

MITSUBISHI

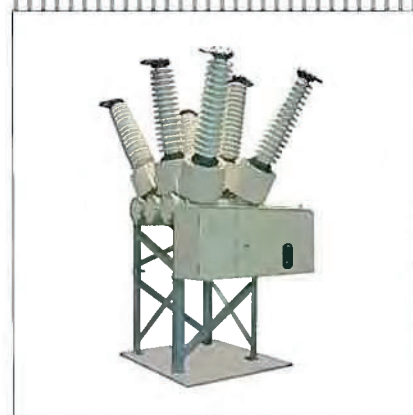
三菱電機技報

Vol.83 No.11

2009 11

特集Ⅰ「交通システムにおける環境社会への取り組み」

特集Ⅱ「21世紀の電力流通を支える最新技術」



目次

特集Ⅰ「交通システムにおける環境社会への取り組み」

サステナブルな交通システム	1
須田義大	
交通システムにおける環境社会への取り組み	2
小尾秀夫・作田昌弘	
蓄電池技術を応用した車両用推進制御システム	6
北中英俊・石田貴仁・白木智之・白木直樹・竹田進治	
回生エネルギー貯蔵システム	9
竹岡俊明・松村 寧・北中英俊・畠中啓太・山田健一	
鉄道車両用パワーデバイスの動向	13
小林知宏・梅崎 勲・中山 靖	
列車運転制御における省エネルギー化	16
吉本剛生・廣石 高・鳥居尚史・田原一浩・青山武郎	
N700系新幹線用空調装置における 省エネルギー・低振動化への取り組み	20
首藤克則・宮下 剛・福井智巳	
鉄道電力システムにおける環境への取り組み	24
岩山利幸・高橋邦明・木内浩司・藤田敬喜	
特集Ⅱ「21世紀の電力流通を支える最新技術」	
低炭素社会を支える 次世代電力ネットワーク技術への期待	27
栗原郁夫	
21世紀の電力流通を支える最新技術	28
福井伸太	
高性能センサによるCBMとSF ₆ ガス排出抑制技術	33
亀井光仁・西田智恵子	
高経年GCB・GISの劣化評価技術と更新技術	37
望月哲夫・皆川忠郎・笹森健次	
経年変圧器の劣化評価技術と更新技術	41
大野孝雄・土江博美・網本 剛	
保護制御装置更新に対応した最新技術	45
伊藤健司・長澤 宏・磯松信夫・臼井正司・佐藤 廣	
自然エネルギー導入のための系統解析技術	49
藤原修平・黒田憲一・小島康弘	

Towards Energy-saving of Transportation System for Environmentally Sustainable Society
Sustainable Transportation Systems
Yoshihiro Suda

Towards Energy-saving of Transportation System for Environmentally Sustainable Society
Hideo Obi, Masahiro Sakuta

Propulsion Systems Using Energy Storage Technology
Hidetoshi Kitanaka, Takahito Ishida, Tomoyuki Shiraki, Naoki Shiraki, Shinji Takeda

Advanced Technologies for Regenerative Brake Energy Storage System
Toshiaki Takeoka, Yasushi Matsumura, Hidetoshi Kitanaka, Keita Hatanaka, Kenichi Yamada

Trend of Power Device for Railway Vehicle
Tomohiro Kobayashi, Isao Umezaki, Yasushi Nakayama

Energy-saving Train Control System
Kouki Yoshimoto, Takashi Hiroishi, Hisashi Torii, Kazuhiro Tahara, Takeo Aoyama

Approach to Energy Saving and Vibration Reduction in Air Conditioning System for Series N700 Shinkansen
Katsunori Shudo, Tsuyoshi Miyashita, Tomomi Fukui

Ecological Approach in Traction Power Supply System
Toshiyuki Katsurayama, Kuniaki Takahashi, Hiroshi Kiuchi, Keiki Fujita

State-of-the-art Power Grid Technologies in the 21st Century

Expectations for Smart Grid Technologies to Support Low Carbon Society
Ikuo Kurihara

State-of-the-art Power Grid Technologies in the 21st Century
Shinta Fukui

CBM Management and Reduction of SF₆ Gas Emission Using High Accuracy Sensor
Mitsuhito Kamei, Chieko Nishida

Deteriorating Portions Detection and Replacement Technologies for Aged GCBs and GISs
Tetsuo Mochizuki, Tadao Minagawa, Kenji Sasamori

Deterioration Assessment and Replacement Technology for Aging Transformers
Takao Ohno, Hiroyoshi Tsuchie, Tsuyoshi Amimoto

Recent Technology for Replacement of Protection & Control Systems
Kenji Itou, Hiroshi Nagasawa, Nobuo Isomatsu, Masaji Usui, Hiroshi Sato

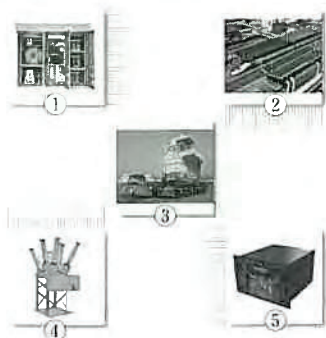
Power System Analysis for Renewable Energy
Shuhei Fujiwara, Kenichi Kuroda, Yasuhiro Kojima

特許と新案

「容器」「真空バルブ」	53
「電気機器の絶縁診断方法」	54

スポットライト

簡易据置型SF₆ガスローリーク監視装置



表紙：交通システムにおける環境社会への取り組み

三菱電機は、電機品の高効率化、車両制御の高度化とともに、電力貯蔵システムの有効活用、さらには太陽光発電システムの導入に取り組んでいる。表紙の写真は、①余剰となる回生電力を貯蔵する地上用電力貯蔵システム、②駅に設置された屋根一体型太陽光発電システムである。

表紙：21世紀の電力流通を支える最新技術

表紙の写真は、この特集号で紹介している“21世紀の電力流通を支える最新技術”を駆使した当社製品である。③主変／所変一体形コンパクト・低損失変圧器、④点検周期を延伸した新形84／72kV GCB、⑤新形ユニット形デジタルリレー

サスティナブルな交通システム

Sustainable Transportation Systems



須田義大
Yoshihiro Suda

地球上の生物の中で、人類ほどモビリティが活発な生き物はないと思われる。人類の進化に密接に関係したと考えられるモビリティであるが、エネルギーとエコを考慮した新たな仕組みが求められている。モビリティの基本はパーソナルな行動である人間の歩行である。より速く、より楽に移動するための工夫として、馬などの動物利用から、動力利用の交通機械が発明された。高価な蒸気機関を有効活用することに英知を働かせて実現したのが鉄道であり、動力源の変化によって自動車を実現した。電気動力利用から電気鉄道が大きく発展した。多くの交通需要を、安全に、かつ信頼性を確保して輸送を行うことから、個別の車両をオーガナイズして運行することが求められた。それを実現したのが近代的な鉄道であり、自動車交通におけるITS（高度道路交通システム）である。今後のモビリティは、鉄道などの軌道系公共交通システム、ITS化された自動車交通と、電気動力と人力を活用したPMV（パーソナルモビリティビークル）を使い分けることになると考えられる。

これらのサスティナブルな交通システムの課題は、エネルギーの徹底的な有効活用と、効率的なオペレーションであろう。車両単体のエネルギー効率向上はもちろん進化が望まれるが、運転の仕方によって、走行エネルギーは大きく異なってくる。

本来、平面内の移動には物理学的にはエネルギーを必要としない。つまり走行エネルギーはブレーキ時に回生が重要で、必然的に電力利用が主体となる。電力貯蔵の技術は難しく、架線集電方式の電気鉄道が早くから実現した。ところが、近年のエネルギー貯蔵技術の進展はめざましく、化学エネルギーに貯蔵するニッケル水素方式、リチウムイオン方式のバッテリーによって、電気自動車が再度注目され、さらに鉄道であってもLRT（ライトレール）のような軽車両であれば走行可能となってきた。キャパシタやフライホイール、位置エネルギーの活用といった化学変化を用いない方式の展開も進められている。

地上一次の活用や現実的な車載用蓄電池が実現すると、鉄道においても架線レスによってインフラ設備の軽減というメリットも出てくる。LRTであれば駅停車で充電し、駅間を架線レス走行する。通常の鉄道ならば、駅間の架線で充電し、分岐がある駅構内で架線を廃止し、省力化と駅構内の安全性を向上させられる。

走行抵抗の低減も重要である。タイヤと路面、車輪とレールの技術革新が望まれる。鉄道における鉄車輪・鉄レールは転がり摩擦が小さいことが特徴であるが、曲線通過においては、不必要な摩擦力が発生し抵抗になる。元々鉄道車両では曲線旋回性能は一つのネックであり、LRTの本格的普及には、道路上の交差点を内回りするような半径10mを旋回可能な技術革新が求められてくる。そこで登場するのが操舵（そうだ）台車や摩擦調整材による摩擦制御技術であり、さらには、逆路面勾配（こうばい）を用いた車軸付き独立回転車輪という新方式である。車輪の路面勾配を外側にいくほど車輪半径を大きくすると、重力の復元力が自己操舵モーメントとして作用する。常識を覆す方式であるが、原理上はどんな急曲線であっても車輪とレールの滑りを最小限に抑えて、摩擦と走行抵抗をとことん軽減できる。

効率的な運行については、元々鉄道固有の技術であるが、省エネルギー運転に向けてITS技術との連携も重要になると思われる。すなわち、IT・デジタル地図と位置検知による車両制御である。無線通信や、GPS（Global Positioning System）を利用した位置検知技術の進展によって、ハードウェアとしてインフラと直接やりとりを行わなくても、車上に高精度のデジタル地図データを持ち、位置検知技術を組み合わせることによって、仮想的なインフラとの相互作用を実現できる。ナビ連動のトランスミッションの制御、サスペンションの制御や、さらには速度制御が市販乗用車で実現した。今後の交通システムの更なるイノベーションに期待したい。

巻頭論文

交通システムにおける 環境社会への取り組み



小尾秀夫*



作田昌弘**

Towards Energy-saving of Transportation System for Environmentally Sustainable Society

Hideo Obi, Masahiro Sakuta

要 旨

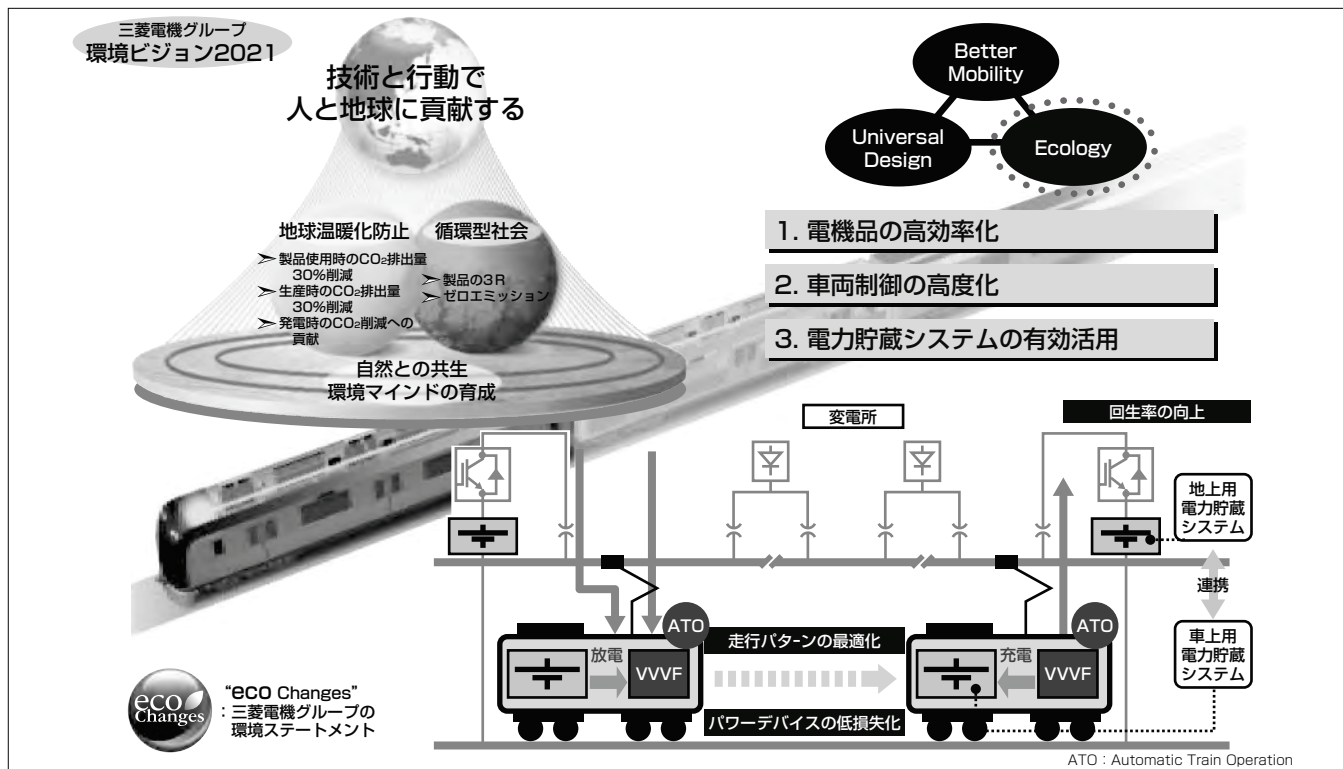
三菱電機は、創立100周年の年である2021年を目標年とする、三菱電機グループの環境経営における長期ビジョン“環境ビジョン2021”を2007年に策定した。そして、“技術と行動で人と地球に貢献する”を指針に、事業活動を通じ、持続可能な社会の実現に貢献するために、地球温暖化防止と循環型社会の形成に取り組んでいる。また、自然と共生し、環境マインドを持った人材の育成にも努めている。

交通事業では、“Better Mobility”をスローガンとして、鉄道の価値向上につながる製品を提供してきた。車両システムを基幹製品に、信号、通信、指令、電力、駅、基地などの地上システムでも豊富な実績を積み重ねてきた。特に、近年は製品開発に当たって、“ユニバーサルデザイン”と“エコロジー”を念頭に置き、人と環境に優しい交通システムの構築に取り組んでいる。現在、国内はもとより、世界20か国以上で当社製品が活躍しており、世界No.1の車両用電機品メーカーを目指して努力している。

鉄道は人・km当たりのCO₂排出量が乗用車の約1/10と言われるように、“環境の優等生”である。一方、環境への意識は地球規模での高まりを見せており、鉄道に対しても、更なる環境負荷低減が期待されている。

当社は、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータに代表される電動機制御の高効率化、回生ブレーキの導入、装置の小型・軽量化など、これまでも積極的・継続的に鉄道の環境負荷低減に取り組んできた。現在は、電機品の高効率化、車両制御の高度化、電力貯蔵システムの有効活用などの開発を進めている。今後も、車両システムから地上システムまでに関する幅広い高度な技術を提供できる交通システムプロバイダーとしての特長を生かして、鉄道における更なる環境負荷低減に貢献していく所存である。

本稿では、鉄道における省エネルギー化の経緯と展望を中心に、当社の交通システムにおける環境社会への取り組みについて述べる。



交通システムにおける環境社会への取り組み

当社は、“環境ビジョン2021”のもと、車両システム、車両制御システム、電力システムなど様々なシステム間で連携を取り、鉄道における省エネルギー化に向けた最適なソリューションを提供していく。

1. ま え が き

当社は環境経営における長期ビジョン“環境ビジョン2021”を策定し全社的な取り組みを行っている。交通事業でも、“エコロジー”を念頭に置いて、環境に優しい交通システムの構築に取り組んでいる。一方、世界は今、地球規模で環境意識の高まりを見せており、“環境の優等生”である鉄道に対しても更なる環境負荷低減が期待されている。この要請にこたえ、鉄道の省エネルギー化に取り組むとともに、安全・安定輸送を確保することによって、鉄道の価値向上に貢献することは、当社交通事業における最も重要な課題である。

本稿では、このような背景に基づき、鉄道における省エネルギー化の経緯と展望を中心に、当社の交通システムにおける環境社会への取り組みについて述べる。

2. 鉄道の省エネルギー化

現在の鉄道は電気駆動が主流となり、人・km当たりのCO₂排出量は乗用車の約1/10で済むと言われている。こうした“環境の優等生”である電気鉄道車両(以下“車両”という。)のエネルギーフローを図1に示す。

架線から入力された電気エネルギーは、走行に必要な運動エネルギーに変換されるとともに、空調装置や補機で消費される。電気エネルギーを運動エネルギーに変換する際には、主回路(推進制御装置・主電動機)における損失と車両の機械系や走行抵抗による損失が発生する。そして、車両が持つ運動エネルギーは、ブレーキ時に主電動機を発電機として作用させることによって、回生エネルギーとして架線に返すことができる。

図1からわかるように、鉄道の省エネルギー化には、各種の損失及び空調・補機エネルギーの最小化、入力エネルギーの最小化、そして回生エネルギーの最大化が必要である。当社は、これらの課題に対して、電機品の高効率化、車両制御の高度化、電力貯蔵システムの有効活用に取り組んでいる。

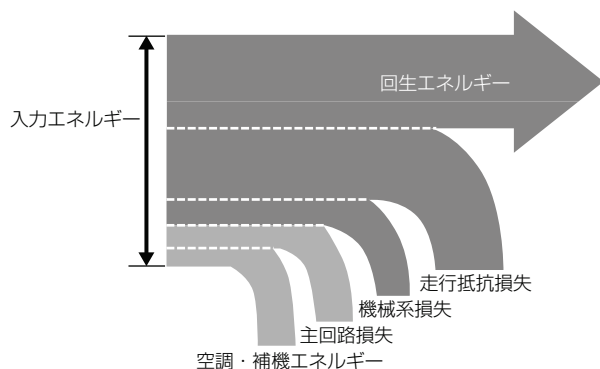


図1. 車両のエネルギーフロー

3. 電機品の高効率化

電機品の高効率化は主回路損失又は補機エネルギーを削減するとともに、装置が小型・軽量化できることによって、入力エネルギーの削減にもつながっている。次に、主要な電機品の高効率化について述べる。

3.1 推進制御装置

当社は、インバータ制御の先駆者として、交流駆動化を率先して推進してきた。また、インバータ制御装置の核となるHVIPM(High Voltage Intelligent Power Module)やパワーユニット、ゲート制御装置をすべて自社内で一貫生産するとともに、ハードウェアとソフトウェアを統合した設計製造体制によって、鉄道車両向けの高い品質を実現している。パワーデバイスの開発にも注力し、図2に示すように、GTO(Gate Turn-Off)サイリスタからIGBT(Isolated Gate Bipolar Transistor)へ、更にはIGBTとその制御・保護機能を同一パッケージに格納したHVIPMを他社に先駆けて実用化し、パワーデバイスの高耐圧化、大電流化、低損失化、インテリジェント化による装置の小型化・高性能化を実現してきた。最近では、定格電流の25%増加、最大動作温度の150℃化を図った“RシリーズHVIPM”を開発した。これによって、従来のパワーデバイスでは限界となっていた装置の小型化を更に進化させた。

一方、シリコン(Si)に比べて、低損失でかつ高温動作が可能なシリコンカーバイド(SiC)が次世代パワーデバイス材料として期待されている。SiCを適用することによって、更なる装置の高効率化と小型・軽量化が可能である。当社は、11kWのSiCインバータを開発し、Siインバータと比較して、損失で70%、体積で75%の低減を達成している。さらに、高耐圧・大電流化に向けた開発を進めている。

3.2 主電動機

主電動機は従来、銅損失、鉄損失の低減が進み、開放形誘導電動機の効率は約92%に達している。また、全閉形誘導電動機では、回転子バーに低抵抗材料を採用することによって、更に効率を2~3%改善している。こうした状況から、当社は主電動機単体での高効率化だけではなく、主回路全体の高効率化、小型・軽量化に向けた開発を進めている。

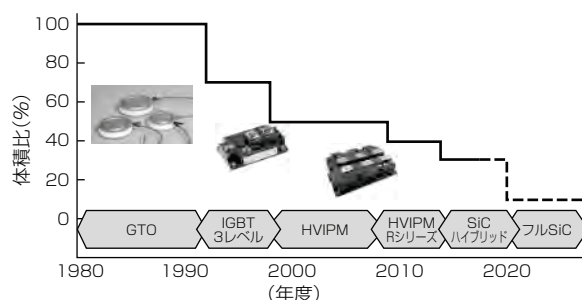


図2. パワーデバイスの発展とパワーユニットの小型化

3.3 空調装置

空調装置の冷房能力は通勤車で約58kW/両、新幹線で約76kW/両にも達しており、空調・補機エネルギーに占める割合が大きい。当社は空調装置の高効率化を図るために、全熱交換器を搭載した空調装置を開発した。全熱交換器は車内に取り込んだ外気と車内からの排気との間で、温度と湿度を同時に交換することができるので、排気熱をそのまま捨てることなく回収できる。これによって、外気取り入れによる熱負荷が低減され、圧縮機の台数削減が可能になる。例えば、N700系用空調装置では700系用空調装置と比較して、圧縮機を1台削減でき、消費電力は約11%削減することができた。

4. 車両制御の高度化

車両制御の高度化は入力エネルギーの削減とともに、回生エネルギーの増加にも貢献している。次に、車両情報制御システムと自動列車運転装置での取り組みについて述べる。

4.1 車両情報制御システム

当社は1979年から、三世代の車両情報制御システムを国内外の50以上の鉄道事業者提供してきた。第二世代のTIS(Train control Information management System)と第三世代TIMS(Train Integrated Management System)では、各車両の搭載機器をネットワークでつなぎ、制御指令の伝送と情報の統合管理を実現することによって、省エネルギー化にも貢献している。具体的には、ネットワーク化によって引通し線は大幅に削減され、電線質量が約50%削減された。また、編成単位で電気／空気ブレーキ力を最適に配分する編成ブレンディング制御によって、回生エネルギーを発生させる電気ブレーキを最大限に活用できるようになった。今後も、車両情報制御システムは列車単位の省エネルギー化で中核的な役割を果たすと考えられる。

4.2 自動列車運転装置

自動列車運転装置ATO(Automatic Train Operation)は省力化を目的に開発されたが、入力エネルギーの削減にも役立つ。当社はATOの国内トップシェアメーカーとして、二つの観点から運転制御における省エネルギー化に取り組んでいる。まず、定常走行時では、勾配(こうばい)を考慮して惰行を多用することによって、駅間走行時分を守りながら、消費電力量を従来よりも最大10%程度削減できることが確認されている。また、ダイヤ乱れ時では、先行列車の位置、さらには進路開通予測時刻を考慮して、適切なタイミングで加速・減速する予測制御ATOについても、実用化に向けた開発を進めている。

5. 電力貯蔵システムの有効活用

鉄道の省エネルギー化は、車両が持つ運動エネルギーを

表1. 電力貯蔵デバイスの比較

	電気二重層キャパシタ	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池
特長	急速充放電が可能	放電持続力が高い	放電持続力が高い
注意点	端子電圧の変動が大きい	残容量の把握が難しい	保護装置が不可欠
容量	小さい	比較的大きい	大きい
寿命	長い	比較的に長い	短い
電極材料	主原料は活性炭	希少金属を使用	希少金属を使用

ブレーキ時に回生エネルギーとして取り出す回生ブレーキの実用化によって大きく進歩した。当社は、通勤車から新幹線までの様々な車両で回生ブレーキを実用化してきた。また、インバータ制御装置の制御応答・精度の改善、編成ブレンディング制御、更には回生インバータの適用などによって、回生エネルギーの最大化に取り組んできた。

一方、回生エネルギーを消費する負荷が絶対的に不足する場合には、回生ブレーキは十分に作用せず、車両が持つ運動エネルギーの一部は熱として消費されている。これに対して、近年電力貯蔵システムの有効活用に期待が集まっている。電力貯蔵システムは、リチウムイオン電池などの電力貯蔵デバイスとその充放電を制御するDC/DCコンバータ装置を組み合わせ、回生エネルギーを吸収・再利用できるようにしている。代表的な電力貯蔵デバイスの比較結果を表1に示す。

当社は、これまで培ってきたパワーエレクトロニクス技術を駆使して、それぞれの電力貯蔵デバイスの特性に対応した充放電制御の開発を進めている。現在、リチウムイオン電池を用いて、車上設置と地上設置の電力貯蔵システムを開発し、小田急電鉄(株)と共同で、充放電制御の動作及び回生率の改善効果を検証している。また、東日本旅客鉄道(株)と共同で、同じくリチウムイオン電池を用いて、非電化区間向けの蓄電池駆動電車システムと架線停電時の緊急走行システムを開発している。

電力貯蔵デバイスは、技術進歩が著しいことから、今後の動向を注視して鉄道向けに最適なデバイスを選択する必要があると考えている。その上でデバイスに対応した充放電制御方式を確立して、各用途向けの電力貯蔵システムの実用化に取り組む所存である。

6. 電力システムにおける取り組み

車両に電力を供給する電力システムは、鉄道の根幹を支える重要なものである。この分野で当社は、“Harmony：地域環境との調和”“Ecology：地球との共存”“Friendly：設備とヒトの融合”を環境コンセプトとして、電力供給の安定化・省力化とともに、環境負荷低減に取り組んできた。環境負荷低減では、回生インバータによる回生電力の有効利用、ガス絶縁開閉装置の脱SF₆化、騒音・電磁界シミュレーションによる変電所設備の環境評価などを積極的に進めてきた。最近では、電力貯蔵システムを車上と地上に設置

した場合のエネルギーフローを解析するための、車上・地上システム統合電力シミュレータの開発、太陽光発電システムの導入に取り組んでいる。

6.1 車上・地上システム統合電力シミュレータ

電力貯蔵システムの効率的な運用には、車上及び地上に設置するデバイスの容量の配分と特性の設定、き電回路網上での設備位置が重要である。このために、当社はき電システム、車両システムを統合して扱うことが可能な統合電力シミュレータPETS-DC(Power Estimation of Transportation System-DC feeding system)を開発し、直流き電システムにおけるエネルギーフローの最適化に取り組んでいる。

PETS-DCは複線、複々線、単線からなる大規模路線における、分割・併合を含む高密度な列車運行を対象とする。シミュレーションの入力として、路線、き電系統、運行ダイヤ、車両、変電所、電力貯蔵システムの各モデルを設定することによって、列車運行に応じた、き電回路網の状態変化を求めることができる。なお、電力貯蔵システムはすべての変電所と車両に設置することが可能である。

現在、大手私鉄路線を対象として種々の条件でシミュレーションを行い、電力貯蔵システム導入による変電所出力の低減、回生電力の増加を評価している。

6.2 太陽光発電システム

電力消費量の多い公共施設・事業所などでは、化石燃料を使わない太陽光発電の導入が期待されている。当社は、太陽電池セルからパワーコンディショナまでを自社内で一貫生産しており、信頼性の高い太陽光発電システムを提供している。性能面でも、太陽電池セルは世界最高の変換効率(多結晶シリコンで18.9%)^(注1)を、産業用(100kW)パワーコンディショナは業界最高の電力変換効率(97.5%)^(注1)を実現している。

鉄道事業者向け導入事例として、東日本旅客鉄道(株)の上越新幹線高崎駅に設置された屋根一体型システム(200kW, 三相)を図3に示す。

(注1) 2009年2月現在、当社調べ



図3. 太陽光発電システムの設置事例

7. 設計・生産時における取り組み

当社は、車両電機品を中心に、設計段階でLCA(Life Cycle Assessment)手法を適用した環境負荷評価に継続的に取り組んでいる。これによって、省エネルギー化だけでなく、カドミウムなど有害特定化学物質の排除、走行風を利用した冷却方式によるフロンなどの冷媒レス化、主電動機の全閉化などによる低騒音化、徹底したEMC(Electro Magnetic Compatibility)対策、リサイクル可能なアルミニウムの使用などを積極的に進めている。また、三次元CAD(Computer Aided Design)設計を駆使したデジタルモックアップによる設計品質の向上や、大型EMC試験設備による精度の高い検証評価も環境負荷低減に役立っている。

また生産時でも、廃棄物の削減、リサイクルの推進に取り組んでいる。例えば、交通システムの製造拠点である当社伊丹製作所では、近隣製作所と連携し購入品とともに持ち込まれるクッション材を再利用することによって、クッション材の購入量を半減させている。

8. む す び

持続可能な社会の実現は、今や地球規模の要請となっている。今後とも、当社は幅広い高度な技術力と長年培ってきたシステム構築力をもって、鉄道における更なる環境負荷低減に貢献していく所存である。

蓄電池技術を応用した 車両用推進制御システム

北中英俊* 白木直樹**
石田貴仁* 竹田進治**
白木智之*

Propulsion Systems Using Energy Storage Technology

Hidetoshi Kitanaka, Takahito Ishida, Tomoyuki Shiraki, Naoki Shiraki, Shinji Takeda

要 旨

鉄道システムは、エネルギー効率が良く、地球環境への負荷が少ないシステムである。三菱電機はこれまでにパワーエレクトロニクス技術を駆使した回生ブレーキや、電力制御技術をベースとして数多くの車両用推進制御装置を実用化し、これらの要求にこたえてきた。

しかしながら、更なる省エネルギー化、環境負荷の低減、また安定輸送の向上への限りない要求がある。

電気鉄道の推進制御システムはこれまで、パンタグラフを通して架線から電力を受電して走行するシステムとして発展してきた。架線を通して容易に電気エネルギーを得ることができるため、車両にエネルギー源を搭載する必要がなく、軽量で大出力の車両を構成できるというメリットがある。

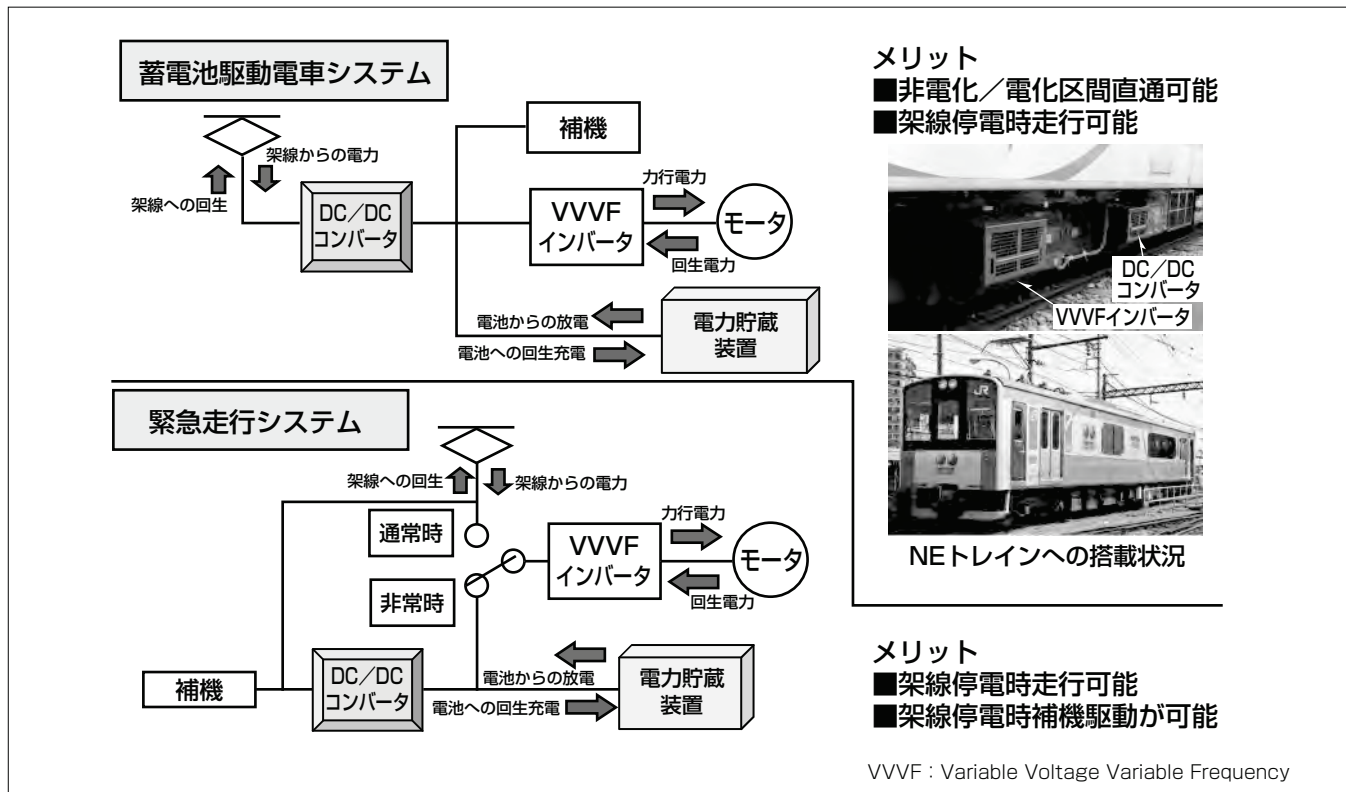
近年、リチウムイオン電池をはじめとする電力貯蔵デバイスの性能が向上し、産業用途でも適用され始めており、

