

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

9

2012

Vol.86 No.9

特集Ⅰ「電力流通の進化を支えるシステム技術」

特集Ⅱ「鉄道トータルエネルギー・環境ソリューション
への取組み」



目次

特集Ⅰ「電力流通の進化を支えるシステム技術」

東日本大震災後の電力システムの革新	1
横山明彦	
電力流通の進化を支えるシステム技術	2
福井伸太	
大規模系統安定化システム	6
押田秀治・小和田靖之・黒瀬 健・前田 徹・京本寿美恵	
新形ばね操作550kV GIS	12
貞國仁志・吉田大輔・釣本崇夫・山本茂之	
新型デジタルリレー “MELPRO-CHARGE2”	16
匹田猛雄・山根定章・片山善博・松澤 勝	
次世代電力系統制御システム	20
藤田淳文・黒川隆久・飯塚 剛・鶴 薫	
スマートグリッド向け需給制御技術	24
古塩正展・マルミローリ マルタ・清水恒夫・小島康弘	
特集Ⅱ「鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションへの取り組み」	
鉄道のグローバル化とカスタマイズ化	28
渡邊朝紀	
鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションへの取り組み	29
四方 進	
環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向 ～SiC適用インバータシステム、補助電源装置～	33
中嶋幸夫・草野健一・山下良範・出井和徳・田中 毅	
蓄電デバイスの車両推進制御システムへの応用	38
根来秀人・畠中啓太・山崎尚徳・北中英俊・岡田万基	
省エネルギー化に取り組む列車運転制御システムの最新動向	42
山本 律・白鳥弘敏・中桐慶之・玄田和行・田原一浩	
駅エネルギー管理システム	46
白石広幸・村山 聡・曾田圭一・丸井一也・竹村文吾	
路線全体の回生エネルギー有効活用	50
松村 寧・葛山利幸・藤田敬喜	

System Technologies for Evolving Power Transmission and Distribution

Innovation of Power System after 3.11 Disaster
Akihiko Yokoyama

System Technologies for Evolving Power Transmission and Distribution
Shinta Fukui

Large-Scale Special Protection Systems

Hideharu Oshida, Yasuyuki Kowada, Ken Kurose, Toru Maeda, Sumie Kyomoto

Advanced Spring Operating 550kV GIS

Hitoshi Sadakuni, Daisuke Yoshida, Takao Tsurimoto, Shigeyuki Yamamoto

New Digital Relay “MELPRO-CHARGE2”

Takeo Hikita, Sadaaki Yamane, Yoshihiro Katayama, Masaru Matsuzawa

Next Generation EMS/SCADA (Energy Management System/Supervisory Control and Data Acquisition)

Atsufumi Fujita, Takahisa Kurokawa, Tsuyoshi Iizuka, Kaoru Tsuru

Demand and Supply Control Technology for Smart Grid

Masanobu Koshio, Marta Marmioli, Tsuneo Shimizu, Yasuhiro Kojima

Total Railroads Solutions, Supporting Progress Toward a Low-carbon Society

Globalization and Customization of Railway
Tomoki Watanabe

Total Railroads Solutions, Supporting Progress Toward a Low-carbon Society
Susumu Shikata

The Latest Trend of Environment-Friendly Power Electronics Equipment for Railway Vehicles ～Traction Inverter System with SiC Power Device & Auxiliary Power Supply System～

Yukio Nakashima, Kenichi Kusano, Yoshinori Yamashita, Kazunori Dei, Takeshi Tanaka

Application of Energy Storage Device for Traction System

Hideto Negoro, Keita Hatanaka, Hisanori Yamasaki, Hidetoshi Kitanaka, Yuruki Okada

Latest Development in Train Control System Contributing to Energy Savings

Tadashi Yamamoto, Hirotohi Shiratori, Yoshiyuki Nakagiri, Kazuyuki Genda, Kazuhiro Tahara

Station Energy Management System

Hiroyuki Shiraishi, Satoshi Murayama, Keiichi Soda, Kazuya Marui, Bungo Takemura

Effective Usage of Regenerative Power in Traction Power Supply System

Yasushi Matsumura, Toshiyuki Katurayama, Keiki Fujita

特許と新案

「運転支援装置」	54
----------	----

スポットライト

SiC適用DC750V VVVFインバータ装置

表紙：電力流通の進化を支えるシステム技術

東日本大震災以降、電力の供給と消費において大きな変化が進行している。本特集号ではこの変化に対応する電力流通の実現に向けたシステム技術に焦点をあてる。

写真①は、この特集号で紹介している系統安定化システムのうち関西電力株式会社に納入したBSSシステムである。BSSは大電源脱落事故時に系統周波数の大幅な低下を防止し電力系統の安定維持を図るための装置であり、電力流通の高い信頼度を支える最重要システムと位置付けられている。

表紙：大容量SiCパワーモジュールと鉄道車両用VVVFインバータ装置

三菱電機は、更なる環境負荷低減への取り組みとして、大容量SiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを適用した鉄道車両用VVVFインバータ装置を世界に先駆けて製品化した。

写真②は、大容量SiCパワーモジュールとそれを適用した鉄道車両用VVVFインバータ装置である。



東日本大震災後の電力システムの革新

Innovation of Power System after 3.11 Disaster


横山明彦
Akihiko Yokoyama

2011年3月11日の東日本大震災(以下“3.11”という。)以来、震災直後の計画停電、原子力発電の運転停止等による昨夏の電力使用制限や今夏の需給逼迫(ひっばく)、燃料費の増加による電気料金の値上げ、再生可能エネルギーの全量買取制度による太陽光発電や風力発電などの導入拡大など電力システムは厳しい状況に置かれており、電力安定供給のみならず電気事業制度の観点からも電力システムのあり方の見直しを迫られているところである。

これまで電力会社は、自社の制御地域で需給バランスをとり、つまり地産地消をできるだけ行い、基本的には一点連系の地域間連系線を介して他社の制御地域と緊急時の電力融通や経済的な電力融通をして、経済的かつ安定な電力供給を行ってきた。2000年代に入り、電力自由化に伴い新たな事業者である特定規模電気事業者(2012年から“新電力”と呼ぶことになった)が出現し、日本卸電力取引所(JEPX)が設立され、制御地域内の電力取引だけでなく制御地域間の電力取引も積極的に行われることが望まれてきた。加えて、3.11以降、需要家選択肢の拡大が求められており、ネガワット取引や、スマートメータを利用した時間帯別料金による需要の移動などのデマンドレスポンスも取り込もうとしている。

送電ネットワークに目を向けると、3.11直後に、周波数変換所(FC)を通しての50Hz地域への電力融通量の少なさが問題となり、FCの増強とともに、その費用負担や建設促進のための政府の関与の仕方も議論されたことは記憶に新しいところである。また、今夏の60Hz地域の需給逼迫時において、地域間連系線に平常時の運用容量以上の電力潮流を一時的に流すことも検討されている。これは、需給逼迫時の計画停電と連系線に流れる潮流量増加による突発的事故停電リスクの増大を比較して、緊急時に連系線の利用を一時的に拡大するものであり、世界的にも例のないことであろう。

近年、地球環境問題解決のために、特に3.11後は原子力発電停止によるエネルギー不足を補う意味で、再生可能エネルギー電源を大量に系統連系することが期待されている。特に風力発電は国内では偏在しており、各制御地域で地産地消しようとする火力発電所などの周波数調整能力

や送電ネットワークの送電能力、電圧などの系統上の条件で制約されるため、経年送電設備の更新や新たな送電設備の建設とともに他社の制御地域の周波数調整容量を用いて広域で管理・制御することも必要となる。

このような状況下で、各50Hz、60Hz地域で広域的な系統運用を行うことによって上述の系統課題を解決し、広域の電力取引も活発化することのできる広域系統運用組織を作ることが国レベルで検討されている。この組織に求められる機能は、需要予測に始まり、電源開発計画の把握、流通設備計画と補修計画の策定、地域間連系線や地域内主要幹線の運用ルール策定などの系統計画業務と、広域の需給バランス調整、周波数調整、緊急時の系統運用、風力発電、太陽光発電などや電力取引の電力が流れる地域間連系線や地域内主要幹線の運用などの広域の系統運用業務にまでおよぶ。

地域間連系線が直流設備も含めて増強され、再生可能エネルギーからの連系線を含む送電線の潮流が大きくなり、広域での電力取引も活発化すると、突発的な事故による大停電発生リスクも増え、その防止のための運用・制御も複雑になることが予想される。太陽光発電出力の変動、需要家の電気自動車や貯湯槽をもつヒートポンプ給湯機そして太陽光発電そのものを制御する機能などを考慮した各制御地域の中央給電指令所の需給制御・系統安定化制御システム、それに加えて、希頻度の大地震や風力発電出力の広域利用も考慮した広域運用・制御システムを検討する必要がある。前述のデマンドレスポンス、需要家機器最適制御機能、BEMS(Building Energy Management System)機能など、極めて多数の需要家の不確実な応答を需給制御システム、配電自動化システムなどに取り込むことは、チャレンジなテーマである。

今後の電力システムの革新は、3.11前の供給信頼度を維持しつつ社会コストをできるだけ増加させないように進めることが重要で、需要家も含めた社会全体のベネフィットの分析も行いながら慎重に進める必要があり、地に足のついた研究開発を行っていくことが必要である。今後の技術開発の進展に期待したい。



