸電圧，電気学会回転機研究会資料 RM-98-107（1998）
- (3) Erdman, J. M. : Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. IEEE Trans. Vol.32, No.2（1996）

低価格・高効率を志向した永久磁石形同期機的设计法

奥山 吉彦(おくやま よしひこ)

1 まえがき

1960年代以降に出現した希土類永久磁石は、現在もよく使用されているフェライト磁石に比べ残留磁束密度が1Tを超えるなど、磁石特性が格段に優れている。したがって、回転機の体格を決める一つの要素である磁気装荷を従来機と同程度に取ることが可能となった。

従来形同期機は一般に回転子に磁極があり、界磁巻線に直流電流を流して必要磁束を作るので銅損が生じる。一方、永久磁石形同期機は磁極に永久磁石を使用しているため、銅損を発生することなく必要磁束が作られるので高効率となる。この二点が、永久磁石形同期機が注目され比較的大きな容量まで製品化されだした理由である。

本稿では、永久磁石形同期機の基本的設計法とその最適化のための考慮点について述べる。

2 永久磁石形同期機設計の基本

電池と違って、磁石はいくら使っても消耗しない。磁石が鉄片を吸い付ける現象でいえば、鉄片を吸い付けることにより磁石が有するエネルギーは減少するが、その分鉄片の持つエネルギーが増大する。エネルギーの総和は常に一定なので、磁石が有するエネルギーの分担が変わるだけである。これがいくら使っても消耗しない理由である。

この磁石が作る磁束を利用した回転機が永久磁石形同期機である。

2.1 フェライト磁石と希土類永久磁石の特性比較

希土類磁石は、高性能であるため機器の小形化や省エネルギーの目的で採用され、その生産高(質量)は年率20%で伸長している。希土類磁石では、サマリウム-コバルト磁石とネオジム-鉄-ボロン磁石が代表的である。

表1は、フェライト磁石と対比させて、この2種類の希土類磁石の特性を示したものである。残留磁束密度、保持

表 1 希土類磁石の代表的特性

特性項目	磁石種類	フェライト磁石 (乾式異方性) ^{*1}	サマリウム-コバルト磁石 ^{*2}		ネオジム-鉄-ボロン磁石 ^{*3}	
			特性値	対フェライト磁石 ^{*4}	特性値	対フェライト磁石 ^{*4}
残留磁束密度 B_r	(T)	0.2 ~ 0.235	1.02 ~ 1.12	4.9	1.33 ~ 1.38	6.2
保持力 H	bH_C^{*5} (kA/m)	143 ~ 159	716 ~ 844	5.2	836 ~ 1,035	6.2
	iH_C^{*6} (kA/m)	239 ~ 279	1,432以上	5.5以上	875以上	3.4以上
最大エネルギー積 $(BH)_{max}$	(MGOe)	0.9 ~ 1.2	24 ~ 30	25.7	42 ~ 46	41.9
温度係数	B_r (%/K)	- 0.18	- 0.03	0.17	- 0.10	0.56
	iH_C (%/K)	0.22	-	-	- 0.57	-
キュリー温度 T_C	(°C)	450	820	-	365	-
クニック点 iH_K^{*7}	(kA/m)	-	680 ~ 1,300	-	300 ~ 1,000	-
リコイル比透磁率 μ_r		1.1 ~ 1.2	1.02	-	1.05	-
電気比抵抗 ρ	($\mu\Omega \cdot cm$)	10^4 以上 ^{*8}	84	0.0084	180 ~ 200	0.18 ~ 0.2
密度 γ	(g/cm ³)	4.6 ~ 4.9	8.4	1.77	7.5	1.58

*1 : (社)日本電子材料工業会「磁石のはなし」による。

*2 : 信越化学工業(株)R26HS(サマリウム系超高保持力グレード)による。

*3 : 信越化学工業(株)N45(ネオジム系高特性タイプ)による。

*4 : 特性中央値の対フェライト比。

*5 : bH_C は、 $B-H$ 特性上の $B=0$ における磁界の強さ。

*6 : iH_C は、磁化の強さ特性上の $B=0$ における磁界の強さ。

*7 : iH_K は、磁化の強さ特性上の $B=0.9B_r$ における磁界の強さ。

*8 : 住友特殊金属(株)のカタログ「永久磁石」による。



奥山 吉彦

誘導機の電気設計、回転電気機械の技術開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所主幹技師。

図1 希土類磁石の特性

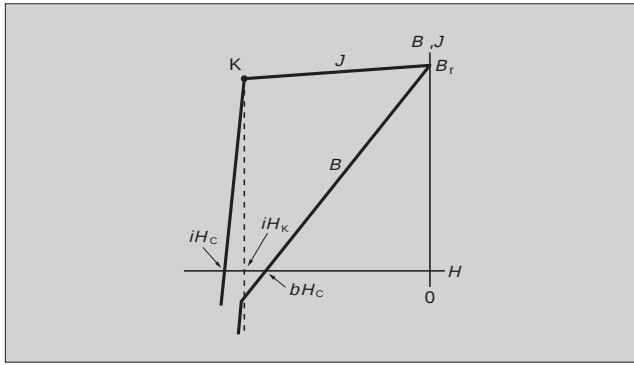
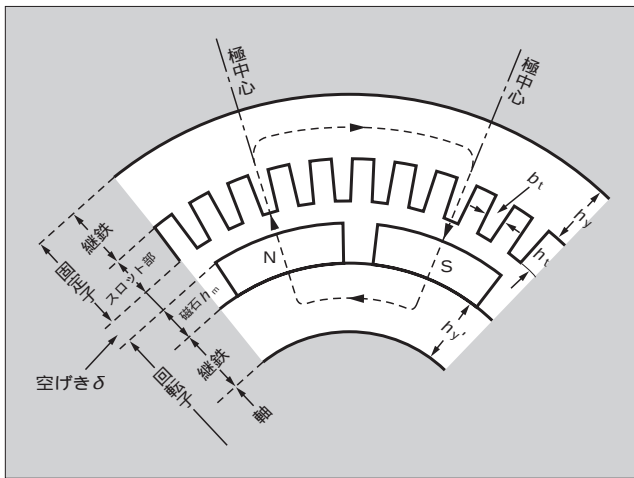


図2 永久磁石形同期機の断面と磁気回路



力および最大エネルギー積はフェライトに対し数倍向上している。永久磁石は温度が上昇すると減磁する。減磁には、磁石温度が元に戻ると $B-H$ 特性も元に戻る可逆減磁と、元に戻らない非可逆減磁がある。表1の温度係数は可逆減磁の係数であり、両希土類磁石ともフェライト磁石に比べ良好な値となっている。

一方、非可逆減磁は磁石温度がある一定温度を超えた場合や、運転点が磁化の強さ J の特性(図1)のある磁界の強さで急激に折れ曲がる点〔クニック(K)点〕を超えた場合に発生する。磁石は小さな磁石(磁区)の集合体であり、K点の右側ではこれら磁区が一方向に向いているが、K点を超える外部起磁力が印加されたり過大温度を経験すると、磁区の一部が逆向きになったり90°方向が違うものが生じ、元の特性に戻らなくなる。これが非可逆減磁の物理的な意味である。表1にはK点を磁界の強さで示しているが、近年この特性がきわめて良好な希土類磁石が製品化されている。

希土類磁石を使用するときに考慮しなければならない点は、フェライト磁石に比べ電気抵抗が低いことである。磁石を回転子表面に張り付ける方式(SPM: Surface Permanent Magnet)では、電機子スロットが作る脈動磁束密度(スロットリップル)により比較的大きな表面損失を発生するので注意が必要である。

2.2 永久磁石形同期機の設計法⁽²⁾

永久磁石形同期機は磁石の種類と寸法から決まる界磁起磁力一定の同期機となる。この条件を導入すれば、従来形同期機の設計法が永久磁石形同期機にも適用できる。

2.2.1 磁路の飽和特性 ----- 無負荷電圧の求め方 -----

図2は代表的な永久磁石形同期機(SPM)の構成を示す断面図である。図中の破線は磁路を示している。すなわち、N極磁石から出た磁束は空けき δ を通り、固定子鉄心を通り、向きを逆にして空けきを通してS極磁石へ流れ込む。回転子継鉄部では、磁束は図示のS極からN極へ流れ閉回路が形成される。この閉回路にアンペアの周回積分の法則を適用すると式1が求まる。なお、閉回路の1/2の起磁力で考える。

$$\frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m \cdot k_c + \frac{B_g}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_c + AT_{Fe} \quad (A) \quad (1)$$