回生エネルギーの吸収や架線電圧の補完用途など、電気鉄道への適用も検討されている。電力貯蔵デバイスを組み合わせることで、これまで不可能であった魅力ある推進制御システムを構築できる可能性がある。

今回、電力貯蔵デバイスとしてリチウムイオン電池を応用し、次の車両用推進制御システムを開発した。

- ①非電化区間の電気駆動化による環境負荷低減を可能とし、電化区間との直通走行が可能な蓄電池駆動電車システム
- ②架線停電時に、最寄り駅までの列車の自力退避を可能とする緊急走行システム

蓄電池駆動電車システムについては、2009年度下期から、東日本旅客鉄道㈱のNEトレインへ搭載し、システム評価を行う計画である。また、緊急走行システムについても、今後現車搭載して詳細検討を進める計画である。



蓄電池技術を応用した車両用推進制御システム

蓄電池技術を応用することで、電気エネルギーを貯蔵し必要なときに再利用することが可能となり、これまで不可能であった魅力ある推進制御システムを構成できる。上図は非電化区間と電化区間を直通可能な蓄電池駆動電車システムと、架線停電時に走行可能な緊急走行システムの構成を示す。

1. ま え が き

電気鉄道の推進制御システムはこれまで、パンタグラフを通して架線から電力を受電して走行するシステムとして発展してきた。架線を通して容易に電気エネルギーを得ることができるため、車両にエネルギー源を搭載する必要がなく、軽量で大出力の車両を構成できるメリットがある。一方、近年、リチウムイオン電池をはじめとする電力貯蔵デバイスの性能が向上し、産業用途でも適用され始めており、回生エネルギーの吸収や架線電圧の補完用途等の電気鉄道への適用も検討されている。電力貯蔵デバイス応用することで、これまで不可能であった魅力ある推進制御システムを構築できる可能性がある。

本稿では、大容量のリチウムイオン電池を使用して開発中の蓄電池駆動電車システムと、緊急走行システムについて述べる。

2. 蓄電池駆動電車システム

2.1 概 要

このシステムは非電化区間を走行する次世代形車両として、既存気動車と比較してCO₂の低減、排出ガスのゼロ化、低騒音化を図ることを目的としており、次の特長を持つ。

- ①非電化区間は蓄電池で走行し、電化区間／非電化区間の直通運転が可能
- ②電化区間では蓄電池と架線からの電力を併用する架線ハイブリッドシステムとして動作が可能
- ③蓄電池異常時は、蓄電池を開放して架線からの電力のみで走行可能な冗長性に配慮したシステム
- ④非電化区間でのシステム効率を高めた回路構成

2.2 主要諸元

表1に、今回開発した蓄電池駆動電車システムの主要諸元を示す。

2.3 主回路構成

図1に主回路構成図を示す。

パンタグラフ直下にDC／DCコンバータを配置し、

表1．蓄電池駆動電車システムの主要諸元

電気方式	DC1,500V(架線)／DC600V(蓄電池)	
編成	0.5M0.5T	
DC／DC コンバータ	回路構成	昇降圧PWMチョッパ 600kW
	制御機能	架線／電池電流分担制御機能
		急速充電機能 定電圧出力機能(蓄電池開放時)
VVVF インバータ	回路構成	三相2レベルPWMインバータ
	制御機能	トルク制御(ベクトル制御)
主電動機	三相誘導電動機	95kW×2
主蓄電池	種類	リチウムイオン電池
	システム電圧	605V
	システム容量	160kWh

PWM: Pulse Width Modulation

DC／DCコンバータの出力にVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ、SIV(Static Inverter)装置、主蓄電池を並列に接続したシステム構成とした。

非電化区間では、主蓄電池をVVVFインバータとSIV装置へ直結する構成とし、損失低減を可能とした。

電化区間では、架線からのDC1,500VをDC／DCコンバータで降圧し、VVVF、SIVへの電力供給を行うとともに、主蓄電池への充放電を行うシステムとした。なお、主蓄電池には600V系のリチウムイオン電池を採用したが、これ以外の蓄電池との組合せも可能である。

2.4 制御系構成

このシステムは、表2に示す制御機能を実現している。

電化区間では、VVVFインバータからの回生電力は電池が過充電とならない範囲で極力電池へ回収し、非電化区間進入前の急速充電を不要とするよう構成した。なお、電池電圧が所定以上に上昇すると、回生電力の一部を架線へ回生して電池電圧の上昇を抑制する機能を持つ。

力行時は電池電流ゼロ制御とし、力行電力はすべて架線から供給する構成を基本とした。スイッチ操作で力行アシストモードを選択することで、例えば架線電圧低下時に力行電力の一部を電池から放電することも可能である。

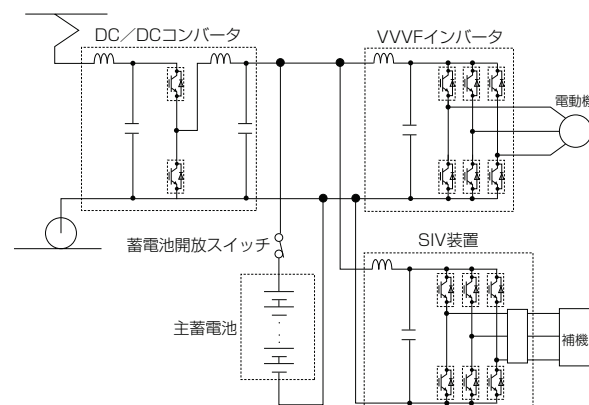


図1．蓄電池駆動電車システムの主回路構成図

表2．システムの制御機能

運転区間	装置	制御状態	
非電化区間	DC／DC	停止	
	VVVF	電池電圧リミット制御(過充電／過放電防止)	
電化区間	電池健全時	力行時	電池電流ゼロ制御(力行電力は架線から供給) 力行アシスト放電制御、蓄電池調整充放電制御
		回生時	架線電流ゼロ制御(回生電力は電池に回収) ※電池電圧が高いときは過剰分を架線へ回生 蓄電池調整充放電制御
		惰行時	蓄電池調整充放電
	電池開放時	VVVF	トルク制御、電池電圧リミット制御(過充電／過放電防止)
		DC／DC	出力定電圧制御(DC600V一定制御)
		VVVF	トルク制御
急速充電時	DC／DC	蓄電池への充電電流制御 電池電圧リミット制御(過充電／過放電防止)	
	VVVF	停止	

VVVFインバータは、従来の制御機能に加え、力行時は電池電圧が規定値より低下しないように、また回生時は電池電圧が規定値を超えないようにパワー制限する電池電圧リミッタ機能を付加した。

なお電化区間では、主蓄電池異常時などに蓄電池を開放して架線からの電力でのみ走行することを可能とし、冗長性を確保した。

2.5 試験結果について

このシステムの工場での組み合わせ試験状況を図2に示す。電化区間／非電化区間走行とも、所望の性能を確認できた。

2.6 今後の展開

2009年度下期から、東日本旅客鉄道(株)のNE(New Energy)トレインにこのシステムを搭載し、現車走行試験を通してシステム評価を行う計画である。

3. 緊急走行システム

3.1 概要

このシステムは、架線停電時等において、蓄電池に貯蔵した電力を利用して車両を最寄り駅まで緊急退避走行させることを目的として開発したものであり、次の特長を持つ。

- ①架線停電時には、蓄電池の電力によって、10両編成を30km/h程度(平坦(へいたん)線)で走行可能
- ②蓄電池への充電は、架線からDC/DCコンバータを用いて行うことで、特別な充電作業は不要
- ③電池走行時の損失を最小限とし、走行距離を最大化できる構成
- ④既設SIV装置への給電を可能とし、走行に必要な補機を稼働させることが可能
- ⑤DC/DCコンバータ容量の最小化が可能な構成

3.2 主要諸元

このシステムの主要諸元を表3に示す。

3.3 主回路／制御系構成

図3に主回路構成図を示す。

既存の推進制御システムに、DC/DCコンバータ、主蓄電池、切替えスイッチを追加した構成である。

蓄電池への充電は、DC/DCコンバータを電流制御モードで動作させ、走行中に架線からの電力で自動的に行う構成としたので、特別な充電作業等は不要である。

架線停電時には、蓄電池電圧を直接VVVFインバータに入力するので、電池走行時の電力損失を最小限にすることができる。

また、DC/DCコンバータを昇圧定電圧制御モードで動作させ、蓄電池電圧をDC1,500Vに昇圧してSIV装置へ電力供給するシステムとしたので、既存のSIV装置を使用して補機への電力供給が可能である。



図2. 組み合わせ試験状況

表3. 緊急走行システムの主要諸元

電気方式	DC1,500V	
編成	通常時 6 M 4 T 緊急走行時 1 M 9 T (1 M車のみ蓄電池で駆動)	
DC/DC コンバータ	回路構成	昇降圧PWMチョッパ
	制御機能	通常時 蓄電池充電制御 緊急走行時 昇圧定電圧制御 (SIV装置への供給)
主蓄電池	種類	リチウムイオン電池
	システム電圧	605V
	システム容量	36kWh

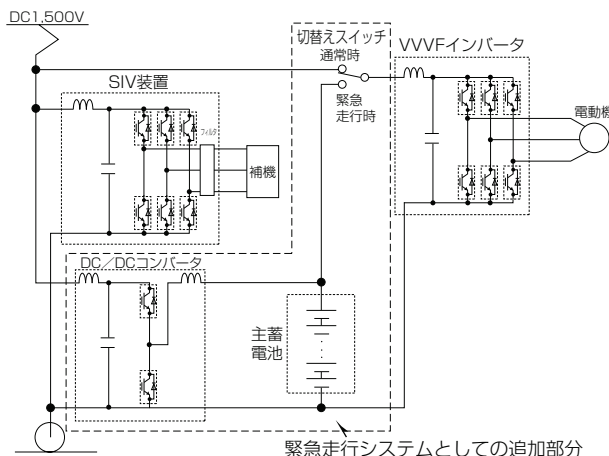


図3. 緊急走行システムの主回路構成図

充電電流は数時間で満充電とできる程度とし、停電時は重要負荷に限り電力供給することで、DC/DCコンバータ容量の最小化を可能とした。なお、主蓄電池には600V系のリチウムイオン電池を採用したが、これ以外の蓄電池との組合せも可能である。

3.4 試験結果について

台上試験で、電池駆動時のVVVFインバータの所望の動作を確認した。またDC/DCコンバータの昇圧機能によって、蓄電池でSIV装置の安定動作を確認した。

表3の構成で、補機を40kW/編成とした条件で、2 km程度の走行が可能であることを確認した。

3.5 今後の展開

今後、現車試験によって詳細検討を進める計画である。

4. む す び

電力貯蔵デバイスを応用した車両用推進制御システムの開発状況について述べた。今後は現車試験を通してシステムの評価と実用化を進める所存である。

回生エネルギー貯蔵システム

竹岡俊明* 畠中啓太*
 松村 寧* 山田健一**
 北中英俊*

Advanced Technologies for Regenerative Brake Energy Storage System

Toshiaki Takeoka, Yasushi Matsumura, Hidetoshi Kitanaka, Keita Hatanaka, Kenichi Yamada

要 旨

CO₂排出量削減をはじめとする環境負荷低減への社会的要請は、ますます強くなっている。鉄道は“環境の優等生”ではあるが、更なる省エネルギー化、環境優位性の向上を図っていく必要がある。

電気鉄道の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再利用することで省エネルギー化が可能なことである。しかし、近くに別の力行車両が存在しないなど架線下に十分な回生負荷がない場合、回生ブレーキが十分に作用せず、機械的なブレーキを併用することとなり、制動エネルギーの一部を熱として放散している。

本稿では、更なる省エネルギー化を実現する新技術として、蓄電池を用いた電力貯蔵システムの開発について述べる。電力貯蔵システムは、余剰となる回生電力を貯蔵し、必要なときに再利用できるようにしたシステムであり、鉄道の省エネルギー化に寄与するものである。

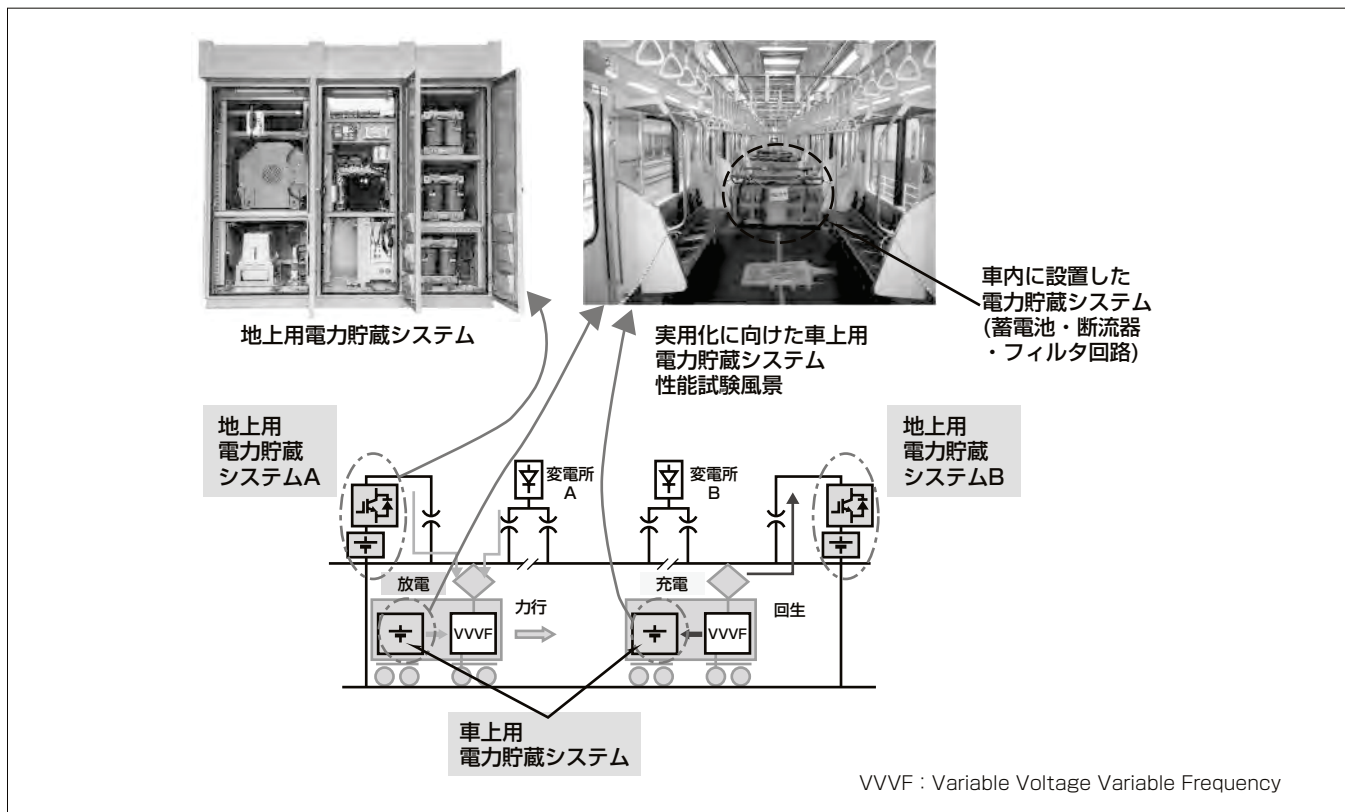
電力貯蔵デバイスにはリチウムイオン電池を採用し、車上用システム、地上用システムとも、パワーエレクトロニクス技術を駆使し、電力貯蔵デバイスへの充放電制御を行う構成とした。

また、車上用システムは小田急電鉄株の路線で走行試験を行い、充放電制御の良好な動作と、回生率改善への寄与を確認した。

地上用システムは、車上用システムで開発した要素技術を生かし、地上設備として必要な機能を付加して構成した。

さらに、車上用システム、地上用システムの最適配置、電力貯蔵デバイスの最適化を図るツールとして、新たに両システムを統合して取り扱える統合電力シミュレータを開発し、システムの最適化検討を可能とした。

これらの技術を生かし、今後も更なる環境負荷低減を図るための製品開発を推進していく所存である。



鉄道システムにおける電力貯蔵システムの運用

現在の鉄道車両で主流の回生ブレーキは、ブレーキ時に発生した回生電力を、別の力行車両で利用するシステムである。しかし負荷となる力行車両が存在しないときは、回生ブレーキが十分に作用しないために機械的なブレーキ力を併用することとなり、制動エネルギーの一部は再利用できず、熱として放散していた。今回開発した電力貯蔵システムは、余剰となった回生電力を貯蔵して、必要なときに再利用できるシステムである。車上と地上の電力貯蔵システムの最適化を図ることで、更なる省エネルギー化を実現できる。

*三菱電機株 伊丹製作所 **小田急電鉄株

1. ま え が き

CO₂排出量削減をはじめとする環境負荷低減への社会的要請は、ますます強くなっている。鉄道は“環境の優等生”ではあるが、更なる環境優位性の向上を図っていく必要がある。

本稿では、小田急電鉄株の実際の路線、車両を使った回生エネルギー貯蔵システムの開発について述べる。具体的には、蓄電池を用いて省エネルギー化を実現させる車上用と地上用電力貯蔵システムの開発試験と、更に車上／地上の最適化を可能とする統合電力シミュレータの開発について述べる。

2. 開発コンセプト

電力貯蔵システムの開発コンセプトは、鉄道における更なる省エネルギー化の実現と回生ブレーキの安定化である。

電気鉄道の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再使用することで省エネルギー化が可能なことである。しかし、近くに別の力行車両が存在しないなど架線下に十分な回生負荷がない場合、回生ブレーキが十分に作用せず、機械的なブレーキを作用させて、制動エネルギーの一部を熱として放散している。また、回生負荷の変動は回生ブレーキ力の変動を発生させ、車両の乗り心地を悪化させたり、停止精度にも影響を与える。

そこで、車上配置と地上配置の電力貯蔵システムを開発し、回生電力の吸収・再利用を最適に行うことで、更なる省エネルギー化と安定な回生ブレーキ力の確保による車両性能の向上を図ることとした。

3. 電力貯蔵システム

3.1 電力貯蔵デバイスの選定

電力貯蔵デバイスとしては、エネルギー密度、出力密度の大きいリチウムイオン電池を採用した。

なお、今後の技術動向に注視し、最適な電力貯蔵デバイスの選択を行っていく方針である。

3.2 電力貯蔵システムの構成

扉ページに鉄道における電力貯蔵システムの構成を図示した。車上配置、地上設置のシステムとも、パワーエレクトロニクス技術を駆使したDC／DCコンバータ装置によって電力貯蔵デバイスへの充放電制御を行う構成とした。

4. 車上用の電力貯蔵システムの開発

4.1 架線電圧リミッタについて

電気鉄道車両の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再使用することで省エネルギー化が可能なことである。この利点を最大限に生かすには、車両のブレーキ時に発生する回生電力は架線を通して別の力行車

両で消費されることが望ましい。しかし、回生車両と力行車両の距離が離れていたり、回生電力が大きく別の車両で十分に消費できない場合は、架線電圧が上昇する。この際、架線電圧が一定値以上とならないように、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ装置では架線電圧リミッタ制御によって回生ブレーキトルクの絞り込み（回生絞り込み）を行い、不足するブレーキ力は機械的なブレーキを併用して車両を減速させている。この際、機械ブレーキによって制動エネルギーの一部は熱として無駄に消費している。

4.2 電力貯蔵システムの開発

ブレーキ時に架線下に十分な回生負荷がない場合に、車上配置した電力貯蔵デバイスに回生電力を吸収し、回生絞り込みを抑制するシステムを開発し、実車両を使って回生電力の充電制御、力行や惰行時の放電制御を確認した。

小田急電鉄株の3000形通勤車（6両編成）を対象とし、電力貯蔵システムは既存のVVVFインバータ装置（床下機装（ぎそう））を改造してDC／DCコンバータ装置として使用し、車内にはフィルタ回路、断流器類、電力貯蔵デバイスの各機器を設置した。

扉ページに試験風景写真を示す。また、表1に試験概要を示す。

4.2.1 制御方式

図1に車上での電力貯蔵システム構成図を示す。試験車両はTIOS（列車情報制御システム）を持っており、ブレーキ時にVVVFインバータ装置（M1車）の架線電圧リミッタによって生じた回生絞り込み量をDC／DCコンバータ装置（M3車）に伝送し、DC／DCコンバータ装置はこの回生絞り込み量に基づいて、充電電流を制御する構成とした。蓄電池への充電電流は最大400Aとした。

また、力行時は架線電圧と編成力行電力に基づき、最大200kWで力行アシスト放電を行い、惰行時は一定電流（電池電流100A）で惰行放電を行う構成とした。

4.2.2 試験結果

約2か月の工程で、昼間と夜間、過密路線と閑散路線で走行試験を実施した。試験条件は、電力貯蔵システムを動作させた場合（最大400A吸収）と未動作の場合であり、それぞれ回生率（力行電力量に対する回生電力量の割合）及び回生有効率（モータ性能上回生可能な電力量に対する実回生電力量の割合）を比較した。

なお、各試験日の同じダイヤで走行試験を実施した場合でも、試験車と他の車両の力行や回生ブレーキのタイミングが同じではなく、個々のデータにはばらつきが含まれる

表1. 電力貯蔵システムの試験概要

試験車両	小田急電鉄株式会社 3000形車両
走行区間	多摩線、小田原線（経堂～小田原間）
蓄電池仕様	リチウムイオン電池 605V - 30Ah（約18kWh）

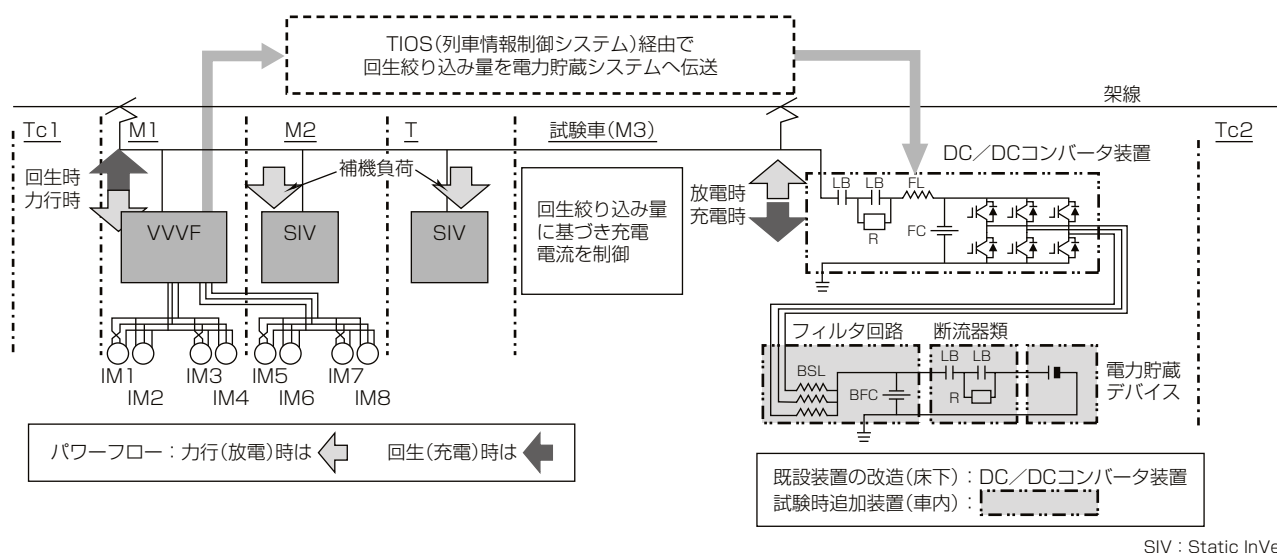


図1. 車上用電力貯蔵システム構成図

表2. 電力貯蔵システム 回生電力向上の改善効果

・夜間走行試験（海老名-伊勢原 往復平均）

電力貯蔵システム	回生率(%)	回生有効率(%)	往復数(回)
動作時	8.1	20.7	2
未動作時	3.4	7.4	2
改善ポイント	+4.7	+13.3	

・昼間走行試験

（非過密区間：新百合ヶ丘-唐木田 往復平均）

電力貯蔵システム	回生率(%)	回生有効率(%)	往復数(回)
動作時	35.8	80.7	23
未動作時	32.8	75.8	17
改善ポイント	+3.0	+4.9	

（非過密区間：海老名-小田原 往復平均）

電力貯蔵システム	回生率(%)	回生有効率(%)	往復数(回)
動作時	24.3	61.3	16
未動作時	20.8	54.6	7
改善ポイント	+3.5	+6.7	

（過密区間：経堂-海老名 往復平均）

電力貯蔵システム	回生率(%)	回生有効率(%)	往復数(回)
動作時	33.9	82.9	2
未動作時	32.1	77.6	2
改善ポイント	+1.8	+5.3	

ため比較評価が難しい。そこで、可能な限り多くのサンプル数を取り、平均値で評価することにした。

表2に回生電力向上の改善効果を示す。

電力貯蔵システムの動作時と未動作時を比較すると、夜間走行では、回生率は約5%、回生有効率は約13%向上し、昼間走行では、回生率は約2~3%、回生有効率は約5%程度向上した。また、電力貯蔵システム動作時、夜間と昼間の走行試験結果を比較すると、夜間では架線下の負荷が少ないため、回生率、回生有効率は低いが、電力貯蔵システムの蓄電容量を増やすことで改善は可能である。

電力貯蔵デバイスの容量の制約があるものの、充放電制御が良好に動作し、回生率改善への寄与を確認した。

5. 地上用システムへの電力貯蔵システム適用

電気鉄道の直流き電システムにおける電力貯蔵システム

は、次の技術課題への適用に期待が寄せられている。

- ①省エネルギー：回生有効率の向上
- ②回生失効対策：乗心地改善、定点停止精度確保
- ③ピーク電力補償：変電所パワー不足時の電力補償

従来各課題に対し、抵抗チョッパシステム、電力回生インバータシステム、フライホイールシステムを適用してきた。これらの適用実績を活かし、地上用電力貯蔵システムを開発した。

5.1 電力貯蔵デバイスを用いたシステム構成

扉ページに地上用電力貯蔵システムの外観を示す。図2に地上用電力貯蔵システム回路構成、図3に制御特性イメージを示す。

電力貯蔵デバイスの充放電制御を行う昇降圧チョッパは、車両用VVVFインバータ装置として実績のあるIGBT適用パワーユニットを使用した。基本ピーク容量を690kW、4.5分繰返し、キャリア周波数は720Hz、600Hzとし、チョッパの基本周波数を12パルス変電所整流器のリップル周波数と合わせることで、き電側へのノイズ影響の低減を図った。

制御特性はフライホイールシステムで実績のあるき電電圧-電流のパターン制御方式とし、電池条件による絞り込み制御を付加して積極的に回生電力を吸収させる回生優先モードと電圧補償モードを設けている。

制御盤は、マンマシンインタフェースを内蔵した遠隔制御機能を持ち、光ケーブル伝送で昇降圧チョッパの制御特性設定、モード切替え、計測を可能としている。

5.2 車上・地上システム統合電力シミュレータの開発

電力貯蔵システム導入による最適き電システムの検討に、複雑な路線構成や列車運用、更に車上/地上用電力貯蔵システムを扱える統合電力シミュレータ“PETS-DC”を開発し、実際の路線を使った電力シミュレーションを行った。

図4にシミュレーションに用いた地上用電力貯蔵システム

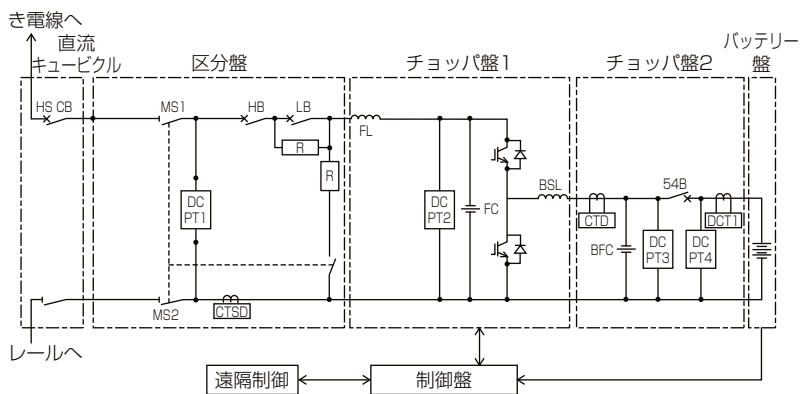


図 2. 地上用電力貯蔵システム回路構成

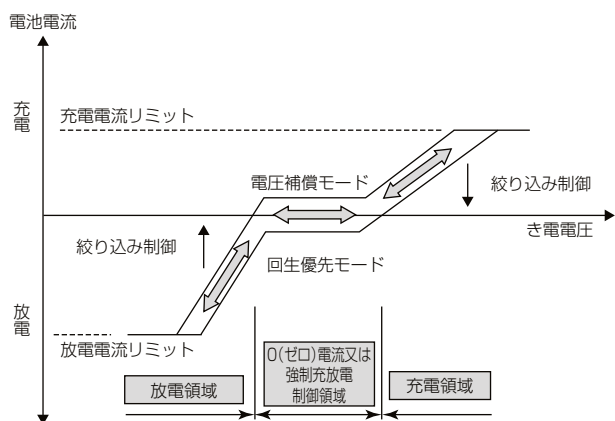


図 3. 制御特性イメージ

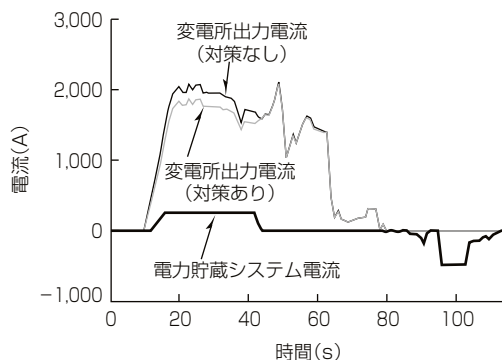


図 5. 地上設置のシミュレーション例

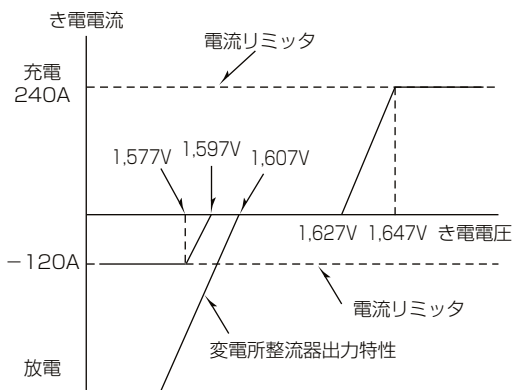


図 4. 地上用電力貯蔵システムの特徴例

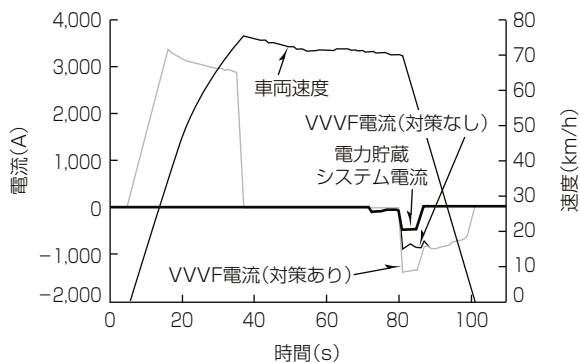


図 6. 車に配置のシミュレーション例

ムの特性例を示す。変電所整流器無負荷電圧を1,607Vとし、充放電エネルギー量を1.5kWh、充電開始電圧を1,627V、放電開始電圧を1,597Vとして、20Vの電圧差で電流リミッタを働かせている。車上においても同様に充放電開始電圧とリミッタを持った特性を設定している。図5には、電力貯蔵システムを変電所に地上設置した場合の電流挙動、図6には車上に配置した場合の電流挙動、及び車両速度の様子を例示した。地上設置では高負荷時変電所出力の一部を電力貯蔵システムからの放電で補うことによって変電所出力低減に寄与し、変電所出力電流がないときに電力貯蔵システムに充電していることがわかる。