福井伸太*

電力流通の進化を支えるシステム技術

System Technologies for Evolving Power Transmission and Distribution

Shinta Fukui

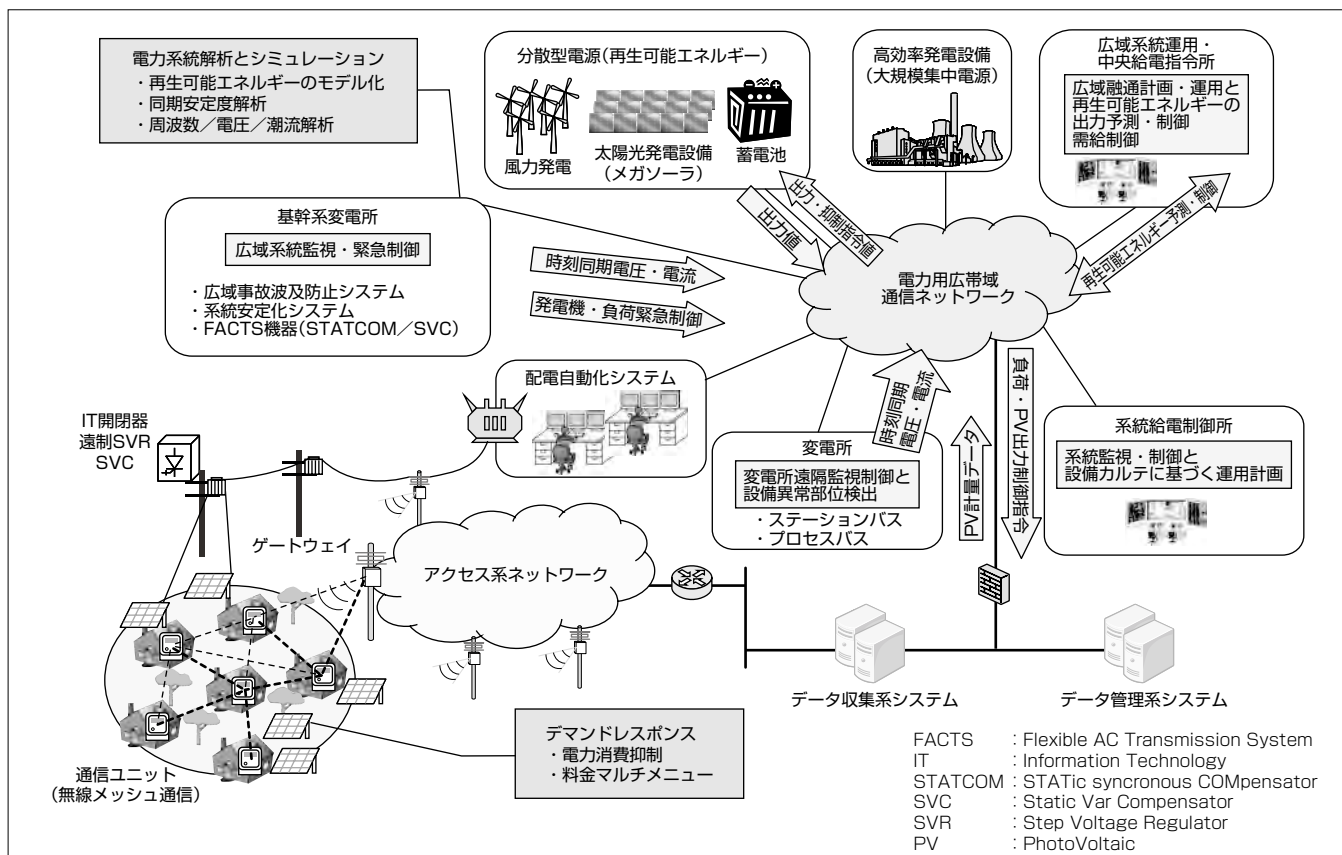
要 旨

昨年の東日本大震災以降、我が国の電力エネルギーを取り巻く環境は激変した。震災以前のエネルギーセキュリティ、経済効率性、環境負荷低減に加えて、安全及びその感受性からうまれる安心が最優先されるというパラダイムシフトである。これは電力系統の特性を決める発電サイドと需要サイドで顕著となっている。具体的には、次の3点に集約される。①原子力依存低減による火力発電の更なる高効率化、②再生可能エネルギー電源の大量連系加速、③計画停電回避のための自発的な需要制御である。これらの大きな変化を吸収して電力の供給を従来と変わらない信頼性で実現する使命を負っているのが電力流通である。送電、変電、配電を行う電力設備群と、それらの計画、運用、制御、保守を行う人間系とシステム群から実現される。

電力設備面では高度経済成長時代に建設された機器の高

経年化が進んでおり、延命対策や期待寿命に基づく更新が計画されている。システム面では、運用と制御へのIP(Internet Protocol)ネットワークの積極導入によって、運用階層の圧縮や保守拠点の集約と変電所の情報化に加えて、デマンドレスポンスによる電力需要管理が進行すると期待されている。一方で、ここ数年に発生した大規模地震での経験から、事故発生時における大停電の波及防止にはシステム群が確実に機能している。

本稿では、これらの電力流通の進化を支えるシステム技術として、情報化する変電所システムと電力系統の計画、運用、制御、保守を行うシステムの広帯域ネットワーク上での情報連携、需要サイドでのデマンドレスポンスに焦点をあてる。



次世代の電力流通を支えるシステム技術

変電所設備の運用と保全情報、需要家の電力消費情報を活用することによって、平常時・被災時・緊急時における系統運用の信頼性とロバスト性の維持、さらには流通設備のトータルアセットマネジメントを実現していくための計算機システム、機器、通信ネットワークからなるシステム技術の全体像を示す。

1. ま え が き

東日本大震災以降、電力系統では発電サイト喪失時における供給力の確保とデマンドレスポンスによる消費抑制、そして耐震の強化や復旧の迅速化等の防災対策の強化が議論されている。自然災害時での供給力確保策としては、全国レベルでの広域融通拡大及び再生可能エネルギー電源の大量連系を加速する方向で進められている。このような電力供給の変化の中で、電力流通の要となる変電所機能が一部又は全喪失した場合には全系への停電波及防止能力の更なる強化が必要になる。

本稿では、これらの新たな要請に応えるための電力流通における対策として、電力流通状態の情報発信元となる変電所の情報化と電力系統の計画、運用、制御、保守を行うシステム群との情報連携について述べる。次に、平常時及び災害時での需給逼迫(ひっばく)時に需給バランスを維持するために自発的な消費抑制が期待できるデマンドレスポンスの社会実証システムの取組みについて述べる。これらのシステムの構築と検証には計画や制御の対象となる電力系統の特性を目的に応じて忠実に再現できなければならない。最後に、三菱電機の系統解析技術を駆使した電力系統解析とシミュレーションについて述べる。

2. 広域融通と再生可能エネルギーの大量連系による供給力拡大

原子力発電依存度の減少によって、長距離大容量送電は少なくなり、代替電源である都市部近郊の火力発電所からの送電が増加してきており、同期安定度は向上してくる方向になる。しかしながら、風力発電の連系量拡大や自然災害によって発電サイトが消失し、複数の電力会社間の連系線を跨(またが)って緊急融通する場合には長距離化によって、送電ルート区間でのきめ細かい同期安定度の監視とその改善のための発電機と系統の制御を考える必要がある。家庭用太陽光発電及びメガソーラーが大量に系統に連系されてくると太陽光を遮る雲の発生・移動状況が結果として日射量の変動による発電変動となり多地点での需要変動に重畳される。日射変動合計の地域内平滑化効果が期待できる一方で、地点ごとでみれば一定時間での需要変化率がより大きくなる場合が想定される。需給面での解決策としては、気象予報に基づく予想では困難な雲の急激な変化もあり周波数調整のための更なる予備力が必要である。出力変化速度の大きい系統用蓄電池又は定格付近を含めた一定範囲での高効率なガスタービン等が周波数調整用電源として必要になってくる。

系統の運用や制御面からは、この需要変動に応じて、特定の送電ルートでの潮流変動や変電所での電圧変動が短時間に発生し、運用目標値の上下限を超えてしまう可能性が

ある。変電所で計測される潮流値や電圧値の同一時刻断面における高精度化と広域化によって、運用マージンを少なくすることで運用目標上限値を引き上げることが可能になる。

図1はGPS(Global Positioning System)とPMU(Phasor Measurement Unit)で計測された同期時刻情報付き電圧と電流のベクトル値情報、GIS(Gas Insulated Switchgear)や変圧器の機器センサによる設備の状況・不具合状況等の運用及び保全情報を発信する次世代変電所の監視制御システムである。

ある時刻断面での各変電所の母線電圧と送電線又は変圧器電流のベクトル値からその大きさと位相、さらにはその変化量が分かるので、時々刻々における電力系統の潮流状態や同期安定度そして周波数を正確に把握することができる。現在は電力会社ごとで構築されている周波数安定化、電圧安定化、過渡安定度維持等の事故波及防止システムでも、同期時刻情報付きの電圧・電流ベクトル計測値を用いれば他社系統を含む広範囲での系統状態の監視が可能となる。このように広域系統の状態把握が正確にできれば、図2に示すように平常時に加えて、災害時の緊急制御として、潮流調整や電圧調整、負荷制限、系統分離を行う機器に対して制御信号を送るシステムを構築していくことができる。

今後、高経年の変電機器が増加していく中で運用保全情報に基づく機器の事故発生確率を考慮した設備計画が求め

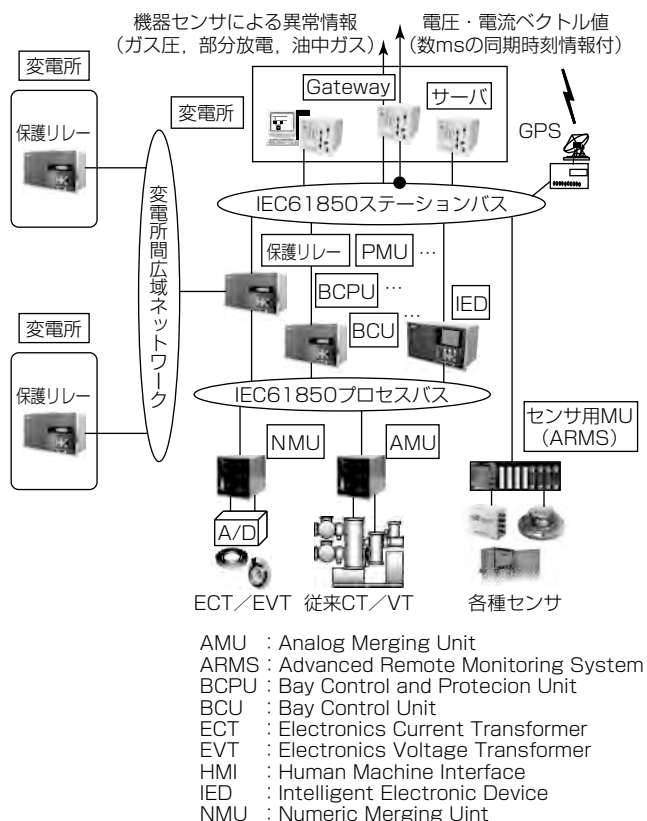


図1. 次世代変電所の監視制御システム

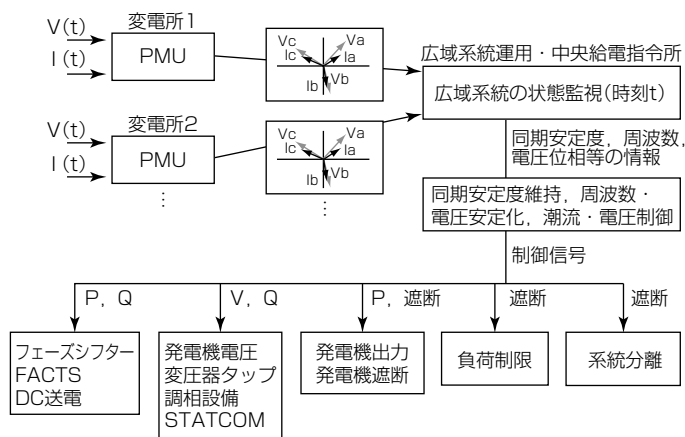


図2. 広域システムの緊急制御システム

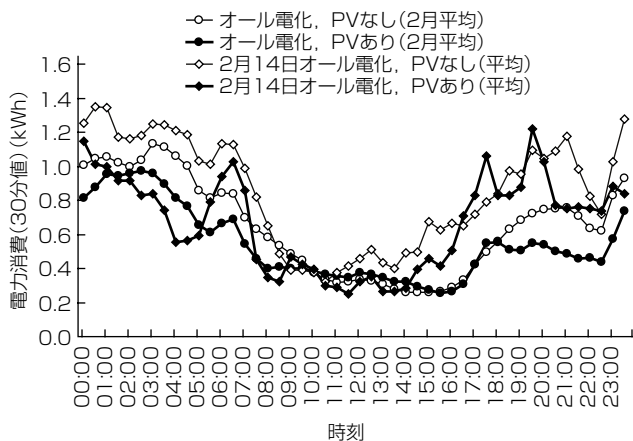


図3. オール電化住宅の電力消費量比較⁽²⁾

られる。運用及び保全情報のデータベースに格納された機器の動作履歴や異常履歴（設備カルテ）から事故発生確率を計算する。事故時及び復旧操作時の系統様相を忠実に再現できる訓練シミュレータを活用し、事故時における復旧時間や重要負荷停電の影響度も考慮して、高経年設備の更新又は延命の判断を行う。需給運用計画や系統運用計画、作業停止計画では、機器の劣化レベルに応じた負荷電流や短絡電流の上限値、設備の電圧上下限値を運用制約として計画を立案する。