ここで、

B_r : 磁石の残留磁束密度(T)

B_m : 磁石内の磁束密度(T)

B_g : 空けきの磁束密度(T)

μ_r : 磁石のリコイル比透磁率(= 1.05)

μ_0 : 真空の透磁率(= $4\pi \cdot 10^{-7}$)

h_m : 磁石の厚さ(m)

k_c : カータ係数

δ : 空けき長(m)

AT_{Fe} : 空けきと磁石部を除く磁気回路の所要起磁力(A)

を示す。

永久磁石形同期機は界磁起磁力が一定であるから、いわゆる無負荷飽和特性は存在しないが、無負荷誘導電圧を求めるための磁路の飽和特性が従来形同期機の無負荷飽和特性に相当する。この磁路の飽和特性を求めるには、まず各磁路、例えば歯鉄部や継鉄部などの磁束密度を空けき磁束密度 B_g の関数として表す。図2において磁石間の漏れ磁束は少ないので無視すると、 $B_m = B_g$ (T) が成立する。

したがって、空けきと磁石の所要起磁力は式(2)、式(3)となる。

$$AT_g = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot k_c \cdot \delta \quad (A) \quad (2)$$

$$AT_m = \frac{B_g}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot k_c \cdot h_m \quad (A) \quad (3)$$

また、歯鉄部や継鉄部の磁束密度と所要起磁力は以下の式で表せる。

$$B_t = \frac{I_n}{b_t} \cdot B_g \quad (T), \quad AT_t = H(B_t) \cdot h_t \quad (A) \quad (4)$$

$$B_y = \frac{b_m}{2h_y} \cdot B_g \quad (T), \quad AT_y = H(B_y) \cdot l_y \quad (A) \quad (5)$$

$$l_y = \frac{\pi(D_i + 2h_t)}{2p} \cdot k_y \quad (m)$$

ここで、

B_t : 歯鉄部磁束密度(T)

τ_n : 固定子溝ピッチ (m)
 b_t : 固定子歯鉄幅 (m)
 AT_t : 固定子歯鉄起磁力 (A)
 $H(B_t)$: 固定子鉄心の B_t に対する磁界の強さ (A/m)
 h_t : 固定子歯鉄高さ (= 溝高さ) (m)
 B_y : 固定子継鉄磁束密度 (T)
 h_y : 固定子継鉄厚さ (m)
 b_m : 磁石幅 (m)
 AT_y : 固定子継鉄起磁力 (A)
 $H(B_y)$: 固定子継鉄の B_y に対する磁界の強さ (A/m)
 l_y : 継鉄磁路長 (m)
 D_i : 固定子鉄心内径 (m)
 p : 極対数
 k_y : 継鉄磁束の分布を考慮した係数

を示す。

なお回転子継鉄部の所要起磁力に関しては、式 5 のそれぞれの値を回転子に対応させれば同様に求められる。

例えば、 B_g を 0.1T ごとに式 2)~(5) にて所要起磁力を計算し、縦軸に空げき磁束密度を、横軸に全所要起磁力をプロットすると図 3 のような磁路の飽和特性が得られる。図中一点鎖線で示す直線は式 1 の左辺の磁石起磁力を示す。したがって、この起磁力と磁路の飽和特性の交点が無負荷運転時の空げき磁束密度となる。図の例では、 $B_g = 0.84\text{T}$ である。なお、空げきと磁石の所要起磁力の全所要起磁力に占める割合が高いので、磁路の飽和特性はほとんど直線に近い。したがって、概略の空げき磁束密度を求めるには、次式を用いると便利である。

$$B_g \approx \frac{h_m}{h_m + k_c \cdot \delta} \cdot B_r \quad (\text{T}) \quad (6)$$

一方、 B_g の空間的分布はほぼ方形波であるから基本波磁束密度はフーリエ級数展開により、 τ をポールピッチ (m) とすると次式となる。

$$B_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau}\right) \quad (\text{T}) \quad (7)$$

この磁束密度から毎極の基本波磁束数 φ_1 が求まり、三相の線間誘導電圧 U は式 8 で表される。

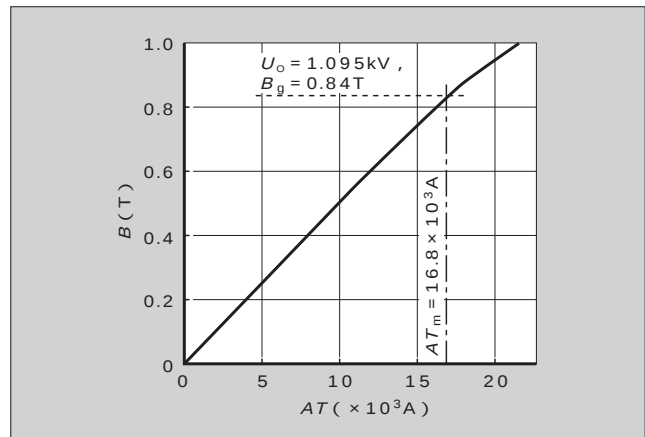
$$U = \sqrt{3} \cdot 1.57 \cdot \frac{N_1 \cdot n_s}{a} \cdot n \cdot l \cdot D_i \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau}\right) \cdot K_{w1} \cdot 10^{-2} \quad (\text{V}) \quad (8)$$

ここで、

N_1 : 固定子溝数
 n_s : 毎溝導体数
 a : 固定子巻線並列回路数
 n : 回転速度 (min^{-1})
 l : 鉄心長
 D_i : 固定子鉄心内径
 K_{w1} : 巻線係数

を示す。

図 3 磁路の飽和特性



2.2.2 負荷時電圧特性

負荷電流が流れると固定子漏れリアクタンスや抵抗により電圧降下が生ずるので、端子電圧 U を発生させるためには内部誘導電圧 E は電圧降下分だけ大きくななければならない。この電圧 E を発生させるための界磁起磁力 A_R は図 3 の無負荷飽和特性から求められ、 A_R の位相は E に対し 90° 進む。また負荷電流が流れ、電機子反作用 A_g による電圧降下が生じる。

$$A_g = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot A_1 \cdot \tau \cdot K_{w1} \quad (\text{A}) \quad (9)$$

ここで、 A_1 は電気装荷 (A/m) で、 I_1 を電機子電流とすると、 $A_1 = I_1 \cdot N_1 \cdot n_s / a$ となる。この起磁力 A_g を A_R にベクトル的に加算すると負荷時に必要な界磁起磁力 A_2 が得られる。端子電圧を仮定し A_2 が磁石起磁力 A_m に等しくなるまで反復計算することになる。図 4 は無負荷飽和特性上で負荷時端子電圧を図式的に求める方法を示すものである。

2.2.3 永久磁石形同期機の等価回路

前項では負荷時端子電圧の図式表示について述べた。ここでは永久磁石形同期機のリアクタンスおよび抵抗を求め、等価回路を作り負荷時端子電圧を求める方法について述べる。

(1) 電機子反作用リアクタンス

負荷電流 I_1 が電機子巻線に流れることにより生ずる 1 極あたりの起磁力 AT (A) は、 q を毎極毎相の溝数とすると、

$$AT = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{n_s}{2} \cdot q \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{I_1}{a} \cdot K_{w1} \quad (\text{A}) \quad (10)$$

この起磁力によって空げきに生ずる磁束密度 B は、

$$B = \frac{\mu_0 \cdot AT}{k_c \cdot \delta + h_m / \mu_r} \quad (\text{T}) \quad (11)$$

1 相あたりの直列導体数は $W_1 = n_s \cdot q \cdot 2p / 2a$ ($2p$: 極数) であるから、鎖交磁束量 φ は、

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \cdot B_1 \cdot \tau \cdot l \cdot W_1 \cdot K_{w1} \quad (\text{Wb}) \quad (12)$$