車上配置では車両減速時、電力貯蔵システムが回生電力を回収し、VVVF電流(回生電流)が多くなったことがわかる(図中の対策有無は電力貯蔵システムの有無)。

6. む す び

今回、電力貯蔵システムの開発にあたり、電力貯蔵デバイスや充放電制御方式を車上と地上のシステムで共用化して、実際の車両での走行試験を実施し、変電所設備での実用化に向けた試験に取り組んでいる。今後は、これらの技術を活かし、更なる環境負荷低減を図るための製品開発を推進していく所存である。

鉄道車両用パワーデバイスの動向

小林知宏*
梅 寄 勲**
中山 靖***

Trend of Power Device for Railway Vehicle

Tomohiro Kobayashi, Isao Umezaki, Yasushi Nakayama

要 旨

鉄道は、従来、公共性、安全性、信頼性、定時性、環境性に優れた輸送手段であることが評価されてきたが、ここ最近の環境に対する意識の高まりから、世界的に環境負荷の低い輸送手段として再認識される状況となっている。

鉄道の輸送手段としての範囲は、新幹線に代表される大都市間の高速旅客輸送、通勤電車等の都市から近郊までの旅客輸送、路面電車や新交通システム等の都市部の旅客輸送、さらに長距離貨物輸送と幅広く、そのニーズも多岐にわたっている。例えば、大都市間の旅客輸送、貨物輸送では高速化・大量輸送のため変換器の大容量化が求められるし、路面電車では小型・低床化によって利用しやすい乗り物であることが求められる。

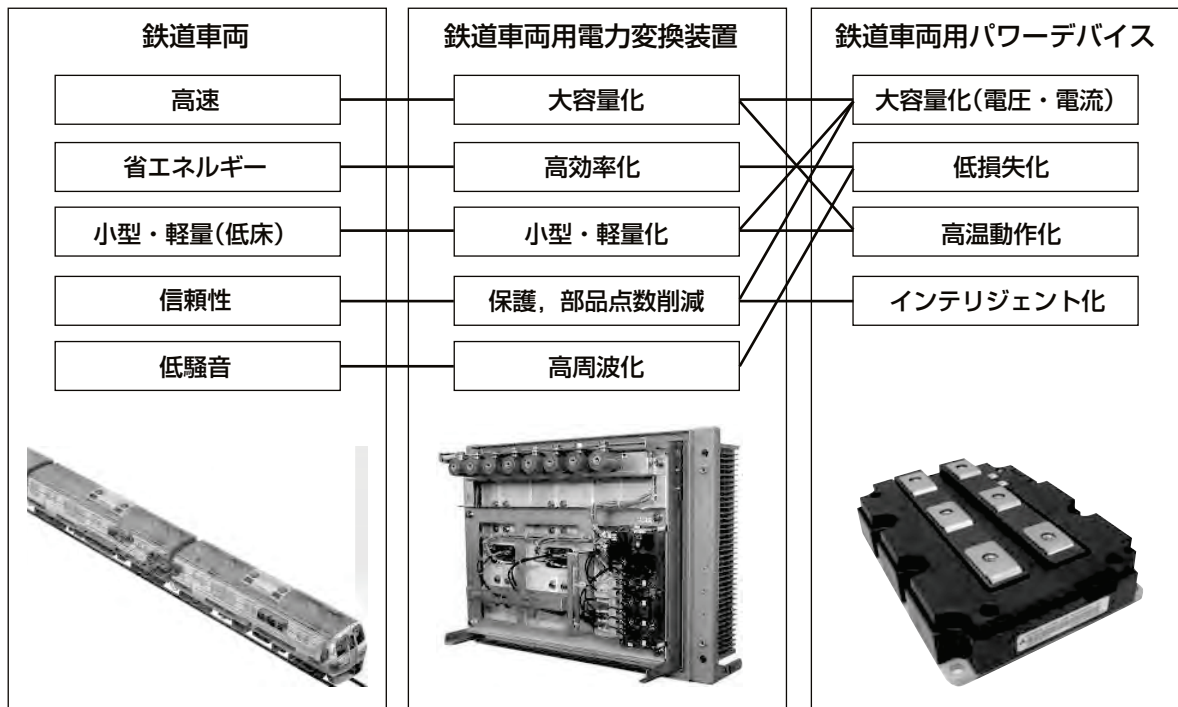
鉄道に対する要求事項は、すなわち、鉄道車両、電力変

換装置、パワーデバイスに対する要求事項にブレイクダウンされる。

三菱電機では、鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項にこたえるため、これまでもHVIPM(High Voltage Intelligent Power Module)によって高耐圧化、大電流化、低損失化、インテリジェント化を図ってきたが、このたび最近の大容量化の要求を従来と同等の装置実装で実現するために、大電流化、高温動作化を実現した“RシリーズHVIPM”を開発した。

本稿では、RシリーズHVIPMの特長と鉄道車両用電力変換器の応用について述べるとともに、今後のパワーデバイスの動向として、シリコンカーバイド(SiC)デバイスの開発の状況と、その鉄道車両への応用について述べる。

特集
I



鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項

鉄道に対する要求事項を基に、鉄道車両、鉄道車両用電力変換装置、鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項のブレイクダウンを示す。これまで鉄道車両用パワーデバイスは、高耐圧化、大電流化、低損失化、インテリジェント化によって、鉄道車両の高速、省エネルギー、小型・軽量、信頼性、低騒音を実現してきた。

1. ま え が き

ここ最近の環境に対する意識の高まりから、鉄道が世界的に環境負荷の低い輸送手段として再認識され、鉄道車両用パワーデバイスもその要求に応じて進歩している。

鉄道用車両用パワーデバイスは、一般的に600～750V架線には1.7kV耐圧品、1,500V架線及び高速車両3レベル用には3.3kV耐圧品、3,000V架線用には6.5kV耐圧品が使用され、当社ではこのたび、3.3/6.5kV耐圧の新しくRシリーズHVIPMを開発した。

本稿では、このRシリーズHVIPMの特長とその鉄道車両用電力変換器の応用について述べるとともに、今後の鉄道車両用パワーデバイスとその応用について述べる。

2. RシリーズHVIPMの特長

2.1 RシリーズHVIPM開発の背景

当社はIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に駆動回路、保護機能を内蔵し、さらに鉄道車両用電力変換装置に適用可能な大容量のHVIPMを他社に先駆けて開発し、1997年に新幹線の推進制御用として採用されて以来、多数の市場実績を誇っている。

今回、開発した3.3/6.5kV耐圧のRシリーズHVIPMは高速車両や3,000V架線用2レベル電力変換装置の大容量化を実現するために、従来のHVIPMに対して25%の定格電流アップを図っている。また、3.3kV耐圧品に関しては、最大動作温度を125℃から150℃に拡大し、高温動作を可能としている。

次に、3.3kV耐圧品をRシリーズの代表として、その特長などについて述べる。



図1. 3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観

表1. 3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの特長・特性

	従来HVIPM	Rシリーズ
定格電流	1,200A	1,500A
最大動作温度	125℃	150℃
過熱保護用温度センサ	チップ外別置き温度センサ	IGBTチップ内蔵型
VCE(sat) ^(注1)	3.80V	3.80V
VEC ^(注1)	3.15V	2.75V

(注1) 特性測定条件：通電電流Ic=1,500A、接合温度Tj=125℃

VCE : Collector-Emmitter Voltage
 VCE(sat) : Collector-Emmitter Saturation Voltage
 VEC : Emmitter-Collector Voltage

2.2 RシリーズHVIPMの特長

3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観を図1に示す。従来のHVIPMに対して基本外形や信号のインタフェースを変更せずに取り付け互換性を保ちながら、性能向上を図っている。

表1に、従来品のHVIPMとRシリーズHVIPMの特長と特性比較を示す。定格電流は従来の1,200Aから1,500Aにアップし、最大動作温度150℃を実現すると同時に、過熱保護検出を高精度な方式にしている。

2.3 開発における技術課題と対策

2.3.1 高温動作における課題と対策

高耐圧の半導体デバイスでは、電圧阻止状態のコレクタ遮断電流(通称：漏れ電流)が大きい場合は、発生する電力損失が接合温度を上昇させるため、更に漏れ電流が増加し正帰還がかかると、最終的に熱破壊に至る場合がある。このため、最大動作温度をさらに高くして使用する場合は、この漏れ電流を低く抑える必要がある。

そのため、RシリーズHVIPMに搭載される半導体チップは、従来の電気的特性を損なうことなく漏れ電流を抑えるために新たなチップ構造設計を行い、また、高温化における制御・保護機能の最適設計及び構造部材の選定と製造プロセス開発を行った。

2.3.2 定格電流アップの課題と対策

定格電流アップに伴い、2.3.1項の高温化と合わせて半導体チップが動作時に受ける負荷は従来のものよりはるかに過酷なものとなるため、遮断耐量(Reverse Bias Safe Operating Area：RBSOA)をはじめとする動作確認を-50～+150℃の全動作温度範囲で実施した。さらに通電能力を上げるための最適な構造設計を行うことで、25%の定格電流アップが可能となった。

2.3.3 保護機能の性能アップ

当社のHVIPMに備えられた制御電源低下保護(UV)、過電流保護(OC)、過熱保護(OT)を、精度良く、また個体差などのばらつきを小さくすることによって、電力変換装置の余分な設計マージンが不要となり、経済的で高性能な装置設計が可能になる。

特に、RシリーズHVIPMの過熱保護では、チップ自体に温度検出用のセンシング部を内蔵し、デジタル信号で特性調整可能なデジタルトリミングICとの組み合わせによって、より確実に迅速な過熱保護を実現している。

2.3.4 最大ターンオフ時の波形

RシリーズHVIPMの定格電圧1,500V、定格電流1,500Aに対して、最大定格2,500V/2,700Aにおけるターンオフ時の波形を図2に示す。

いずれの動作波形でも150℃の高温化で異常な挙動ではなく、安定した動作が確認できた。

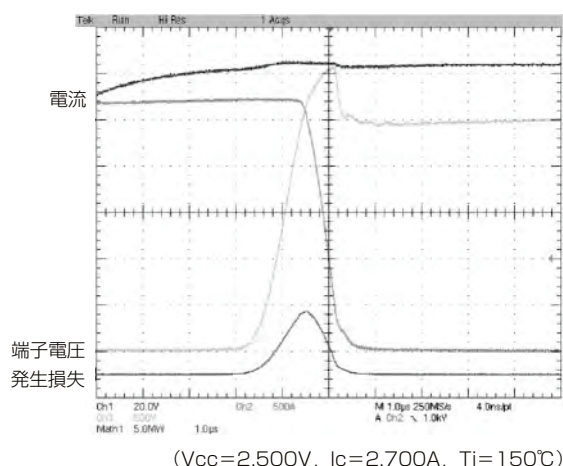


図2. 150℃におけるターンオフ波形

3. RシリーズHVIPMの応用

鉄道車両用電力変換装置に用いられている主な冷却方式には、大容量の高速車両では強制風冷式沸騰冷却（フロリナート）、中容量の近郊車両では自冷式ヒートパイプ（水冷媒）、比較的小容量の都市型車両では自冷式ドライパネルなどがある。主に高速車両に用いられている3.3kV耐圧のRシリーズHVIPMは最大動作温度150℃を実現しており、これによって、高速車両用電力変換装置で、従来フロリナートの沸騰冷却を用いていたものを水冷媒の沸騰冷却へ置き換えることが可能となり、これまでよりも環境に配慮した冷却方式にできる。

大都市間の旅客輸送で環境負荷の低い鉄道が見直された結果、世界的に車両の高速化が進んでおり、電力変換装置の大容量化が求められている。このため、RシリーズHVIPMを高速鉄道車両用の電力変換装置に搭載して、その特長である大定格電流、最大動作温度150℃の検証を実施している。

4. 今後の鉄道車両用パワーデバイスの展望

4.1 シリコンからシリコンカーバイドへ

鉄道車両用パワーデバイスはこれまで飛躍的な発展を遂げてきたが、シリコン（Si）デバイスによる高性能化は、近年では飽和傾向にある。そのため、Siに比べて損失が低く、高温動作が可能なシリコンカーバイド（SiC）が次世代パワーデバイス材料として期待されている。

当社は、SiC-MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）、SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）の開発を進めており、1.2kV耐圧のSiC-MOSFETとSiC-SBDを組み合わせたSiCインバータで2006年に世界で初めて3.7kW定格の三相モータの駆動に成功した⁽¹⁾。現在では11kWのSiCインバータで、Siインバータと比較して



従来Siインバータ比
損失：70%低減、体積：75%低減

図3. 11kW出力SiCインバータの試作品

損失で70%低減、体積で75%低減を達成している（図3）。また、高耐圧化開発も進めており、1.7kV耐圧素子で、低オン抵抗、スイッチング損失の低減を確認している⁽²⁾。

4.2 SiCデバイスの鉄道車両用電力変換装置への応用

SiCデバイスを鉄道車両用電力変換装置に応用した場合、次のような効果が期待できる。

(1) 推進制御装置

低損失化によって大幅な省エネルギーが可能になるとともに、損失低減と高温動作化によって、冷却器が大幅に簡略化でき、さらに環境に配慮した電力変換装置にできる。

(2) 補助電源装置

低損失化によって変調周波数の高周波化が可能となるため、出力段にあるフィルタの小型化が可能となる。

以上のような効果が期待できるSiC鉄道車両用パワーデバイスを実用化するには、1.7kV耐圧品、3.3kV耐圧品が必要で、定格電流は数百A以上のものが必要となるため、高耐圧化、大電流化が今後の開発課題となる。

5. む す び

鉄道車両用のパワーデバイスに対する要求事項について整理し、今回開発したRシリーズHVIPMの特長を中心に述べた。また、次世代のパワーデバイス材料として期待が高いSiCデバイスの開発状況と、鉄道車両応用の効果と開発課題について述べた。

参考文献

- (1) 木ノ内伸一，ほか：SiC-MOSFETインバータによる3.7kW定格モータ駆動，三菱電機技報，**80**，No.6，367～371（2006）
- (2) 1.7kV耐圧SiCデバイス技術，三菱電機技報，**83**，No.1，5（2009）

列車運転制御における省エネルギー化

吉本剛生* 田原一浩**
廣石 高** 青山武郎**
鳥居尚史**

Energy-saving Train Control System

Kouki Yoshimoto, Takashi Hiroishi, Hisashi Torii, Kazuhiro Tahara, Takeo Aoyama

要 旨

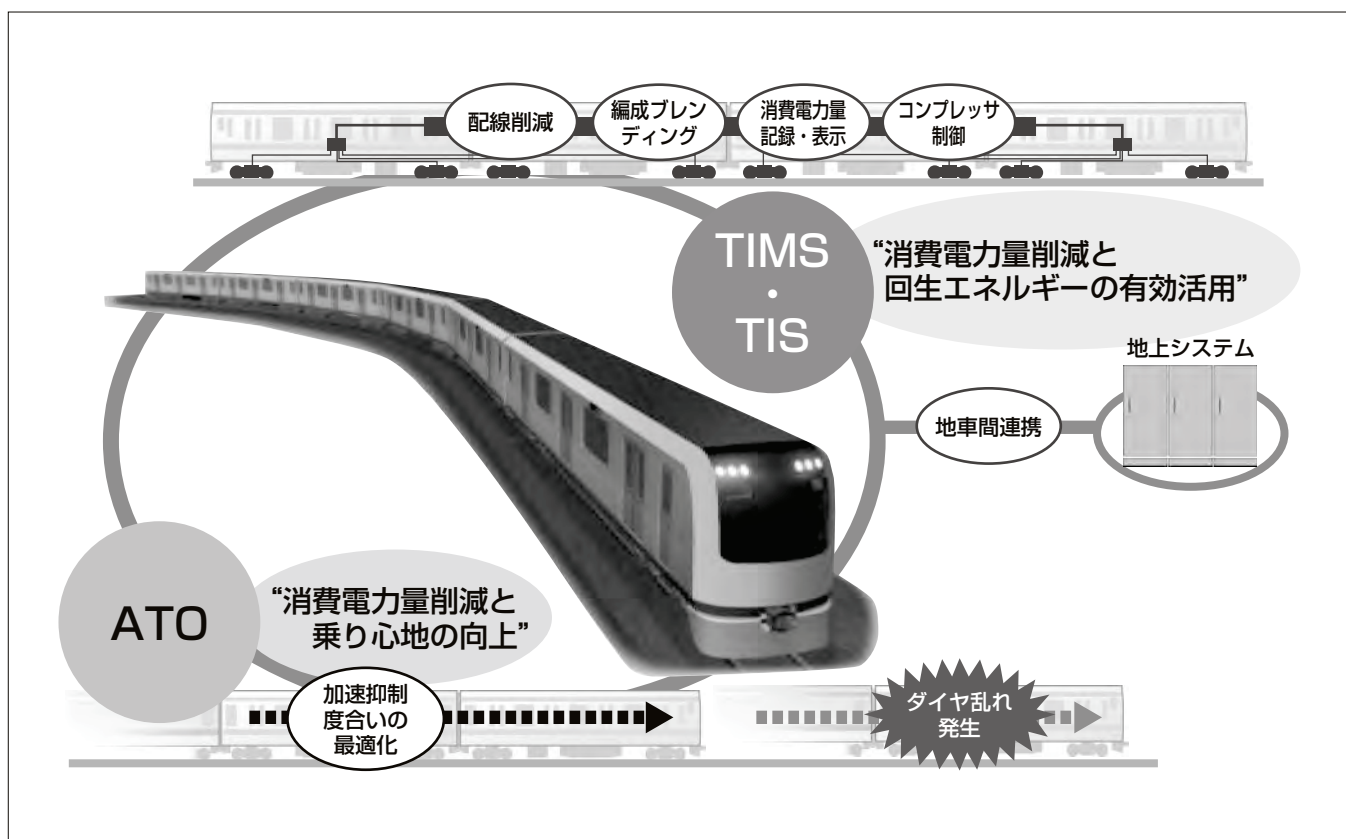
鉄道はエネルギー効率が良く、環境に優しい交通システムであり、地球温暖化防止のために大きな役割を担うものとして期待されている。そのため、安全性や定時性、利便性を維持・向上しつつ、より一層環境負荷の低い交通システムとして進化することが求められる。

環境負荷を考える上で、まず問題となるのは消費電力である。三菱電機では、これまでもインバータや主電動機、空調装置などの個々の装置で省エネルギー化に努め、高い成果を収めてきた。今後、より一層の省エネルギー化を進めるために、これらの対策と並行して列車運転制御の観点からの対策も必要不可欠である。

本稿では、列車運転制御における省エネルギー化をテーマとし、自動列車運転装置 (Automatic Train Operation :

ATO) と車両情報統合管理装置 (Train Integrated Management System : TIMS) ・ 車両情報制御装置 (Train control Information management System : TIS) に焦点を当てて、当社の環境問題への取り組みについて述べる。

ATO に関してはダイヤ乱れ時に着目し、信号情報を活用して無駄な加減速を抑制し、消費電力量削減と乗り心地向上を実現する制御方法について述べる。TIMS/TIS に関しては、回生エネルギーの有効活用に貢献している編成単位でのブレーキ制御技術 (編成ブレンディング) について述べる。また、現在検討を進めている、TIMS/TIS の情報管理機能を用いて消費電力量削減に貢献する取り組みについて述べる。



列車運転制御における省エネルギー化

鉄道システム全体の省エネルギー化を実現するには、個々の装置だけではなく、列車運転制御の観点からの取り組みも必要である。列車運転制御の一つとして、ATOとTIMS/TISに関して省エネルギー化への取り組みを進めている。

1. ま え が き

鉄道事業者並びに各メーカーは、鉄道システムをより安全・高速・快適にするために様々な努力を続ける一方で、ブレーキ力を電力として再利用する回生ブレーキの効率向上や車両形状の改良など、様々な面から省エネルギー化に取り組んできた。特に近年、環境に対する要求は急速に高まっており、当社でもVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータや主電動機、空調装置などの個々の装置に対して省エネルギー化に努め、高い成果を収めている。今後、より一層の省エネルギー化を進めるためには、これら装置単位の対策と並行して列車運転制御の観点からの対策も必要不可欠である。

本稿ではこのような背景に基づき、列車運転制御における省エネルギー化をテーマとし、自動列車運転装置(ATO)と車両情報統合管理装置(TIMs)・車両情報制御装置(TIS)に焦点を当てて、当社の取り組みについて述べる。

2. ATOにおける省エネルギー化の取り組み

2.1 ATOの概要

列車運転制御システムの一つであるATOは、保安信号装置(主にATC(Automatic Train Control))によって安全が確保された下で、あらかじめ設定された走行パターンに沿って列車を自動走行させるものである。当社のATOはベテラン運転士を想定した知識ベースを用いた“エキスパートシステム”によって、安全性・定時性・乗り心地などを考慮した制御を行っている⁽¹⁾。この知識ベースは、国内トップシェアの実績を基に進化を続けており、きめ細かで精度の良い運転を実現している。

2.2 走行パターンによる消費電力量の違い

列車走行については、同一駅間を同一時分で走行しても、その走行パターン次第で消費電力量が大きく異なることが知られている。例として図1に、ある駅間(距離1km、出発駅直後が下り勾配(こうばい)、停車駅手前が上り勾配)を走行する二つの走行パターンを示す。単純走行パターンは高速域で一定速度を保って走行するのに対し、最適走行パターンでは、ある速度から惰行を行って消費電力量を削減している。惰行開始速度は、単純走行パターンと走行時分が同じになるように調整されている。この二つの走行パターンでの消費電力量の比較結果を表1に示す。両パターンの走行時分は同一であるが、最適走行パターンの消費電力量は単純走行パターンと比較して、1割程度も低くなっている。一般に、駅間が短い場合には、最大加速→惰行→最大減速の走行パターンがエネルギー効率的には一番良いことが知られている⁽²⁾。

従来のATO走行パターンは、鉄道事業者が運転士向けに設計したものをそのまま使用することが多かった。その

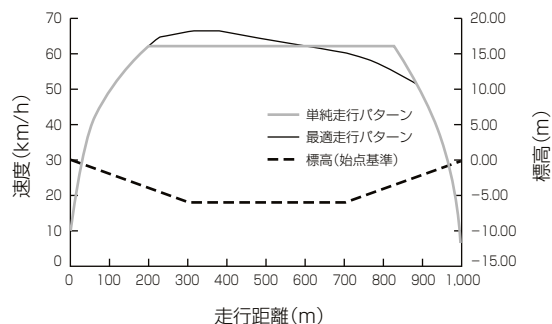


図1. 走行パターンの比較

表1. 走行パターンによる消費電力量比較

	走行時分	消費電力量 ^(注1)
単純走行パターン	77秒	100
最適走行パターン	77秒	89

(注1) 単純走行パターンでの値を100とした相対値

走行パターンは、省エネルギーという観点からの考慮はされているものの、必ずしも最適化されたものではなかった。したがって、ATO走行パターンを省エネルギーの観点から最適化することによって、これまでよりも数%~10%程度の消費電力量削減効果が見込まれる。また仮に駅間の走行時分を数秒程度調整可能であれば、更に大きな効果が期待できる。

2.3 ダイヤ乱れ時対応の省エネルギー運転

2.3.1 ATC動作の走行パターンへの影響

ダイヤ乱れのない“定常時”での省エネルギー化は、先に述べたような走行パターンの静的な最適化で対応可能である。しかし、列車は常に定常時の条件で走行できるわけではなく、ダイヤ乱れや臨時の速度制限などの“非定常”の条件下でも走行しなければならない。特にダイヤ乱れに関しては、高密度線区のラッシュ時間帯に発生しやすく、問題となっている。

ダイヤ乱れ発生時は先行列車の遅延が発生し、先行列車に接近することによって、ATC現示(先行列車の位置に応じて決まる、ATCが列車に対して指示する制限速度)が通常より低くなるため、事前に設計したパターンどおりに走行できなくなる。さらに、ATC現示は先行列車と自列車の位置に応じて動的に変わるため、予測困難である。

仮に、先行列車の現在の位置・速度・今後の予測走行パターンが取得可能であれば、ATC現示の変化が予測でき、消費電力量について最適な走行パターンを設計可能と考えられる。しかし、現実にはこれらの情報は車上に伝送されていない。また先行列車の挙動は、さらにその先々の列車の挙動や乗客乗降時間などに影響されるため、正確な走行パターンを予測することも困難である。このため、現在取得できる情報に応じた走行パターンの最適化を検討する必要がある。

2.3.2 予告信号の活用

このような問題に対し、ダイヤ乱れ時のATOの省エネルギー化について、東京地下鉄㈱の協力の下で開発を進めている。東京地下鉄㈱のATCシステムでは、予告信号と呼ばれる情報を列車に対して送信している。鉄道では線路をある区間ごとに分割し、一つの区間に同時に複数の列車が入らないよう保安信号装置(ここではATC)で制御して安全を確保している。予告信号とは、一つ前方の区間におけるATC現示が、在線中の区間における現示よりも低いときに、ATC信号に重畳して列車に伝えられる信号である(図2)。

予告信号を受信したときには、その先でATC現示が低く変化し、減速することが予測されるため、あらかじめ無駄な加速を抑制し、惰行を有効活用することによって、若干の走行時分増加と引き替えに、消費電力量削減・乗り心地向上を実現することが可能である。ただし、加速を抑制しすぎると、走行時分が過剰に悪化するおそれがある。これはその列車の走行時分だけの問題にとどまらず、後続列車に対するATC現示が更に低く変化し、一層のダイヤ乱れを誘発するという点で大きな問題である。また、予告信号を受けたとしても、先行列車の挙動によっては、次の軌道回路に到達する前に予告信号が消去されてしまう可能性もあり、その場合は、加速抑制が無意味になるばかりか、走行時分増加という副作用だけが残る結果となる。これらのことから、予告信号を受けたタイミングや位置などを基に、適切な加速抑制度合いを調整する必要がある。

2.3.3 シミュレーションによる評価

予告信号を活用した場合に、現行ATOと比較してどの程度消費電力量が改善されるか、シミュレーションによって評価を行った。シミュレーションでは2分間隔で走行する2列車のうち、先行列車がある駅で30秒余分に停車した場合の、後続列車の走行パターンを評価した。その結果を表2並びに図3に示す。これらの結果から、消費電力量が1.0kWh分改善できていることがわかる。定常時からの消費電力量増加分で比較すると、62%の改善となっている。また、無駄な加減速が解消されたことによって、乗り心地も改善されている。一方で、消費電力量・乗り心地改善のトレードオフとして、走行時分が1.2秒だけ増加している。

3. TIMS/TISにおける省エネルギー化の取り組み

車両情報統合管理装置TIMSや車両情報制御装置TISは、車両の各機器の状態のモニタリング機能や、制御指令の伝送、そして編成での最適制御を司(つかさど)るシステムとして普及が進んでいる。TIMSやTISでも、省エネルギー化に貢献する機能の要求が大きくなってきている。ここでは、現状実現している機能に加え、実現に向けて検討中の機能を含めて述べる。

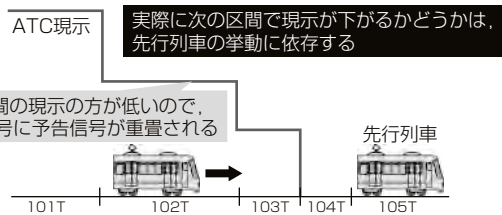


図2. 予告信号

表2. 消費電力量と走行時分の比較

	消費電力量(kWh)	走行時分(秒)
定常時	9.2	150.7
現行ATO(乱れ時)	10.8(+1.6)	162.0(+11.3)
予告活用ATO(乱れ時)	9.8(+0.6) (62%改善 ^(注2))	163.2(+12.5)

(注2) 定常時からの増加分についての比較

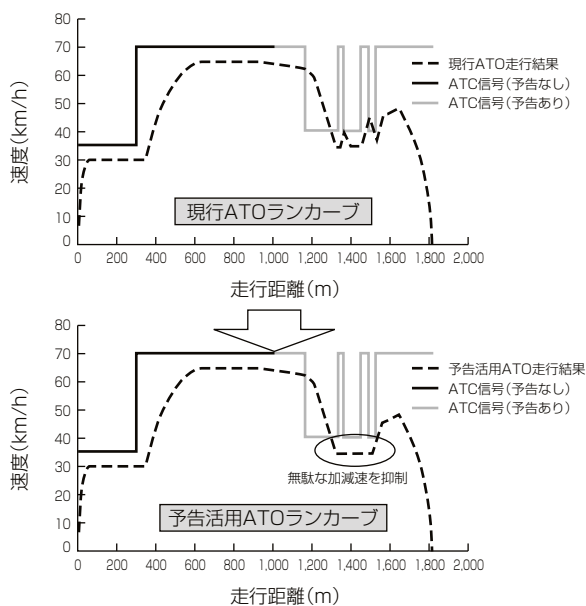


図3. ランカーブの比較

3.1 配線削減による省エネルギー化

TIMSやTIS導入の一つの目的として、車両内配線の削減が挙げられる。指令や情報伝達のための引き通し配線を、各車両のTIMS/TIS端末間での伝送に置き換えることで配線を削減してきた。配線の削減によって、コスト削減効果や車両製作工程の短縮効果以外に、車両質量が軽減されることによる力行時の消費電力量削減に大きな効果が得られている。

3.2 編成制御による省エネルギー化

TIMS/TISでは、編成単位でのブレーキ制御を実現している(編成ブレンディング)。ブレーキ指令時に、TIMS/TISは編成全体の必要ブレーキ力と各車両が負担すべき最適なブレーキ力を演算し、各車両の主回路制御装置(主変換装置やVVVF制御装置)から負担できる回生ブレーキ力を得て、不足分を空制ブレーキで負担するための情報を各車両のブレーキ装置に対して送信する。必要ブレー

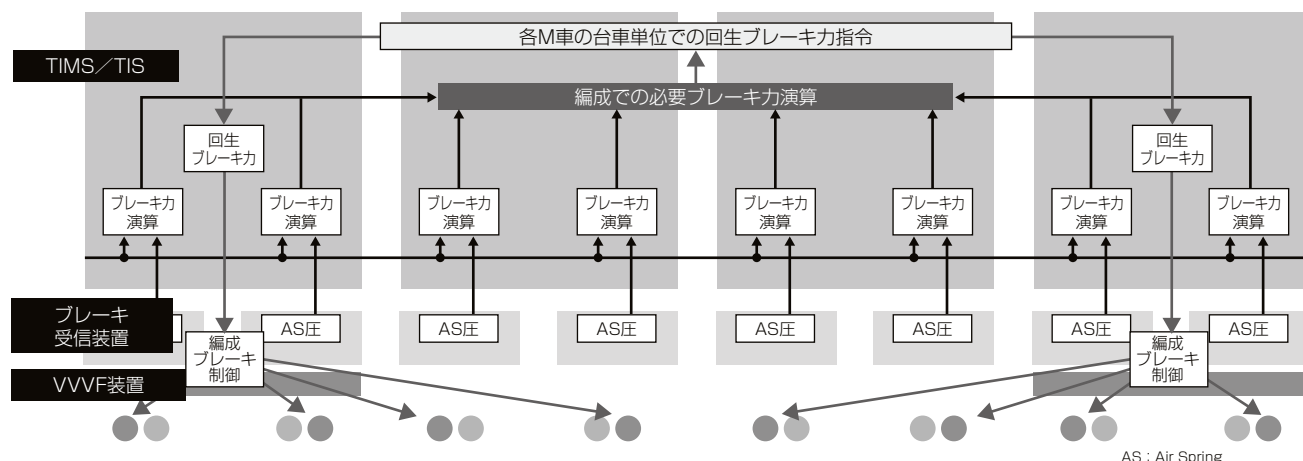


図4. TIMS/TISによる編成ブレンディング

キ力に対し、各車ばらばらではなく、編成として無駄のない制御を行うことで、回生ブレーキの利用効率を最大化できる(図4)。

一方で、実用化はされていないが、ブレーキと同様に編成での制御の考え方を力行についても応用し、省エネルギー走行を行うことも可能と考えられる。主回路制御と連携し検討を進めたい。