自然災害による変電所機能の一部喪失又は全喪失時にも、先に述べた劣化レベルに応じた運用制約のもとで同期安定度を維持する適正な送電可能量をオンラインで計算する。これによって緊急時における一定時間内の安全な送電を実現する。さらに、積極的に送電可能量を増加させるためには送電ルートの昇圧や多回線化が必要である。費用メリットの観点からは、長距離送電ルートの中間地点の電圧を維持する無効電力を注入できる自励式変換器を適用したSTATCOMの設置が有効である。系統構成にもよるが、送電ルートでの一回線事故時には、事故除去後の電圧回復を加速化させることによって、発電機の過渡安定度の改善を図ることも可能になる。

3. デマンドレスポンスによる需要管理

東日本大震災による電源構成の大きな変化に対して、今後の需給バランスを維持していくための新たな方向性として、①高効率火力発電の増加、②再生可能エネルギーの大量連系加速、③電力消費の抑制が経産省で検討されている⁽¹⁾。震災前は、需要管理（Demand Side Management：DSM）は、需要サイドでの特定期間に発生する太陽光発電による余剰電力をいかに少なくするかに焦点がおかれていたため、蓄電池充放電によるピークシフトや需要創出が目的であった。現在では供給力不足時の需要家へのインセンティブ付与によってピークカットを誘導する、つまり需要家への消費抑制指示によって需要家反応に期待するデマンドレスポ

ンスに関心が高まっている。

ここでは、電力需要の約3割を占める一般家庭を対象にしたデマンドレスポンスの試みについて述べる。生活の快適性（Quality Of Life：QOL）を維持しながら電力の消費抑制をいかに実現するかが家庭への普及につながる。米国の一部地域で試行されている家電機器の直接OFF制御に加えて、電力消費の調整ができる高機能な日本製家電機器に合わせたきめ細かな制御が快適性には必須となる。ピークカットについては、ヒートポンプ給湯機や家庭用蓄電池、電気自動車等の蓄電機能と太陽光発電や燃料電池による家庭用発電機器による組合せで実現できる可能性がある。

図3は、経産省“次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト”のけいはんな学研都市実証事業で、オール電化住宅33軒で太陽光発電（PV）の有無、つまり環境負荷低減への関心度の違いによる冬季電力消費量をモニタリングした結果である。例えば9時から18時の昼間で空調などの家電機器を必ず使用する時間帯では、電力使用量の差は少ないが、朝晩に違いが現れることが分かる。デマンドレスポンスのベースとなる電力消費抑制のシナリオ立案には、このように居住者の時間帯の違いによる省エネルギー感度の変化を的確に捉えることもQOLの維持には不可欠となる。ピークカットを実現するためには、発電機器や蓄電機器の使用組合せが必須となる場合もある。けいはんな学研都市実証事業では、このような機器設置の提案や省エネルギーなどのコンサルテーション有無、世帯構成の違いによるデマンドレスポンスへの対応有無を想定して、無作為に各世帯を4つのグループに分け、約700軒を対象にした大規模社会実証を2012年度の夏から開始する。図4に、デマンドレスポンス実証に使用する情報システムの構成例を示す⁽²⁾。

自然災害などの非常時から平常状態に戻るまでは、地域単位での需要抑制を電力系統側の供給力不足に応じて一定期間は協調して行う必要がある。30分ごとの電力量検針値を2章で述べた需給計画、系統運用における各システムと情報連携することによって可能となる。

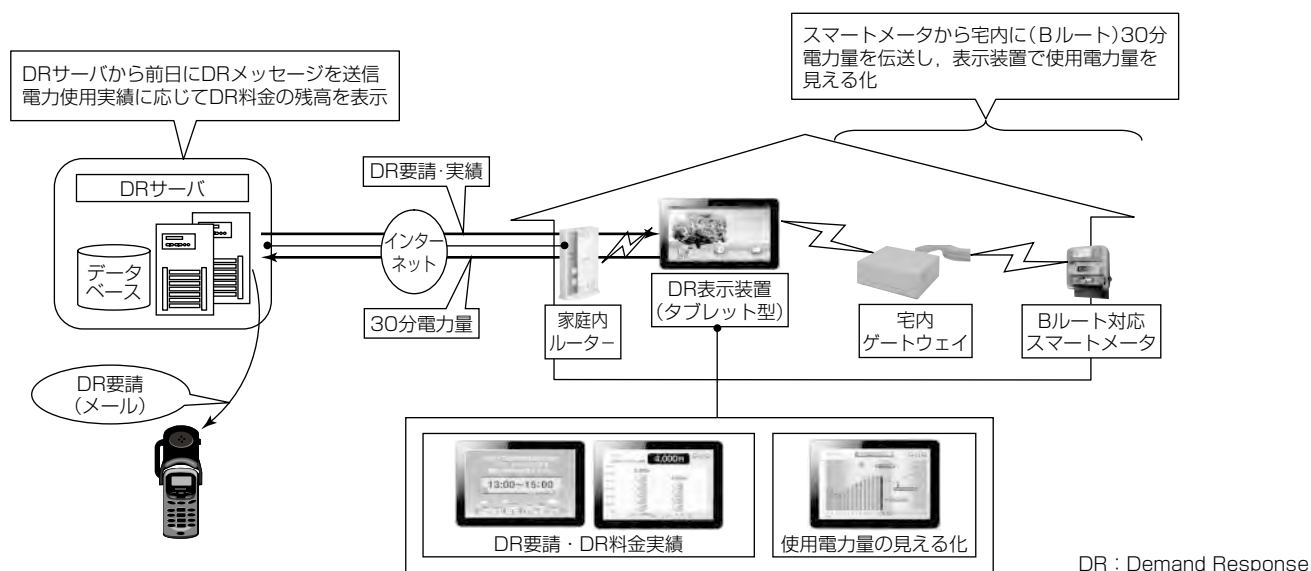


図 4. デマンドレスポンスのシステム構成例⁽²⁾

4. 電力系統解析とシミュレーション

当社ではSTATCOMなどのパワーエレクトロニクス技術を応用した新しい電力機器、事故波及防止システムの制御特性の検討や動作試験、既設系統での事故・不具合発生時の現象解明には、電力系統解析用のシミュレータを使用している。電力系統の規模と時間精度による適用範囲を図5に示す。アナログシミュレータは、電力系統の変圧器・送電線・変換器・負荷の縮小モデルと発電機は計算機によるモデルを組み合わせた模擬装置で、各構成要素の容量及び電圧をスケールダウンして実際に近い現象の再現ができる。デジタルシミュレータは電力系統の各構成要素を数式で表し、計算機で数値計算することによって電力系統の挙動を模擬するものであり、時間精度が数十ms以上であれば大規模な系統にも適用可能である。大規模風力発電や太陽光発電のモデルも用意している。複数のCPUでの並列処理などによって実現象と同じタイムスケールで現象を再現でき、入出力用のインタフェースを介することによって製品検証を行っており、現在では不平衡事故が扱える発電機数はアナログシミュレータに近づいている。

一方、通常のパソコンなどでノンリアルタイムで実行する解析プログラムでは、大規模系統の数秒から数時間にわたる現象を対象とした実効値プログラムと数μ秒から数十秒の現象を対象とした瞬時値プログラムがある。当社独自の実効値プログラムは数十年にわたる技術蓄積に基づいて改良を重ねている。現在では再生可能エネルギーなどの新規モデルの迅速な組み込みを可能としている。

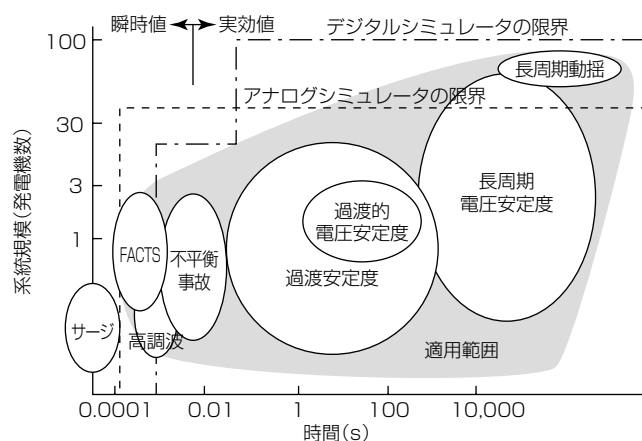


図 5. 電力系統解析シミュレータの適用範囲

5. む す び

東日本大震災以降における電力の供給サイドと消費サイドでの大きな変化、それらに対応しながら進化していく電力流通の実現に向けたシステム技術について述べた。

当社では、電力流通におけるシステム技術は長年にわたる絶え間ない技術開発と顧客へのシステムの導入と運用実績を通じて集大成されている。計画、運用、制御面での新たなニーズに対するシステム技術は、実績ある要素技術を組み合わせながらブラックボックス化させないことが、現在の社会に必要とされている安全で安心なシステムの実現につながる。今後の技術開発においても、時代の変化に適応する製品供給に邁進(まいしん)していく。

参 考 文 献

- (1) 経産省：電力システム改革専門委員会(第1回～第7回)配布資料，経済産業省 (2012)
- (2) 半谷陽一：けいはんな実証事業におけるDRの取組，けいはんな実証事業シンポジウム (2012)