したがって、電機子反作用リアクタンス X_a は次式となる。

図4 負荷時端子電圧の図式表示

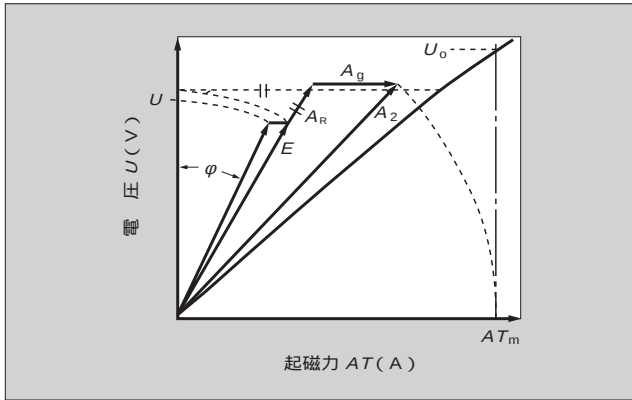
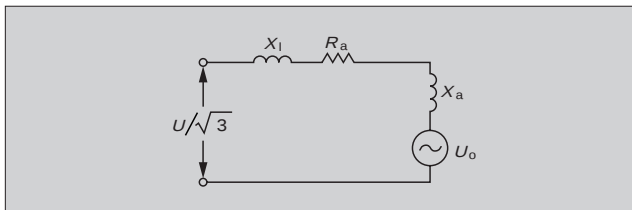


図5 永久磁石形同期機の等価回路



$$X_a = 2\pi f \cdot \mu_0 \left\{ \frac{W_1 \cdot K_{w1}}{p} \right\}^2 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \frac{D_i \cdot l}{k_c \cdot \delta + h_m / \mu_r} \quad (\Omega) \quad (13)$$

(2) 等価回路

従来形同期機の等価回路は電機子漏れリアクタンス X_l 、抵抗 R_a 、界磁巻線漏れリアクタンス X_f 、抵抗 R_f および制動巻線漏れリアクタンス X_k で示される。一方、永久磁石形同期機では、磁石表面あるいは保持リング表面の渦電流回路の電流が基本波電流の値を左右しないので、図5に示す単純な回路となる。なお、図中の U_0 は無負荷誘導電圧を示す。この等価回路を用い力率 $\cos \varphi$ を考慮した電流を与えたときの端子電圧を求めれば、図4の図式表示の数値計算となる。

③ 永久磁石形同期機最適化の設計考慮点

1997年10月24日から施行された米国のエネルギー政策法には、かご形誘導電動機の効率に高い基準が設けられているが、これは地球温暖化を防止すること、すなわち省エネルギーを狙いにしたものである。高性能な希土類永久磁石を採用した低価格で界磁損失のない高効率な永久磁石形同期電動機は、正にこの主旨に沿った電動機である。希土類磁石の価格はフェライト磁石に比べけた以上高いので、希土類磁石の使用量を最小にし、しかも機能的にも性能的にも問題のない設計はいかにあるべきか、主要点につき以下に述べる。

3.1 IPMの極間漏れによる磁石磁束利用率の低下

小容量永久磁石形同期機は、すでに多数製作され運転されている。この節では、図6(a)の典型的なIPM (Inner Permanent Magnet) 方式の極間漏れによる磁束利用率の低

下について述べる。磁石両端では、磁束は磁石外径部の薄いケイ素鋼板を通して隣接する極性の異なる磁石へ周方向へ流れ、磁気抵抗の大きい空けきを通して電機子へは流れにくくなる。すなわち磁束利用率が低下する。薄いケイ素鋼板の飽和特性を考慮して、空けき磁束密度分布を定量的に解析する。図6(b)は各部の磁束密度および寸法を示す図である。電機子鉄心などの磁路の起磁力は無視できるとすると、薄いケイ素鋼板部の周方向磁束の起磁力の0からxまでの積分値は空けき起磁力に等しいので次式が得られる。

$$\int_0^x H_x dx = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot k_c \cdot \delta = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m - \frac{B_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot h_m \cdot k_c \quad (A) \quad (14)$$

$$B_m dx + (B_x + \frac{dB_x}{dx} \cdot dx) h_s = B_x h_s + B_g dx \quad \text{が成立するので、}$$

$$\frac{dB_x}{dx} = \frac{1}{h_s} (B_g - B_m) = \frac{1}{h_s} \left(B_g + \frac{\mu_r \cdot k_c \cdot \delta}{h_m} \cdot B_g - B_r \right) \quad (15)$$

素鋼板の $B-H$ 特性を図7の破線で近似し、式16で表し微分方程式を解くと、 B_x 、 B_g は式17、式18となる。

$$B = \mu_s \cdot \mu_0 \cdot H_x + B_0 \quad (T) \\ \mu_s = 5.37, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \quad B_0 = 1.73 \quad (16)$$

$$B_x = A \epsilon^{\alpha x} + B \epsilon^{-\alpha x} + B_0 \quad (T) \quad (17)$$

$$B_g = \frac{1}{\mu_s \cdot \delta \cdot \alpha} \left(A \epsilon^{\alpha x} + B \epsilon^{-\alpha x} + \frac{B_r}{\alpha \cdot h_s} \right) \quad (T) \quad (18)$$

$$B_m = B_r - \frac{\mu_0 \cdot k_c \cdot \delta}{h_m} \cdot B_g \quad (T) \quad (19)$$

$$\alpha^2 = \frac{h_m + \mu_r \cdot k_c \cdot \delta}{\mu_s \cdot k_c \cdot \delta \cdot h_s \cdot h_m} \quad (1/m^2) \quad (20)$$

境界条件から係数 A 、 B を求め近似を用いると、 B_g は式21となる。

$$B_g \approx \frac{B_r}{\mu_s \cdot k_c \cdot \delta \cdot \alpha^2 \cdot h_s} (1 - \epsilon^{-\alpha x}) \quad (21)$$

式21の磁束密度分布の基本波波高値をフーリエ級数展開して求める。ただし $\alpha^2 = (\tau / \pi)^2 \cdot \alpha'^2$ に換算する。

$$B_1 \approx \frac{4}{\pi} \left\{ \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} - \frac{1}{\alpha'^2 + 1} \left(\alpha' \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} + \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} \right) \cdot \frac{B_r}{\mu_s \cdot k_c \cdot \delta \cdot \alpha'^2 \cdot h_s} \right\} \quad (22)$$

極間の漏れがないときの方形波の基本波波高値 B_1' は式6、式7から次式となる。

$$B_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} \approx \frac{4}{\pi} \cdot \frac{h_m}{h_m + \mu_r \cdot k_c \cdot \delta} \cdot B_r \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} \quad (23)$$

磁石磁束利用率を $B_1/B_1' = \eta$ と定義すると、式22、式23から η は式24で与えられる。

$$\eta = 1 - \frac{1}{\alpha'^2 + 1} \left(\alpha' \cot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau} + 1 \right) \quad (24)$$

55 kW、1,800 min⁻¹、6極機の永久磁石同期電動機の磁束利用率について具体的に検討した。この電動機の基本波磁束密度 B_1 は約1T、 b_m/τ は0.85のIPM方式〔図6(a)〕である。 $B_1 = 1T$ としたときの接着剤方式SPM (接着剤厚さ極小)、バインド方式SPM (ガラスバインドなど) および当該機方式 (IPM) の3方式の b_m/τ と磁石使用量の関係を求めた。図8は当該機の磁石使用量を1として、3

図6 IPM方式永久磁石形同期機

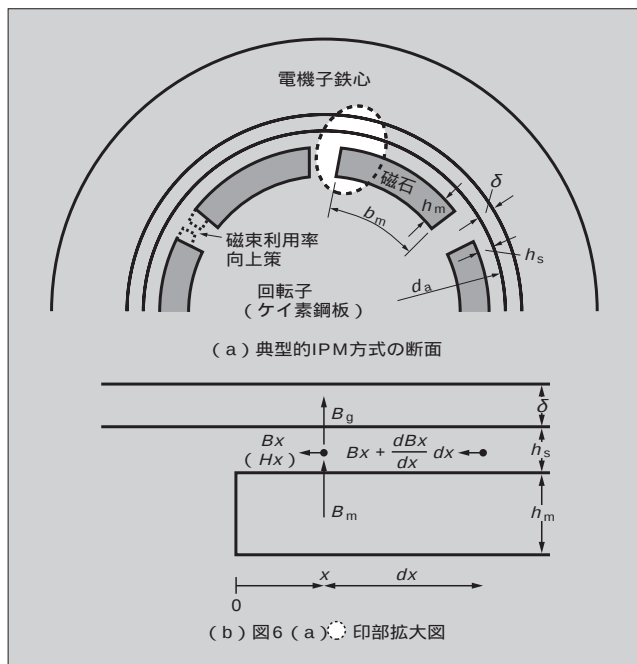
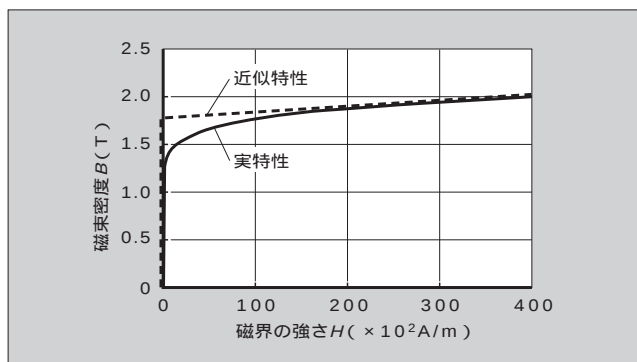