3.3 消費電力量の記録による省エネルギー走行支援

TIMS/TISは、走行時に積算電力を記録する機能を備えている。この機能は主回路での走行エネルギーの削減検討に役立っている。主回路制御装置で、瞬時値としての消費電力は把握されるが、データとしての記録容量に制限があり、また編成全体での記録ができないため、TIMS/TISでの記録が求められている。現状、標準的な仕様として編成としての積算電力量をkWh単位で記録しているが、省エネルギー走行支援機能で必要に応じ取得する消費電力量データの詳細化を図る。

一方、2章で述べたATOでの走行と同様、運転士による運転で省エネルギー走行を実現するためには、省エネルギーの意味での理想的な走行パターンに近づけることが必要である。そのため、走行時の消費電力量の記録や理想的な走行パターンとの差異を運転士に示すといったことが考えられる。これを含め、運転士の省エネルギー走行を支援する機能について検討中である。

3.4 回生ブレーキ中のコンプレッサ制御

一般的に、ブレーキ用コンプレッサ(空気圧縮機)では、空気圧が規定値以下の状態に達すると起動するようになっている。走行中のブレーキ動作では回生ブレーキを活用できるが、駅停車直前からは空制ブレーキを使用し、空気消費が増加するため、駅停車中にコンプレッサが起動する頻度が高く、その際走行中に発生する回生エネルギーを活用できていないのが現状である。

TIMS/TISが主体となり、停車駅間での空気圧の消費

を予測し、回生ブレーキ作用中に規定圧に達していない場合にコンプレッサを起動させる機能について検討中である。

3.5 地上・車両間連携による省エネルギー化の実現

地上変電設備に電力貯蔵デバイスを設置し、他の走行車両で利用できない回生エネルギーを吸収するシステムや、車両に電力貯蔵デバイスを搭載し架線に返せない回生エネルギーを吸収するシステムが試行されている。これらのシステムが鉄道システムとして省エネルギー効果を最大限に生み出すためには、現状の架線電圧や電力貯蔵デバイスの状態のみを判断条件とした個々の制御ではなく、地上システム、各車両システムの電力貯蔵デバイスの状態や各車両の位置をも勘案した全体での最適制御が必要となる。TIMS/TISが各車両の情報を統括し、さらに無線インフラを標準搭載することで、地上システムとリアルタイムで接続され、全体の最適制御を実現していくことが可能となる。

現状ではそれぞれの要素技術が開発されている状況であるが、将来的にはこのような鉄道システムの実現に貢献したい。

4. む す び

列車運転制御における省エネルギー化をテーマに、ATOとTIMS/TISにおける取り組みについて述べた。環境に対するニーズは今後より一層高まることが予想される。今後も環境に優しい鉄道システムを実現するため、鉄道事業者と協力しつつ、個々の装置のみならず運転制御の観点からも省エネルギー化に取り組む所存である。

参 考 文 献

- (1) 飛岡正己：無人運転システム，電気学会誌，**119**，No.3，156～159（1999）
- (2) 田部典之，ほか：省エネで電車を運転する，RRR，**60**，No.6，6～9（2003）

N700系新幹線用空調装置における 省エネルギー・低振動化への取り組み

首藤克則*
宮下 剛**
福井智巳**

Approach to Energy Saving and Vibration Reduction in Air Conditioning System for Series N700 Shinkansen

Katsunori Shudo, Tsuyoshi Miyashita, Tomomi Fukui

要 旨

最速、最高の乗り心地、そして省エネルギーをコンセプトに、東海旅客鉄道㈱と西日本旅客鉄道㈱の共同で開発されたN700系新幹線向けに、三菱電機の長崎製作所では東海旅客鉄道㈱と先行して技術開発を行い、客室の快適性を担う空調装置を開発した。N700系新幹線用空調装置の開発に当たっては、軽量・コンパクト・静かでありながら冷房能力を確保し、しかも消費電力を削減することを目標とした。

次に、開発したN700系新幹線用空調装置の特長を示す。

①各車両の床下に、前位空調装置と後位空調装置の2台

を搭載。また、従来別置きにしていた換気装置を、後位空調装置に内蔵することによって、従来空調装置に比べて小型化を実現

②全熱交換器を採用し、外気取り入れによる熱負荷を低減することによって、圧縮機台数を削減でき、従来空調装置に比べて省エネルギー化を達成

③防振構造の最適化によって、低振動かつ低騒音を実現

④空調装置筐体(きょうたい)のアルミ化及び圧縮機台数の削減などによって、従来の空調装置に比べて軽量化を実現



前位空調装置



後位空調装置
(換気装置内蔵)

N700系新幹線用空調装置

N700系新幹線用空調装置は、1両当たり前位空調装置と後位空調装置の各1台で構成されている。後位空調装置には、従来の空調装置では別置きにしていた換気装置を内蔵している。

1. ま え が き

表1にN700系新幹線用空調装置の開発目標を示す。N700系新幹線の一世代前となる700系新幹線用空調装置をターゲットとして、開発目標を設定した。

本稿ではこの開発目標を達成するに至ったN700系新幹線用空調装置の概要と、小型軽量化、省エネルギー化、低振動、低騒音化に向けた取り組み内容について述べる。

2. N700系新幹線用空調装置の概要

図1に、N700系新幹線の空調システムと700系新幹線の空調システムを示す。N700系新幹線用空調装置は車体の床下に搭載され、車両ごとに前位空調装置と後位空調装置を備える。前位空調装置は、車内からのリターン空気のみを冷却／加熱し、後位空調装置は換気装置を内蔵し、新鮮気とリターン空気を冷却／加熱する構成である。

また、700系新幹線では、空調装置と、それとは別置きの換気装置を用いたため、両者を接続する新鮮気ダクトを必要としていたが、N700系新幹線では後位空調装置に換気装置を内蔵したことで新鮮気ダクトが不要となった。

3. 小型軽量化

N700系新幹線用空調装置の小型軽量化を進めるため、次の取り組みを実施した。

- ①換気装置の内蔵化
- ②筐体のアルミ化
- ③全熱交換器の搭載

3.1 換気装置の内蔵化

N700系新幹線用空調装置では、従来別置きにしていた換気装置を後位空調装置に内蔵した。これによって換気装置の筐体を省略でき、さらに内部機器配置を最適化することによって、小型軽量化を実現した。また、従来換気装置が別置きであった場合には、新鮮気ダクトを用いて2台の空調装置へ外気を振り分けていたが、N700系新幹線用空調装置では換気装置を後位空調装置に集約させたことで新鮮気ダクトが不要となり、ダクト削減による車両全体の軽量化も図っている。図2に、700系新幹線用空調装置とN700系新幹線用空調装置のレール方向長さの比較を示す。N700系新幹線用空調装置の機装(ぎそう)スペースは、700系新幹線用空調装置に比べて約25%低減できた。

3.2 筐体のアルミ化

これまで、空調装置における筐体の材料はステンレスであったが、軽量化を目的にアルミ化を実施した。

3.3 全熱交換器の搭載

N700系新幹線では、換気送風機によって最大30m³/minの外気を車内に取り込んでいる。全空調負荷に対して、外気取り入れによる熱負荷の割合は高く、およそ50%に及ぶ。

表1. N700系新幹線用空調装置の開発目標

項目	開発目標
冷房能力	700系以上
質量	700系以下
外形寸法	
消費電力	
振動	
騒音	

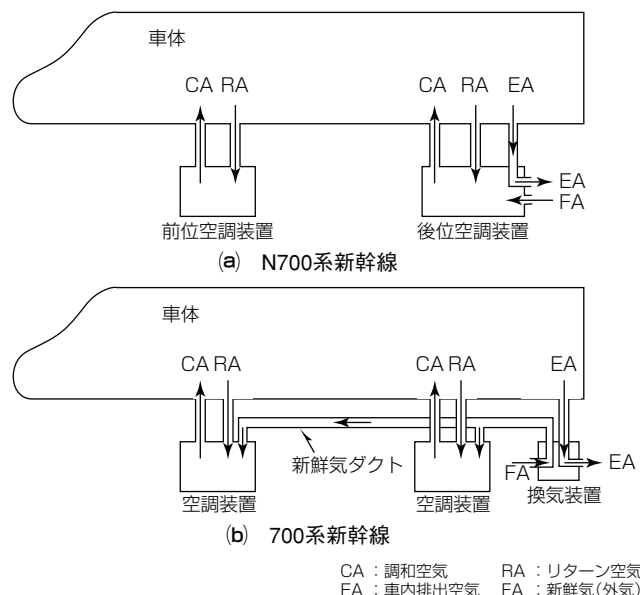


図1. N700系, 700系新幹線の空調システム

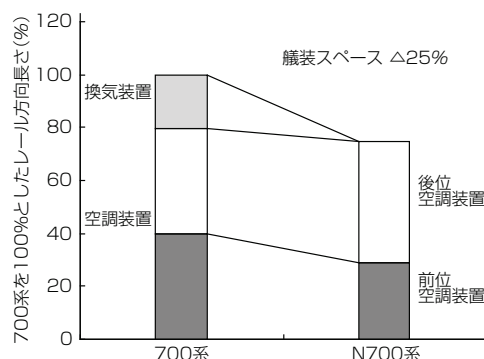


図2. 空調装置レール方向長さ

そこで、外気取り入れによる熱負荷を低減するため、全熱交換器を空調装置に搭載した。

3.3.1 全熱交換器

図3に、全熱交換器の説明図を示す。全熱交換器は、特殊加工紙の仕切り板と間隔板で構成され、特殊加工紙が持つ優れた熱通過性及び透湿性によって、空気と空気が互いに混ざり合うことなく、温度と湿度を同時に交換することができる。

N700系新幹線では、車内から車外に至る排気通路と、車外から車内に至る給気通路を交差するように全熱交換器を配置している。排気通路と給気通路のそれぞれに排気及び新鮮外気を通すことで熱交換させ、排気熱をそのまま捨てることなく、回収するようにした。

3.3.2 圧縮機台数の削減

従来の換気装置では、排気される車内空気は車外へ捨てられるだけであったが、全熱交換器によって新鮮外気と熱交換させることで、その排熱分を有効に活用できる。つまり、全熱交換器が全熱負荷の一部を担うことで、空調装置の冷凍サイクルで受け持つ熱負荷が小さくなる。これによって、N700系新幹線用空調装置は700系新幹線用空調装置に比べて、圧縮機を1台削減することが可能となり、軽量化を図ることができた。

3.4 軽量化の効果

図4に、N700系新幹線用空調装置における軽量化の効果を示す。N700系新幹線用空調装置の質量は、700系新幹線用空調装置に比べて14%低減できた。また、図に示す効果以外に、3.1節で述べたように新鮮気ダクトが不要になったことで車両全体の軽量化にも貢献している。

4. 省エネルギー化

図5に、N700系新幹線用空調装置と700系新幹線用空調装置の消費電力の比較を示す。N700系新幹線用空調装置では、全熱交換器を搭載したことで圧縮機を1台削減することができたため、消費電力を約11%削減することができた。

5. 低振動、低騒音化

N700系新幹線用空調装置の低振動、低騒音化を進めるため、次の取り組みを実施した。

- ①振動伝播(でんぱ)の抑制
- ②配管発生応力の低減

5.1 振動伝播の抑制

空調装置の振動、騒音源として、回転機器である圧縮機、室内送風機、室外送風機、換気送風機が挙げられる。これらの運転振動は取り付けられている空調装置の筐体へ伝わり、それから車体への取付け脚、車体、客室へと伝播する。N700系新幹線用空調装置では、最初の振動伝播経路である回転機器と空調装置筐体間の振動を防止するため、700系新幹線用空調装置よりも硬度の低い防振ゴムを介して、回転機器を筐体に取り付けるようにした。図6に、圧縮機の取付け構造の例を示す。

5.2 配管発生応力の低減

回転機器と空調装置筐体間の振動を防止するため、防振ゴムの硬度を低くしたが、回転機器は揺れやすい構造となるため、圧縮機周りの配管について信頼性の低下が懸念された。そこで、圧縮機起動時における配管応力を測定した結果、圧縮機が回転する方向の振動に合わせて配管が大きく振動し、圧縮機の吸入配管、吐出配管に発生する応力が増加することが分かった。

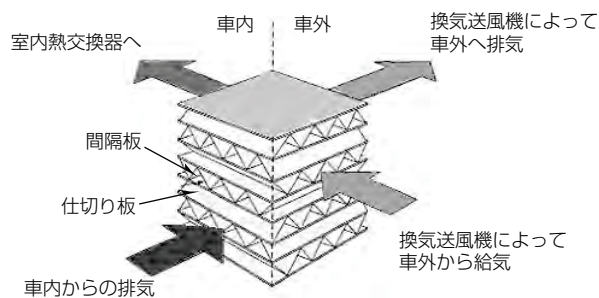


図3. 全熱交換器

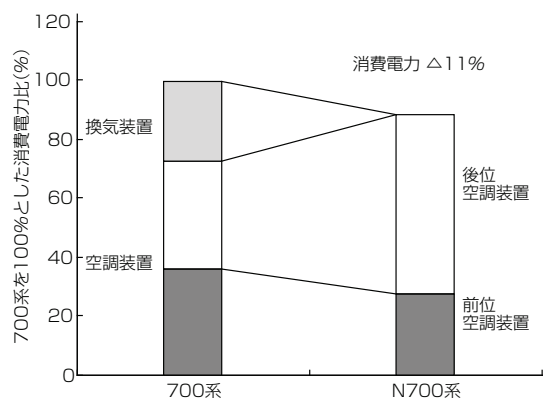


図5. 空調装置の消費電力

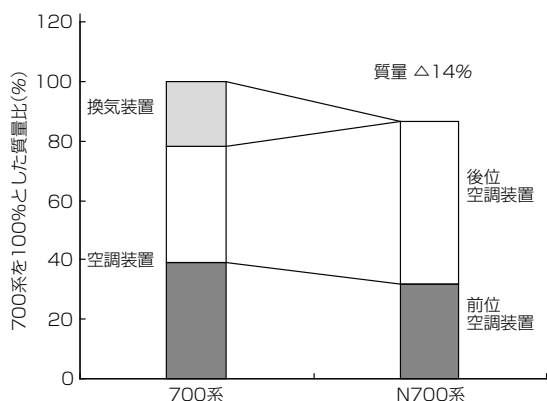


図4. 空調装置質量

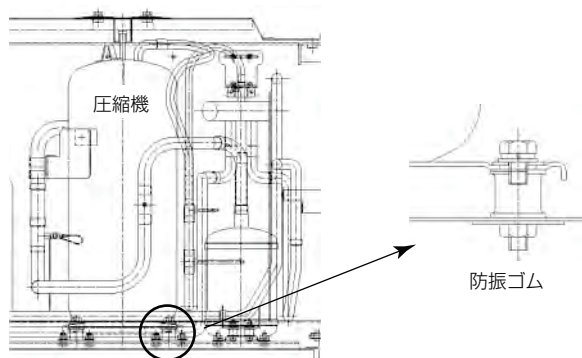


図6. 圧縮機の取付け構造

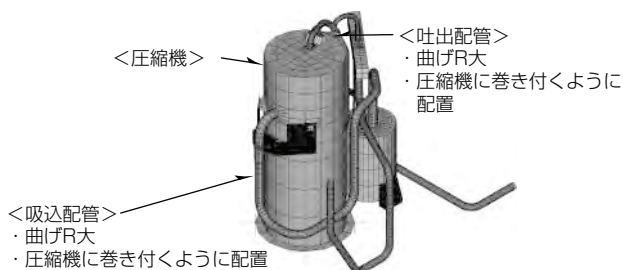


図7. 圧縮機周り配管(N700系新幹線用空調装置)

このため、図7に示すように配管の曲げ半径を大きくするように配置し、配管に発生する応力集中を取り除いた。さらに、圧縮機の起動時に、圧縮機が回転する方向の振動が問題となることから、その振動方向に合わせて、配管を圧縮機に巻き付くように配置した。これによって配管への発生応力を低く抑えることができた。

5.3 現車振動、騒音測定

5.1節、5.2節で述べた対策の効果を確認するため、空調装置を新幹線に搭載し、振動、騒音の測定を実施した。その結果、N700系新幹線用空調装置の振動、騒音は、目標値である700系新幹線用空調装置以下であることを確認できた。

6. む す び

N700系新幹線用空調装置の概要を述べるとともに、小型軽量化、省エネルギー化、低騒音、低振動化に向けた取り組み内容について述べた。今後、この開発で培った技術を生かし、更なる省エネルギー化への取り組みと、環境への配慮に貢献していきたいと考える。

最後にこの空調装置の開発に当たり、多大なご支援、ご指導をいただいた東海旅客鉄道㈱、西日本旅客鉄道㈱をはじめ関係各位に深く感謝の意を表す。

鉄道電力システムにおける 環境への取り組み

葛山利幸* 藤田敬喜*
高橋邦明**
木内浩司***

Ecological Approach in Traction Power Supply System

Toshiyuki Katsurayama, Kuniaki Takahashi, Hiroshi Kiuchi, Keiki Fujita

要 旨

鉄道電力システムでは、三つの基本となるデザインコンセプト“電力の安定供給”“社会・環境との調和”“事業コストの低減”を軸に、より快適で信頼性の高いモビリティの実現に向けた活動を行っている⁽¹⁾。

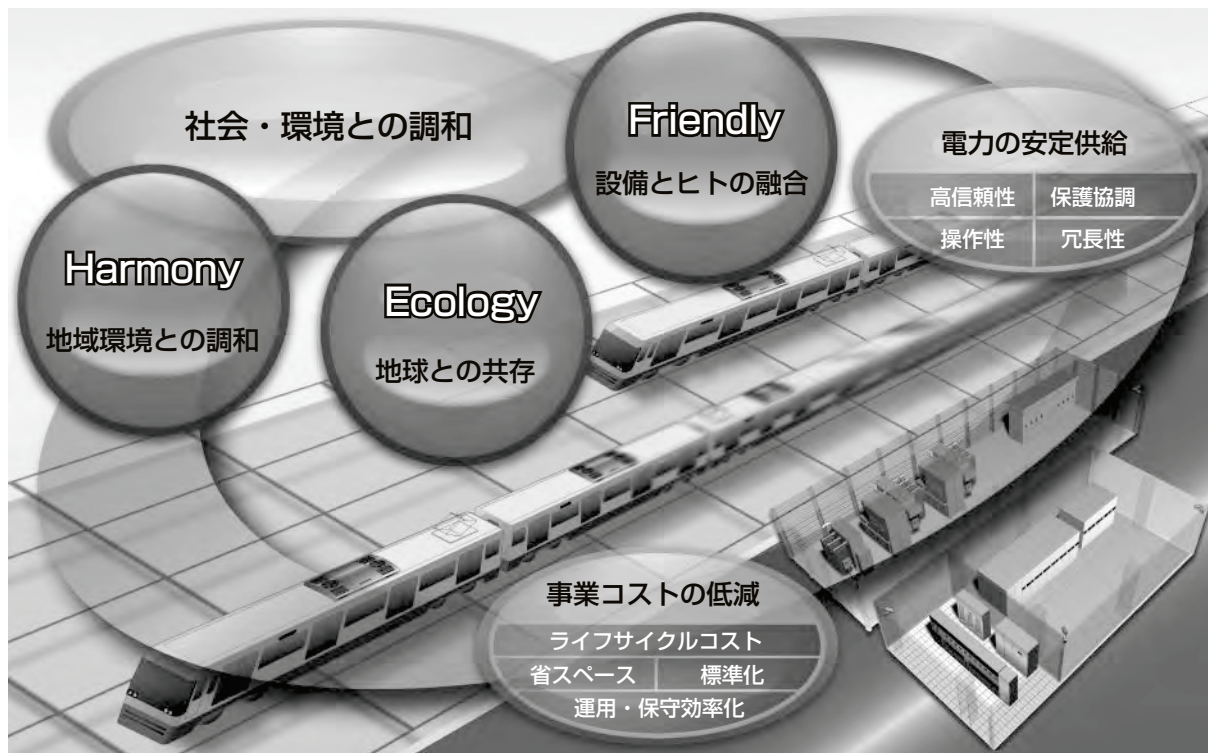
環境においては、このデザインコンセプトの下に、Harmony：地域環境との調和、Ecology：地球との共存、Friendly：設備とヒトの融合からなる環境コンセプトを掲げ、顧客ニーズにこたえるために環境調和設備と環境評価技術の提供と共に回生エネルギーの有効活用に向けた取り組みを行っている。

三菱電機的主要な環境調和設備としては、低ガス圧ドライエア複合絶縁技術を用いた72～7.2kVの脱SF₆ガス絶縁ス

イッチギヤ、純水ヒートパイプ冷却によるシリコン整流器、さらに駅舎の屋根に設置する太陽光発電システムがある。

環境評価技術としては、騒音シミュレーション、並びに電磁界シミュレーションによって、電力設備の計画をサポートする。

鉄道システムにおける回生エネルギーの有効活用では、電力回生インバータといった既存技術と合わせて、リチウムイオン電池を用いた電力貯蔵システムや、車上・地上システムを統合して扱うことが可能な統合電力シミュレーションを開発し、エネルギーフローの最適化に取り組んでいる。



鉄道電力システムにおける環境への取り組み

安定大量輸送という鉄道サービスの根幹を支える鉄道電力システムは、Harmony：地域環境との調和、Ecology：地球との共存、Friendly：設備とヒトの融合からなる環境コンセプトを掲げて取り組んでいる。

1. ま え が き

環境意識の高まりの中、地球温暖化防止に向けた取り組みが始まっている。当社は2000年に世界で初めて市場投入した脱SF₆(六フッ化硫黄)ガス絶縁24kVスイッチギヤをはじめとして、環境調和設備の開発・製品化を推進してきた。また変電所における漏洩(ろうえい)磁界や騒音については、シミュレーション技術によって最適化を図り、地域環境へ配慮した変電所の建設を進めている。さらに回生エネルギーの有効活用では、電力貯蔵システムや統合電力シミュレータを開発し、エネルギーフローの最適化に取り組んでいる。

2. 環境調和設備

2.1 特高受電設備

2.1.1 72kV脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤ

特高受電設備に用いられている電力機器には、1970年ごろから絶縁性能が高く消弧性能に優れたSF₆ガスが絶縁媒体として採用されてきたが、1997年の地球温暖化防止京都議定書以降、SF₆ガスの排出量削減とともにSF₆ガスを用いない脱SF₆ガス設備が望まれてきた。

当社は、キュービクル形ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)の脱SF₆ガス化による地球温暖化抑制を目的として、24～36kV密閉形複合絶縁スイッチギヤで実用化したドライエアと固体絶縁による複合絶縁を更に高度化することで、72kVクラスで、低圧力(最高使用ガス圧力0.2MPa-G以下)のドライエアによって、従来のSF₆ガス絶縁C-GISと同等の外形寸法で脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤを実現した⁽²⁾(図1)。

遮断器は、72kVクラスの真空遮断器(VCB)に電磁コイルの磁力による開閉動作と、永久磁石の磁力による開閉状態保持を行う電磁操作方式を採用し、大幅に信頼性が向上した。操作機構を電磁操作化することによって、VCB操作機構の状態監視ができる技術を開発し、タンク内常時監視技術と合わせて、スイッチギヤのトータルCBM(Condi-



図1. 72kV脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤ

tion Based Maintenance)化を可能とした。

2.2 直流き電設備

2.2.1 低損失・脱SF₆ガス変圧器

変圧器には鉄心にトッランナ変圧器で使われる低損失材料“高配向性珪素(けいそ)鋼帯”を使用、さらに整流器用変圧器は3相5脚外鉄形鉄心構造の採用によって、鉄損、銅損を低減した低損失変圧器を製品化している。またガス変圧器の代用として、難燃性の特長を持つシリコン液による変圧器も実現している。

2.2.2 純水ヒートパイプ式シリコン整流器

半導体素子の冷却には従来PFC(パーフルオロカーボン)を用いてきたが、環境に配慮して純水を封入したヒートパイプを採用している。図2に純水ヒートパイプ自冷式シリコン整流器の外観を示す。新しく開発した高耐圧・大容量の半導体素子を適用することによって、部品数の低減と装置の小型化を図っている。ヒートパイプは安全面を考慮して主回路と絶縁し接地電位としている。ヒートパイプを工夫することで、周囲温度が氷点下になる場合も凍結防止ヒーターなしで整流器運転が可能である。

2.3 交流き電設備

2.3.1 ルーフデルタ結線き電用変圧器

超高压で受電する変電所では変形ウッドブリッジ結線が使われてきたが、昇圧変圧器が省略でき低損失化が図れるルーフデルタ結線を新たに開発した。また外鉄形鉄心構造を採用することによって小型・軽量化でき、使用材料の削減が図れた。

2.3.2 電力補償装置(RPC)

RPC(Railway Static Power Conditioner)は、新幹線用き電設備として、電源不平衡対策としての有効電力融通機能と、き電電圧降下対策としての無効電力補償機能を兼ね備えた自励式変換器である。既設変電所にRPCを導入することで、既存の設備容量を増やさずに、加速性能を向上させた車両の投入に伴うピーク負荷増対応を可能とした。

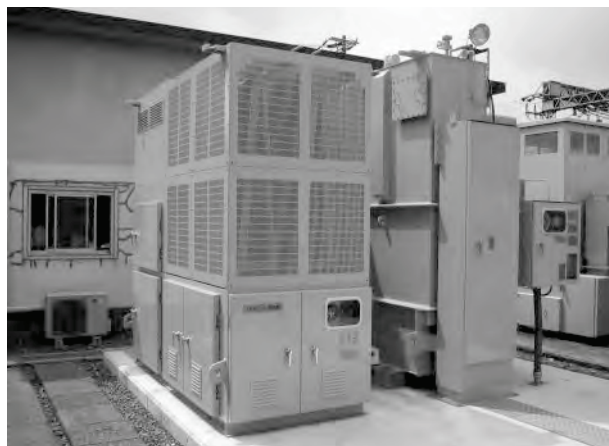


図2. 純水ヒートパイプ式シリコン整流器

2.4 配電設備

2.4.1 太陽光発電

太陽電池セルからパワーコンディショナまでを自社一貫生産し、信頼性が高い太陽光発電システムを提供している。

実用サイズの多結晶シリコン太陽電池セルでは、世界最高の変換効率18.9%(当社測定値)を達成し、また大容量太陽光発電システム向け100kW大容量パワーコンディショナでは、97.5%の変換効率を達成した。太陽光発電システムの更なる普及と発電効率向上によって、CO₂排出量の削減に取り組んでいる。

2.4.2 7.2kV密閉形複合絶縁スイッチギヤ

駅配電所の高圧設備は、従来大気で絶縁されたスイッチギヤが採用されていたが、感電防止や外気(車の排気ガス等)に含まれるNO_xやSO_xなど、湿度の影響を受けない密閉形複合絶縁スイッチギヤとして、7.2kV同様ドライエアー絶縁によるスイッチギヤがシリーズ化された。

3. 環境評価技術

3.1 騒音シミュレーション

騒音シミュレーションの計算例を図3に示す。複数の変圧器が同時に運転したときの音圧上昇や、建屋の壁による反射や敷地境界に設けた塀を迂回(うかい)する影響を加味した解析が可能である。

3.2 電磁界シミュレーション

直流変電所の出力電流は最大数千Aにもなり、漏洩磁界が無視できない。電磁界シミュレーションにより主回路ケーブルの配線ルートの違いによって漏洩磁界の分布を求めることができる。

4. 回生エネルギーの有効活用

4.1 電力回生インバータ

電気鉄道車両の回生余剰電力を熱として消費することなく、交流電力に変換し有効利用できることから、回生電力吸収設備として広く採用されている。当社の電力回生インバータは、電源転流による他励式位相制御方式を採用しており、制御が単純で応答性に優れ安定した回生電力吸収を行うことができる。

4.2 地上用電力貯蔵システム

現時点でエネルギー密度が最大であるリチウムイオン電池を使った、地上用電力貯蔵システムを開発した。詳細についてはこの特集号の“回生エネルギー貯蔵システム(p 9~12)”を参照願いたい。

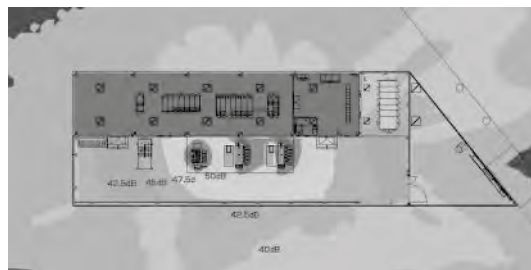


図3. 騒音シミュレーションの計算例

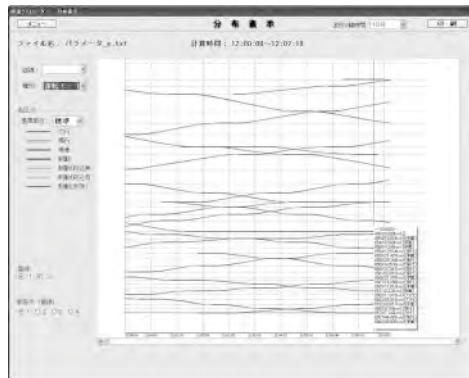


図4. 統合電力シミュレータ計算例

4.3 車上・地上システム統合電力シミュレータ

き電システム、車両システムを統合して扱うことが可能な統合電力シミュレータPETS-DCを開発した。電力貯蔵システムによるエネルギーフローの最適化検討が行える。電力貯蔵システムの検討では、地上設備だけでなく車上搭載も可能である。また回生絞り込みの発生状況を把握するため、図4に示す車両運転モードをダイヤ上に色別に表示するポストプログラムも整備している。

5. む す び

今後、鉄道電力システムに対してもトータルシステムとしての提案や品質確保など、顧客ニーズはますます高度化・多様化していくと考えられる。当社は三つのデザイン・コンセプトを軸にその期待にこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 米畑 譲, ほか: 電力システムの現状と今後の展望, 三菱電機技報, 77, No.11, 731~736 (2003)
- (2) 有岡正博, ほか: 7.2kV脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤ“HG-VA”, 三菱電機技報, 80, No.7, 455~458 (2006)

低炭素社会を支える次世代電力ネットワーク技術への期待

Expectations for Smart Grid Technologies to Support Low Carbon Society

栗原郁夫
Ikuro Kurihara



地球温暖化問題は21世紀における最大課題と言っても過言ではないだろう。2009年7月のラクイラ・サミットでは、世界全体の平均気温上昇を、摂氏2度を超えない範囲にすべきとの認識で一致した。CO₂排出削減の長期目標については、いまだ明確な合意は得られていないが、いずれにせよ、その削減規模と実現の厳しさにおいて現状の社会にパラダイム転換を求めるものである。

低炭素社会を実現していくには、特にエネルギー利用における大きな変革が求められる。中でも化石燃料の直接燃焼から電気の利用への転換は重要な視点である。電気はゼロエミッション電源を含む多様な排出特性、集中的管理の容易さ、高効率・高度なエネルギー利用など、低炭素社会を実現する上で有効となる様々な特長を持つ。高まる電気の役割にこたえるには技術開発が不可欠で、発電から電力輸送、電気利用のそれぞれの分野で革新的な新技術開発への期待が高まる。しかし一方で、様々な要素を考えると低炭素社会の実現にとって特効薬が存在しないのも事実である。省エネルギーはもとよりエネルギー資源の特性に応じた、社会全体から見た適材適所利用など多様なオプションの活用が求められる。