大規模系統安定化システム

Large-Scale Special Protection Systems

Hideharu Oshida, Yasuyuki Kowada, Ken Kurose, Toru Maeda, Sumie Kyomoto

押田秀治* 前田 徹**
小和田靖之** 京本寿美恵**
黒瀬 健**

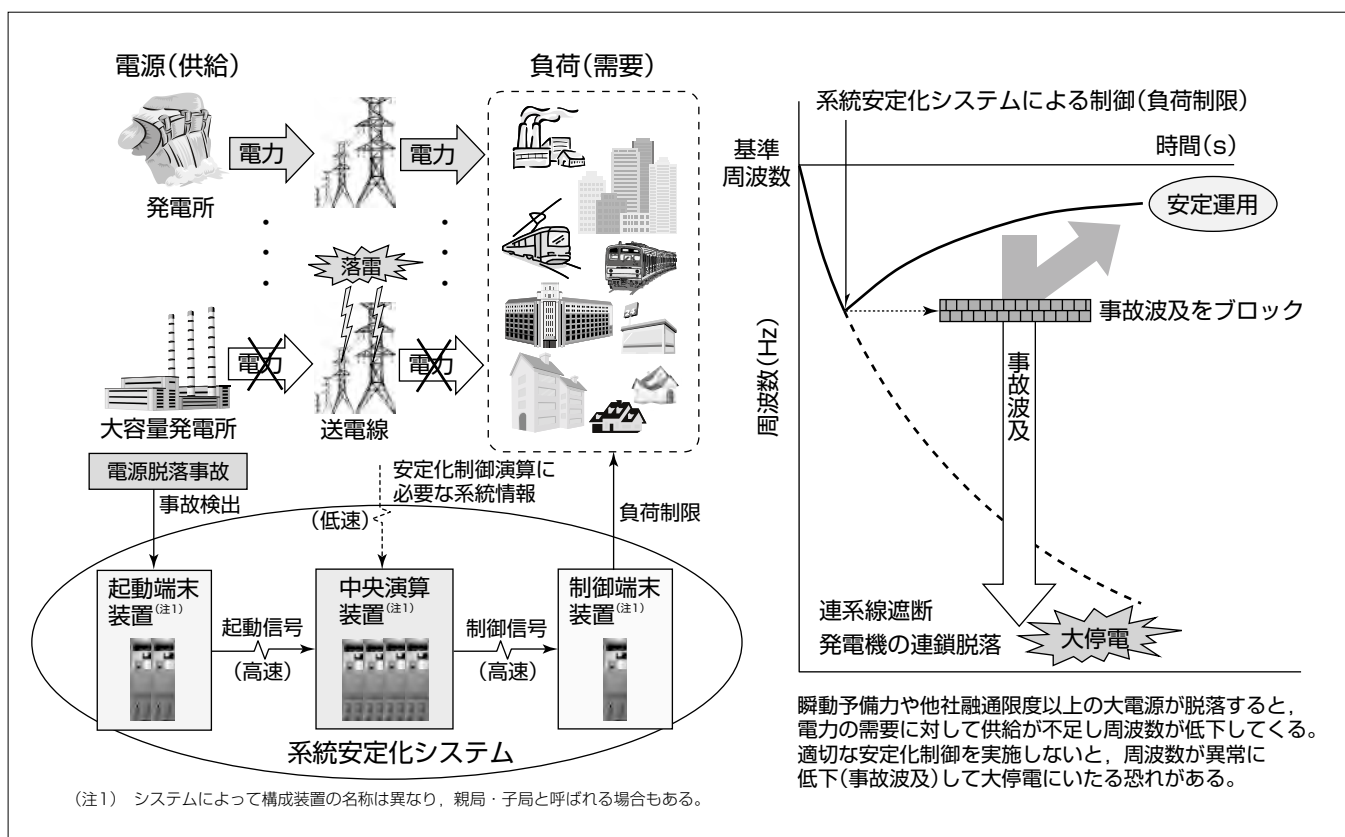
要 旨

系統安定化システムは、過酷事故の影響が波及し大停電にいたるのを未然に防止する機能を持つ。40年以上前から、日本は世界に先駆けてこのシステムを開発・導入し、以降、拡大・複雑化する電力系統に応じて更新・新設が図られてきた。電力流通の高い信頼度を支える最重要システムの一つに位置付けられており、その製作には系統解析からシステム構築にいたる幅広い分野で高い技術力が要求される。三菱電機は、導入当初から時代ごとのニーズに応じて、数多くの系統安定化システムを製作・納入してきた。

このシステムは事故波及防止リレーシステムとも呼ばれ、系統を面的に保護している点に特徴がある。その保護範囲が長距離系統、全系統、及び広域系統等、広くなる程、一般にシステムは大規模化してくる。

近年、系統構成の変遷、新規大容量電源・長距離送電線の建設等を背景として、広範囲の電力系統を保護する大規模系統安定化システムの更新・新設の気運が高まってきた。これを受けて、最近、当社は関西電力向けBSS(Bulk power System Stabilizer)、沖縄電力向けSSC(System Stabilizing Controller)、中部電力向け長野方面ISC(Integrated Stability Control system)の各大規模系統安定化システムを、それぞれの電力会社と共同で研究開発し、製作を担当した。現在、どのシステムも現地搬入・調整試験が完了し、運用が開始されている。

本稿では、これらの各システムに関して、導入の背景、特徴、構成・制御論理(制御アルゴリズム)の概要等を運用開始順に述べる。



系統安定化システムの基本的な機能と装置構成

ここでは、大電源(大容量発電所)の脱事故に対して、負荷制限によって周波数の異常低下を防止する周波数維持機能を示している。この他に、過渡～定態安定度や電圧の維持、過負荷防止等が主たる機能となる。装置構成としては、対象事故を検出してシステム起動させる起動端末装置、安定化制御演算や制御対象選択等を行う中央演算装置、安定化制御を実行する制御端末装置からなる集中型構成を例示している。一般に保護範囲が拡大するほど、各端末装置や通信ルートの数が増え、システムは大規模化してくる。この他に、全ての役割を一装置に集約した自端型構成などがある。各構成装置はデジタルリレーをベースに製作される場合が多いが、親局として計算機サーバを持つシステムもある。

1. ま え が き

系統安定化システムは事故波及防止リレーシステムとも呼ばれ、落雷などの原因で電力系統に過酷事故が発生した場合、その影響が波及して系統周波数の大幅低下や発電機脱調等、大停電を引き起こす恐れのある異常現象へ進展するのを未然に防止する。そのため、電力流通の高い信頼度を支える最重要システムの一つに位置付けられている。

安定化制御の手段としては、対象とする現象に応じて、負荷制限(負荷遮断)や電源制限(発電機遮断)等が適用される。また、その保護する系統の対象範囲が広がる程、一般にシステムは大規模化してくる。

本稿では、最近、当社が製作を担当した大規模系統安定化システムの関西電力向けBSS(広域系統対象)、沖縄電力向けSSC(沖縄本島全系統対象)、中部電力向け長野方面ISC(長距離送電系統対象)の各々について、導入の背景、特徴、構成・制御論理等を述べる。なお、どのシステムも、当社デジタルリレーの主力機種である“MELPRO-Cシリーズ”で構築した。

2. 関西電力納めBSS(更新)

2.1 開発の背景

関西電力では大容量電源脱落事故時の周波数及び動態安定度維持対策として、系統安定化システム(BSS)を40年以上前から導入している。このシステムは関西電力管内の大容量電源脱落によって周波数が大幅に低下し全系崩壊する恐れのある場合、又は中西60Hz系統の動態安定度が崩壊する恐れのある場合で、事故発生後すみやかに必要最小限の負荷を制限し、系統安定維持を図ることを目的としている。このBSSによ

る安定化制御を図1に示す。

旧BSSの経年が20年を超過して顕在化してきた保守部品確保の問題や、系統構成の変遷(放射状→ループ運用)、新規電源建設等に対応するため、新たなBSSの開発を行った。この新BSSは2011年5月に運転開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、新規機能について述べる。

2.2 システムの特徴及び構成

BSSは親装置・事故検出装置・負荷制限装置で構成されている。システム構成を図2に、装置の外観を図3に示す。事故検出装置(23か所)は、大容量発電所及び基幹系統の変電所に設置しており、基幹系送電線のルート断や発電機脱落信号を親装置に伝送している。親装置は、事故検出装置からの信号を判定し、事前の系統状況から演算される制御対象を選択し、負荷制限装置に負荷制限信号を送信する。

従来は系統を2つに分ける放射状の運用に対応して2か所に親装置が設置されていたが、系統全体がループ運用へ変更となったため1か所に集約した。親装置は、事故検出装置及び負荷制限装置との通信を行う通信インタフェース盤、事故判定及び制御対象選択・出力を行う演算盤、整

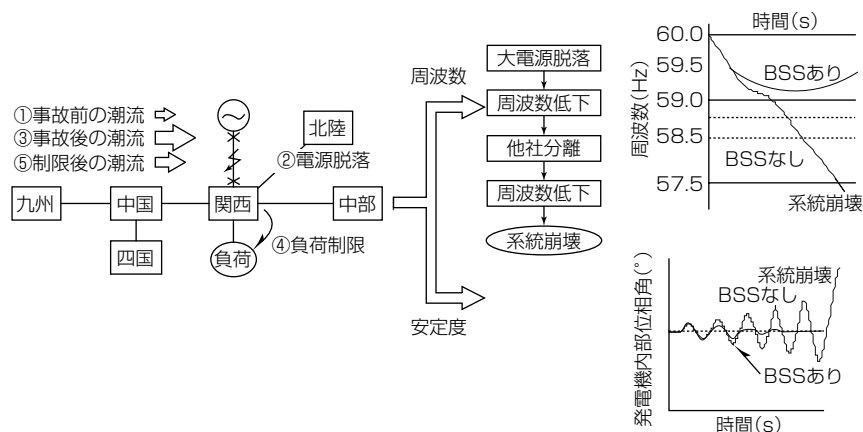


図1. BSSの安定化制御

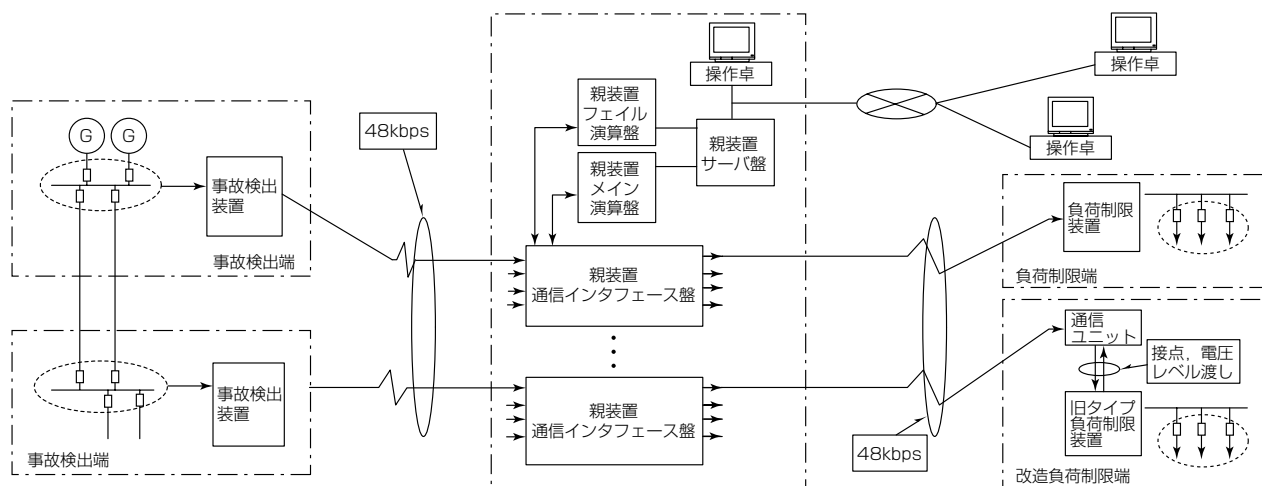


図2. システム構成



図 3. BSSの装置外観

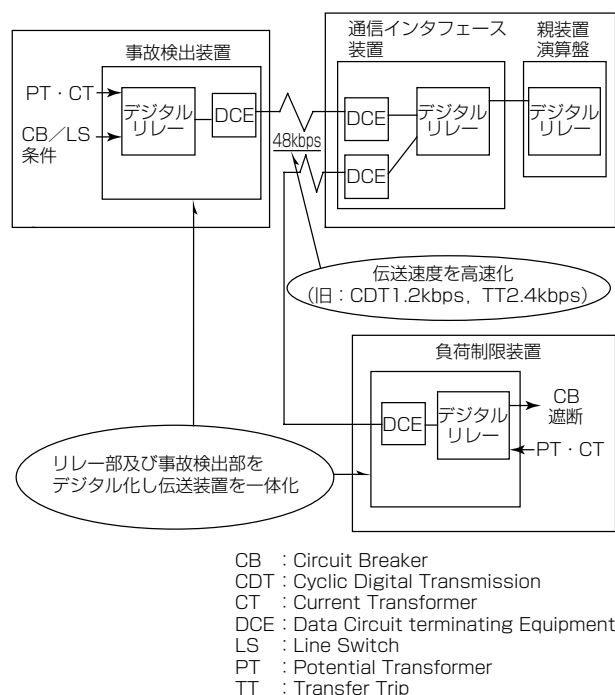


図 4. 伝送系の構成

定・運用操作・状態表示等のヒューマンインタフェース機能を管理するサーバ盤と操作卓で構成している。

負荷制限装置(73か所)は、各変電所に設置されており、親装置からの制御信号に基づいて制御を行う。

2.3 新規機能

ハードウェアスペックの向上や、高速・大容量の伝送路構築が可能となったため、新たな機能を開発・適用した。次に代表的な内容を示す。

(1) 制御の高速化

従来は事故検出信号についてはTT・CDT装置を適用し、伝送速度はそれぞれ2.4kbps・1.2kbpsであった。今回、事故検出装置及び負荷制限装置に伝送部を内蔵し48kbpsの伝送速度を適用し高速化、大容量化を実現した。これによってTT・CDT装置の設置コストの削減も可能となった(図4)。