図7 ケイ素鋼板の \$B-H\$ 特性



方式の磁石使用量を単位法で示したものである。この図から接着剤 SPM 方式では極間漏れがなく、永久磁石形同期機として理想的方式である。最適な厚さのバインドテープがあるものとして算出したバインド方式 SPM の使用量が接着剤 SPM より大きい理由は、バインドの厚さだけ空け長が大きくなるからである。式(21)~(24)を用いて算出した IPM 方式の磁石使用量が接着剤方式 SPM のそれより大きい理由が極間漏れである。また $b_m/\tau \leq 0.8$ で使用量が SPM バインド方式より増加するのは、機械強度的に h_s が大きくなり、極間漏れが増加するためである。希土類磁石は高価なので、極間部に空け層を設けた磁束利用率向上策〔図6(a)の破線〕などが採用される。

SPM の場合の磁石使用量 W は、 γ_m を磁石の比重、 $2p$ を極数とすると次式で示される。

$$W = 2p \cdot \gamma_m \cdot b_m \cdot h_m \cdot \frac{\frac{b_m}{\tau}}{\frac{4}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau}\right) - \frac{B_1}{B_r}} \dots\dots\dots (25)$$

したがって、 W が最小となる $(b_m/\tau)_{\min}$ は B_1/B_r に依存し、 B_1/B_r が小さくなると $(b_m/\tau)_{\min}$ は小さく、 B_1/B_r

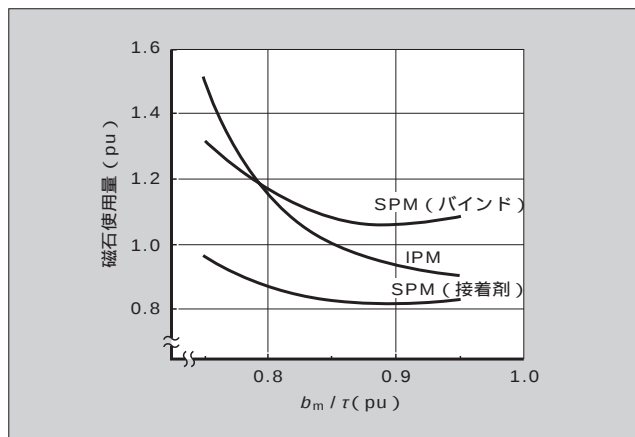
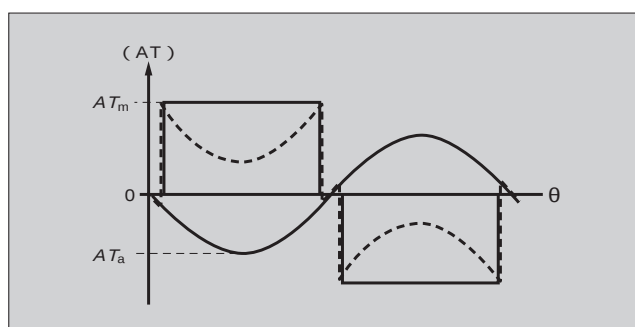
図8 磁石使用量と b_m/τ の関係

図9 短絡電流の起磁力



が大きくなると、 $(b_m/\tau)_{\min}$ は大きくなる。 $B_1/B_r \approx 1$ を採用すると、図8のように $(b_m/\tau)_{\min} \approx 0.9$ となる。

磁石厚は使用量だけではなく、3.2節の短絡電流による磁石の永久減磁にも関係するので、両者を勘案して決める必要がある。

3.2 短絡電流による磁石の永久減磁

永久磁石形同期機の端子部で短絡が発生すると短絡電流が流れる。この短絡電流による起磁力 (AT_a) は図9に示すように磁石の起磁力 (AT_m) と逆向きの起磁力となる。図には磁石の起磁力を方形波で、短絡電流による逆向きの起磁力を正弦波で示し、破線は $AT_m - AT_a$ を示す。この状態における磁石の磁束密度 B_m および磁界の強さ H_m は式(26)になる。

$$\frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m \cdot k_c = H_m \cdot h_m = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m - \frac{B_g}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_c - AT_{Fe} - AT_a \dots (26)$$

ここで、 AT_a は短絡電流による起磁力を示し、正弦波分布の波高値を表す。この点 $P_m (B_m, H_m)$ を磁石の $B-H$ 特性にプロットして図10に示す。図において $H_a = AT_a/h_m$ 、 P_c は電動機磁気回路のパーミアンズ係数である。この点 P_m が K 点を超え P_m' になる H_a/h_m が印加されると、短絡電流が消滅しても元の無負荷運転点 P_0 に戻らず P_0' になる。この現象を磁石の永久減磁という。短絡電流は交流対称分と直流分からなり、直流分は時間とともに減衰するので、この減衰も考慮して永久減磁を検討する必要がある。なお IPM 方式の場合、磁石両端外径側の薄いケ

図 10 短絡時の動作点

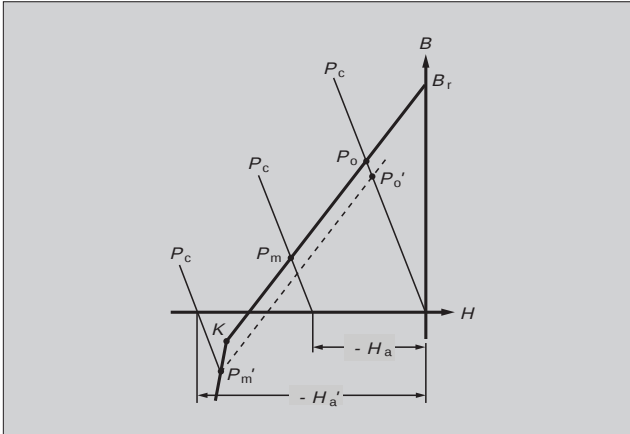
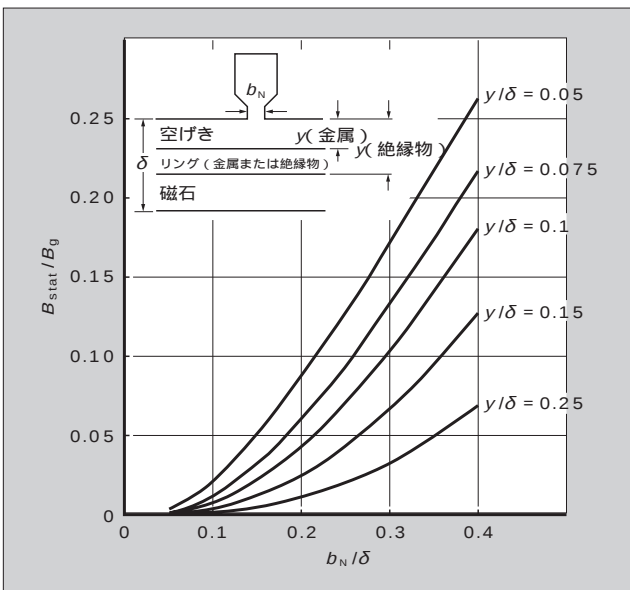