昨今、特に米国では次世代の電力網として“スマートグリッド”への関心の高まりと取り組みが加速している。スマートグリッドは、現時点では明確な定義があるわけではないが、電力需給インフラに高度な双方向通信と監視・運用・制御技術等を取り込み、インテリジェント化することが共通概念となっている。電気と情報通信技術(ICT)の融合である。米国でスマートグリッドが叫ばれるようになった背景には、電力インフラの老朽化や、時代にそぐわない供給信頼度、再生可能エネルギーの活用、昨今の景気と雇用問題などがある。

我が国でも地球温暖化問題への対応の一つとして、2030

年において太陽光発電(PV)の5,300万kW導入という展望が示されている。5,300万kWは、現状の原子力発電設備容量を上回る極めて大きな値である。日本では集中型電源を中心とした高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムがすでに出来上がっている。しかし、このような、PVを中心とした再生可能エネルギーの大量導入、さらに電気自動車などの新しい電気利用、利便性の向上と省エネルギーの両立など、低炭素社会で求められる要件を実現していくには、我が国においても日本型のスマートグリッドが必要になると考える。

日本型のスマートグリッドが注目を集めていく一方で、我が国においても電力設備の高経年化は着実に進んでいる。電力流通設備については、高度成長期とバブル期に大量に増強した設備がリプレースを迎える時期が、そう遠くない将来に訪れる。日本型のスマートグリッドを考える際に、高経年化した電力設備の維持・管理技術の高度化を同時に取り込んでいかなければ、我が国の誇る高信頼度供給の骨格が弱体化することになりかねない。個別機器の診断技術はもとより、各種センサのネットワーク化などICTを活用した保守・保全システム、さらにはトータルとしての設備管理に向けたアセットマネジメントの高度化も重要な側面である。

個別技術は着実に進展したものの、基本においては大きな変化のなかった電気の供給方式に変革の波が押し寄せている。スマートグリッドは国や地域によって動機や対象が異なるものの、ICT、セキュリティ、標準化など、従来の電力の領域を越えた広範な技術展開が求められる。我が国の電力産業界は、電力技術はもとより広範な技術力を持っている。これらの総合力を発揮して、我が国の産業界が、日本そして世界のスマートグリッドをリードしていくことを期待したい。



福井伸太*

21世紀の電力流通を支える最新技術

State-of-the-art Power Grid Technologies in the 21st Century

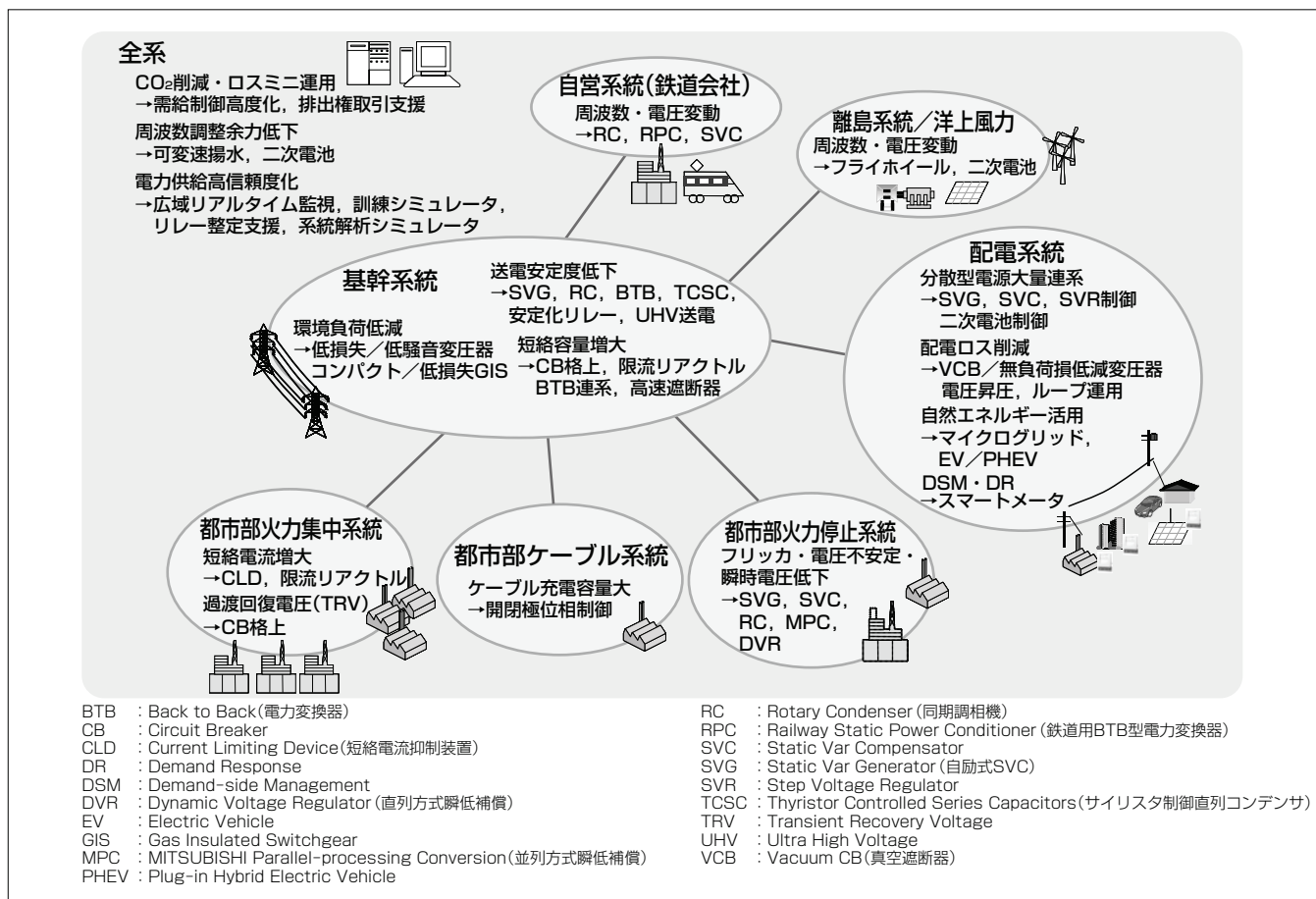
Shinta Fukui

要 旨

我が国の電力需要は、少子化や省エネルギーの進展があるものの電化率の向上が進み、21世紀においても緩やかではあるが拡大方向にある。一方、地球温暖化低減の必要性からも、電力供給の低炭素化となる原子力・揚水の増加、高効率火力集中化への更新が進む方向にあり、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電などの新エネルギー電源の大量導入が計画されている。また、ここ数年で発生した大規模地震での経験から、自然災害による大規模停電の発生・進行防止への確実な対応が必要となっている。流通設備面では1980年代までの高度経済成長時代に建設された変電機器の老朽化が進んでおり、2020年代には全国で最初の更新ピークを迎えることになる。ICT(情報通信技術)

の積極導入によって、運用階層の圧縮や保守拠点の集約による省力化に加えて需要家サイドでの電力需要の管理が進行すれば、低損失の変電機器導入と相まって、発電から流通、消費まで含めた電力供給の更なる効率化が加速していくと考えられる。このように、低炭素電力供給化による電源構成の変化に直面し、流通設備の計画的更新の中で、電力系統の信頼度を維持して、運用と保守の合理化を実現する21世紀の電力流通システムには、系統の安定・効率運用、被災時・緊急時の迅速な復旧、電源の多様化における電力品質の維持が要求されている。

本稿ではこれらの電力系統における新しい課題を明らかにし、21世紀の電力流通を支える最新技術について述べる。



電力系統の課題と対策

電源構成の変化及び地球温室効果ガス低減などの環境負荷低減、電化率の向上が予想される21世紀の電力系統の課題に対して、三菱電機がその解決策として提供する機器及びシステム技術についての全体像を示す(課題→対策)。

1. ま え が き

21世紀は、社会的には少子化、省エネルギーの進行が進むが、地球温暖化防止の観点からヒートポンプを含む家庭機器の電化率向上や電気自動車の普及によって、ピーク電力需要は全体的には今世紀前半までは年0.5%程度で緩やかに拡大すると予想されている。一方、電力の低炭素化供給の進行によって、2030年までに原子力の新增設と火力の高効率化への更新、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電の大量導入が国で計画されている。このような電源構成が多様化する中で、送電線や変電所設備の経年化が進み、高度成長時代に建設された設備の更新が2020年代ごろには最初のピークを迎えることが予想されている。また、至近に国内外で発生した大規模な停電事故の発生防止や、中越沖大地震による原子力発電所停止による大きな潮流変化など、希頻度の大型停電リスクへの対応も喫緊の課題となっている。このような電力システムを取り巻く環境の変化の中で、設備面では、大容量長距離送電の安定化や電力品質の維持、経年更新に合わせた電力流通の高効率化、系統運用面では、連系線拡充に伴う系統の監視制御対象の広域化並びに被災時・緊急時における系統の信頼性・ロバスト性の維持を同時に進めていく必要がある。

本稿では、21世紀の電力システムの新たな課題と解決策としての最新技術動向について述べる。

2. 電源構成の変化に適応した安定運用

原子力発電所や大規模風力発電ファームは、需要地から遠い場所に設置されることから、電力会社間を結ぶ連系線の容量拡大に伴い、長距離送電が多くなる傾向となる。また、用地取得の制約から高効率火力の電源線長距離化や集中的な高効率火力への更新によって、送電可能量に制約が生じる場合が出てくる。発電機間の同期化力低下を抑える送電安定化対策としては、送電線の多回線化、連系線のDC送電化、UHV送電などの高電圧化が効果的である。太陽光発電の電力は大半が家庭用であるため、大量普及が進むと基幹系統での連系線潮流は全体的には少なくなるが、無効電力供給も少なくなり、連系線での電圧低下によって同期化力が下がる時間帯が発生すると考えられる。局所的な対策としては、送電回路に並列に接続して系統電圧を高速に制御するFACTS(Flexible AC Transmission System)機器によって、等価的な効果を実現することができる。図1に長距離電源線での同期安定度及び送電電圧安定度の向上を実現している自動電力変換素子を用いたSVG(Static Var Generator)の適用例を示す。

一方、エネルギー消費における電化比率が大きくなるにつれて、電力品質維持への要望は高くなると予想される。老朽化による都市部火力停止に伴うフリッカ電圧発生、直

流電源機器の増加による高調波の抑制にもSVG, SVC, アクティブフィルタ等の無効電力補償装置、又はLCフィルタの導入が進むと考えられる。

大規模な停電の発生防止には、事故点除去後の系統周波数や潮流の変化、発電機の電圧位相の変化などの系統状態指標の予測計算を行い、発電量や負荷量の最適な制御によって系統の緊急状態から脱出して、事故波及を防止する必要がある。系統事故時の系統周波数の変化をリアルタイムに検出して、最小限の発電及び負荷制御によって、系統の周波数を適正範囲に維持する系統安定化システムの基本構成を図2に示す。

発電出力が自然状況に応じて急変する再生可能エネルギーの大量導入時には、広域の電力融通量も時間帯によっては大きく変動し、系統事故時での電圧低下によって太陽光発電の一斉脱落、又は運転継続機能が付加されている分散電源もあり、周期的なテレメータ値の冗長度による状態推定では系統状態指標の正確な予測が困難となる可能性がある。1サイクル内遮断などの高速遮断器による事故除去で発電機の数変化を極力抑え、系統動揺時の電圧・電流のベクトル値を広範囲にリアルタイムに計測して発電機又は負荷を高速に制御する系統安定化システムが必要になる。系統の情報発信源である変電所へのICT(情報通信技術)適用によって、変電所構内の現場機器近傍に光ファイバ等の耐ノイズ性の情報バスを配置し、GPS(Global Positioning System)の同期時刻を付加した母線電圧や線路電流な

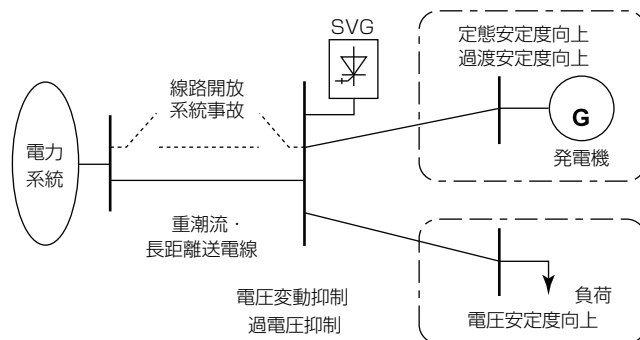


図1. 長距離電源線でのSVG設置

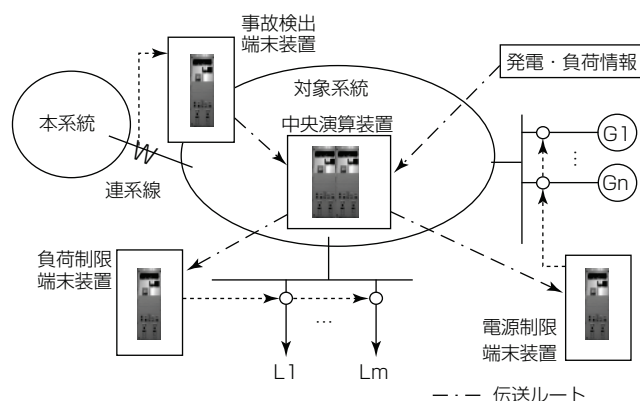


図2. 系統周波数安定化システムの構成

どのデジタル情報を高速に変電所内外に配信できる。さらに設備運用や設備保全計画に反映する変電機器の各種センシング情報、映像、音などのデジタル情報も配信できるフルデジタル変電所の実現が期待される。

2008年に行われた資源エネルギー庁の低炭素電力供給システムの研究会では、再生可能エネルギーの大量導入時には太陽光発電時などの需給が一致しない時間帯に備えて、昼間揚水や蓄電池の系統側設置が検討されている。蓄電池はインバータ制御によって、有効電力と無効電力を独立に高速に供給する電源として、周波数や電圧変動が大きいマイクログリッドでの自立運転試験でその有効性が実証されている。系統事故時の周波数や電圧の安定化制御を担う電源になり得る。

停電時間の短縮化のためには、給電運用制御システムから変電所機器の遠隔状態監視と直接操作による復旧迅速化、並びにそれを支える給電運用者の復旧技能の維持と継承が必要である。系統運用の効率化を目指して、電力系統の運用階層は圧縮され、保守拠点の統合に伴う運用拠点の統合が進んでいる。被災時のリスク分散を考慮した運用拠点の広域での相互バックアップによって、被災時・緊急時での系統運用のロバスト性を維持できる。広域給電の進展とも相まって、給電運用制御所単位での監視制御範囲拡大の一要因である単位CPU (Central Processing Unit) 当たりの処理能力増大は、今後も1年半程度で倍増していくと見込まれている。

これらの背景から、事故時の系統復旧迅速化のためには、事故箇所と設備運転状態の情報、系統制御や系統操作情報が広域かつ高速大容量の制御用IP (Internet Protocol) ネットワーク経由で変電所の監視制御システムと給電運用制御システム間で相互共有されていくと予想される。

給電訓練シミュレータは、広域停電での復旧に必要な中給や複数の給電所運用制御所に跨(また)がる広域系統のリアルタイムシミュレーションが実現されてきており、復旧技能の訓練だけでなく、経年設備事故時の復旧時間など系統への影響度推定も可能であり、設備の保全計画にも活用が期待される。

3. 経年変電機器の大量増加と環境負荷低減

電力系統の要(かなめ)である変電所を構成する変電機器のうち、高度成長期(60年代後半～80年前半)に建設された機器の多くはすでに設計想定寿命を超過しており、今後これら高経年機器の増加が懸念される。保守部品の枯渇や保守要員の減少、又はトラブル実績から性能劣化がある機器は、ライフサイクルコストや不具合発生時の停電範囲などの系統への影響度を考慮して、更新優先度と時期を選定する必要がある。設計寿命が近づいている機器については、適切な保全計画の立案、つまり劣化状態や余寿命を的確に

診断し、適切な修理・部品交換等の補修を行うことで、設計寿命を超えて使用される可能性がある。特に再生可能エネルギー電源の大量導入が毎年継続する予定である2020年代には、最初の更新量のピークを迎えると予想される。機器の状態に応じた更新の前倒しや延命化を組み合わせた年度単位でみた更新量の平準化は、一定の系統余力を確保した上での設備停止を伴う更新工事を進めることができ、適正な系統信頼度を維持する上でも極めて重要である。

主要な変電機器である開閉器や変圧器の性能劣化を決定づける要因としては、ガスシール用Oリングや摺動(しゅうどう)部のグリースの劣化と磨耗、フランジ面の発錆(はっせい)、油及び絶縁物の機械的重合度の劣化、負荷時タップ切り換え器の接点磨耗、また最近注目されてきている経年性流動帯電がある。これらを起因とする性能変化を検出できるセンシング技術を適用して、経年劣化や余寿命を診断するアルゴリズムを搭載した可搬又は遠隔の監視装置がすでに実現されているが、環境負荷低減の観点から最も重要なセンシング技術は、温暖化係数の高い絶縁媒体であるSF₆(六フッ化硫黄)ガスのリークセンシングである。高経年化に伴い、Oリング劣化やフランジ面の発錆によるSF₆ガスのスローリークが懸念されるため、フィールドでのガスリークを早期に発見し、大気中への漏洩(ろうえい)レスを実現しなくてはならない。IEC(International Electrotechnical Commission)／JEC(Japanese Electrotechnical Committee)で規定している0.5%/年のリーク管理を、半年間の短期間の計測データで検出できる精度を持つ可搬型のガススローリーク監視装置を図3に示す。

変電設備の保全を計画的かつ効率的に実施するためには、これらのセンシングデータや巡視点検履歴・事故障害情報など多岐にわたる設備情報の一元管理を行い、設備状態の的確な劣化トレンドの把握が必要である。加えて、設備とその“資産・原価・収益”情報を紐(ひも)付けることによるアセットマネジメントも大量の設備更新時には重要な課題である。図4に、設備データ統合管理基盤である“三菱DiaPassage”の概要を示す。設備の統合データベースであ

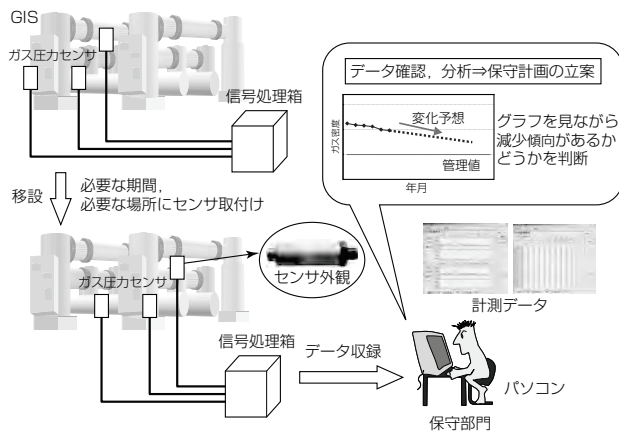


図3. 可搬型ガススローリーク監視装置

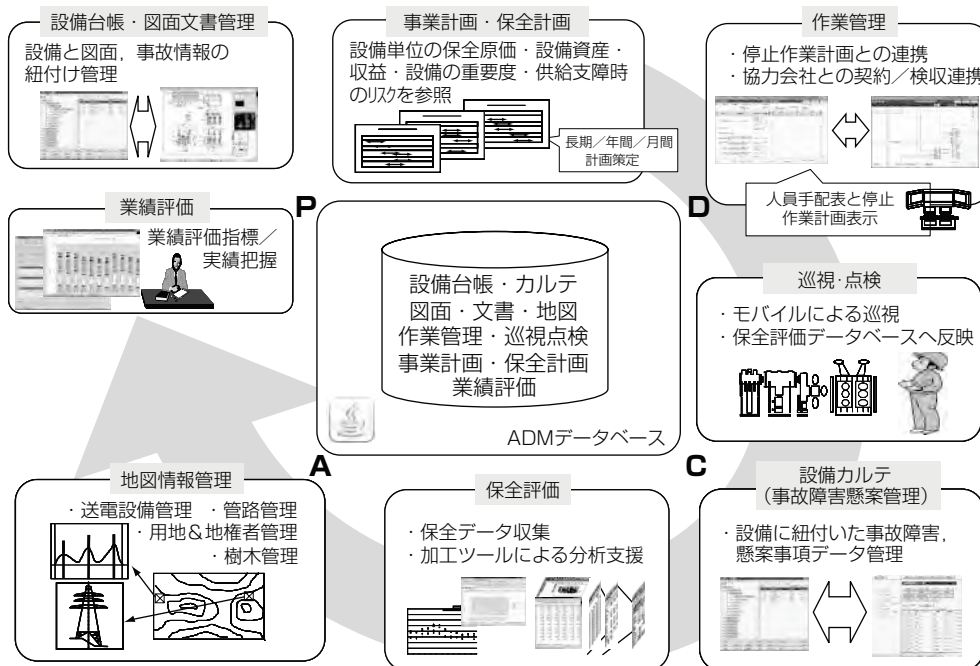


図 4. 三菱DiaPassageにおけるADM

るADM(Asset Data Management)に蓄積された、過去から現在までのデータから将来の故障・劣化を予測し、最適な維持管理方策を立案して、PDCA(Plan Do Check Action)のサイクルを回すことが可能になる。

経年変電設備の更新に合わせた電力流通の高効率化としては、基幹系統では、変圧ロスを低減した変圧器や操作エネルギーや通電ロスを抑制する開閉機器への更新が進むと考えられる。日本の系統では、電力流通ロスは数%程度であるが、その大半を占める配電系統でのロス削減が望まれる。無負荷時の励磁損失を削減する配電用変圧器の合理化設置や配電電圧の昇圧は最も効果的である。配電線の柱上に設置されたCT(Current Transformer)やPT(Potential Transformer)内蔵の開閉器によって電圧や電流の計測値を遠隔監視すれば、配電系統のループ化運用時での配電線損失の削減が実現できる。

環境負荷低減機器への更新に当たっては、図 5 に示すような機器の製造、輸送、据付け、運用、廃棄に至る全ステージを含めたLCA(Life Cycle Assessment)が考えられる。例えば、運用面によるロス低減効果は、期待寿命での長期間運用におけるCO₂排出量減少に積算換算することによって、ライフサイクルの全期間で実際に大気中に放出されるCO₂総量を減少させるか否かを定量的に試算可能である。また、製造、輸送、除却時の使用エネルギー削減が可能だけでなく、部分的な機器の段階更新が可能であり、更新時や内部開放点検時の温室効果ガス回収時間削減など、保守や保全時の系統信頼度を考慮した総合評価が必要である。

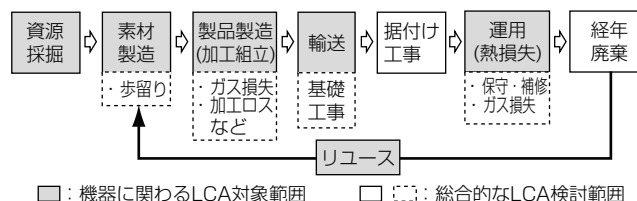


図 5. CO₂削減のLCA評価

4. 21世紀の電力流通システム

電力系統の運用と保全を担う電力流通システムの要件は、大きく次の3項目に集約される。

- (1) 低炭素電力供給進行時の系統運用及び設備運用の信頼度維持
再生可能エネルギー電源の比率拡大、連系線拡充に伴う広域電力供給の増加による管内潮流の不確実性増大、並びに設備の劣化状況や不具合状況を反映した系統運用への対応力強化
- (2) 変電所運転・保守の省力化・効率化
変電所運転業務の集中制御化と、保守拠点統合に伴う運転・保守業務増大への対応力強化
- (3) 被災時・緊急時の信頼性・ロバスト性維持
広域供給に伴う被災時・緊急時の事故波及防止・復旧能力の強化

図 6 に21世紀の電力流通システムの構想を示す。高速大容量の広域IPネットワークによって、監視制御だけでなく設備保全に関する大量の情報を瞬時にN:Nで伝送することができ、運用拠点や保守拠点の集約や分散に柔軟かつ迅

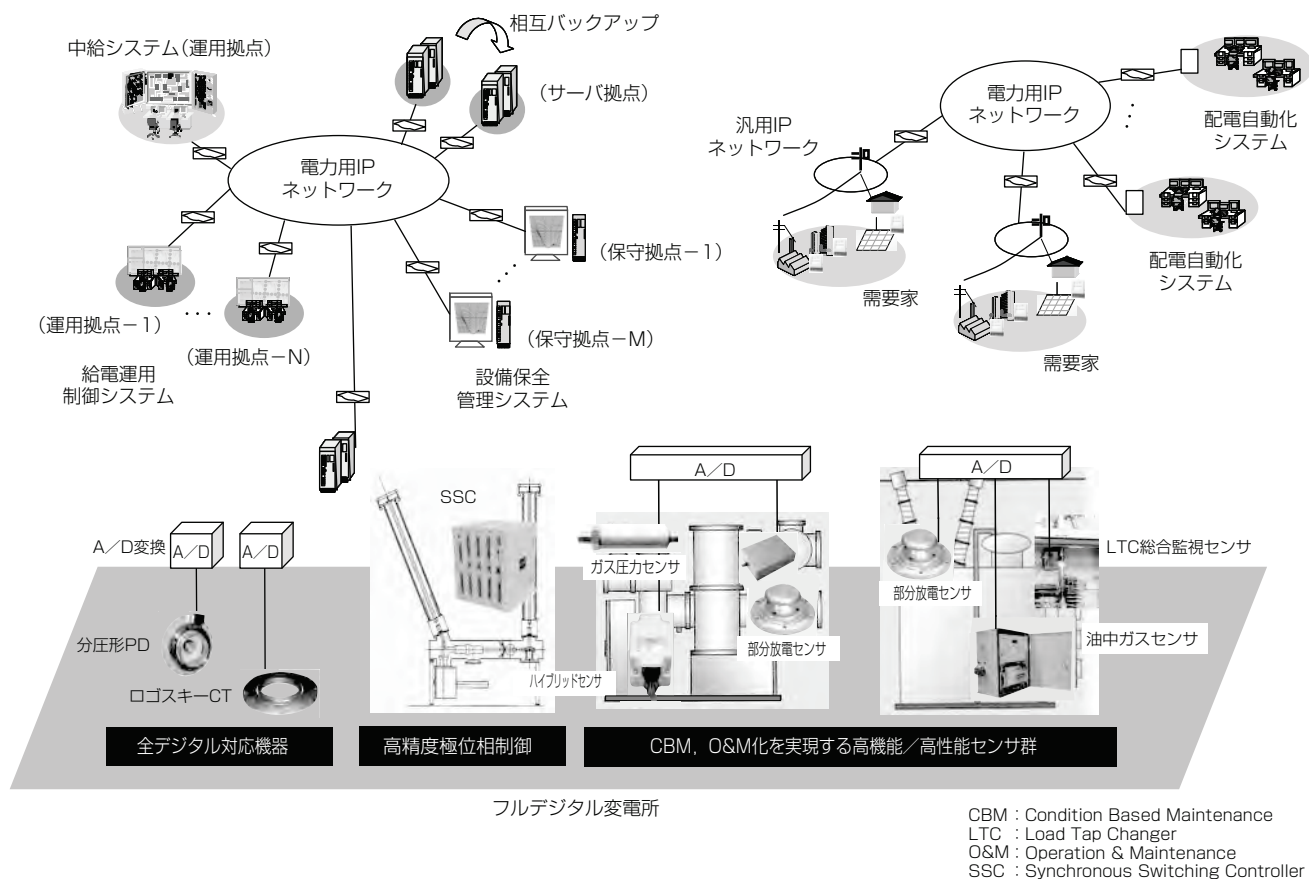


図6. 21世紀の電力流通システム

速に対応可能である。再生可能エネルギーの大量導入の進行状況に応じて、地域的にある程度まとまった太陽光発電や風力発電専用の給電運用制御システムを分散させて実現させることも可能であり、電源構成の変化にも追従できる。ここで、最も重要なのはセキュリティ技術である。国内では、発電所から配電用変電所までは、すでに専用の通信ネットワークでネットワークセキュリティや情報セキュリティなど物理的な対策を施しているが、米国では過去に計算機内で不正プログラムが見つかった事例が2009年4月に報告されている。さらに、ICTの適用をDSM(Demand Side Management)まで進めた電力流通効率向上によって再生可能エネルギー電源導入の促進を図るという観点からのスマートグリッドの実現には、配電用変電所から配電線を経由した需要家側の電子メータ、電化機器、PHEV/EVに至るまでの双方向通信インフラが必要である。社会への二重投資防止の観点から、電力専用ではなく音声や画像まで含めた次世代ネットワークNGN(Next Generation Network)等の汎用(はんよう)ネットワークを適用する場合には、基幹系の電力流通システムへのサイバー攻撃を防ぐための頑強なセキュリティ維持手段が不可欠である。

5. む す び

21世紀の電力システムの新たな課題に対し、電力流通の解決策を最新技術とともに述べた。制御面から見た実質的な電源特性の変化、経年変電機器の増加による設備不具合リスクを含んだ中で、更なる電力流通の効率化、環境負荷低減機器への更新、電力システムの運用と保全を融合する電力流通システムについて述べた。当社は、今後も低炭素社会の最重要インフラである21世紀の電力流通に向けて、ハードウェア・ソフトウェア両面からのベストミックスによる環境性、機能性、経済性を追及した製品開発に邁進(まいしん)していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 低炭素電力供給システムの構築に向けて：資源エネルギー庁，研究会報告書（2009）
<http://www.meti.go.jp/report/data/g90727ej.html>

高性能センサによるCBMとSF₆ガス排出抑制技術

亀井光仁*
西田智恵子*

CBM Management and Reduction of SF₆ Gas Emission Using High Accuracy Sensor

Mitsuhito Kamei, Chieko Nishida

要 旨

設計期待寿命30年を超えた高経年ガス絶縁開閉装置で、現在も運転が継続されているものが増加しつつあり、保守の合理化・省力化を図りながらも電力供給の信頼度維持のために、機器の健全性をいかに正確に把握するかが課題となっている。一方、この課題を解決する保守方式の一つとして注目されてきたCBM(Condition Based Maintenance)は、その実践で状態情報の定義、特に誤差が管理に与える影響は十分に検討されてきていない。

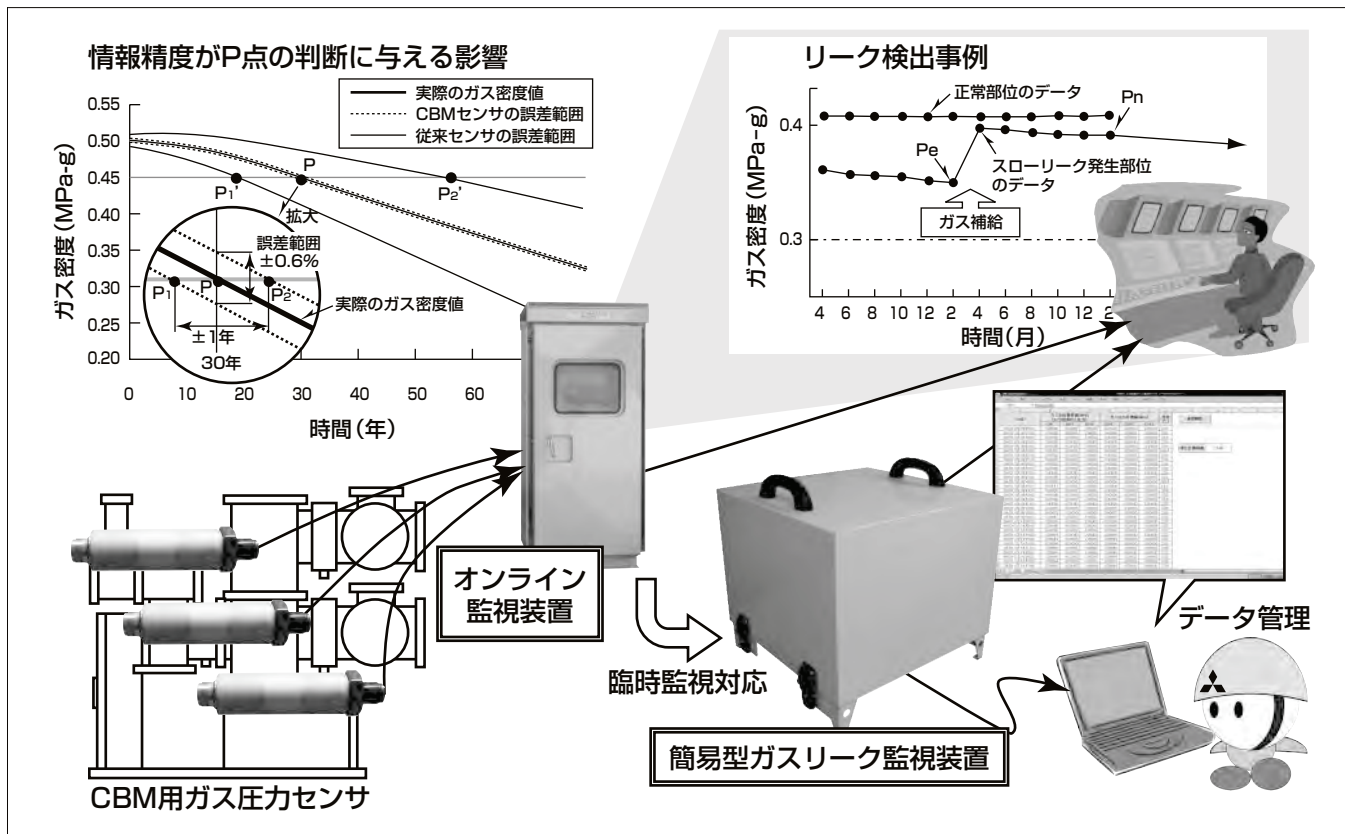
本稿ではCBMに使用する情報の誤差影響をP-Fカーブ(Potential-Failure Curve)を利用して考察した結果、長寿命設備のCBM管理で設備情報が精度関連で備えるべき性能として、“状態軸でP点^(注1)を早期に検出できる高い精度”と、“時間軸でP点の推定誤差を広げない長期安定度”が(注1) P-Fカーブ上で劣化に最初に気付く点。