(2) ヒューマンインタフェースの高度化

従来は親装置設置箇所に併設した操作卓からだけ整定変更や各種表示の確認が可能なスタンドアロンの構成であっ

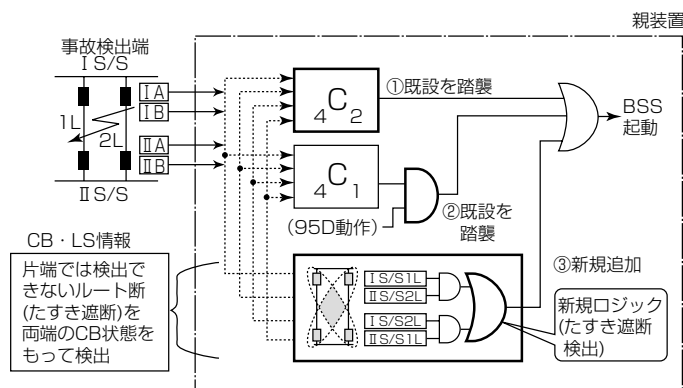


図 5. たすき遮断検出ロジックの追加

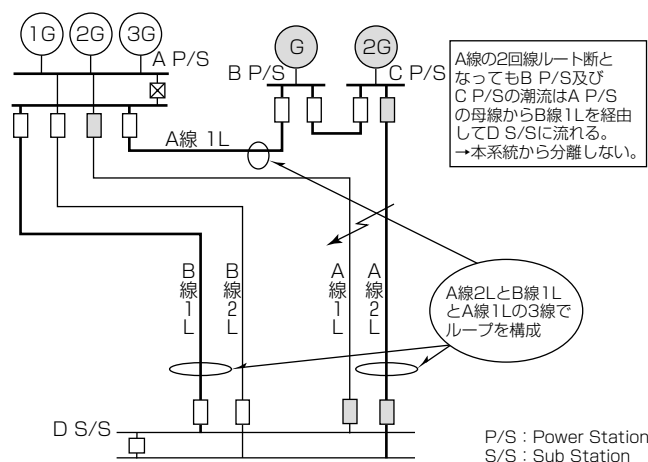


図 6. システム構成の認識

た。今回、電力用IP(Internet Protocol)網を活用し、遠方の運用箇所、保全箇所についてもヒューマンインタフェースを提供可能な構成とし、操作・監視の効率化を図った。

(3) 事故検出の高度化

既設システムでは、事故検出端末ごとに送電線ルート断(自端の2回線断)検出を行っていたため、遮断器不動作(CBF)などが発生した場合に検出ができない可能性があった。今回そのようなケースにも対応するため、各端末からルート断検出信号に加え、1回線ごとのCB・LS状態を親装置に送信して、親装置側でルート断(たすき遮断)を判定する機能を追加した。図5に親装置のロジックを示す。

BSSが事故検出の対象とする一部の系統では、電源線が複数発電所にわたってループを構成する複雑な系統運用を行い、かつ送電線の配置から風雪害や山火事等による複数回線の多重・続発事故に対応する必要がある。しかしながら従来のルート断検出方式では、電源脱落の発生を正しく判断できない(図6)。このため系統パターン認識を用いた新たな事故検出方式を適用した。

3. 沖縄電力納めSSC(新設)

3.1 開発の背景

他社との連系のない小規模な沖縄本島系統は、併入発電機台数が少なく、電源脱落時に周波数が大きく低下する恐れがあるため、従来、不足周波数リレー(UFR)を全系に分散設置することで、電源脱落に伴う周波数低下に対処してきた。一方、沖縄本島系統では、環境面や経済性を考慮し、既存発電機と比べ出力の大きいLNG(Liquefied Natural Gas)火力機導入が進められている。単機出力割合の大きな発電機が脱落すると、分散型のUFRだけでは電源脱落時の周波数低下が回避できず、また他の健全発電機の安定運用に影響を与える可能性が出てきた。そこでこの度、オンライン情報を活用し、高速かつ適正な制御を実現できる集中型の系統安定化システム(SSC)を沖縄電力と共同で開発した。このSSCは2012年4月に運転を開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、制御論理について述べる。

3.2 システムの特徴及び構成

SSCは、沖縄本島系統の諸特性を踏まえて開発しており、次のような特徴を持つ。

- ・集中型のシステム構成を採用し、全運転発電機、主要負荷及び系統周波数に関するオンライン情報を積極的に活用した周波数制御論理(起動方式・制御方式)を開発、適用している。
- ・最新の高性能デジタルリレーと高速・高信頼度な電力用通信網を使用している。

このSSCによって、系統周波数低下の主因である発電機の脱落や出力異常低下を確実に検出し、系統状況に応じた安定化制御を高速かつ適正に実現する。SSCのシステム構

成を図7に、装置の外観を図8に示す。各装置の機能は次のとおりである。

(1) 中央演算装置

給電指令所に設置され、各端末装置からの上り情報(発電・負荷情報、起動信号、周波数データ等)を基に制御演算を行い、下り情報として制御(負荷制限)指令を系統安定化端末装置に送出する(2系列構成)。

(2) 事故検出端末装置

発電所に設置され、発電機の出力情報や起動信号を中央演算装置に送信する(2系列構成)。

(3) 系統安定化端末装置

変電所に設置され、中央演算装置に負荷量を送信する。また、中央演算装置からの制御指令を受信し、所定の負荷制限を行う(1系列構成)。

3.3 制御論理

3.3.1 起動方式

運転中発電機の脱落や出力異常低下は、発電プラント側事故又は系統側事故に起因して生じる。この発電プラント側事故には、瞬時に主変圧器遮断器(以下“主変CB”という。)が開放される電気系故障、出力喪失後に主変CBが開放されるタービン・ボイラ系故障、及び主変CBが開放されずに緩やかに出力が低下するような補機などのその他機械的故障が、また系統側事故には、主に単機脱落となる片母線・主変事故など、及び複数機脱落となる二重母線事故等

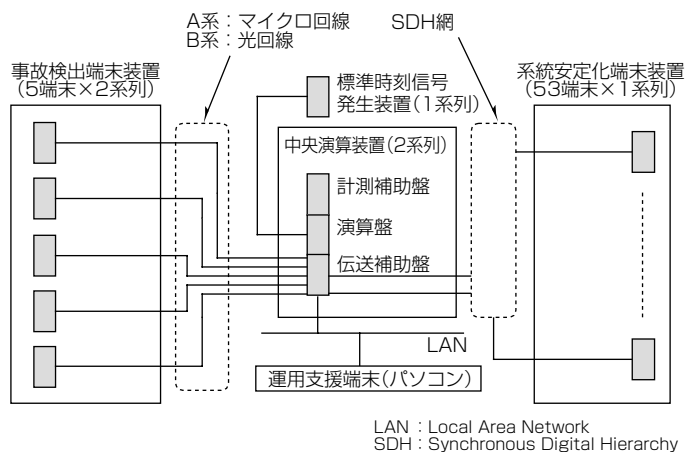


図7. SSCのシステム構成

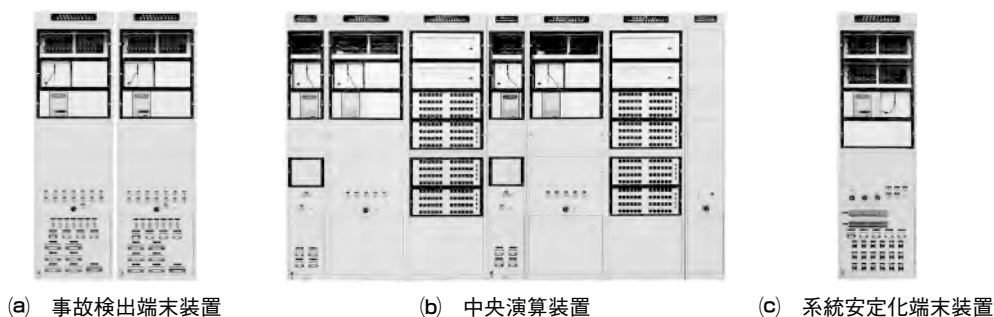


図8. SSCの装置外観

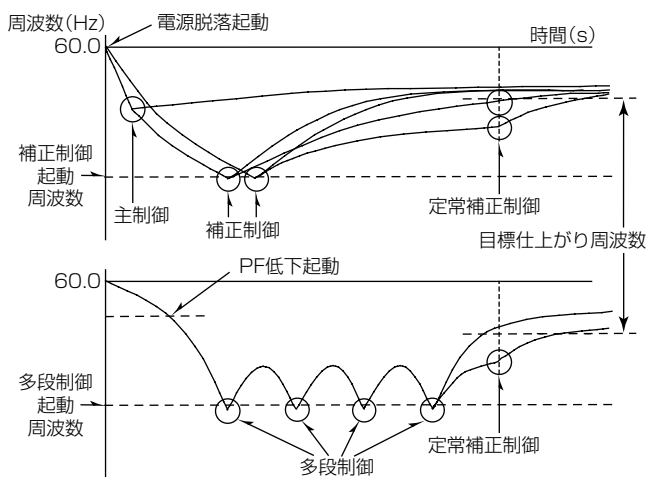


図9. SSC制御時の周波数変化イメージ

が含まれる。SSCではこれら事象の確実な検出のため、主変CB状態や電気量などの情報に基づき高速に発電機脱着を検出する“電源脱着起動”と、緩やかな出力(P)低下と周波数(F)低下を条件とした“PF低下起動”の2方式を開発して採用した。

3.3.2 制御方式

起動後は、次の各制御方式が系統状況に応じて適切に動作することで、周波数低下を確実に抑制する。制御実施時の周波数変化イメージを図9に、各制御方式を次に示す。

(1) 主制御

電源脱落率の大きな事故が生じた場合は、事故直前及び事故中の計測情報に基づき制御量を算出し、早期に負荷制限を実施することで迅速な周波数低下抑制を実現する。

(2) 補正制御

電源脱落率の小さな事故が生じた場合、又は制御誤差などに起因し周波数低下が継続する場合、事後除去後の計測情報などに基づき制御量を算出し、所定レベル以上の周波数低下を条件に負荷制限を実施する。

(3) 多段制御

発電機出力が緩やかに低下しPF低下起動を検出した場合、所定レベル以上の周波数低下を条件に複数段の負荷制限を実施する。

(4) 定常補正制御

起動後一定時間経過後も周波数回復が十分ではない場合、事後情報に基づき系統定数を推定した上で再度制御量を算出し、負荷制限を実施する。

4. 中部電力納め長野方面ISCシステム(新設)

4.1 開発の背景

新潟県上越市に大規模火力発電所(最大出力2,380MW)の新設を行っており、2012年7月から2014年5月にかけて順次運転開始を予定している。上越火力発電所の発電電力は、新設される275kV上越火力線から長野系統を経由して