図 11 スロットリプルの大きさ



イ素鋼板部は周方向には磁氣的に飽和しているので減磁に対する効果はないが、極中心のケイ素鋼板部で磁束密度の緩和が生じるので SPM 方式より多少有利となる。

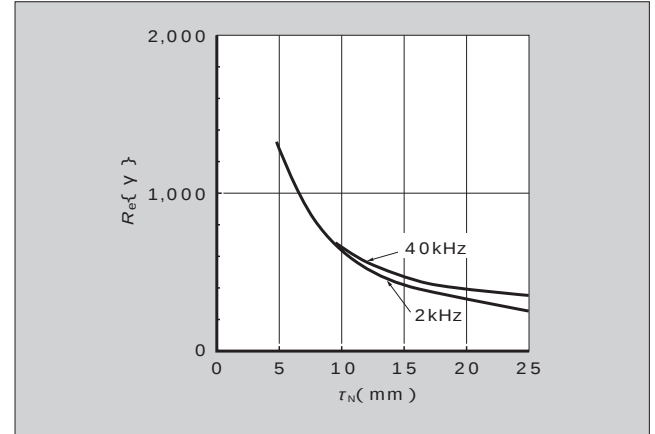
3.3 SPM 方式の回転子表面損⁽⁴⁾

SPM 方式の場合、永久磁石として希土類磁石の固有抵抗がフェライト磁石に比較し非常に小さいので、磁石表面は固定子スロットによるスロットリップルと鎖交し、渦電流が流れ損失が発生する。非磁性導電性金属の磁石保持リングを装備する高速永久磁石形同期機の場合には、この損失は保持リングに発生する。磁石はある一定温度を超えると永久減磁を生じるので、特に磁石や磁石近傍に発生する損失と磁石温度の精度よい定量化は必要不可欠である。

さて、磁石または保持リング表面におけるスロットリップル B_{stat} (T) は b_N をスロット幅、 y を電機子鉄心表面から磁石（または金属保持リング）表面までの距離とすると空けき磁束密度 B_g に対する割合 B_{stat}/B_g は、図11で与えられる。

N_1 を固定子スロット数、 n を回転速度 (s^{-1}) とすると、

図 12 $R_e(\gamma)$ (ネオジウム - 鉄 - ボロン磁石の場合)



回転する磁石表面あるいは保持リング表面は周波数 $f = N_1 \times n$ (Hz) で、この磁束と鎖交するので表面には渦電流が流れる。この渦電流は B_{stat} を減じるように作用するが、この影響は小さいので無視しても損失値に大きな違いは生じない。

χ を磁石または保持リングの導電率、 μ_1 を磁石または保持リングの比透磁率、 τ_N をスロットピッチ (m)、 $\omega = 2\pi f$ とすると、単位表面積あたりの損失 P は式27で示される。

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{(B_{stat} \cdot f \cdot \tau_N)^2}{2R_e(\gamma)} \quad (W/m^2) \dots \dots \dots (27)$$

$$\text{ここで、} \gamma^2 = \left(\frac{2\pi}{\tau_N} \right)^2 - j \frac{1}{\alpha^2}, \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \omega \cdot \chi}}$$

ネオジウム - 鉄 - ボロン磁石の $\chi \approx 0.5 \cdot 10^6$ (S/m) であるから、 $R_e(\gamma)$ は図12となる。

4 あとがき

永久磁石形同期機の基本的設計法と、経済的にも性能的にも最適な永久磁石形同期機とするための考慮点について理論的に述べた。本稿が設計技術者に多少でも参考になれば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、多大なご指導をいただいた関東学院大学森安正司教授に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 森安正司：希土類磁石の特性，電気評論，No.4 (1998)
- (2) 奥山吉彦・森安正司：永久磁石形同期機の設計法，電気学会回転機研究会資料，RM-97-25 (1997)
- (3) 小貫天ほか：電機設計法への最適化数値計算の導入，電気学会回転機研究会資料，RM-98-132 (1998)
- (4) Hausberg, V.; Moriyasu, S.: Tooth-Ripple Losses in Highspeed Permanent Magnet Synchronous Machines, 電気学会論文誌 D, No.11 (1998)

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
2811872	半導体装置の保護回路	重兼 寿夫	2815729	薄膜太陽電池の製造方法	卜部 恭一
2811905	燃料電池発電システムの水蒸気発生器	後藤平四郎	2815774	放射線テレビ装置の走査機構	山田 正
2811906	自動販売機のデータ異常通報制御装置	繁田 雅信	2815821	レーザ加工方法	齋藤 清雄
2811941	スイッチングトランジスタの制御回路	古畑 昌一 五十嵐征輝	2816268	腹水器冷却水熱回収設備	西島 捷二
2811973	自動販売機の氷吐出量制御装置	小池 輝男	2817171	電動機速度制御装置	小原 正樹
2811983	プログラマブル・コントローラ	ハツ田 豊	2817336	光電スイッチ運転指令信号伝送異常判別方法	柳川 勝志
2812342	自動販売機の商品搬出装置	萩野 憲三	2817488	ハイブリッド形発電機モデルの起動装置	小島 武彦
2812343	冷凍自動販売機の除霜ヒーター制御方法	海野 覚	2817807	電子写真用感光体	黒田 昌美 天野 雅世 古庄 昇
2812345	コンデンサ充電回路	山形 繁男			
2812784	フルスクリーン型エディタ装置	細川 勝美	2817811	電子写真用感光体	折笠 仁 菅田 好信 古庄 昇
2813040	アーク加工用電源装置	小林 義治			
2813600	表形式文書読取装置	細川 勝美	2817822	電子写真用感光体	中村 洋一 森 伸義 野上 純孝
2813601	表形式文書認識装置	片野 浩司			
2814702	アーク炉設備における設定電力量演算方法	春日 利明 宇都 克哉	2817823	電子写真用感光体	中村 洋一 森 伸義 野上 純孝
2814706	燃料電池発電装置	大内 嵩			
2814716	固体高分子電解質型燃料電池のセル構造および水とガスの供給方法	坂本 康孝	2817824	電子写真用感光体	中村 洋一 森 伸義 野上 純孝
2814739	電子写真用感光体	黒田 昌美 天野 雅世 古庄 昇			
			2818189	液体爆薬を用いた高強度プラズマの発生方法	森田 公 宮本 昌広
2815030	逆スターリングサイクル冷凍機	大嶋 恵司	2819774	絶縁膜の形成方法	佐々木光夫
2815031	冷凍装置	藤並 太 大嶋 恵司	2819810	酸素分析計	杉本 啓介 三森 裕司
2815033	りん酸型燃料電池の起動方法	氏家 孝	2822357	IC カード対応自動販売機	久野 宏仁
2815035	半導体装置	小田 佳典 山田 克己	2822358	薄膜太陽電池の製造方法	藤掛 伸二
2815688	薄膜太陽電池の製造方法	藤掛 伸二	2822359	テスト機能付自動販売機	福井 一夫
2815690	液体電解質型燃料電池の起動制御装置	小林 義治	2822360	貨幣識別機およびその貨幣受入方法	小寺 利治 坂本 政司
2815707	キーワード検索方法	圓子 雄 木下 仁	2822620	インバータの瞬停停電時の再始動方法	米澤 裕之
2815711	薄膜半導体装置製造装置	吉田 隆	2822636	硬貨搬送リフター	伊藤 義矩
2815716	メッセージ送信処理方法	岡嶋 英治	2822637	硬貨リフターの制御方法および制御装置	松藤 宏
2815719	薄膜太陽電池の製造方法	卜部 恭一	2822638	インバータ駆動誘導電動機の電流振動抑制方法	米澤 裕之
2815723	薄膜太陽電池の製造方法	卜部 恭一	2822651	高温ガス炉用燃料交換機のグリッパ	広木 篤