重要であることを明らかにした。

また、地球温暖化ガスの一つとして年々管理要請が強まっているSF₆(六フッ化硫黄)ガスのリークを題材として、精度に関するセンサの仕様差がCBM運用に与える影響を、CBM用に開発されたセンサと従来型のセンサで比較試算した。また実フィールドでの長期収集データによる検証も実施した。

これらの検討によってセンサ精度が機器のCBM運用に与える影響が明らかになるとともに、検証テーマとして選択したSF₆ガスのリーク管理について、JEC-2350-2005の規定を十分に満足するCBM管理が可能となることが確認され、ガスリーク時の現場管理を支援する装置として製品化を行った。

特集
II



CBM用センサを用いたスローリーク監視

長寿命機器の劣化診断を行う場合、CBM用に開発したセンサでは正確に劣化時期の推定が可能なのに対し、従来型の長期安定性が不足したセンサでは大きな累積誤差が発生し、CBM運用による劣化時期の推定が困難であった。これらの傾向をSF₆のリークを題材として長期間収集したデータで検証し、現場でのガスリーク管理用に新たに開発した簡易型ガスリーク監視装置に反映した。

1. ま え が き

1960年代末から変電分野で導入が進んできたガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear : GIS)は、初期の機器では設計期待寿命を超えて現在も運転が続いているものが多く、保守の合理化・省力化を図りながらも、電力供給の信頼度維持のために機器の健全性をいかに正確に把握するかが課題となっている。

この課題を解決する概念として注目されたのがRCM(Reliability Centered Maintenance)で、その中でも機器の状態情報に即した保守を施すCBMは重要な選択肢の一つとなっている。しかしながら、このCBMの実践で状態情報の定義、特に誤差が管理に与える影響は十分に検討されてきていない。

本稿ではRCMの中で扱われているP-Fカーブを利用し、CBMに使用する情報の誤差影響を考察した。また、地球温暖化ガスの一つとして年々管理要請が強まっているSF₆ガスのリークを題材として、センサの仕様差がCBM運用に与える影響の試算、及び実フィールドでの長期収集データによる検証を実施した。また、これらの成果を基に“簡易型ガスリーク監視装置”を製品化した。

2. P-Fカーブにおける情報誤差の扱い

情報誤差の影響に関する試算は、定格0.5MPaでSF₆ガスが封入されたGCB(Gas Circuit Breaker)でガスリークが発生したことを想定した。ガス開閉機器のSF₆ガスリーク管理基準は、JEC-2350-2005でIEC62271-203と整合性を図って0.5%/年になっている。この結果、リーク率が0.5%/年を超えていないことの管理が必要となるが、CBMの観点からはガスリークに気付くタイミングが、センサ情報の誤差によって、どの程度ずれるかも問題となる。

試算では表1に示すCBM用に開発したガス圧力センサ⁽¹⁾と、従来型の市販ガス圧力センサの誤差性能を利用して比較した。なお表中の測定精度は非線形誤差とヒステリシスによる誤差を考慮した値で固定誤差の一つに相当する。

表1に示したCBM用センサ、従来センサの誤差要因を、経年によってリーク率が変化するP-Fカーブに重ね書きしたものを図1に示す。なおリーク率変化は、初期0.1%/年、中期0.3%/年、後期を限界リーク量0.5%/年と仮定したも

表1. ガス圧力センサの仕様

	CBM用センサ	従来センサ
測定範囲	0~1MPa-Gauge	0~1MPa-Gauge
分解能	10Pa(100dB)	1kPa(60dB)
精度*	±0.1%	±0.5%
温度特性	±0.01%/℃	±0.05%/℃
長期安定性	±0.015%/y(0~3 rd y) ±0.004%/y(4 th y~)	±0.1%/y

※ 3σ値

ので、ガスリークに最初に気付くタイミング(想定P-FカーブのP点)をガス密度が0.05MPa低下しガス補給指令が出る時点とすると、P点はほぼ30年となり、Oリングの劣化が顕在化する可能性が指摘されている時期にほぼ一致する。なお、試算ではセンサ部の温度変化を最大10℃/日とし、固定誤差は測定精度と温度特性の2乗平均で与えている。

図1で誤差を加味した場合のCBM用センサのP点判定タイミングP₁、P₂は±1年程度のずれに収まっているのに対し、従来センサのP₁'、P₂'は-10年、+25年と大きなずれを示している。CBM運用ではP点をいかに早く安定して推定できるかが生命線とされており、従来センサでは事実上CBM管理効果は得られないと考えられる。

3. CBM用ガス圧力センサを使用したガス漏れ監視

試算した誤差特性を実際の屋外変電所環境で確認するために、所内変電所の84kV GISに両タイプのガス圧力センサとガス密度演算用の温度センサを設置し、図2の監視システムを構築して2005年5月10日から2006年5月23日までの年間データ収集を行った⁽²⁾。なお、試験期間中のGISタン

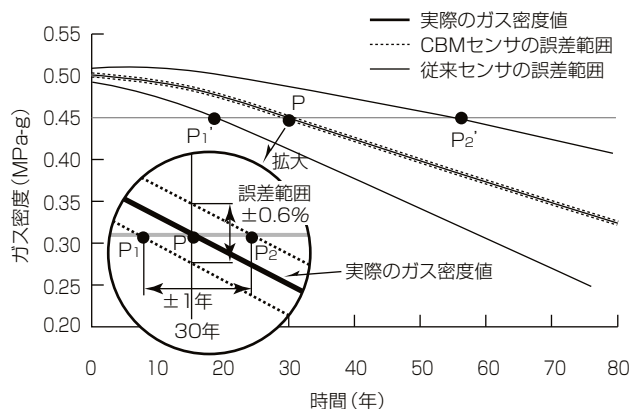


図1. 長期安定度の影響

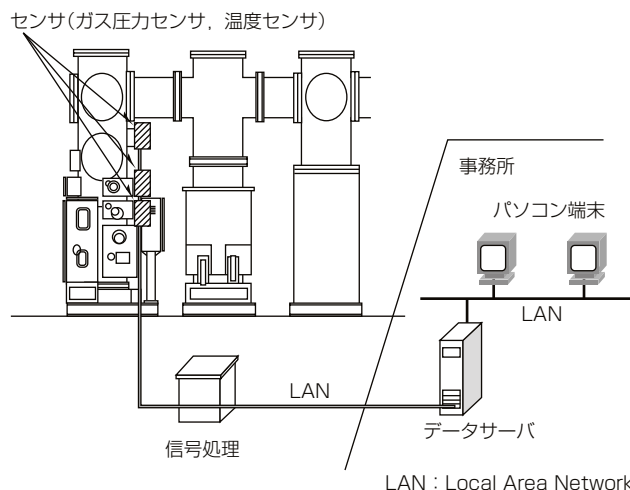


図2. 所内変電所監視システムの構成

クのガスリーク状況は定期的にビニル巻きによる蓄積法で確認したが、リークは観測されなかった(検証精度0.1ppm)。このことから得られたデータ誤差はすべてセンサによる検出情報の誤差となる。

CBM用センサ及び従来センサについて測定データを春から冬までの4シーズン別、及び1年通期で処理した場合のそれぞれの誤差の標準偏差を、1日の時刻別に図3にまとめた。図からガス密度演算誤差は、日の出とともに増加し15:00ごろピークを迎え、朝3時から6時の間に最小値となる。この傾向は1年を通じて同様であった。また、標準偏差の最小値は朝6時に、CBM用センサでは0.1%, 市販ガス圧力センサでは0.65%(3 σ で評価するとそれぞれ0.3%, 1.95%)となった。

ここで、ばらつきの主要原因を気象変化に伴うガス温度分布不安定と推定し、年間データの中から異常気象によると考えられる特異点28点(月当たり2点ほど)を、気象台のウェザーレポートで照合し、スムージングフィルタ処理を施したあとのデータ群に対して統計的な手法によってリーク率の試算を行った。

日々のガス密度を縦軸(y軸)、測定日を横軸(x軸)にとると、ガスリークによるガス密度変化の一次回帰式は

$$y = ax + b \dots\dots\dots (1)$$

となる。 a は回帰係数(データ収集期間内のリーク率)、 b は初期ガス密度である。ここでガス密度データが正規分布をしていると一次回帰式の回帰係数 a も正規分布とみなせる。したがって、1年分のデータの回帰係数を母分散の一次回帰係数の不偏推定値として母集団の回帰係数の標準偏差推定値 σ をフィルタ処理後の1年分のデータから計算した結果、CBM用センサの σ 値は0.024%/年(3 σ 値0.072%/年)、従来センサの σ 値は0.61%/年(3 σ 値1.83%/年)となった。試算結果をフィルタ処理前後のCBM用センサと、フィルタ処理後の従来センサの確率密度分布比較として図4に示す。図では横軸にガスリーク率、縦軸に確率密度を設定し、標準偏差の差がわかりやすいように中心値を正規化している。

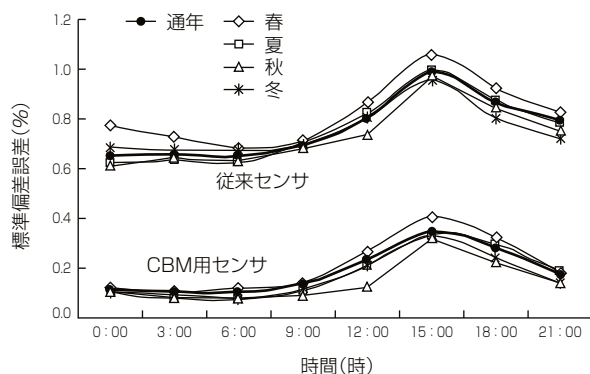


図3. ガス密度監視システムの年間誤差

CBM用センサを使ったリーク率測定は、3 σ 値0.072%/年の性能が期待できるという結果になった。また、t検定を利用した試算では、CBM用センサのフィルタ処理後のデータについて、片側有意水準2.5%の判定としてリーク率0.1%/年以下であることが確認されており、CBM用センサとこれら統計処理手法を併用することでJEC規定を十分に満足するCBM管理が可能となることが確認できた。

4. 変電所におけるリーク検出事例

屋外の実変電所にCBM用センサを設置し、ガスリークについてP-Fカーブ上のP点検出性能が向上した事例を図5に示す。

図5のデータは84kVの高経年GISで観測されたもので、横軸はフルスケール3年である。この事例は巡視点検でガス密度不足に気づき(CBM用センサは設置していたがデータの運用に入っていない段階。したがって、従来点検でのP点に相当。図ではPeと記載)ガス補給後にガス密度情報の変化をCBMセンサで追跡の結果、継続的な微量リーク傾向が継続していることを確認した(CBMセンサによるP点に相当。図ではPnと記載)。このあとに臨時点検で巡視の死角部にあった小さな錆(さび)を発見、補修している。この事例ではガスリーク率は1%/年程度の大きな値ではあったが、CBM用センサによってP-Fカーブ上のP点の検出能力が大幅に向上かつ安定化したことが証明されたものである。

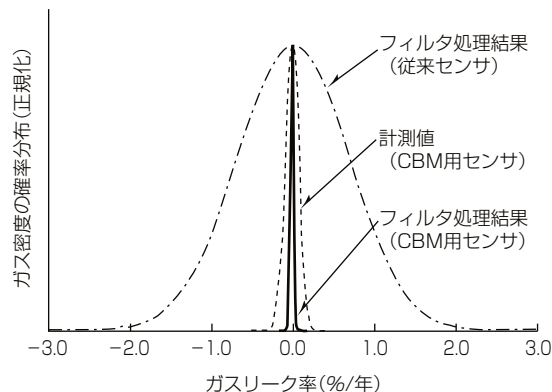


図4. フィルタ処理の効果

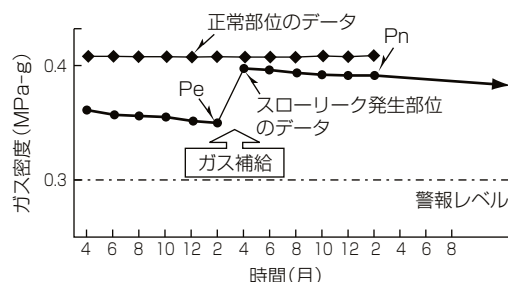


図5. 実変電所でのリーク検出事例

5. 可搬型リーク検出装置

所内変電所での検証データや図5のような実変電所での検出事例を見ると、SF₆ガスリークの管理はオンラインによる連続監視が有効と考えられる。しかしながらこれまでのオンライン型リーク監視装置は装置規模が大きく、個別の設計製造や現地据付けに時間を要するため、散発的な不具合など、緊急に管理が必要な状況には適しておらず、保守員による現場での継続監視業務で対応せざるを得ない状況であり、ガスリーク発生時は依然、現場保守の負担が増加する可能性がある。この状況を解決するために、ここまでの開発成果を採用することでオンライン型システム同等のセンシング性能を持ち、緊急応動が可能な機動性と保守の省力化を支援する遠隔通信機能を備えた“簡易型ガスリーク監視装置”を開発した⁽³⁾。

リーク監視にはCBM用ガス圧力センサを採用し、センサは各種配管アダプタを用いて、既設・新設を問わずガス補給口に設置可能である。



図6. 簡易型ガスリーク監視装置の外観

表2. 簡易型ガスリーク監視装置の仕様

入力	ガス圧力センサ最大3点 温度センサ1点
最高検出感度	0.0001MPa
圧力計測範囲	0.0~1.0MPa・g
温度計測範囲	-20~120℃
保存データ	1日1点として2年相当分(730点)
通信	直接接続通信(USBシリアルケーブル)又は電話回線に対応
電源	AC100V(85~110V), 100VA以下
装置サイズ	W500×D500×H500(mm)
質量	25kg
使用環境	周囲温度: -20~+40℃ 屋外設置(直射日光が当たらない場所に設置するものとする)

装置の外観を図6に、主要な仕様を表2にまとめて示す。可搬型ではあるが、現場に一定期間仮設されて利用することが想定されるため、屋外設置型でかつ一定の質量を持たせている。監視機能としては最長2年間分(1日1点保存の場合)のデータを保存し、長期間のスローリーク監視が可能である。また、記録周期は最短1分ごとまで変更が可能であり、スローリークの進展様相に合わせた運用にも配慮している。

データ通信については電話回線による遠隔監視を可能とするとともに、USB(Universal Serial Bus)シリアルケーブルによるパソコン通信もサポートしており、巡視員による現場でのデータ回収による運用にも対応可能である。

6. む す び

CBM方式による設備管理への移行がうまく機能しない要因の一つに、設備の状態情報の精度が状態判断に与える影響を十分議論していないことがある。

本稿では、保守のCBM化を成功させるために必要な情報精度の考え方を述べるとともに、SF₆ガスリーク管理を題材として情報の精度がCBM運用に与える影響を議論した。その結果、長寿命設備のCBM管理を行う場合に設備情報が備えるべき性能として、従来議論されている“状態軸でP点を早期に検出できる高い精度”以外に、“時間軸でP点の推定誤差を広げない長期安定度”が重要であることを明らかにした。

また、CBM用として開発したガス圧力センサと従来型のガス圧力センサを使用した長期収集データによって、設備情報の精度差が与える影響を検証した。

検証に適用したガスリーク監視では、統計処理を併用することでJEC規定を十分に満足するCBM管理が可能となることを確認し、これらの成果を現場のガスリーク緊急管理用の可搬型リーク検出装置として製品化した。

参 考 文 献

- (1) 西田智恵子, ほか: GIS/GCBのCBM化を推進する高機能化センサの開発, 電気学会論文誌B, **121**, No.9, 1193~1198 (2001)
- (2) 亀井光仁, ほか: センサ情報の精度がGIS/GCB保守のCBM化に与える影響, 電気学会論文誌B, **129**, No.1, 215~221 (2009)
- (3) 伊藤隆史, ほか: 可搬型SF₆スローリークモニタ装置の開発, 電気学会B部門大会予稿, 349 (2008)

高経年GCB・GISの劣化評価技術と更新技術

望月哲夫*
皆川忠郎*
笹森健次*

Deteriorating Portions Detection and Replacement Technologies for Aged GCBs and GISs

Tetsuo Mochizuki, Tadao Minagawa, Kenji Sasamori

要 旨

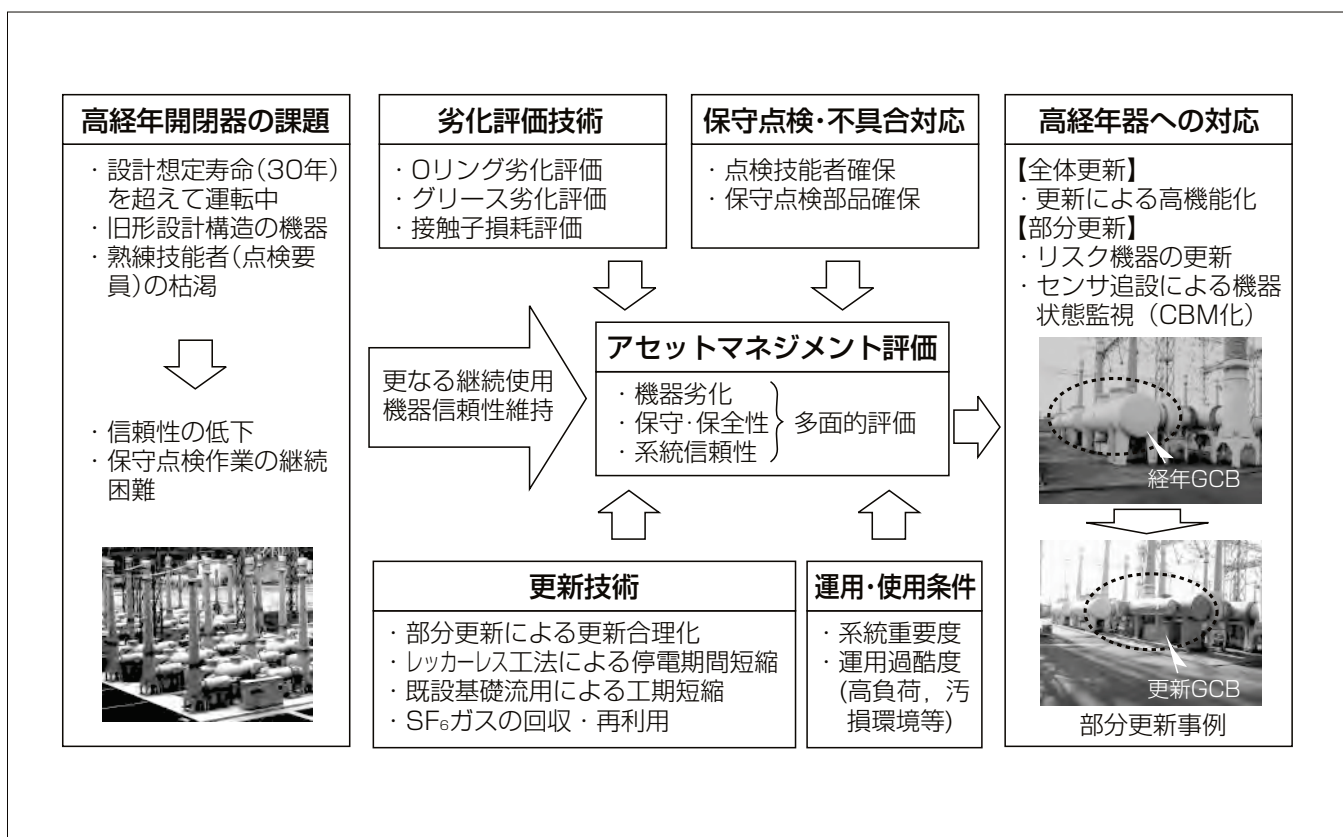
1970年代に本格導入された多数のGCB (Gas Circuit Breaker)・GIS (Gas Insulated Switchgear)は、すでに設計想定寿命(30年)を超過しており、最近では経年劣化による信頼性低下、旧形設計構造機器に対応できる熟練技能者の枯渇による保守点検作業の維持困難などの課題が顕在化している。

一方で、既設設備有効活用の観点から、高経年化する機器の更なる継続使用と機器信頼性維持が求められる中で、最適な更新時期の把握と保全対策の合理化の要求が高まってきている。そのため、機器の耐用年数の把握と機器の更新・保全の方策を決定するアセットマネジメントによる評価が急務である。

近年、これら高経年機器の耐用年数把握のため、フィー

ルド器の工場持ち帰り調査を行い各種部品の劣化進展状況を定量的に分析・評価し、劣化診断・寿命評価技術の向上を図ってきた。まずは、劣化進展が懸念されるOリング及び接触子の損耗も含めたグリースの劣化評価について、新しい知見を述べる。次に、高経年GISを例にとり、機器全体の更新又はリスクが高い機器の部分更新、又は未更新部の機器状態監視(CBM(Condition Based Maintenance)化)による機器継続使用等、更新・保全に対する考え方と対応方法について述べる。さらに、550kV GISの主要部であるGCB部の部分更新工事の実施事例を紹介し、停電期間の極少化、現地工期短縮、既設設備有効利用等を考慮した更新技術の現状と更新時の配慮事項について述べる。最後に更新機器の開発事例についても述べる。

特集
II



高経年開閉器の課題と劣化評価、更新技術による高経年器への対応

高経年化するGCB・GISの長期使用時の信頼性維持には、機器の劣化評価技術による耐用年数評価と運用・設備条件、保守・安全性を考慮した保全方策が重要である。保全対策には機器更新とCBM化による継続使用の考え方があり、更新時には停電時間ミナムム、工期短縮等の更新技術が適用される。

1. ま え が き

1970年代から本格導入されたGCB・GISは、昨今では設計想定寿命(30年)を超過するものが増加しており、経年による信頼性低下、熟練技能者の枯渇による保守点検作業の継続困難などの問題が顕在化している。一方、既設設備有効活用の観点から耐用年数の把握による更新必要時期の設定が検討されるとともに、合理的な保全策を施すことによる、更なる長期使用も期待されている。

耐用年数を合理的に設定するためには、経年による各種部品の劣化進展状況を定量的に分析・評価する技術が必要となる。三菱電機では、GCB・GISの劣化を定量的に評価する技術の開発のため、フィールド器の工場持ち帰り劣化調査の実施によって、高経年機器の劣化診断・余寿命推定技術の向上に努めてきた。

本稿では、最新の劣化評価技術と、それによる評価事例を述べるとともに、今後増大が懸念される高経年GISの合理的な更新・保全の考え方・対応方法を提示し、更新事例をもとに機器更新時の配慮事項について述べる。

2. 劣化評価技術

機器の基本性能に影響を及ぼすガスシール用Oリング劣化、及び接点・摺動(しゅうどう)面のグリース劣化に対し最近新しい知見が得られており、それらについて次に述べる。

2.1 Oリングの劣化特性

ガスシール用Oリングは、ゴムの酸化・熱劣化が進展して弾力の低下が大きくなり、圧縮永久歪(ひずみ)率が一定値(80%)以上になると、ガスリークの発生が懸念される。

図1に、フィールドで得られたOリングの圧縮永久歪率のデータを示す⁽¹⁾。圧縮永久歪率80%をシール性能限界としデータを統計解析すると、図2に示すとおり経年20年を超えるとリーク発生確率は上昇傾向となり、経年30年を迎えるものは数%の確率でガススローリーク発生が懸念される。

なお、これらのデータはOリング使用部位温度、フランジ面の錆(さび)発生、又は図3に示すとおり、補助シール剤の有無・使用雰囲気(酸素供給の有無)等によって変化する。

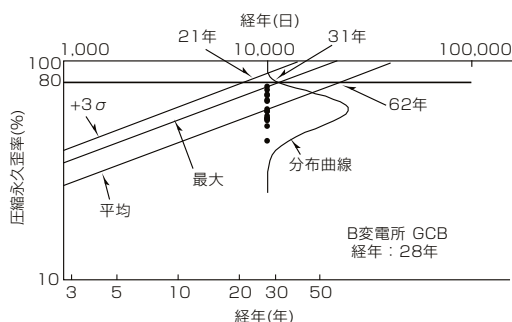


図1. Oリング劣化の統計解析結果

るため、表1に示すとおり、使用状況に応じたりスク評価が必要となる。

2.2 グリースの劣化特性

経年によるグリースの潤滑性能低下は知られているが、中でもGCB等の摺動接点部グリースは塗り替えが困難であり、グリース劣化による摩耗促進・通電信頼性低下が懸念される。

図4、表2に経年約30年の3変電所、4台のフィールド器の摺動接点グリースの分析データを示す⁽²⁾。油分蒸発量は経年に依存し、経年30年に近づくグリースが潤滑機能を維持できる限界と一般的に考えられている油分率50%を下回る(摩耗量増大域)傾向にあることがわかった。

さらにピンオンディスク摩耗試験によって、これらグリース劣化の摩耗への影響を評価した結果を図5に示す⁽³⁾。図から、新品グリース(油分率65%)に対し、油分率50%に劣化すると摩耗量が急増することが確認できた。

また、これまでの摩耗試験及びフィールド器の調査結果から、油分率減少以外に、開閉動作による摩耗粉混入及び電流遮断によるSF₆(六フッ化硫黄)分解生成物の混入によ

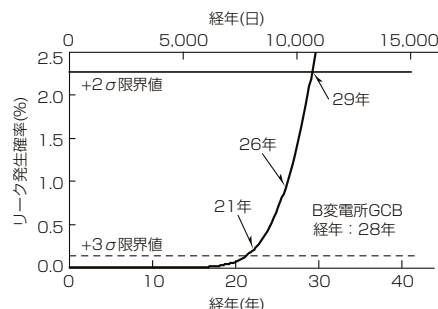


図2. Oリングのリーク発生確率推移

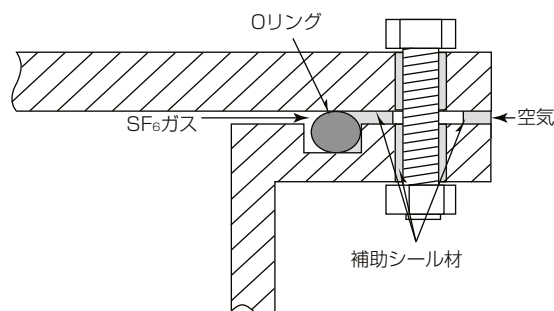


図3. フランジ部のシール構造

表1. 各種因子の劣化促進性

劣化因子	劣化促進度	
	小	大
使用雰囲気	ガス(低酸素)	空気
補助シール剤	健全	劣化
フランジ幅	長	短
雨水の浸入	なし	あり
錆の発生	なし	あり
温度	低	高

って摩耗が促進されるとの知見を得ており⁽⁴⁾、今後更なるデータ蓄積によって、フィールド器の状態予測や点検及び更新要否等の評価を行うことが期待できる。

3. 更新・保全の考え方と更新技術

高経年機器は、2章で述べた劣化に伴う性能・信頼度の低下のみならず、人的資源又は部品入手性の点から定期点検・修理・不具合時の対応等が困難となるなどの課題がある。

特に、高経年機器を熟知した熟練技能者(点検要員)の引退が今後ますます進むと考えるが、それによって、定期点

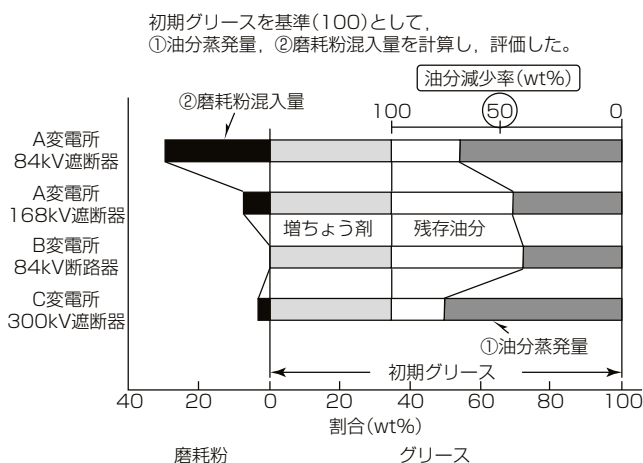


図4. グリースの劣化特性データ

表2. フィールド機器データ

変電所	A		B	C
機種	84kV 遮断器	168kV 遮断器	84kV 断路器	300kV 遮断器
用途	シャント設備用		送電線用	
経年(年)	27	28	29	30
動作回数(回)	8,564	573	255	1,059
負荷遮断回数(回)	1,630	30	—	不明
定格電流(A)	1,200	2,000	2,000	4,000
負荷遮断電流(A)	225	676	—	不明
【グリース中】				
油分率(wt. %)	23	45	52	28
油分減少率(wt. %)	70	47	43	77
異物混入量(wt. %)	36	10	データなし	6

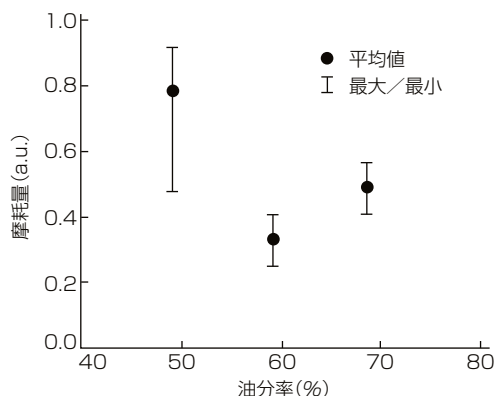


図5. グリース油分率と摩耗量の関係

検又は万一の不具合発生時の対応が困難又は不可能となる等の問題が発生する。

これらの状況を踏まえて、今後高経年機器が増加するGISを例にとり、その更新・保全の考え方について述べるとともに、実施した更新事例を紹介し、更新時に配慮すべき事項について述べる。

3.1 GISの更新・保全の考え方

GISは単体機器と異なり、複数の機器の集合体であるため、各機器の更新・保全要否を総合的に勘案して対応を図ることが必要となる。初期の遮断器、避雷器、変成器等は基本構造も現行と異なる旧式のものであり、性能・保守点検維持の観点からリスクが高いと想定される。このため、これらを部分的に更新(部分更新)する、又は、GIS全体を一括して更新(全体更新)することが必要となる。特に前者に関しては、未更新部(断路器、母線など)の健全性を確認するためのセンサ等を追設し、CBM(状態監視)を行うことで、GIS全体の信頼度維持を図ることが望ましい。GIS構成機器ごとの更新・保全の考え方を表3に、今後の対応方策の概要を図6に示す⁽⁵⁾。