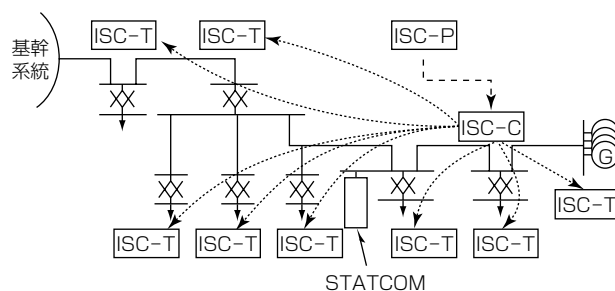
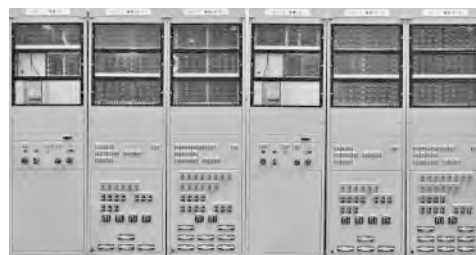


図10. ISCのシステム構成



(a) ISC-C



(b) ISC-T

図11. ISCの装置外観

500kV基幹系統へ送電される。上越火力発電所から500kV基幹系統までは約300kmの長距離系統となるため、過渡安定度対策及び周波数対策では、電圧変動を考慮した系統安定化対策が必要となる。加えて、平常時運用では、長野方面系統全体を監視した上で電圧・無効電力制御を行う必要がある。

これに対し、過渡安定度対策、周波数対策、電圧変動対策に対応する統合型の系統安定化システム(ISC)を中部電力と共同で開発した。このISCは2012年5月に運転を開始し、現在、実運用中である。次に、システムの特徴と構成、制御論理について述べる。

4.2 システムの特徴及び構成

ISCは、ISC-P(他社製)・ISC-C(当社製)・ISC-T(当社製)の3種類の装置で構成されている。システムの構成を図10に、装置の外観を図11に示す。

ISC-P～ISC-Cの異メーカー間の装置の結合はTCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)によってIP接続され、ISC-C～ISC-T間はPCM(Pulse Code Modulation)接続されている。

ISCは全装置とも2系列構成としており、DUAL構成の

表1. ISCの制御機能

事象	演算方式	制御機能(制御内容)
非ルート断事故	事前演算(ISC-P)	過渡安定度維持第1段制御(電源制限+調相制御)
	事後演算(ISC-C)	過渡安定度維持補正制御(電源制限)
ルート断事故	事前演算(ISC-C)	分離系統周波数維持第1段制御(電源制限+負荷制限+調相制御)
	事後演算(ISC-C)	分離系統周波数維持補正制御(電源制限+負荷制限+調相制御)
平常時運用	事前演算(ISC-P)	電圧・無効電力制御(VQC) (調相・変圧器タップ制御・ 発電機端子電圧制御)
		最適電力用コンデンサ投入量制御(SC制御)

2系列を採用しているが、事後演算を実施している一部のISC-Cは、数msの計測電気量の差によって制御結果にもわずかな差が出てくる可能性もあるため、DUPLEX(常用/待機)の2系列構成としている。

(1) ISC-P

計算機サーバで構成し、給電指令所に設置する。過渡安定度維持第1段制御及び平常時の電圧・無効電力制御の演算を、オンライン情報を基に30秒周期で行い、制御量をISC-Cへ送信する(2系列構成)。

(2) ISC-C

デジタルリレーで構成し、新北信変電所に設置する。ISC-Tで検出した事故情報に基づき起動判定を行い、ISC-Pの演算結果に基づく過渡安定度維持制御指令をISC-Tへ送信する。また、過渡安定度維持補正制御や分離系統周波数維持制御(第1段制御・補正制御)の演算を実施し、ISC-Tに制御指令を送信する(2系列構成)。ただし、事後演算を担当する装置は常用/待機の2系列構成としている。

(3) ISC-T

デジタルリレーで構成し、上越火力発電所から豊根開閉所までの各電気所9か所に設置する。ISC-Cからの制御指令とフェールセーフリレー動作を条件に系統安定化制御を実施する。また、計測情報や起動情報をISC-Cへ常時送信する(2系列構成)。

4.3 制御論理

ISCは長野方面系統の諸特性を踏まえて開発しており、様々な系統事故に対して、表1の各制御機能を事前演算と事後演算の融合によって高速かつ適応性の高いシステムとして実現している。

非ルート断事故時の過渡安定度維持制御では、ISC-Pで30秒周期で事前演算する第1段制御、及びISC-Cで事故発生後のデータを用いて事後演算する補正制御の2段階の制御で実現しており、電源制限に加えて、調相制御も実施し、発電機の脱調防止のみならず、過渡的な電圧変動も抑制している。

ルート断事故時の分離系統周波数維持制御では、ISC-

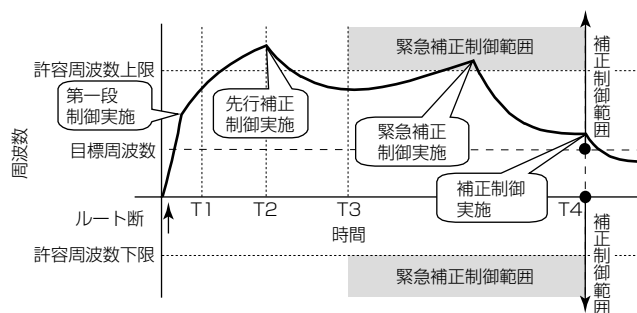


図12. 分離系統周波数維持制御実施時の周波数変化

Cで10秒周期で事前演算する第1段制御、及びISC-Cで事故発生後のデータを用いて事後演算する補正制御の2段階の制御で実現している。ただし、補正制御はさらに先行補正制御、緊急補正制御、補正制御の3段階としており、分離系統周波数維持のために、より細やかな制御を実施している。

平常時運用では、ISC-Pで30秒周期で事前演算しており、平常時の電圧プロフィールが最適になるよう集中型の制御を実現している。

一例としてルート断事故時の分離系統周波数維持制御の周波数変化のイメージを図12に示す。

5. む す び

最近、当社が製作を担当した3つの大規模系統安定化システムについて、導入の背景、特徴、構成・制御論理等を述べた。今後、再生可能エネルギーを始めとする分散型電源の普及・拡大、基幹送電線の増設や周波数変換容量の拡大による広域連系の強化等、我が国の電力系統は大きな変革期を迎えようとしている。これらに伴い、系統安定化システムに求められる機能・性能もますます高度なものになっていくと予想される。

当社は、長年培った系統解析技術と最新のICT(演算制御・通信技術等)を駆使して、これからも様々なニーズに応える系統安定化システムを提供し、電力流通の高信頼度維持に寄与していく所存である。

参考文献

- (1) 森田 誠, ほか: 広域系統安定化システムの再構築, 電気学会保護リレーシステム研究会資料, PPR-11-19, 95~99 (2011)
- (2) 喜納 篤, ほか: 小規模・独立系統向け集中型系統安定化システム(SSC)の開発と適用, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 31 (2011)
- (3) 木下貴史, ほか: 長野方面系統安定化(ISC)システムの開発(1)~(5), 電気学会全国大会講演論文集, 6-213~217 (2011)

新形ばね操作550kV GIS

貞國仁志* 山本茂之**
吉田大輔*
釣本崇夫**

Advanced Spring Operating 550kV GIS

Hitoshi Sadakuni, Daisuke Yoshida, Takao Tsurimoto, Shigeyuki Yamamoto

要 旨

ガス絶縁開閉装置(GIS)は、ライフサイクルコスト低減や保守省力化等の更なる向上に加え、世界規模での環境意識の高まりによって地球温暖化ガスであるSF₆(6フッ化硫黄)ガスの使用量や排出量の削減などといった低環境負荷への対応が求められている。

これらに対応するため、三菱電機では2010年に小型・軽量な国内初(注1)のばね操作ガス遮断器(GCB)適用550kV GISを開発・実用化した。さらに、これに先進技術を加えて、今回新形ばね操作550kV GISを製品化した。

550kV GISに適用するGCBは電流を遮断する機構に大きな力を必要とするため、これまでは油圧で操作する方式であったが、保守項目が多いことが課題であった。そこで、これまで300kV以下で多くの製品実績を持つ当社独自のト

ーションバー式ばね操作装置を高出力化し、550kV GCBのばね操作化を達成し保守項目の大幅な削減を実現した。トーションバー式ばね(ねじりばね)は、一般に用いるコイルばねに比べ、駆動時のばね自身によるエネルギー損失がほぼゼロであるため、エネルギー効率が極めて高く、高出力化に適している。

また、低損耗ノズル、磁気アーク駆動遮断方式断路器/接地開閉器、ハイブリッド絶縁方式等の先進技術を適用し、部品点数の削減や軽量化(現行器比:75%)による投入資材削減と温暖化ガスの使用量・排出量の削減(現行器比:70%)を可能とした。これによって低環境負荷・保守省力化・ライフサイクルコスト低減・耐震性能向上を達成した。

(注1) 2010年3月10日現在、当社調べ



550kV GIS試験状況(H-GISの例)

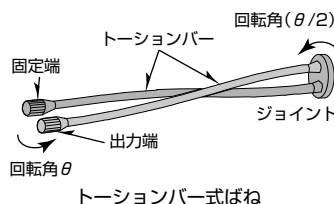
国内初のばね操作GCB(トーションバー式ばね採用)

質量75%, SF₆ガス量70%(現行器100%)

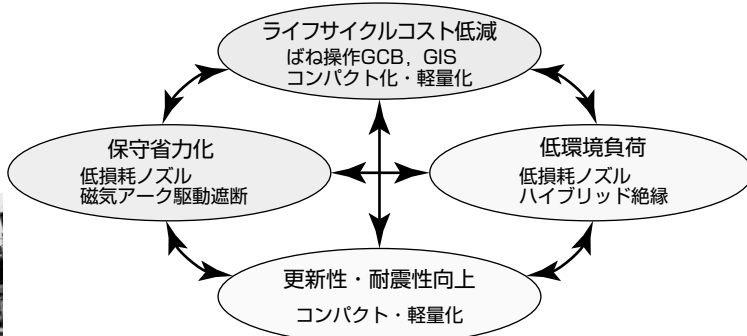
GCB点検項目・試験項目50%(現行器100%)



トーションバー式ばね操作装置



トーションバー式ばね



新形ばね操作550kV GISの特長

このGISは550kVクラスでは国内初のばね操作遮断器を採用しており、省エネルギー・環境負荷低減・信頼性向上を図った。この技術を実現するために、トーションバー式ばねを適用した当社独自の操作装置を採用することによって高出力化を達成した。また、新技術として、低損耗ノズル、磁気アーク駆動遮断方式、ハイブリッド絶縁方式を用いることで、部品点数の削減や軽量化(現行器比:75%)による投入資材削減と温暖化ガスの使用量・排出量の削減(現行器比:70%)が可能となり、低環境負荷・保守省力化・ライフサイクルコスト低減・耐震性能向上を達成した。

1. ま え が き

昨今、電力設備に対し低炭素化社会に向けて環境負荷低減、省エネルギーの進展、保守点検の省力化、ライフサイクルコスト低減、さらに、高経年器の更新を考慮したレトロフィット性の向上などの要請が強くなっている。

当社は、このような社会の要請、次世代の電力設備への期待に応えるため、先進技術の開発・実用化に努め、2010年に国内メーカーとして初めて550kVばね操作GCBを開発・実用化した。さらに、これに先進技術を加えて、今回新形ばね操作550kV GISを製品化した。