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
2822699	断線検出回路	藤田 光悦 藍原 隆司 桃津 敏朗	2831042	油入変圧器の部分放電監視装置	臼井 昇 川尻 幸一
			2831195	半導体加速度センサ	上柳 勝道
2823025	しゃ断器の不足電圧引き外し装置	新井 政起	2831200	薄膜太陽電池の製造方法	卜部 恭一
2824065	回路遮断器の接続導体構造	小山 淳 内田 直司	2831280	レーザ加工装置	齋藤 清雄
2824069	エキシマレーザ装置	沼田 忍	2833118	垂直搬送装置	武 達男
2824164	微粒子計測方法	大戸時喜雄 財津 靖史 平岡 勝久 星川 寛 伊藤 晴夫	2833146	ソーラポンプシステムの制御装置	伊藤 豊
			2833187	電力交換器の電流制御回路	海田 英俊
2826060	配電系統における監視，制御方法	草間 悟	2833192	電子写真用感光体	天野 雅世 黒田 昌美 古庄 昇
2826061	配電系統の融通操作方法				
2827189	インバータの出力電圧制御方法	米澤 裕之	2833257	半導体加速度センサ	佐々木 修
2827191	集積回路装置	平林 温夫	2833265	ペルトン水車の運転ノズル自動選択装置	戸野塚武浩
2827192	電子写真用感光体	高嶋 幹夫 中村 洋一 野上 純孝	2833266	電力用半導体素子およびその製造方法	渡邊 雅英
			2833282	エレクトロルミネッセンス表示装置とその製造方法	河島 朋之 谷口 春隆 加藤 久人 柴田 一喜
2827194	冷却用水供給装置	後藤 久			
2827390	光－電気変換器	石川 雅英 糸賀 一穂	2834604	家畜用歩行通過型体重測定装置とこれを用いた家畜への体重データ記録方法	中村 雄有 井上 富生
2827413	インクジェット記録ヘッド	2834895			
		2827470	硬貨搬送リフター	伊藤 義矩	2834902
2827484	インバータ制御回路	五十嵐征輝 八田 恭典	2836250	自動販売機のサーペンタイン式商品ラック	難波 正樹 源水 敏彦 川北 武
2827531	インクジェット記録ヘッドの駆動方法	松本 浩造 佐々木光祐 久道 功 篠田 正紀			
2827599	可変絞り弁	谷口 隆典	2836273	マスク形レーザー刻印装置	竹田 豊
2828478	直流アーク炉用電源装置	岡崎 金造 元吉 攻 小西 茂雄	2836312	固体識別装置	吉田 和雄
			2837313	クレーンの振れ止め・位置決め制御装置	右田 博久 乳井 直樹 伊藤 潤
2829225	骨材生産装置における骨材製品の選別装置	福田 和彦			
2830435	インクジェット記録ヘッドおよびその製造方法	深澤 直人 瀧川 亜樹 永山 一彦 永山 利枝	2837314	クレーンの振れ止め制御装置	右田 博久 乳井 直樹 伊藤 潤
2830565	バーコードリーダー	池田 文幸 高崎 靖夫	2838845	コイルの層間絶縁紙挿入装置	松田 幸一

主要営業品目

電 機

電動機，可変速装置，誘導加熱装置，誘導炉，産業用電源装置，クリーンルームシステム，非常用電源装置，コンピュータ用電源装置，舶用電気品，車両用電気品，変圧器，遮断器，ガス絶縁開閉装置，電力変換装置，原子力機器，火力機器，水力機器，発電機，新エネルギー発電システム，発電設備用保護・監視・制御装置，発電設備用コンピュータ制御装置，誘導電動機，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，ポンプ，ブロワ，電磁開閉器，操作・表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，汎用モールド変圧器，電力制御機器，交流電力調整器，近接スイッチ，光応用センサ，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，多重伝送システム，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ，可変速電動機

制御・情報・電子デバイス

コンピュータ制御装置，運転訓練・系統解析シミュレータ，電力量計，放射線モニタリングシステム，保護・監視・制御装置，マイクロコントローラ，水処理装置，水質計測制御装置，遠隔制御装置，オゾン処理システム，電気集じん機，計測情報通信制御システム，レーザ応用装置，画像処理応用装置，工業計測機器，放射線計測機器，磁気記録媒体，複写機・プリンタ用感光体，パワートランジスタ，パワーモジュール，スマートパワーデバイス，整流ダイオード，モノリシック IC，ハイブリッド IC，半導体センサ，サージアブソーバ

業務用民生機器ほか

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，ホテルペンダシステム，カードシステム

富 士 時 報	第 72 卷	第 2 号	平成 11 年 1 月 30 日 平成 11 年 2 月 10 日 印刷 発行 定価 525 円（本体 500 円・送料別）
編集兼発行人	谷	恭	夫
発 行 所	富 士 電 機 株 式 会 社 技 術 開 発 室	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 （ゲートシティ大崎イーストタワー）	
編 集 室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電 話 (03)5388 - 7826 F A X (03)5388 - 7369	
印 刷 所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-8520 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電 話 (03)5388 - 8241	
発 売 元	株 式 会 社 才 一 ム 社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電 話 (03)3233 - 0641 振替口座 東京 6 - 20018	

電気鉄道技術の現状と21世紀への展望

衛藤 福雄
富士時報 Vol.72 No.2 p.97-99 (1999)

最近の電気鉄道には安全性、高速性、快適性に加えて、経済性、省電力、省力、省保守、地球環境対応など幅広い期待が寄せられている。パワーエレクトロニクス技術や制御技術などのめざましい発展は、これらのニーズや期待の実現に大きく貢献してきた。

富士電機は電力供給を主とした交通地上分野と、車両駆動用電気品を主とした車両電気システム分野でこれらのニーズにこたえるべく技術開発を行い製品を提供してきた。本稿では、これらについての取組みの現状と21世紀に向けた展望を紹介する。

電気鉄道地上システム

田中 滋夫
富士時報 Vol.72 No.2 p.100-103 (1999)

電気鉄道地上システムは、パワーエレクトロニクスやマイクロエレクトロニクス技術をベースとしてさまざまな技術革新が行われてきた。電力供給面では、電鉄負荷の特殊性から派生する課題（回生、高調波、電圧変動、逆相など）を主としてパワーエレクトロニクス技術により解決してきた。情報処理システムはコンピュータの小形化や通信技術の向上に伴い、光 LAN を適用した分散形システムが普及していくであろう。また、駅においては省エネルギー、省人化や利便性向上がキーワードとなっていくであろう。

電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス応用システム

牧野 喜郎 小高 英明 山本 光俊
富士時報 Vol.72 No.2 p.104-110 (1999)

地上設備にパワーエレクトロニクス応用装置が多用されている。高調波抑制対策として12パルス整流器、回生電力対応として電力回生インバータと回生電力吸収装置、電圧変動・三相不平衡対策として単相 SVC と三相自励式 SVC を取り上げ、概要と現地測定データによる効果を紹介する。

今後の大容量変換装置は平形 IGBT を適用することにより、小形化・高効率化・高機能化がさらに進展する。

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器

粟飯原 一雄 鈴木 伸夫 菊地 征範
富士時報 Vol.72 No.2 p.111-117 (1999)

電気鉄道用直流変電所では従来から直流高速度気中遮断器が使用されてきたが、遮断時に爆発的なアークが発生するので、頻繁な保守点検を要した。今回、これらの短所をすべて解決した、真空遮断器を応用したアークレス遮断器を開発した。直流電流に振動電流を重ねて電流零点を生成することにより遮断する原理である。機械的損耗が微少で、省保守化が実現できるため、ランニングコストが低下する。結果的にライフサイクルコストの低減や小形化・安全性の向上などが実現できる付加価値の高い装置である。

電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器の性能検証

昆野 康二 清水 直樹 菅野 朋人
富士時報 Vol.72 No.2 p.118-121 (1999)

真空遮断器を応用した新形の電気鉄道変電所向け直流高速度遮断器を開発した。本装置は電磁反発駆動機構をもった真空遮断器本体、主振動回路、副振動回路、非線形抵抗、検出制御ユニットなどから構成されている。機械的な開閉器と電子回路の複合化された装置であり、性能検証では機械的性能、電気的性能、および組合せ性能検証が必要となる。本稿では性能検証試験と、結果の概要について述べる。

鉄道車両システム

廣津 和則 尾崎 覚 星野 栄雄
富士時報 Vol.72 No.2 p.122-126 (1999)

21世紀に向けた鉄道車両システム用電気品の技術開発の取組みを紹介する。パワーデバイスは IGBT が主流となり、今後素子の高耐圧化と性能向上の開発が推進される。主回路システムには3レベル構成と2レベル構成が適用されているが、素子の高耐圧と性能向上が進めば、2レベル構成が多用されるようになるであろう。また、大容量素子の冷却は地球環境対策のため不凍液冷媒などを適用したものとなろう。制御装置の高性能化、高機能化はデバイスの進歩に連動して発展し、開発の効率化のためさらにシミュレーションの活用が推進されるであろう。