3.2 更新方法の選択

部分更新又は全体更新の選択に当たっては、表4に示すとおり、更新必要部位、更新後(次期更新まで)の延命期待期間、更新のためのコスト・工事期間・停電期間などを総合的に検討することが必要である。

表3. GIS更新機器の更新・保全の考え方

構成機器	更新・保全の考え方
遮断器(GCB)	GCBは技術進歩に伴う機種世代交代が顕著であり、初期のものは現状に比べ、旧式の遮断部・操作機構部を持つため、性能面、保守点検面及び不具合時の対応等、高経年化に伴い至近に継続使用が困難となることが想定される。このため、GCB部を更新し、GIS全体の継続使用を図る取り組みがすでになされている。
避雷器(LA)・変成器(VT)	初期のものは現行の酸化亜鉛形LA、ガス絶縁VTとは異なる旧式のもの(ギャップ付きLAや油入りPDなど)が納入されており、万一の不具合発生時の修復が困難であることや特性・性能低下の可能性が考えられる。このため、GCBと同様に機器の更新が進められている。
断路器(DS)・接地開閉器(ES)・母線(BUS)	断路器、母線などは、性能低下面、保守点検対応など至近での対応優先度はGCBに比べて低いが、経年が進むにつれて課題が顕在化してくると考える。このため、今後継続使用を図るに当たってはセンサ等による状態監視を行い、健全性確認を行うのが望ましい。

PD: Potential Device

GIS構成機器	点検可否	トラブル 対応可否	性能低下	(経年)(30年) 西暦 2000	(40年) 2010	(50年) 2020
GIS共通	—	—	○→△	全面更新		
遮断器	▲	▲	▲	部分更新		
避雷器／ 変成器	—	▲	△	更新		
断路器／ 接地開閉器	○→△	○→△	○→△	CBM(監視・診断)		
母線	—	—	○→△	CBM(監視・診断)		

凡例：○：現状対応可能、▲：至近で対応不可と予想、△：近い将来問題、—：該当なし

図6. 高経年GISの更新・保全対応方策

表 4. 更新方法の選択

更新時の検討項目	全面更新	部分更新
更新必要部位	多数	限定
更新後の延命期間	長期	短～中期
更新コスト	大	小
工事期間・スペース	大	小
停電範囲・期間	中～大	小～大

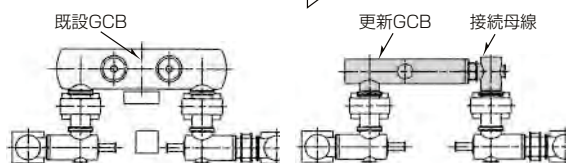


図 7. 550kV 二圧式GCB更新事例

3.3 550kV GISのGCB部更新技術

高経年機器の更新に当たっては、系統運用、更新費用、工事期間などを勘案し、停電期間・範囲の極小化、既設品（健全部位、基礎、SF₆ガスなど）の流用範囲の拡大、更新時の現地工事期間の短縮を図ることが必要となる。

近年実施している高経年550kV GISのGCB部の部分更新事例を図7に示す⁽⁶⁾。更新に当たっては、次の更新技術適用によって合理的、経済的な更新を実施した。

- ①重機を要しないレッカーレス工法による気中母線無停電でのGCB取替え（図8）
- ②既設GCBの基礎流用による現地工期の短縮
- ③既設GISとの取り付け部の流用（接続母線設置）
- ④SF₆ガスの回収・再利用

3.4 更新メリットを実現する機器開発

既存機器更新時、更新器の一層の軽量化、高機能化などを図ることによって、信頼性・保守点検性の向上、既設設備の有効利用などの更新メリットを創出することが重要となる。

今後の機器開発に当たっては、軽量化・所要操作力低減による基礎荷重の軽減（既設基礎の流用）、機器寿命延長又は保守性向上を目的とした新技術開発などの取り組みが必要である。

当社で開発・製品化した新形84/72kV GCB⁽⁷⁾は、これらの更新メリットを追求した機種であり、次の特長を備えている（図9）。

- ①軽量化（転倒モーメント軽減）による既設基礎の流用・更新工事期間の短縮
- ②新材料ノズル適用によるタンク内点周期の延伸（従来2,000回→5,000回）、操作装置のグリスアップ省略による保守点検性向上

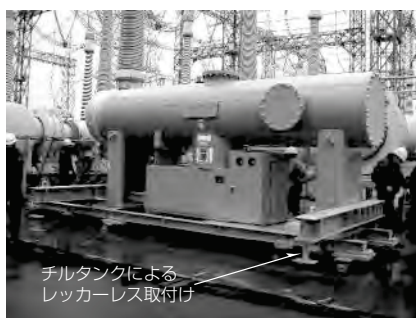


図 8. 550kV GIS用GCBの更新工事状況

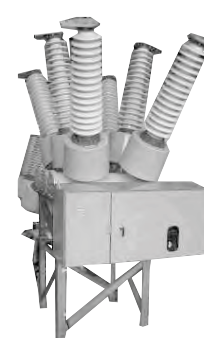


図 9. 新形84/72kV GCB外観

4. む す び

今後増加が見込まれる高経年開閉機器の最近の劣化評価技術と更新技術について述べた。

劣化評価技術に関しては、ここ数年でフィールドデータの分析・蓄積によって、劣化要因・メカニズム、劣化事象が機器性能へ及ぼす影響などが明らかになるとともに、耐用年数を定量的に評価できるレベルとなっている。

更新技術に関しては、GISを例にとり、性能面に加え、点検要員・点検部品などに起因する保守点検継続性等の面から、更新・保全に対する考え方を述べた。また、最近の550kV GISの部分更新工事に適用された最新の更新技術を述べるとともに、新形84/72kV GCBの更新メリットを追求した配慮事項について述べた。

当社はGIS・GCBのパイオニアメーカーとして、今後も高経年機器の信頼度維持と更新・保全技術の向上に向けて不断の努力を行う所存である。

参 考 文 献

- (1) 皆川忠郎，ほか：高経年GISにおけるOリングの劣化特性，電気学会論文誌B，**125**，No.3，322～330（2005）
- (2) 浦山雅彦，ほか：GCB用グリースの劣化評価（その7），平成20年電気学会B部門大会，No.353（2008）
- (3) 鈴木淳史，ほか：GCB用グリースの劣化評価（その5），平成17年電気学会B部門大会，No.410（2005）
- (4) 鈴木淳史，ほか：GCB用グリースの劣化評価（その6），平成18年電気学会全国大会，6-218（2006）
- (5) 笹森健次：GISの発展経緯と最近の技術動向，エコトピア科学シンポジウム（2008）
- (6) Okuyama, H., et al.: Example for partial replacement of aged GIS/MTS in Japan, CIGRE SC A2A3B3 Colloquium（2009）
- (7) 森 智仁，ほか：新形84/72kV ばね操作GCBの開発，平成21年電気学会全国大会，6-209（2009）

経年変圧器の劣化評価技術と更新技術

大野孝雄*
 土江博美*
 網本 剛*

Deterioration Assessment and Replacement Technology for Aging Transformers

Takao Ohno, Hiroyoshi Tsuchie, Tsuyoshi Amimoto

要 旨

変圧器の長期運転による材料の劣化やストレスなど、経年に対する評価技術や更新技術は、事故未然防止の点から重要である。

変圧器の診断技術は、絶縁紙の熱劣化に対する劣化診断と油中ガス分析や部分放電試験に代表される変圧器内部の異常現象を検出する異常診断に大別され、診断技術の高度化や新たな知見による診断技術の見直しなどが提案されている。

従来の油中ガス分析は、主に絶縁油の熱分解で生じる可燃性ガスによる異常診断であったが、高精度油中ガス分析では過熱や放電で生じる絶縁材料の微量分解生成物を検出し、異常部位を更に精度よく診断するものである。

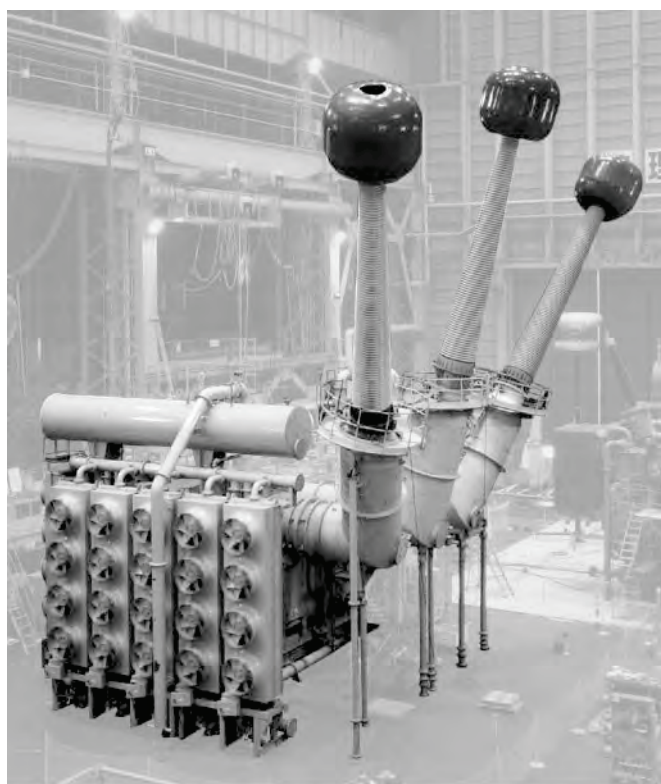
流動帯電に関する研究では、絶縁油の高帯電度化に加え、

絶縁物の高帯電度化が影響していることがわかってきた。そのため、絶縁物と絶縁油の両者の劣化要因を考慮した管理基準や指標について、電気協同研究報告の内容見直しが図られた。

一方、経年変圧器の更新が今後増加していくことが予想されるが、建設当時からの輸送環境の変化に対応した輸送方法に適した設計や現地工事期間の短縮が重要である。

九州電力(株)川内原子力発電所1号機の主変圧器の更新工事では、主変圧器・所内変圧器の一体化によるコンパクト化と損失改善による高効率化を図り、さらにIPB(Isolated Phase Busduct)の一部を取り付けて輸送するなどの工程短縮によって、約60日間という短期間で無事更新工事を完了した。

特集
 II



川内原子力発電所1号機の主変圧器・所内変圧器更新器

1,000MVA、520kV主変圧器と56MVA所内変圧器とを一体形した更新器の、工場試験時の状態を示す。3本の気中ブッシングは工場試験のためのものである。右上図は、IPBの一部を取り付けた変圧器本体が専用キャリアで発電所構内を搬送される状態を示す。右下図は、旧変圧器を変圧器エリアからスライド工法で搬出する作業を示す。

*系統変電システム製作所

1. ま え が き

変圧器は、送電用・配電用その他様々な用途に使用されている重要な電気機器であるが、国内の電力用変圧器の半数が設計寿命の30年を経過する状況にあり、変圧器故障による電力供給支障のリスクが高まる可能性があるため、劣化診断技術や異常診断技術の高度化が求められている。

一方、今後増加していく経年変圧器の更新に当たっては、省エネルギー等の社会的・環境的ニーズや輸送環境の変化への対応が必要とされる。

2. 変圧器の診断技術

変圧器本体に関する主な診断技術は、研究途上で今後期待される技術を含め、表1に示すようなものがある。

2.1 絶縁紙の劣化診断技術

絶縁紙は変圧器の運転に伴って熱劣化し、機械的強度が低下する。これは絶縁紙の平均重合度の低下によるもので、その値が450に達すると変圧器寿命と考えられている。

絶縁紙の劣化特性は、110℃前後を境に劣化速度が異なるという特徴があるため、変圧器の運転温度の110℃以下での劣化特性が必要であり、約12年間の長期低温劣化試験を行った。その結果を図1に示す。

絶縁紙の劣化診断技術は、この結果を統計処理した重回帰式を用いて、コイルの最も温度の高い部分(ホットスポット：HSP)の絶縁紙がいつ寿命レベルの平均重合度450に達するかを推定するものである。

表1. 変圧器の診断手法

	目 的	方 法
絶縁紙の劣化診断	平均重合度の推定	重合度法
		フルフラール法
		CO ₂ +CO法
本体の異常診断	過熱・放電現象	油中ガス分析
	過熱・放電部位	高精度油中ガス分析
	部分放電	電気パルス, UHF
		AEセンサ
	流動帯電	巻線漏れ電流測定
		絶縁油の帯電度測定
		蓄積電荷密度測定
	巻線の異常	FRA
	絶縁紙の水分	RVM

AE : Acoustic Emission

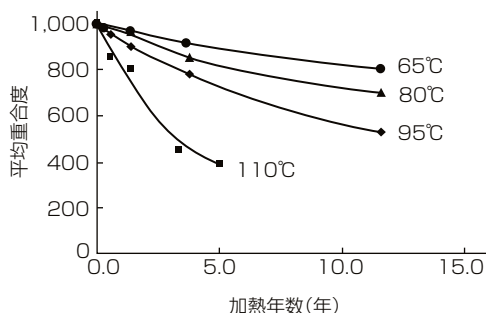


図1. 絶縁紙の低温劣化特性

油温度で劣化した絶縁物(プレスボード：PB)を採取し、その平均重合度と運転年数・運転負荷率・工場試験での温度データから重回帰式を用いて求められたHSP部の絶縁紙の平均重合度が寿命レベルに達する期間を算出し、寿命推定を行っている。

図2は絶縁紙の電子顕微鏡写真であり、劣化絶縁紙では、繊維長手方向の亀裂(きれつ)が割れに進展している。

先に述べたPBを採取して寿命推定する方法のほかに、絶縁紙の劣化生成物である油中のフルフラール量やCO₂+CO量から推定する方法などがある。平均重合度を測定する方法として、光(吸光度、色相)を用いた方法も研究されている。

2.2 本体の異常診断技術

2.2.1 油中ガス分析

油中ガス分析は、変圧器内部での過熱や放電などのエネルギーによって、絶縁油が分解し可燃性ガスを生じることから、油中溶存ガスを分析することによって異常を検出する手法であり、最も広く使用されている。電気協同研究報告では、可燃性ガスの量と種類によって3段階の異常レベルに区分されている。また、様相診断や過熱温度推定方法などについても詳しく述べられている。

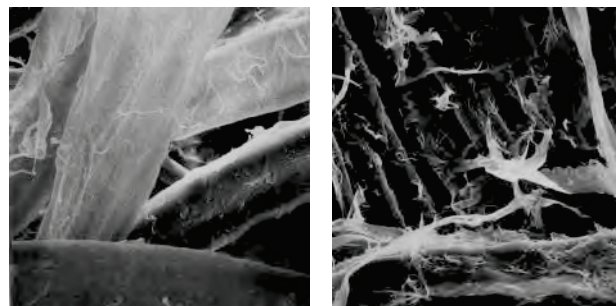
高精度油中ガス分析は、過熱や放電で絶縁材料が分解して出てくる多種類の高沸点微量成分を高感度で分析し、特徴的な成分を検出して損傷材料の識別・部位の特定などを行い、運転可否を判断するものである⁽¹⁾。

絶縁材料の分解成分は沸点が高く蒸気圧が低いいため、微量成分の抽出と高感度の分析手段が必要であり、図3に示す装置で濃縮捕獲し、その成分を急速に加熱・気化させガスクロマトグラフ質量分析器(GCMS)で分析する。

分析された微量成分と表2のような分解成分のデータベースとを比較して、異常が生じている材料を判別し異常部位を特定するものである。

2.2.2 部分放電

変圧器の絶縁検証のため部分放電試験が行われ、電気パルスや音響マイクによって放電音を検出しているが、UHF(Ultra High Frequency)帯(0.3～3GHz)の電磁波を



(a) 新品絶縁紙(平均重合度1,051) (b) 劣化絶縁紙(平均重合度279)

図2. 絶縁紙の電子顕微鏡写真(1,000倍)

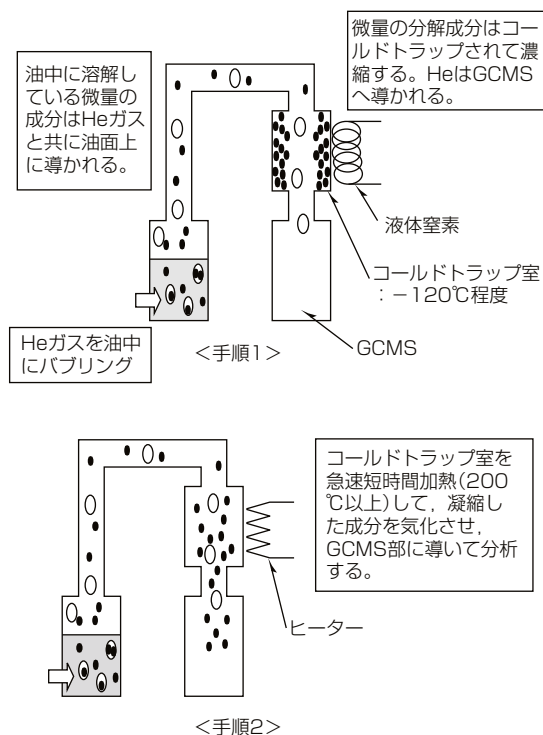


図3. 油中溶解微量成分の抽出方法

表2. 診断に必要な分解物

		過熱異常	放電異常
異常検出	正常変圧器及び新油からは検出されない成分を利用	酢酸 3ペンタノン ブタノール アンモニア 2,5ジメチルフラン 1,3ジアジン	2メチル1,3ブタジエン メチルビニルアセチレン
損傷材料識別	材料固有分解物	耐熱処理紙 ワニス処理紙 ガラスエポキシ	アンモニア 1,3ジアジン ブタノール 2メトキシエタノール
	検出成分の濃度比率を利用(1例)	セルロース系材料から上記材料を除く材料	ギ酸メチル フラン ジアセチル ジメチルサルファイド
			エタノール 酢酸メチル 2メチルフラン

測定すれば、外部ノイズの影響を受けにくく、減衰も少なく高感度に測定できることから、UHF帯での研究が進められている。

部分放電発生位置の位置評定は、図4に示すように、部分放電によって放射された電磁波は変圧器内部を伝播(でんぱ)し、変圧器タンクに設けられたアンテナA1～A3によって検出されるが、電磁波の到達時間($t_1 \sim t_3$)に差が生じるので検出時刻は各アンテナで異なる。アンテナの位置を基準(図ではA1)に、この時間差が一定となる点の軌跡を描くと部分放電発生位置である交点が得られる。

500kV級外鉄形変圧器を用いて、巻線上部空間の模擬放電源を高周波帯域(0.7～2GHz)の検出特性を持つホーンアンテナを使用した測定例では、アンテナの配置を調整することによって、±10cm以内の結果を得た⁽²⁾。

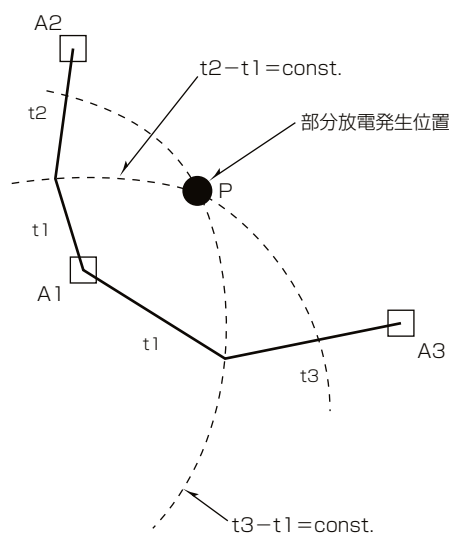


図4. 部分放電の位置評定(概念図)

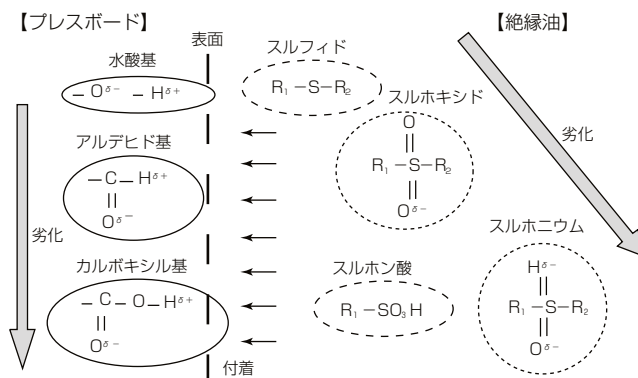


図5. プレスボードの高帯電度化

2.2.3 流動帯電

流動帯電は、変圧器内部で絶縁物との界面で油が流動することによって分離した電荷が移動して電荷が蓄積され、その部位の直流電位が上昇する現象で、静電気放電が発生する場合がある。高帯電度化は、図5に示すように、油中の劣化生成物がPB表面の水酸基、アルデヒド基、カルボキシル基に付着して生じると考えられる。

経年変圧器の絶縁物の流動帯電評価については、PBで構成された油ダクトに絶縁油を流したときの帯電電位(蓄積電荷密度)を測定する方法が、新たな評価指標として加えられた。従来の帯電度や誘電正接及び蓄積電荷密度が管理値を超えた場合、直接的な方法として巻線漏れ電流を測定して異常の判断を行う。

2.2.4 FRA(Frequency Response Analysis)

変圧器巻線の変形や短絡などに至る不具合がある場合、巻線のインダクタンスや静電容量が変化し、共振周波数がずれることを応用した診断法である。測定精度や評価方法の課題があるが、今後の研究に期待されている。

2.2.5 RVM(Return Voltage Measurement)

変圧器内部の絶縁紙中の水分量を把握するための診断法

であり、変圧器にステップ電圧を加えたあとの回復電圧の卓越時定数によって評価する。

3. 変圧器の更新技術

変圧器を更新する際には、接続機器や建屋・基礎などの既設設備とのインタフェースが重要である。また、建設当時から輸送環境の変化や運搬車両の除却などによる制約条件を把握し、更新計画を立案する必要がある。

3.1 変圧器の更新計画

変圧器の更新計画の立案には次のような確認作業が必要となる。

- ①仕様の確認：増容量，低騒音化などの追加仕様確認
- ②既設設備の確認：建屋，基礎，接続設備の流用範囲
- ③現地調査：寸法測定，輸送調査等現地確認
- ④工程計画：停電可能期間など制約条件の確認

特に輸送の制限条件によっては、変圧器の形式変更が伴い、変圧器の特性や工期・費用に大きな影響を及ぼす場合があるので注意を要する。輸送制約が厳しい場所には、特別三相方式やコイルと鉄心に分解して輸送し、現地で組立てハウスを設けて組み立てる分解輸送方式(CGPA)などを採用する必要がある。図6に分解輸送方式を、図7に500kV級変圧器の現地組立てハウスの外観を示す。

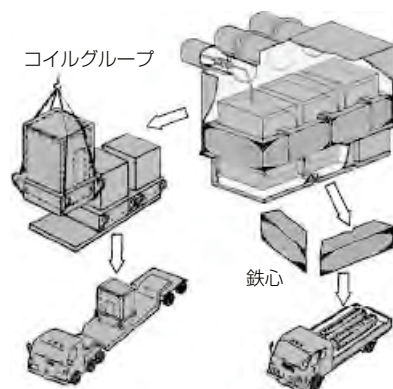


図6. 分解輸送方式(CGPA)



図7. 500kV級変圧器の現地組立てハウスの外観

3.2 変圧器の更新事例

ベース負荷を担う原子力発電所の主変圧器は、高負荷連続運転のため絶縁紙の劣化にとって最も厳しい環境にある。このたび、九州電力㈱川内原子力発電所1号機主変圧器の更新工事を行ったのでその特徴について述べる。

3.2.1 最新技術の適用

1,000MVA、520kV主変圧器と56MVA所内変圧器とを一体化し、主変圧器エリアに据付け可能となるようコンパクト化を図り、旧変圧器に対し約30%の損失改善を達成した。

また、プラントライフ60年を想定した変圧器寿命とするため、絶縁紙の劣化診断で培った技術によって得られた適正な巻線温度上昇限度を満足する冷却設計を行った。

3.2.2 工程計画

主変圧器・所内変圧器の更新工事を約60日間という短期間で行うため、次のような施策によって無事更新工事を完了した。

- ①基礎、IPB、OF(Oil Filled)ケーブル等主要設備を流用するための十分な現地調査
- ②構内輸送に対する干渉物や地耐力の調査
- ③埋設金物の設置など可能なものは前定検で施工
- ④新旧変圧器の搬出入に引き込みフックを必要としないスライド工法を採用

- ⑤IPBの一部を変圧器に取り付けた荷姿で輸送

- ⑥ドライエアの封入輸送によって、現地での絶縁油の取扱いの最小限化

4. む す び

変圧器の高経年化に対する事故未然防止を図るため、新たな診断技術や変圧器更新に対する工法などについて述べた。今後ますます重要となる診断技術や増加する更新需要に対応するための技術開発を更に進めていく。

川内1号機主変圧器更新の機会を与えていただいた九州電力の関係者各位及び更新工事に協力いただいた関係者に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 岡部成光，ほか：油入変圧器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討，電気学会論文誌B，**116**，No.9，1151～1157（1996）
- (2) 石倉隆彦，ほか：変圧器における部分放電位置評定精度へのアンテナ配置の影響，平成20年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集，XIV-6（2008）

保護制御装置更新に対応した最新技術

伊藤健司* 臼井正司*
 長澤 宏* 佐藤 廣*
 磯松信夫*

Recent Technology for Replacement of Protection & Control Systems

Kenji Itou, Hiroshi Nagasawa, Nobuo Isomatsu, Masaji Usui, Hiroshi Sato

要 旨

現在の保護制御装置はエレクトロニクスの進歩によって、1980年初頭から導入したデジタルリレーが大部分を占めている。三菱電機は1981年に16ビット形マイクロプロセッサを用いたデジタルリレー“MDPシリーズ”を開発し、1989年には業界初の32ビットデジタルリレー“M32シリーズ”を開発、その後、1995年からはヒューマンマシンインタフェースを高度化した第二世代デジタルリレー“M32EGシリーズ”を市場投入した。現在は第二世代デジタルリレーを高度化させた“MELPRO-CHARGE(以下“MELPRO-C”という。)シリーズ”を中心に製品化している⁽¹⁾。1980年代後半の変電所設備の拡大時期に設置した保護制御装置は、20年を経過し更新時期を迎えつつある。一方、その後の設

備投資の抑制時期を迎え、年間設置台数は最盛期の50%以下にまで減少し、今後見込まれる更新台数もこれに連動した形になることが予想されるが、更新需要の変動はユーザー、及びメーカー双方とも人的リソース面で困難となることが予想される。その解決策の一つとして、今後納入する装置は、盤筐体(きょうたい)は可能な限り流用し、デジタル部のみを交換することが望まれている。

本稿では、このような更新需要の背景のもと、主力機種であるMELPRO-Cの装置更新に対応した技術と、今後開発を行う次世代形デジタルリレーに必要とされる技術項目について述べる。

特集
II

		Type Sシリーズ	
		1980年代	1990年代
第一世代 デジタル リレー	MDP シリーズ	16ビットCPU シングルCPU ハードウェア構成部品の標準化 低負担化(VT/CT)	リレー単体要素のソフトウェア化 シーケンスロジックのソフトウェア化 歪(ひずみ)波対策 常時監視、自動点検
	M32 シリーズ		32ビットCPU マルチCPU ソフトウェアの共用化 ソフトウェアロジックのデジタル化(VISMAT)
第二世代 デジタル リレー	M32EG シリーズ		タッチパネル 16ビットA/D変換 高速サンプリング 頻度監視 大容量メモリ LPの主後一体 不良部位特定
	MELPRO-CHARGE シリーズ	Type I / II / IIIシリーズ <装置形デジタルリレー>	シングルCPU FPGA パソコン/HMI(汎用) 高密度化 パソコン/HMI(専用) 遠隔運用保守 低負担化(DC) 小型化 試験環境の高度化(SAVE-atl) 生産環境の高度化(MELPRO-SAVE)
		Type Sシリーズ <ユニット形デジタルリレー>	主な納入時期 **** 技術要素 オールインワン コンパクト アナログリレー互換 電解コンデンサレス

VT : Voltage Transformer CT : Current Transformer CPU : Central Processing Unit FPGA : Field Programmable Gate Array
 LP : Line Protection HMI : Human Machine Interface

“MELPRO-CHARGEシリーズ”と三菱保護リレーの変遷

2000年に開発したMELPRO-CHARGEシリーズをベースに、次世代形デジタルリレーを考察する。

1. ま え が き

1980年代後半の変電所設備の拡大時期に設置した保護制御装置は、20年を経過し更新時期を迎えつつある。一方、その後の設備投資の抑制時期を迎え、年間設置台数は最盛期の50%以下にまで減少し、今後見込まれる更新台数もこれに連動した形になることが予想されるが、更新需要の変動はユーザー、及びメーカー双方とも人的リソース面で困難となることが予想される。その解決策の一つとして、今後納入する装置は、盤筐体は可能な限り流用し、デジタル部のみを交換することが望まれている。

MELPRO-Cシリーズには、装置形デジタルリレーとしてType I / II / IIIと、ユニット形デジタルリレーとしてTypeSのバリエーションがある。ユニット形デジタルリレーが一つの筐体の中に保護リレーとしての機能をすべてまとめているのに対して(オールインワン構造)、装置形デジタルリレーは、規模の大きさとCPU(Central Processing Unit)ユニットや入出力ユニットなど機能ごとにユニットを分割構成している。

本稿では、このような更新需要の背景のもと、主力機種であるMELPRO-Cの装置更新に対応した技術を、ユニット形デジタルリレーと装置形デジタルリレーに分類して述べる。さらに、今後開発を行う次世代形デジタルリレーに必要とされる技術項目について述べる。

2. ユニット形デジタルリレーの最新技術動向

ここでは、ミニクラッド内蔵リレー⁽²⁾と配電用保護制御装置について述べる。両者に共通するキーワードは“レトロフィット”であり、既設リレーに使用しているケースや外部配線を流用可能であることが大きな特長である。

2.1 ミニクラッド内蔵リレー

東京電力㈱向け22kVミニクラッド(固体絶縁開閉装置)内蔵リレーは、長期に及ぶ設備停止がとりにくく、アナログリレーがまだ運用されており、デジタルリレーへの更新が進んでいない。しかし、アナログリレーはすでに生産中止となっており、保守面でのリスクが年々高まっている。そこで、アナログリレーと完全互換のデジタルリレーを次のコンセプトで開発を行った。

①ハードウェア面で完全互換、ソフトウェア面は機能向上

②交換部品をなくして信頼性向上

2.1.1 完全互換

(1) 小型化

限られたスペースに実装するためには、納入当時より小型化する必要がある。特にこのリレーはデジタル化に伴いメインリレーとFD(Fault Detector)リレーの二重化構造としたために基板搭載部品の集積化、及び部品の小型化を図った。

(2) コネクタの復刻生産

ミニクラッド本体とアナログリレーのインタフェースはコネクタ接続であるが、すでに生産中止となっていたために、このコネクタを復刻生産することとした。現在、流通しているコネクタについても将来にわたって流通している保証はなく、コネクタ種類の選択が将来のユニット更新の容易性を左右する要素になると考えられる。

(3) 事前検証の容易性

作業による停電時間を最小限とするため、ミニクラッドに実装する前に、事前に単体試験を実施できる試験用治具も同時に開発した。

2.1.2 信頼性の向上(電解コンデンサレス電源の採用)

保護リレーの電源部(DC/DCコンバータ部)には、一次側の入力瞬断やリップル抑制を目的に電解コンデンサを使用している。電解コンデンサは、静電容量が大きく、エネルギー蓄積能力、平滑性に優れており、かつ小型であるが、リップル電流を吸収する際に内部で発生するモジュール熱の影響、及びその周囲温度によって内部の電解液が徐々に蒸発し、それに伴って静電容量が低下するという性質を持っている。そのため、一定期間後には予防保全としての電源のオーバーホールが必要となる。今回、電源を交換しやすいカートリッジ形とするとともに電解コンデンサを使用せず、フィルムコンデンサを用いたカートリッジも開発し、保護リレーの更新周期までの寿命品をなくすことでメンテナンスフリーとした。