本稿では、次世代を担う新形550kV GISの開発コンセプトと先端技術の内容及び特長・適用メリットについて述べる。

2. 開発の経緯・コンセプト

図1に開発・製品化にいたる経緯を示す。

550kV GISは1995年から油圧操作を用いた1点切GCB(縦配置)を適用し、据付け面積の縮小・経済性向上を図り、基幹系統に多くの製品実績がある。

これと並行して当社では、2000年以降に次世代の550kV GISを目指し、1点切GCBを横形配置とし、あわせてGCB、変流器(CT)、断路器(DS)等を直線配置とし、構造の簡素化を図り、気中主母線対応のハイブリッドGIS(H-GIS)に最適で、ユニット一体輸送可能な550kV GISを2003年に開発・実用化した(図2)。

さらに、2010年には、これまで30年にわたって培ってきたばね操作技術をベースに、550kVばね操作GCBを開発し、保守点検の大幅な省力化を達成した。今回このばね操作

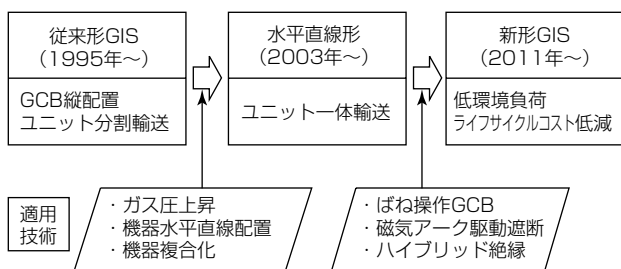


図1. 新形550kV GIS開発・製品化にいたる経緯

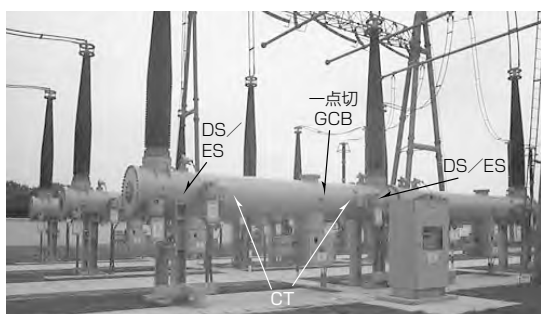


図2. 550kV水平直線形GIS

GCBに加え、各種先進技術適用によって環境負荷低減、保守点検の省力化、ライフサイクルコスト低減等を開発コンセプトとした新形550kV GISを製品化した。

3. GISの基本仕様と構成⁽¹⁾

新形550kV GISの基本仕様を表1に示す。GISの基本寸法諸元を決定する耐電圧仕様、定格電流、定格遮断電流等は国内外の要求仕様に対応できるように考慮した。

図3にH-GIS形態の1CB分を構成した新形GISの外観、図4に内部構造を示す。ばね操作(横形)GCBを基準に断路器(DS)、変流器(CT)等を直線配置し、構成機器を低層化配置した。

表1. 新形550kV GISの定格事項

GIS	定格電圧	550kV
	定格電流	～6,300A
	短時間耐電流	63 kA
	耐電圧	雷インパルス 1,675kV
		開閉インパルス 1,300kV
		短時間商用周波 740kV
GCB	定格ガス圧	
	0.5MPa (GCB以外)	
	0.6MPa (GCB)	
DS	定格遮断電流	63kA
	定格遮断時間	2 サイクル
ES	誘導電流 開閉	電磁 400V/1,600A
		静電 40kV/760A



図3. 新形550kV GISの外観

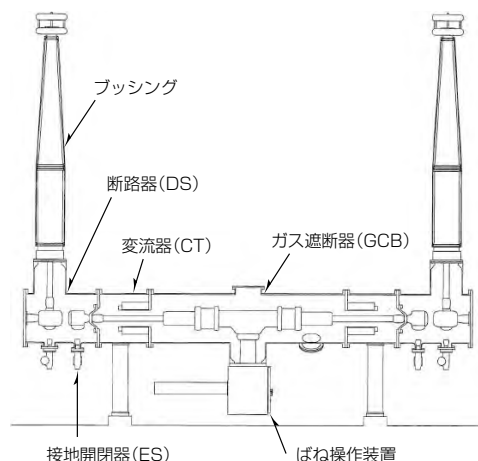


図4. 内部構造

4. 最新技術の適用

4.1 ばね操作GCB⁽²⁾

既に多数の製品実績を持ち、駆動力低減と軽量化可能な2点切消弧室とトーションバー式ばね操作装置の組合せによって、現行技術の延長で合理的に550kV 63kAまでのばね操作化を実現した(図5)。

4.1.1 消弧室の選定と設計

ばね操作装置の限られた駆動力に対して、必要な遮断性能を確保することがこの開発の主要課題である。これに対し、高い極間絶縁回復特性が要求される進み小電流遮断性能を満足させるため、362kV GCB消弧室を2点切構造とし、高速動作させる設計構造を採用した。

4.1.2 ばね操作装置

通常用いられるコイルばねはエネルギー蓄勢効率が低く、高出力化するためには極端に大型化する必要があったが、エネルギー蓄勢効率の高いトーションバーを用いることによって高出力の操作装置を合理的に構成することを可能とした(図6)。

550kVばね操作GCB開発にあたっては、現在300/240kV GCBに適用され、これまで8,000台以上の豊富な製品実績を持つトーションバー式ばね操作装置をベースにすることで信頼性を確保しつつ130%高出力化を図った。

ばね操作装置はグリス塗布・交換を不要としたメンテナンスフリーを指向したものであり、あわせて油圧操作に比べて部品点数・シール箇所が大幅に少ないことから、故障率が低く信頼性が非常に高い操作装置である。

4.1.3 低損耗ノズルの適用⁽³⁾

GCB消弧室に用いるノズルは微量充填材入りPTFE(フッ

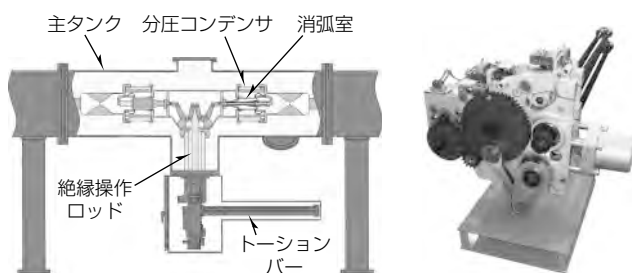


図5. GCB内部構造図

図6. トーションバー式ばね操作装置

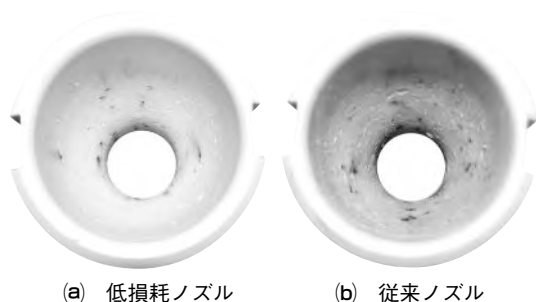


図7. 大電流遮断後のノズル

素樹脂)からなり、電流遮断時のアークによる消耗がその後の遮断性能や耐電圧性能に与える影響が大きい。そこで、充填材の配合変更によって、アーク光のPTFEへの侵入を制御することで、大電流遮断時(図7)及び負荷電流遮断時の損耗を抑制した。これによって、負荷電流遮断の許容回数(従来2,000回)を5,000回まで延長可能としたため、GCB開放点検の延伸による保守点検の省力化と環境負荷低減が期待できる。

4.2 DS, ESの磁気アーク駆動遮断方式⁽⁴⁾

断路器(DS)、接地開閉器(ES)の電流遮断方式には、低操作力で遮断電流に依存せず、安定したアーク駆動が可能な磁気アーク駆動方式を適用した。この方式は永久磁石の磁界で電流遮断アークを駆動し、アークをSF₆ガスで冷却し遮断する方式であり、操作力(開閉速度)の低減と小型・構造簡素化を図ることができる(図8)。これによって図9に示すようにアークの開離度が1/5程度と大幅に短縮でき、コンタクトの損耗軽減による長寿命化及びアーク分解生成物の発生低減による絶縁信頼度向上が期待できる。

4.3 ハイブリッド絶縁方式⁽⁵⁾

ハイブリッド絶縁方式は、図10に示すように高圧導体表面に固体絶縁被覆を施したもので、絶縁性能の弱点となる電極表面上の微小突起を絶縁物で覆うことで放電を抑制するものである。これによって、絶縁性能は裸電極に比べ約150%に向上する。この方式を変流器(CT)部の導体に適用することで、接地電位となるCT収納ケースの小型化によるCT本体、CTタンクの小型化を図った。

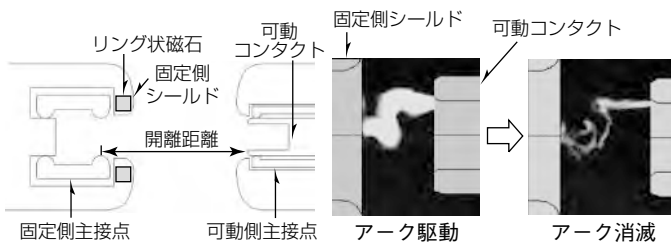


図8. アーク駆動状況

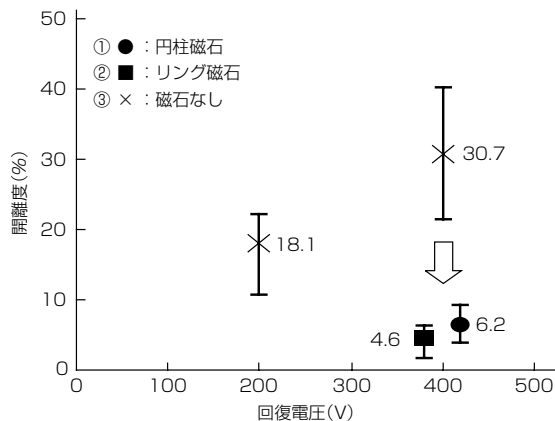


図9. DSループ電流開閉試験結果

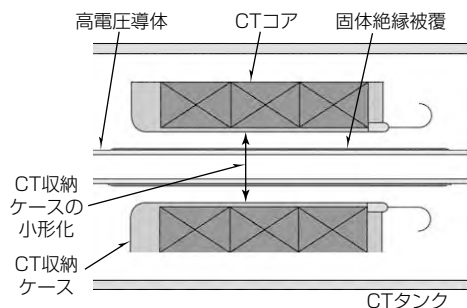


図10. ハイブリッド絶縁

表 2. 検証項目

検証内容	検証項目
絶縁性能	雷インパルス耐電圧試験
	開閉インパルス耐電圧試験
	短時間商用周波耐電圧試験
	部分放電試験
通電性能	温度上昇試験
	短時間耐電流試験
機械強度性能	輸送試験(急発進, 急停止など)
	耐震解析
電流開閉性能	ループ電流開閉試験
	誘導電流開閉試験
開閉性能	高低温試験
	連続開閉試験



図11. 輸送試験状況

5. 検証試験⁽⁶⁾

新形550kV GISの検証項目の一覧を表2に示す。絶縁・通電・電流開閉性能等の基本性能検証である形式試験に加え、輸送・高低温試験等の実用性能検証として参考試験を実施した。

定格電流4,000A, 6,300Aの1.1倍の4,400A, 6,930Aを通電し、温度上昇許容値内であることを確認した。

ブッシングを除いた実輸送形態をトレーラーに積載し、輸送試験を実施した(図11)。急発進・急停止及び悪路模擬走行の各条件で、輸送管理加速度(上限)5Gに対するGIS各部の発生応力は、許容値以下で十分な安全率を持っており、良好な結果を得た。