新幹線車両用主回路システム

井上 亮二 土橋 栄喜 大澤 千春
富士時報 Vol.72 No.2 p.127-132 (1999)

新幹線車両用主回路システムは、東海道新幹線の開業以来、安全性、信頼性、経済性に対する要求とその後の高速化、省エネルギー化、環境問題への対応などの時代の要請にこたえながら、技術革新を実現してきた。その技術進歩は、主電動機を制御する変換器の主回路用パワーデバイスの高耐圧・大容量化とマイクロプロセッサの高性能・高速化といったパワーエレクトロニクス技術のめざましい進歩に負うところが大きい。本稿では、新幹線車両用主回路システムの技術変遷における現状と、主回路システム電気品の今後の技術動向について紹介する。

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 岩堀 道雄 野中 政章
富士時報 Vol.72 No.2 p.133-139 (1999)

VVVF 駆動システムにおける富士電機の実績として、高耐圧 IGBT を使用した3レベルインバータの適用例を述べるとともに、今後の方向として、コストパフォーマンスに優れた2レベルインバータの開発を行ったので、その概要を紹介する。また、将来の応用分野の一つとして注目される DDM システムの開発にも取り組み、その成果を上げつつあるので、それについても述べた。

補助電源システムでは各種車両のニーズに対応しており、最近の適用例を電気車、気動車について紹介する。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

Ground Systems for Electric Railways

Shigeo Tanaka
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.100-103 (1999)

There have been various technical innovations based on power electronics and microelectronics technique in electric railways. In the power supply system, problems caused by the special characteristics of railway loads (regeneration, harmonics, voltage fluctuation, phase reversal, etc.) have been solved mainly by power electronics technique. In the computer control system, distributed systems using an optical LAN (local area network) will come into wide use with the downsizing of computers and improvements in communications. Keywords in the stations will be less energy, less labor, and more conveniences.

Present Status and Outlook Toward the 21st Century for Electric Railway Technologies

Fukuo Etoh
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.97-99 (1999)

In addition to safety, high speed and amenity, modern railway systems are expected to be more economical, consume less energy, need less maintenance, and be environment-friendly. Recent remarkable advances in power electronics, microelectronics, and information processing and control technologies have made a large contribution to the attainment of these expectations. Fuji Electric has supplied most advanced systems and facilities to the railway industry centering on electric power supply and electric propulsion. This paper describes the present status and outlook toward the 21st century of Fuji Electric on electric railway technologies.

New DC High-Speed Circuit Breakers for Traction Substations

Kazuo Aibara Nobuo Suzuki Masanori Kikuchi
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.111-117 (1999)

In traction substations, DC high-speed air circuit breakers have been used. They generate an explosive arc at the time of interruption and so require frequent inspection and maintenance. Fuji Electric has newly developed an arcless circuit breaker based on the vacuum breaker and has solved those problems. Its principle of operation is to interrupt at the point of zero current produced by superposing oscillating current on the DC current. Its little mechanical wear reduces maintenance and running cost. It is high value-added equipment that can realize low life cycle cost, small size, and higher safety.

Power Electronics Application to Railway Ground Systems

Yoshiro Makino Hideaki Odaka Mitsutoshi Yamamoto
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.104-110 (1999)

Many application systems of power electronics are used in railway ground systems. Taking up 12-pulse rectifiers for harmonics suppression, power regeneration inverters and regenerated-power absorbers for power regeneration, and single-phase SVCs (static var compensators) and three-phase self-commutated SVC against voltage fluctuation and unbalanced three phases, this paper describes an outline of these systems and their effectiveness using data on site. Future large capacity power converters will still more reduce in size, improve in efficiency, and advance in functions by flat IGBT (insulated-gate bipolar transistor) application.

Electrical Equipment for Rolling Stock

Kazunori Hirotsu Satoru Ozaki Eio Hoshino
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.122-126 (1999)

This paper outlines our course of technical development of electrical equipment for rolling stock toward the 21st century. IGBTs will be the mainstream of power devices. Voltage and performance of device will be raised. In the main circuit system, 3-level and 2-level systems are used, but 2-level systems will increase as the device voltage and performance become higher. The cooling of large capacity devices will be performed with ice-free coolant to meet the protection of global environment. The performance and functions of control equipment will advance linking up with the devices, and simulation will be utilized for more efficient commercialization.

Performance Verification of the New DC High-Speed Circuit Breaker for Traction Substation

Kouji Konno Naoki Shimizu Tomohito Kanno
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.118-121 (1999)

Fuji Electric has developed a new DC high-speed circuit breaker for electric railway substations based on the vacuum circuit breaker. This equipment consists of a vacuum circuit breaker with an electromagnetic repulsion mechanism, a main oscillation circuit, a sub-oscillation circuit, a nonlinear resistor, and a detector and control unit. It is a combination of a mechanical switchgear and an electronic circuit and requires the verification of electrical, mechanical, and combination performance. This paper outlines the performance tests and their results.

VVVF Inverter Systems and Auxiliary Power Supply Systems for the Existing Lines

Koji Iwamura Michio Iwahori Masaaki Nonaka
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.133-139 (1999)

From among Fuji Electric's VVVF inverter systems, this paper gives an example of the 3-level inverter with high-voltage IGBTs, and also outlines the high-cost-performance 2-level inverter newly developed according to the technical trend. The DDM system that attracts attention as a major application in the future is under development, the status of which is outlined. The auxiliary power supply systems have met the needs of various rail cars. Recent applications for electric and diesel cars are described.

Propulsion Systems for the Shinkansen

Ryoji Inoue Hidenobu Tsuchihashi Chiharu Oosawa
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.127-132 (1999)

Since the Tokaido Shinkansen started operation, the propulsion system for the Shinkansen has met the needs of the times such as safety, reliability and economy, followed by increase in speed, energy saving and environmental preservation through technical innovations. The technical progress is mostly due to the rapid progress in power electronics including high-voltage, high capacity power devices for the main circuits of traction motor control inverters and high performance, high-speed microprocessors. This paper describes the present status of propulsion systems for the Shinkansen in technical transition and the future technical trend of propulsion system apparatus.

直列補償形節電装置「省エネ名人」 石川 吉浩 山本 弘 大熊 康浩 富士時報 Vol.72 No.2 p.140-143 (1999) 交流チョッパ技術と高周波スイッチング技術により実現した多機能電源 MPS と、直列補償回路技術を適用した直列補償形節電装置を製品化した。節電装置は IGBT を用いた 16 kHz の高周波 PWM 制御によりパワー CT を介して、負荷電圧を適正な電圧に一定制御する。そのため、高い節電効果が得られる。また、主回路には電解コンデンサや冷却ファンなどの寿命部品はなく、メンテナンスフリーとなっている。本稿では、標記節電装置の特長、製品仕様と系列、回路構成と動作、試験結果の 4 項目を中心に紹介する。	インバータ駆動誘導電動機の軸電圧 奥山 吉彦 藤井 秀樹 富士時報 Vol.72 No.2 p.144-149 (1999) PWM インバータの技術進歩により、誘導電動機の変速運転はますます増加している。しかしその反面、インバータで駆動される電動機は商用電源駆動時に比べ、種々の性能面で責務が増大する。その代表的な例は、インバータサージによる絶縁責務である。本稿では、いまだ明確な解析がなされていない PWM インバータ駆動誘導電動機の軸電圧について、その発生機構を解説し、解析のための等価回路を提案した。また実機を用いた実験結果により、これらの妥当性を証明した。
低価格・高効率を志向した永久磁石形同期機の設計法 奥山 吉彦 富士時報 Vol.72 No.2 p.150-155 (1999) 非常に特性の良い希土類永久磁石の出現と省エネルギーという時代のすう勢が符合し永久磁石形同期機が脚光を浴びている。 本稿では従来形同期機の設計法を基本にし、それに界磁起磁力一定の条件を導入した永久磁石形同期機の基本的設計法について述べ、さらに、高効率で低価格な永久磁石形同期機とするために、高価な希土類磁石使用量を最小にし、しかも機能・性能を満足するための設計上の考慮点について具体的に理論的に述べる。	

Shaft Voltage of PWM Inverter-Driven Induction Motors

Yoshihiko Okuyama Hideki Fujii
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.144-149 (1999)

Because of the technical progress of PWM inverters, induction motors driven at variable speed are more and more increasing. However, inverter-driven motors bear more burden to various aspects of performance than when driven by commercial power. A typical example is a burden to insulation caused by inverter surge. With regard to the shaft voltage of PWM inverter-driven induction motors which has not yet clearly analyzed, this paper explains the mechanism of its generation and proposes an equivalent circuit for analysis. The adequacy was verified by the test results with an actual machine.