図1にユニット交換手順を示す。

2.2 配電用保護制御装置

配電用保護制御装置⁽³⁾のサイズ互換を検討する場合でも

2.1.1項で述べた小型化がキーワードとなる。アナログリレーのようにハードウェアを主にして構成する場合には、その部品サイズに影響され、種々の形状のリレーが存在した。しかし、デジタルリレーでは、主要要素がソフトウェアで構成されるため、ハードウェアの小型化と標準化が図れる。交換対象となるリレーより、更新するリレーが小型

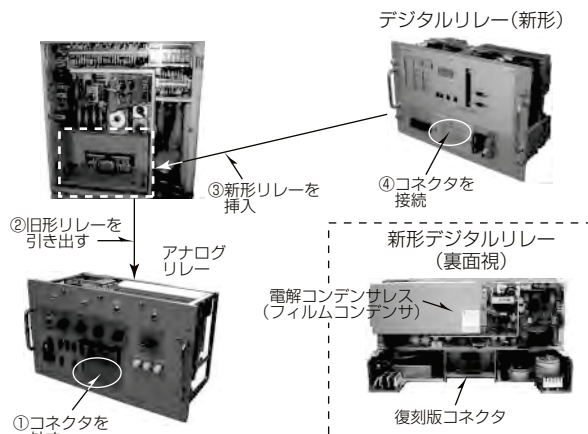


図1. ユニット交換手順

化されれば、既設の保護ユニットケース内に内部配線を実施するスペースを確保することが可能となる。図2にMELPRO-C(TypeS)を用いたユニット内結線による互換リレー概要図を示す。

3. 装置形デジタルリレーの最新技術動向

MELPRO-Cは2000年に標準機種であるTypeⅠとⅡを開発し、2002年には上位グレードであるTypeⅢを開発した。図3にハードウェア規模と機能の相関図を示す。

次に、装置更新を考慮したハードウェア構成を含む次世代形デジタルリレーのコンセプトについて述べる。

3.1 ハードウェアの互換性確保

デジタルリレー装置を構成するユニットとして、リレー演算を行う“CPUユニット”，演算結果からトリップなどを行う“入出力ユニット”，DC110Vからリレー演算に必要な電圧に変換する“電源ユニット”，VT(Voltage Trans-

former)／CT(Current Transformer)からの入力をCPUに入力するための“入力変換ユニット”，及び接点引き出しなどの“補助リレーユニット”がある。CPUユニットと入出力ユニットはエレクトロニクス技術の進歩によって飛躍的に発展しており改廃サイクルが短い。一方、その他のユニットはMDPシリーズから大きく変化しておらず，電子化VT／CTなどの出現まで同一のハードウェアが適用可能である。CPUユニットはソフトウェアが実装されており，ハードウェアの相違によって，特にバスインタフェース部分など互換性を保つことが困難であるが，入出力ユニットはソフトウェアが実装されておらず，CPUユニットとのインタフェースの互換性を保つことで基板ごとの交換が可能となる。デジタルリレーの結線のうち入出力ユニットに大部分が集中していることから，入出力ユニットの基板単位での交換を行うことでユニット更新が簡易なものとなる。図4に装置形リレーのユニット交換概念図を示す。

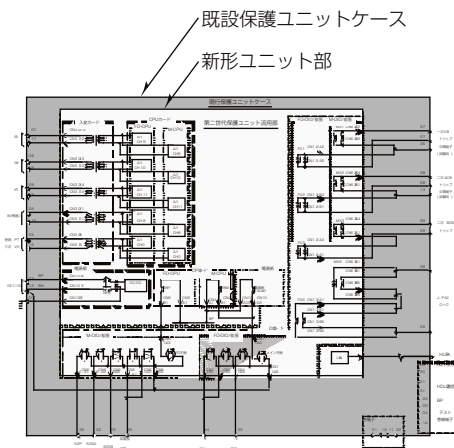


図2. ユニット内結線による互換リレー概要図

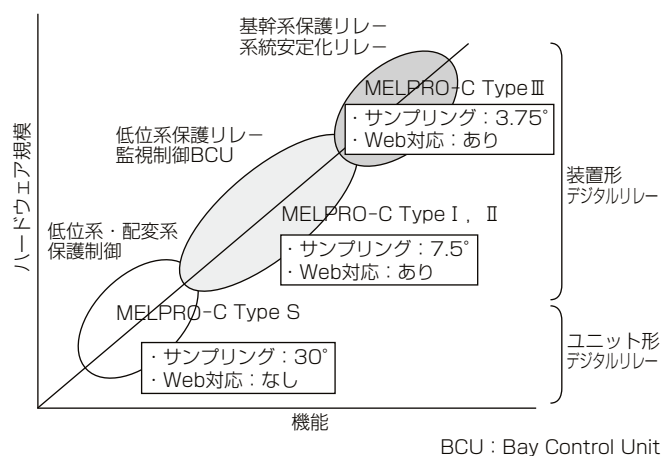


図3. ハードウェア規模と機能の相関図

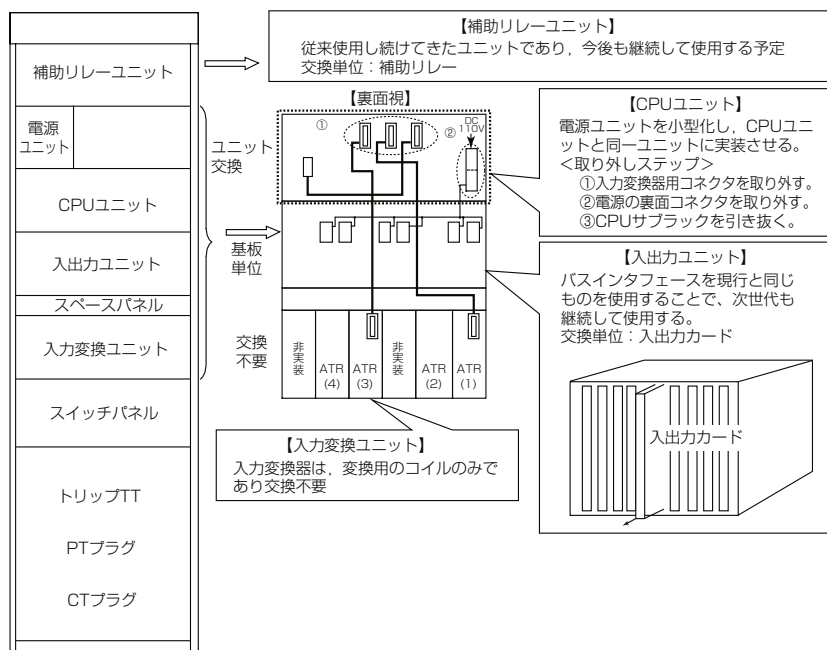


図4. 装置形リレーのユニット交換概念図

3.2 ソフトウェアの互換性確保

第一世代デジタルリレーから第二世代デジタルリレーへ切り替わったときに、送電線保護では主保護と後備保護を一体化させるなど機能向上を行った。保護リレーの独立性を考慮した場合、今後大きな機能統合はないものとする。そのため、次世代形デジタルリレーを開発する場合、MELPRO-Cのアプリケーションの互換性を持たせることで、ソフトウェア信頼性向上を図ることができる。さらに、ソフトウェア生産環境であるMELPRO-SAVE⁽⁴⁾も踏襲することで、環境変化に伴うヒューマンエラーの防止となる。

3.3 PCMキャリアリレーの異機種対向可能

PCM(Pulse Code Modulation)信号を相手電気所へ送信するPCMキャリアリレーは、基幹系統の送電線保護リレーとして一般的に採用されている保護方式である。これまで機種開発を行った際には、ハードウェア、及び伝制御方式の相違によって互換性を持っておらず、異機種間の対向は困難であった。そのため、送電線の間に端子増設があった場合には、既設リレーと同じ機種で納入する、又は既設リレーもリプレイスするかどちらかであり、前者はメーカーの負担が大きく、後者はユーザーの負担が大きかった。そこで、次世代形デジタルリレーは、MELPRO-Cと対向可能な方式とすることで、メーカー／ユーザー双方の負担を軽減させる(図5)。

3.4 その他の次世代形デジタルリレーへの検討

ヒューマンマシンインタフェース(HMI)については、MELPRO-Cと同等機能を踏襲する。なお、HMI画面では、TypeSで採用した表形式やプルダウン形式での整定画面など、1画面での情報量を密にして操作性を向上させた方式を検討する(図6)。

4. む す び

盤筐体部分だけを残して、技術進歩の大きなデジタル部のみを更新することが望まれていることから、当社の最新保護制御技術によるユニット更新について述べた。しかし、装置形デジタルリレーでは、その入出力点数の多さから、変更後の試験時間短縮など技術的な課題はまだ多く残されているものとする。MELPRO-Cは2000年の開発から9年経過しており、今後ユニット更新技術を更に深めた検討を加え、次世代形デジタルリレーを開発していく予定である。

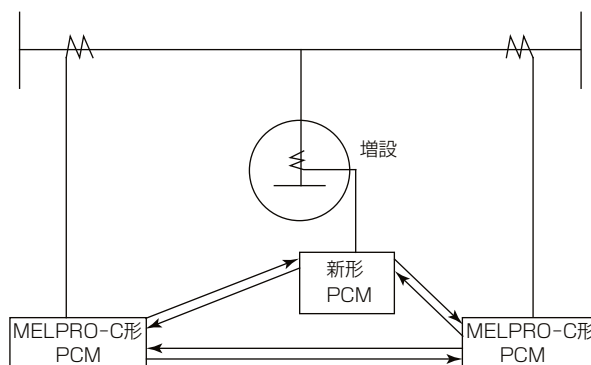


図5. PCMキャリアリレーの異機種互換

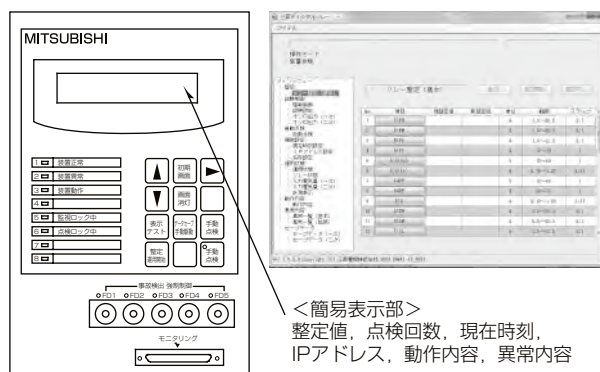


図6. 簡易表示パネルとHMI画面例

参 考 文 献

- (1) 佐藤 廣, ほか: 新形デジタルリレー(MELPRO-CHARGE)の開発, 平成12年電気学会保護リレーシステム研究会PSR-00-11 (2000)
- (2) 大河原健治, ほか: アナログリレー互換の22kVミニクラッド用リレーの開発, 平成20年電気学会保護リレーシステム研究会PPR-08-21 (2008)
- (3) 林 秀幸, ほか: ユニットタイプ新形デジタルリレーの実用化, 平成20年電気学会保護リレーシステム研究会PPR-08-21 (2008)
- (4) 高野富裕, ほか: MELPRO-CHARGEのソフトウェア生産環境MELPRO-SAVE, 三菱電機技報, 75, No.3, 237~239 (2001)

自然エネルギー導入のための系統解析技術

藤原修平*
黒田憲一*
小島康弘**

Power System Analysis for Renewable Energy

Shuhei Fujiwara, Kenichi Kuroda, Yasuhiro Kojima

要 旨

近年、地球温暖化の原因と言われているCO₂を削減する方策の一つとして、風力や太陽光などの自然エネルギーによる発電設備の導入が積極的に進められている。しかし自然エネルギーを利用した発電設備はその出力が気象条件に大きく影響を受け、また立地が遠隔地である場合も少ないため、系統に与える影響が大きくなる傾向にある。そのため系統に大量に導入する際には、電圧維持・高調波など局所的な電力品質に対する課題や、全系周波数の維持といった系統全体の安定運用に関する課題など、多くの課題を解決していく必要がある。

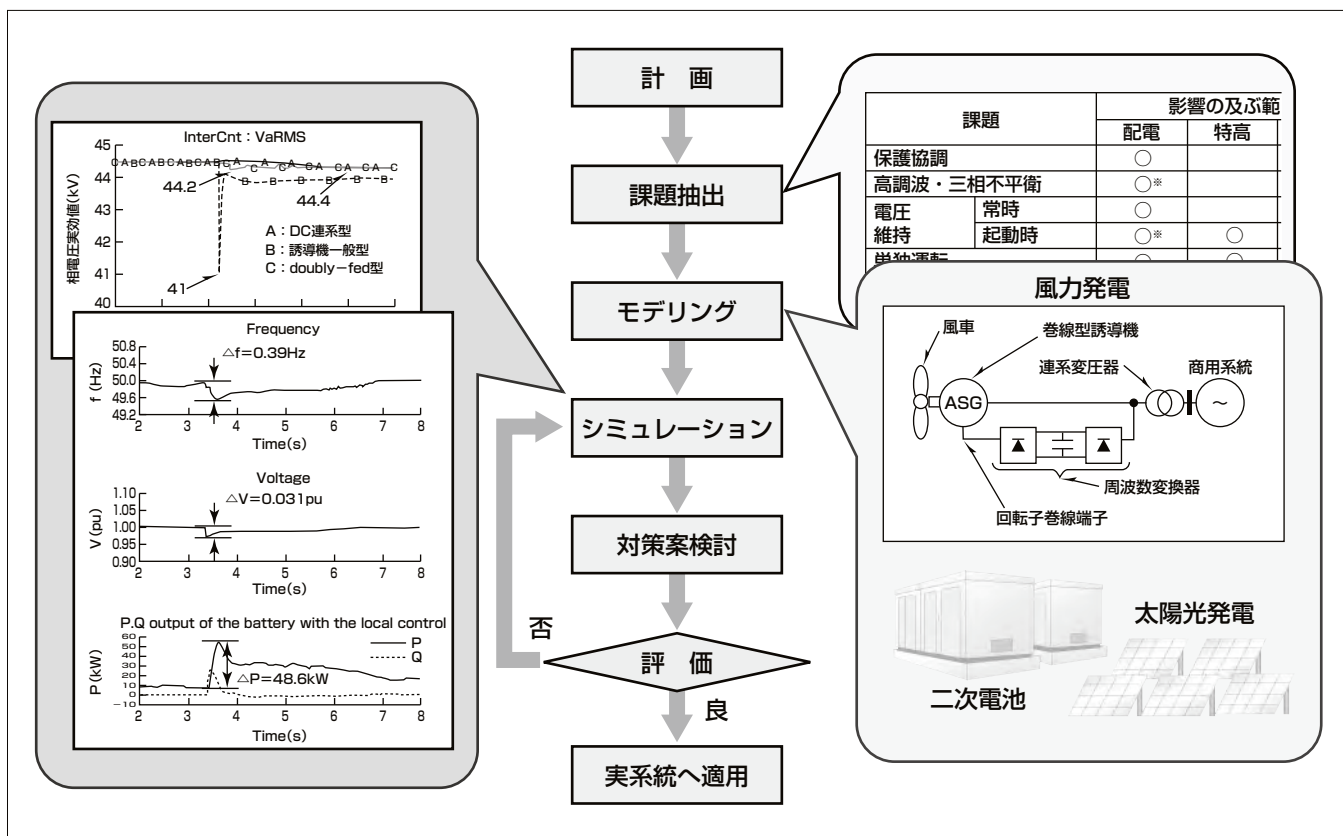
これらの課題を検討する際には、自然エネルギーによる発電設備が系統に与える影響や、対策を講じた場合の効果を事前に把握することが重要となる。そこで本稿では、これらの検討をする際に必要となる系統解析技術として、モ

デリングと解析例について述べる。

まず自然エネルギーを利用した発電設備が連系したときの系統課題について述べたあと、それらの課題を検討した系統解析技術の実例として風力発電システム(中部電力㈱との共同研究)と八戸市マイクログリッドプロジェクト(NEDO((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託事業)について述べる。

風力発電システムについては、シミュレーションモデルの用途、構成要素、計算時間の高速化、局所的な電力品質の計算例として起動時の電圧低下について述べる。また八戸マイクログリッドについては、自然エネルギーを利用した電源からなるマイクログリッド系統における、周波数問題、電圧問題、不平衡問題、高調波問題に対する検討事例及び実証試験結果について述べる。

特集
II



自然エネルギー導入時の系統解析手順の例

自然エネルギーによる発電設備を導入する際には、系統に与える影響や対策を講じた場合の効果を事前に評価するため、対象機器のモデリング、シミュレーションといった系統解析技術が重要となる。

1. ま え が き

本稿では風力、太陽光などの自然エネルギーによる発電を導入する場合の課題・対策を示し、その評価、計画のための解析技術を、実績とともに述べる。

2. 自然エネルギー発電導入時の系統課題と対策

表1に、自然エネルギーを利用した発電が連系したときの系統課題を示す。配電系統では、電圧維持・高調波など局所的な電力品質が課題となり、系統全体では、全系統周波数の維持など安定運用が課題となってくる。これらの課題に対処するにはSVC(Static Var Compensator)等の電圧安定化装置の導入、AFC(Automatic Frequency Control)容量の増大、事故時運転継続などが挙げられる。対策を検討する際には、系統に与える影響をシミュレーションによって把握することも重要となる。3章では、これらの課題をシミュレーション検討する際のモデリングと解析例について述べる。

3. 風力発電システムの解析技術

3.1 風力発電システムの解析モデル

三菱電機は中部電力㈱と共同で瞬時値ベースのシミュレーションモデルをEMTP-RV(Electro Magnetic Transients Program-Restructured Version)上で開発している⁽¹⁾。風力発電のタイプとして3種類の風力発電(誘導機直接接続型、doubly-fed型、DC連系型)を対象とし、風車、発電機、変換器、制御系などを詳細に模擬し、またモデルの高速化によって長時間の風速変動による系統への影響解析にも対応している⁽²⁾。開発した解析モデルは、回転数上下限、ピッチ角、出力停止の制御を反映しパラメータ調整を実施することで、実機に近い結果を得られるようにした。現在構築したモデルの妥当性を評価中である。この開発によって主要な方式の風力発電システムがモデル化され、シミュレーションの際には各方式の導入比率に合った解析が可能となっている。

図1、図2に例としてdoubly-fed型の概念と解析モデルを示す。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)で構

成された周波数変換器から巻線型誘導機の回転子に加える励磁電圧・周波数を変化させる。回転数によらず一定の有効・無効電力の入出力が可能であるため、起動時などの電圧変動を抑制できる特長がある。

3.2 解析例

超高压系統に接続した風力発電システムの、起動時の電圧変動解析を実施した例を図3に示す。図に示すように、誘導機直接接続型の電圧変動が大きく出ており、系統に与える評価を各方式に応じて定量的に評価することが可能となっている。

4. 八戸市マイクログリッドにおける系統解析技術

4.1 八戸市マイクログリッドプロジェクトの概要

NEDOからの委託事業“新エネルギー等地域集中実証研究”における“八戸市水の流れを電気で返すプロジェクト”として、複数の発電設備と需要家から構成され、その内部で需給制御を行うマイクログリッドを構築し、2005年10月から2007年度末まで実証試験を行った。八戸マイクログリッドの構成を図4に示す⁽³⁾。

このマイクログリッドは、太陽光発電130kW、風力発

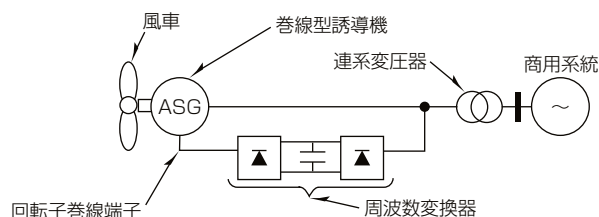


図1. doubly-fed型の概念図

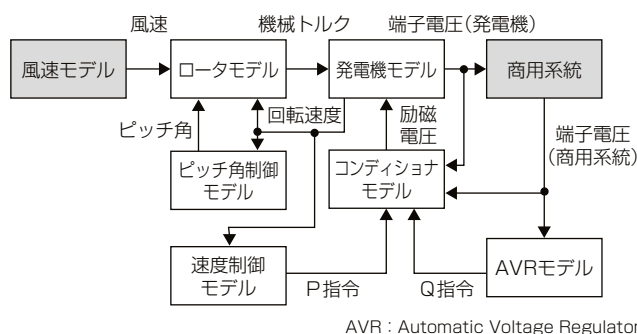


図2. doubly-fed型の解析モデル

表1. 自然エネルギー発電導入時の系統課題

課題	影響の及ぶ範囲		
	配電	特高	全体
保護協調	○		
高調波・三相不平衡	○*		
電圧	常時	○	
維持		○*	○
単独運転	○	○	
短絡容量		○	
過渡安定度		○	
全系統周波数維持・供給力			○*

* 本稿で言及する系統課題

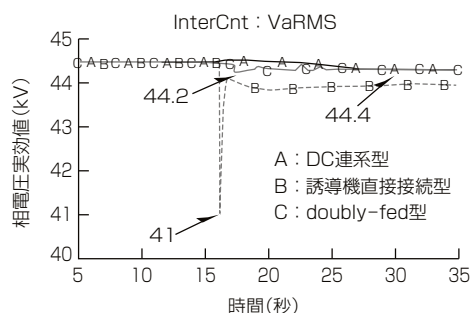


図3. 系統連系時の電圧変動解析例

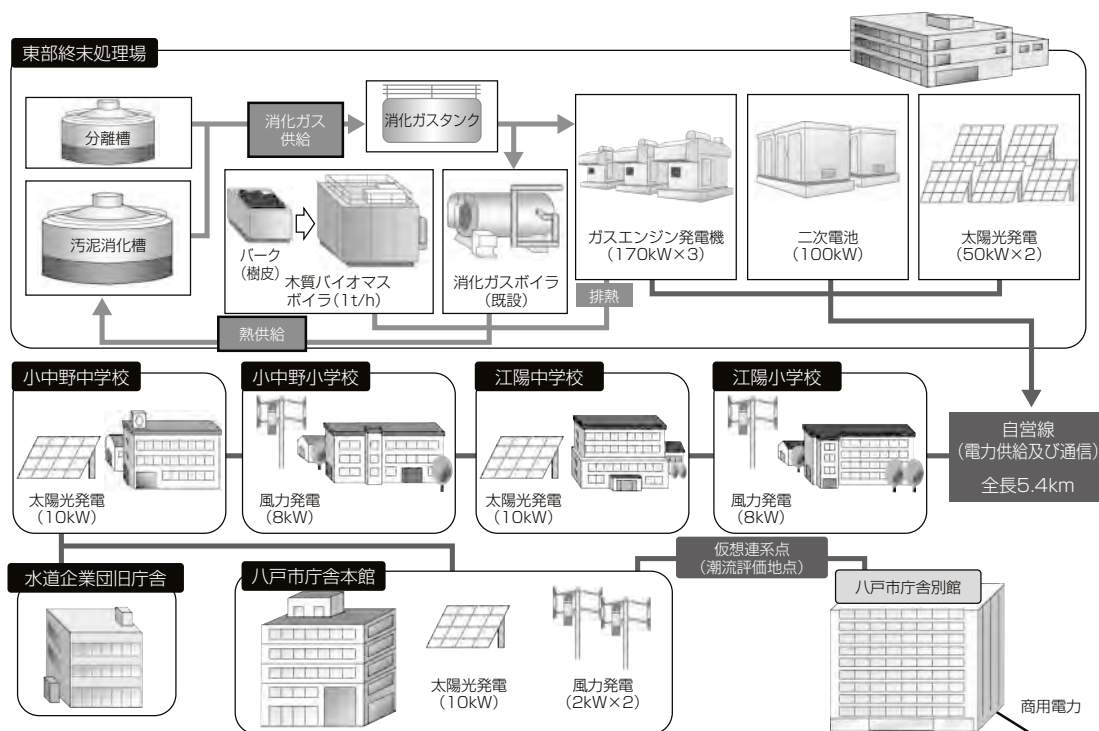


図4. 八戸マイクログリッドの構成

電20kWを導入し、制御可能な再生可能電源としてバイオガスエンジン170kW×3台を組み合わせ、6か所の需要家に対して自営線を用いて電力供給を行うものである。マイクログリッドは市庁舎本館で商用系統と一点連系しており、自営線を用いた自立運転が可能である。

自然エネルギーの出力や需要の変動による需給アンバランスは、商用系統との連系時は連系点潮流変動となる。一方、商用系統から切り離れた自立運転では、系統容量が小さくなることによる課題とともに、表1の分散電源課題がより如実に現れるため、周波数問題、電圧問題、不平衡問題、高調波問題など各種事象に対して、系統解析によって事前に影響を評価し、対策を検討しておくことが重要である。次に検討例について述べる。

4.2 周波数問題

再生可能電源のみからなるマイクログリッドで、商用系統に準じた電力品質を維持する場合、商用系統への連系運転での技術課題に加え、負荷への高速追従という新たな課題が発生する。系統解析によって空調機起動時の周波数低下は1.5Hzに達すると予測された。このためこのプロジェクトでは、当初計画していた需給制御システムにミリ秒単位で周波数制御が可能なローカル制御を追加し、経済性・環境性最適運転と電力品質の維持を両立した4階層の需給システムを構築した⁽³⁾。特に、瞬間的な負荷変動に対しては、リアルタイムシミュレータ等を用いた事前検討によってローカル制御機能の制御ブロック検討、パラメータ調整を行い、高速追従性を実現した⁽⁴⁾。

このマイクログリッドの電力品質に対して最も厳しい負荷は、市庁舎の空調機用ファン(誘導機37kW)であるが、

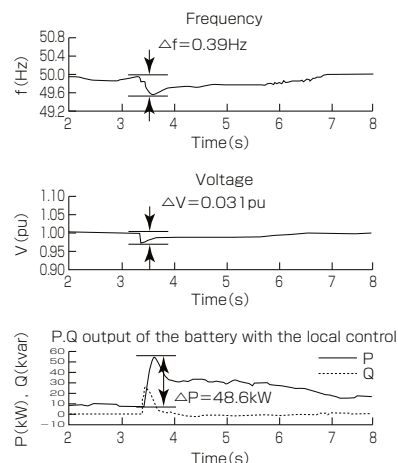


図5. 空調機起動時の周波数及び電圧

その起動時の実測波形を図5に示す。空調機起動によってマイクログリッド系統の周波数及び電圧は急激に低下しているが、先に述べたローカル制御によって二次電池が高速に有効・無効電力を出力し、周波数及び電圧の低下が抑制されている。

4.3 不平衡問題

今回検討したマイクログリッドは、一定地域を対象とした小規模系統であるため、負荷電流の不平衡(三相アンバランス)が生じやすく、負荷不平衡が生じると系統内に逆相電流が発生する。商用系統への連系運転では逆相電流の多くは商用系統へ流出し、広い商用系統内で他の逆相電流と相殺するため、マイクログリッド内の発電設備への負担は小さい。しかしながら、同期発電機を主電源とした自立運転では、逆相電流はすべて発電機負担となり、その耐量を超えた場合は保護リレー動作によって発電機が停止し、

全停へとつながるおそれがある。

八戸マイクログリッドでは、図4のガスエンジン発電機が主電源であり、低負荷時には1台運転となる。使用したガスエンジン発電機1台あたりの許容逆相電流は2.8Aであったが、マイクログリッド内では最大9A以上の逆相電流が発生していた。そこで、マイクログリッド内の単相負荷の消費電力を数日間計測し、逆相電流が最小となる組合せを算出し、実証試験システムの負荷接続相を変更した。接続相変更前後の各日逆相電流最大値を図6に示す。接続相変更を行った7月15日以降の逆相電流最大値は、期間中最大で5A程度となっており、負荷接続相変更による逆相電流低減効果が確認できる。しかしながら、ガスエンジン発電機の許容逆相電流値を依然超過しており、更なる対策を行った。

一般に、逆相電流補償装置としては、アクティブフィルタなどの専用のパワーエレクトロニクス機器が用いられるが、この実証試験システムでは、三相出力太陽光発電用電力変換装置(PVパワーコンディショナ、以下“PVPC”という。)定格50kVAを有効活用し、逆相電流補償機能を開発することで、ガスエンジン発電機に流れる逆相電流を低減した。これらの逆相電流対策を行ったあと、約8日間の自立運転を行った。自立運転期間中の発電機逆相電流合計値の実測結果を図7に示す。先に述べた対策を行うことによって、自立運転期間中の発電機逆相電流を1A程度以下に抑制でき、発電機逆相電流大量(2.8A/台)の範囲内に収めることができた。

4.4 高調波問題

マイクログリッド内の負荷には様々な高調波発生負荷があり、自立運転時には商用系統への連系運転時とは系統インピーダンスが大きく異なるため、過大な電圧歪(ひずみ)が発生するおそれがある。そこで、マイクログリッド内の高調波発生負荷のタイプ、容量、数量などを調査し、シミュレーションによって自立運転時の電圧歪率を算出した。その結果、比較的単相の高調波発生負荷が多く、また自立運転時にはマイクログリッド内の変圧器などのインダクタンス成分と、力率改善コンデンサなどのキャパシタンス成分のLC共振周波数が3次(150Hz)付近となっているため、3次電圧歪が増加する可能性が高いことが明らかになった。ただし、高調波ガイドライン⁽⁵⁾で定められた総合電圧歪率5%以下に収まり、新たな対策は必要ないとの見通しを得た。自立運転試験前及び試験中の電圧歪率実測結果を図8に示す。自立運転試験中の各次電圧歪率はいずれも2%以下であり、高調波ガイドラインを満たしている。また、シミュレーション検討のとおり、自立運転を開始した11月3日午後の時点で、3次電圧歪が増加し、5次、7次電圧歪が減少している。昼間より夜間に電圧歪が大きくなっているが、負荷の多い昼間には抵抗負荷がLC共振回路のダン

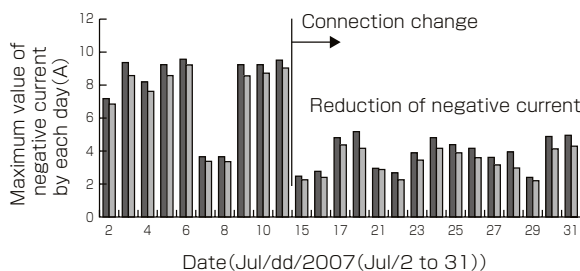


図6. 負荷接続相変更前後の逆相電流

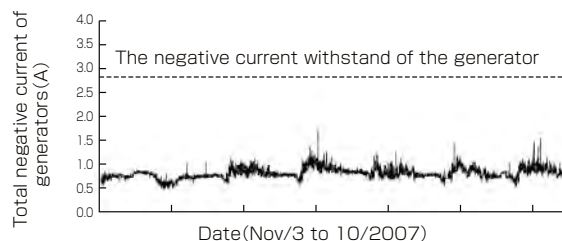


図7. 自立運転時の発電機逆相電流合計値

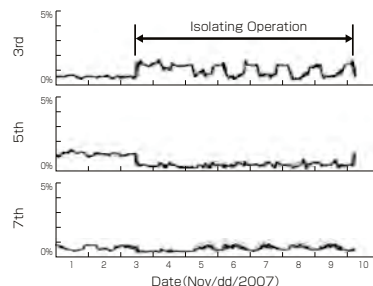


図8. 自立運転試験前後の各次電圧歪率

ピングとして作用し、共振のピークが低くなるためである。さらに、今回のマイクログリッド系統の場合、夜間に蛍光灯や市庁舎外灯などの高調波発生負荷の割合が大きくなることも、夜間の電圧歪が増大する一因であると考えられる。

5. む す び

自然エネルギー発電導入時の系統課題と対策について述べるとともに、系統解析技術の例として風力発電システムと八戸市マイクログリッドについて述べた。

参 考 文 献

- (1) 山田富士宏, ほか: Development of Doubly-fed Wind Energy System Model for DG embedded Power System Studies, PCC Nagoya (2007)
- (2) 山田富士宏, ほか: 風力発電機のシミュレーションモデルの高速化, 平成21年電気学会全国大会 (2009)
- (3) 高野富裕, ほか: 八戸市マイクログリッドにおける自立運転の実証, 電気学会論文誌B, **129**, No.4, 499~506 (2009)
- (4) 天満耕司, ほか: マイクログリッド自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発, 電気学会論文誌B, **126**, No.10, 1032~1038 (2006)
- (5) 高調波抑制対策技術指針JEAG9702-1995