Series Voltage-Compensated AC Power-Saver

Yoshihiro Ishikawa Hiroshi Yamamoto Yasuhiro Okuma
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.140-143 (1999)

Fuji Electric started marketing the multi-function power system MPS using AC chopper and high-frequency switching technologies and the series voltage-compensated AC power-saver using series voltage compensation technology. The AC power-saver controls the load voltage constantly at a proper voltage through a power current transformer by 16 kHz high-frequency PWM control with IGBTs, giving a high power-saving effect. Also it is maintenance free because the main circuit includes no short-life components such as an electrolytic capacitor and a cooling fan. This paper describes the features, specifications and lineup, circuitry configuration and operation, and test results of the power-saver.

Designing Methodology for Low-Cost, High-Efficiency Permanent Magnet Synchronous Machines

Yoshihiko Okuyama
Fuji Electric Journal Vol.72 No.2 p.150-155 (1999)

Since the appearance of rare-earth permanent magnets with very good characteristics happened together with the energy-saving tendency of the times, permanent magnet synchronous machines have been in the spotlight. This paper describes a basic design method for permanent magnet synchronous machines in which the condition of constant field magnetomotive force is introduced into the design method for conventional synchronous machines. Then to attain high efficiency and low cost, the paper concretely and theoretically describes design considerations to minimize the amount of costly rare-earth magnets and yet satisfy the functions and performance.

富士電機株式会社

本 社 事 務 所 ☎ 03)5435-7111 〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号（ゲートシティ大崎イーストタワー）

北海道支社 ☎ 011)261-7231 〒060-0042 札幌市中央区大通西四丁目1番地（道銀ビル）
 東北支社 ☎ 022)225-5351 〒980-0811 仙台市青葉区一番町一丁目2番25号（仙台NSビル）
 北陸支社 ☎ 0764)41-1231 〒930-0004 富山市桜橋通3番1号（富山電気ビル）
 中部支社 ☎ 052)204-0290 〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目19番24号（名古屋第一ビル）
 関西支社 ☎ 06)6455-3800 〒553-0002 大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号（富士電機大阪ビル）
 中国支社 ☎ 082)247-4231 〒730-0021 広島市中区胡町4番21号（朝日生命広島胡町ビル）
 四国支社 ☎ 087)851-9101 〒760-0017 高松市番町一丁目6番8号（高松興銀ビル）
 九州支社 ☎ 092)731-7111 〒810-0001 福岡市中央区天神二丁目12番1号（天神ビル）

北関東支店 ☎ 0485)26-2200 〒360-0037 熊谷市筑波一丁目195番地（能見ビル）
 首都圏北部支店 ☎ 048)657-1231 〒330-0802 大宮市宮町一丁目38番1号（野村不動産大宮共同ビル）
 首都圏東部支店 ☎ 043)223-0701 〒260-0015 千葉市中央区富士見二丁目15番11号（日本生命千葉富士見ビル）
 神奈川支店 ☎ 045)325-5611 〒220-0004 横浜市西区北幸二丁目8番4号（横浜西口KNビル）
 新潟支店 ☎ 025)284-5314 〒950-0965 新潟市新光町16番地4（荏原新潟ビル）
 長野システム支店 ☎ 026)228-6731 〒380-0836 長野市南県町1002番地（陽光エースビル）
 長野支店 ☎ 0263)36-6740 〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号（長野県鋳物会館）
 岡山支店 ☎ 086)227-7500 〒700-0826 岡山市磨屋町3番10号（住友生命岡山ニューシティビル）
 山口支所 ☎ 0836)21-3177 〒755-8577 宇部市相生町8番1号（宇部興産ビル）
 松山支店 ☎ 089)933-9100 〒790-0878 松山市勝山町一丁目19番地3（青木第一ビル）

北見営業所 ☎ 0157)22-5225 〒090-0831 北見市西富町163番地30
 釧路営業所 ☎ 0154)22-4295 〒085-0032 釧路市新栄町8番13号
 道東営業所 ☎ 0155)24-2416 〒080-0803 帯広市東三条南十丁目15番地
 青森営業所 ☎ 0177)77-7802 〒030-0861 青森市長島二丁目25番3号（ニッセイ青森センタービル）
 盛岡営業所 ☎ 019)654-1741 〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16番21号（住友生命盛岡駅前ビル）
 秋田営業所 ☎ 0188)24-3401 〒010-0962 秋田市八橋大畑一丁目5番16号
 山形営業所 ☎ 023)641-2371 〒990-0057 山形市宮町一丁目10番12号
 福島営業所 ☎ 0249)32-0879 〒963-8004 郡山市中町1番22号（郡山大同生命ビル）
 茨城営業所 ☎ 029)266-2945 〒311-1307 茨城県東茨城郡大洗町桜道304番地（茨交大洗駅前ビル）
 金沢営業所 ☎ 076)221-9228 〒920-0031 金沢市広岡一丁目1番18号（伊藤忠金沢ビル）
 福井営業所 ☎ 0776)21-0605 〒910-0005 福井市大手二丁目7番15号（安田生命福井ビル）
 山梨営業所 ☎ 0552)22-4421 〒400-0858 甲府市相生一丁目1番21号（清田ビル）
 松本営業所 ☎ 0263)33-9141 〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号（長野県鋳物会館）
 岐阜営業所 ☎ 058)251-7110 〒500-8868 岐阜市光明町三丁目1番地（太陽ビル）
 静岡営業所 ☎ 054)251-9532 〒420-0053 静岡市弥勒二丁目5番28号（静岡荏原ビル）
 浜松営業所 ☎ 053)458-0380 〒430-0935 浜松市伝馬町312番地32（住友生命浜松伝馬町ビル）
 豊田営業所 ☎ 0565)29-5771 〒471-0835 豊田市曙町三丁目25番地1
 和歌山営業所 ☎ 0734)32-5433 〒640-8052 和歌山市鷺の森堂前丁17番地
 山陰営業所 ☎ 0852)21-9666 〒690-0007 松江市御手船場町549番地1号（安田火災松江ビル）
 徳島営業所 ☎ 0886)55-3533 〒770-0832 徳島市寺島本町東二丁目5番地1（元木ビル）
 高知営業所 ☎ 0888)24-8122 〒780-0870 高知市本町四丁目1番16号（高知電気ビル）
 小倉営業所 ☎ 093)521-8084 〒802-0014 北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号（富士電機小倉ビル）
 長崎営業所 ☎ 095)827-4657 〒850-0037 長崎市金屋町7番12号
 熊本営業所 ☎ 096)387-7351 〒862-0954 熊本市神水一丁目24番1号（城見ビル）
 南九州営業所 ☎ 099)224-8522 〒892-0846 鹿児島市加治屋町12番7号（日本生命鹿児島加治屋町ビル）
 沖縄営業所 ☎ 098)862-8625 〒900-0005 那覇市天久1131番地11（ダイオキビル）

エネルギー製作所 ☎ 044)333-7111 〒210-8530 川崎市川崎区田辺新田1番1号
 変電システム製作所 ☎ 0436)42-8111 〒290-8511 市原市八幡海岸通7番地
 東京システム製作所 ☎ 042)583-6111 〒191-8502 日野市富士町1番地
 神戸工場 ☎ 078)991-2111 〒651-2271 神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
 鈴鹿工場 ☎ 0593)83-8100 〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
 松本工場 ☎ 0263)25-7111 〒390-0821 松本市筑摩四丁目18番1号
 山梨工場 ☎ 0552)85-6111 〒400-0222 山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
 吹上工場 ☎ 0485)48-1111 〒369-0192 埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
 大田原工場 ☎ 0287)22-7111 〒324-8510 大田原市中田原1043番地
 三重工場 ☎ 0593)30-1511 〒510-8631 四日市市富士町1番27号

（株）富士電機総合研究所 ☎ 0468)56-1191 〒240-0194 横須賀市長坂二丁目2番1号
 （株）F F C ☎ 03)5351-0200 〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号（新宿コヤマビル）