6. 適用メリット

新形550kV GISは、次に示す特長と適用メリットを持つ(図12)。図13に特長比較を示す。

- (1) GCBのメンテナンスフリー化による保守点検の大幅な省力化(保守点検項目は現行器比50%)
- (2) GISユニット一体輸送範囲の拡大による据付工期の大幅な短縮, 更新性向上(据付け工期は現行器比50%)

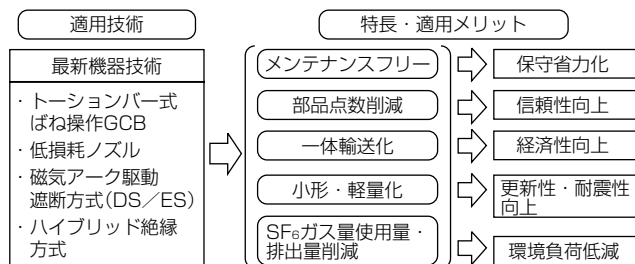


図12. 適用技術と特長・適用メリット

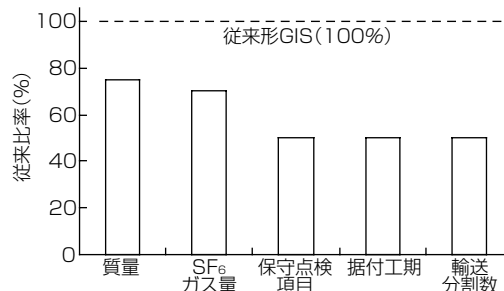


図13. 特長比較(従来比)

- (3) 小型・軽量・構造簡素化・部品点数削減による低環境負荷(温暖ガスの使用量・排出量が現行器比70%)、耐震性向上, 経済性向上(質量は現行器比75%)

なお、これまでハイブリッド形(H-GIS)構成で述べたが、主母線もGIS化したフルGIS構成での適用も可能である。

7. む す び

電力設備に対するライフサイクルコスト低減, 保守省力化, 低環境負荷への対応が強く求められる中、これに対応できる新形550kV GISの開発・製品化について述べた。当社は今後とも保守省力化, 工期短縮, 経済性・信頼性向上を追求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) 中内慎一郎, ほか:ばね操作GCB適用新形550kV GISの開発(1), 電気学会全国大会, No.6, 489~490 (2011)
- (2) 吉田大輔, ほか:550kV 63kAばね操作GCBの開発, 電気学会全国大会, No.6, 374~375 (2010)
- (3) 山下 透, ほか:ガス遮断器用低損耗ノズルの開発, 電気学会全国大会, No.6, 347~348 (2009)
- (4) 柏木紘典, ほか:永久磁石を用いた磁気アーク駆動遮断方式遮断器の開発, 電気学会全国大会, No.6, 344 (2010)
- (5) 吉村 学, ほか:電極への絶縁被覆によるSF₆ガス絶縁システムの高耐電圧化, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 326 (2010)
- (6) 中内慎一郎, ほか:ばね操作GCB適用新形550kV GISの開発(2), 電気学会全国大会, No.6, 491~492 (2011)

新型デジタルリレー“MELPRO-CHARGE2”

匹田猛雄* 松澤 勝*
山根定章*
片山善博*

New Digital Relay "MELPRO-CHARGE2"

Takeo Hikita, Sadaaki Yamane, Yoshihiro Katayama, Masaru Matsuzawa

要 旨

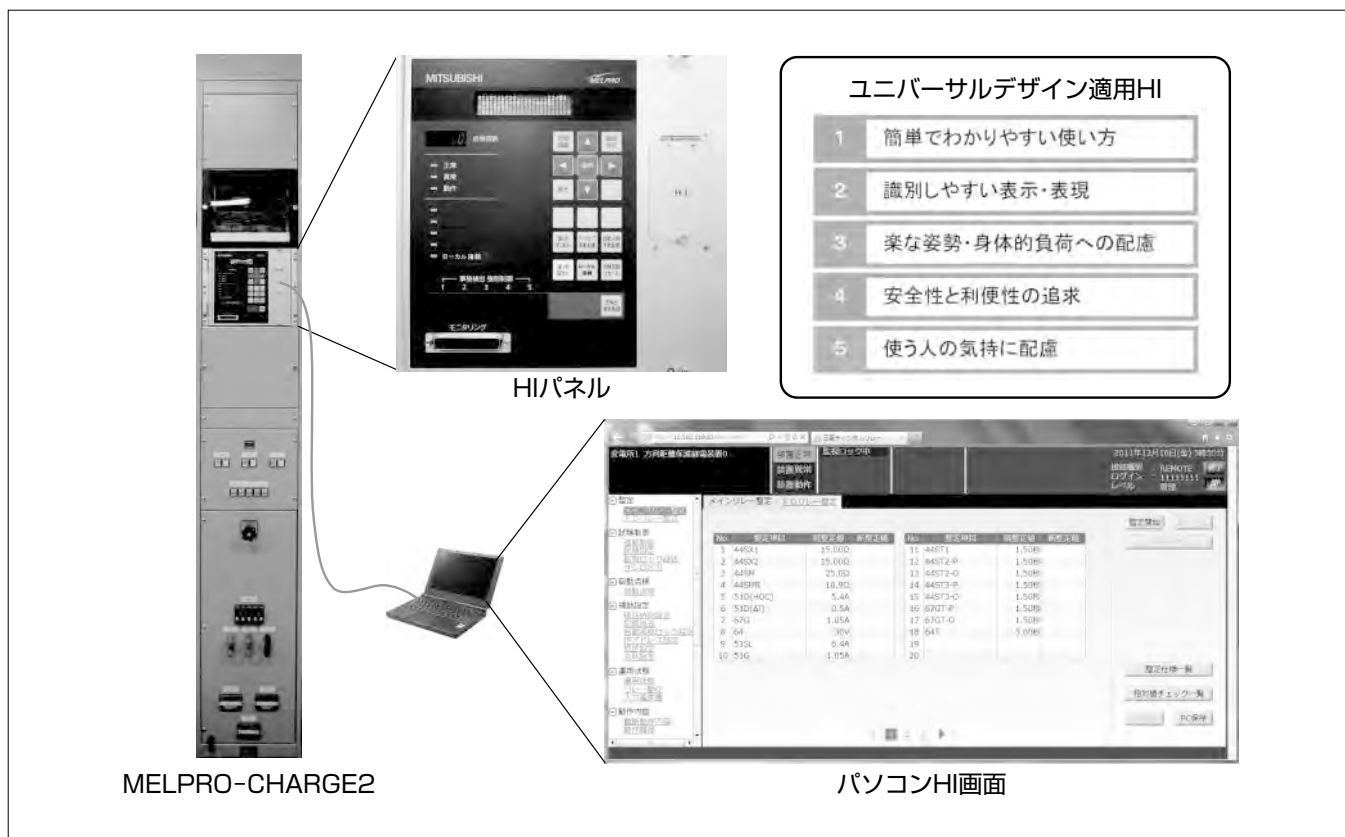
このたび三菱電機が開発した装置形デジタルリレー“MELPRO-CHARGE2”は、現行“MELPRO-CHARGE”の開発コンセプトである“コンパクト”“運用保守性向上”“アダプティブ保護機能”“信頼度向上”“拡張性”“環境に配慮”の各項目を継承しつつ、昨今の保護リレーを取り巻く環境やユーザーニーズの変化に対応できるよう機能・性能を向上させたものである。

MELPRO-CHARGE2では、ハードウェア性能を向上させつつ部品点数を削減することによって、消費電力を低減した。また、ユニバーサルデザインの考え方を適用したHI(Human Interface)による視認性・操作性の改善や、自動監視機能の見直しによって装置の一過性故障に対するリカバリー方法を改善し装置誤不動作率の低減を図るなど、

ユーザーの日常運用保守業務の効率化にも寄与できるものとする。

さらには、現行MELPRO-CHARGEとのPCM(Pulse Code Modulation)キャリアリレーの異機種互換性を確保することで送電線の端子増設時のユーザー／メーカー双方の負担の軽減や、デジタルユニット部の部分更新にも対応可能なユニット構造の採用等、長期の運用保守についても対応可能な設計としている。

新機種への切り替え時には信頼性の確保が課題となるが、MELPRO-CHARGE2では、現行MELPRO-CHARGEの実績ある資産を有効に活用可能な構成とすることで解決している。



ユニバーサルデザインを適用した“MELPRO-CHARGE2”のHI

運用保守機能向上のため、HIにはユニバーサルデザインの考え方を適用し、視認性・操作性を向上させている。

1. ま え が き

当社の現行デジタルリレー“MELPRO-CHARGE(以下“MELPRO-C”という。)”は、2000年に開発後10年以上が経過した。その間保護リレーを取り巻く環境は変化し、電力系統の特性・構成の変化に伴う保護機能へのニーズだけでなく、保護リレーに係る業務の負担低減や長期にわたり運用保守できることが求められるようになってきた⁽¹⁾。これらに対応するため、様々な機能・性能向上を図りつつ、MELPRO-Cで蓄積した資産を有効に活用し信頼性を確保した新型デジタルリレー“MELPRO-CHARGE2(以下“MELPRO-C2”という。)”を開発した。

本稿では、MELPRO-C2の開発コンセプト、及びコンセプトを実現するための各要素の開発内容について述べる。

2. 開発コンセプト

2.1 コンセプトとその背景

現行MELPRO-Cの開発コンセプトは、シリーズ名である“CHARGE”に込められている。つまり、“C：Compact(コンパクト)”“H：Human-Friendly(運用保守性向上)”“A：Adaptive(アダプティブ保護機能)”“R：Reliable(信頼度向上)”“G：Growing(拡張性)”“E：Ecology(環境に配慮)”である。MELPRO-C2でもこれらのコンセプトを継承しつつ、さらに、将来の保護リレーに望まれる機能・性能を見据え、重点的に取り組むべき項目として“環境負荷の低減”“保守性の向上”“設備更新の容易化”を挙げた⁽²⁾。

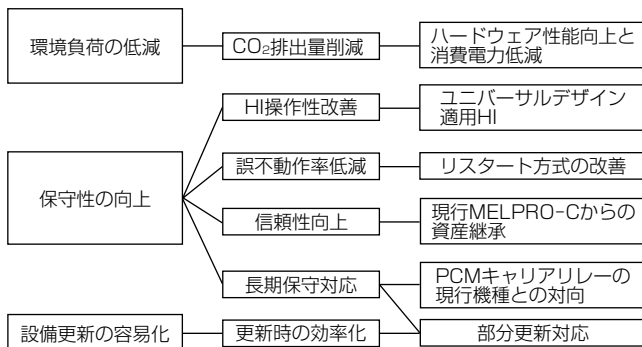


図1. 開発コンセプト

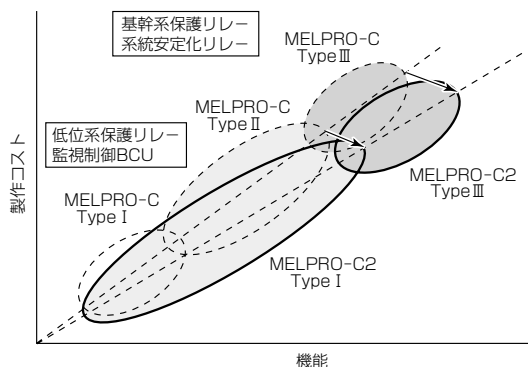


図2. MELPRO-C2シリーズラインアップ

これら3つのコンセプトを実現する手段として、“ハードウェア性能向上と消費電力低減”“ユニバーサルデザイン適用HI”“リスタート方式の改善”“現行MELPRO-Cからの資産継承”“PCMキャリアリレーの現行機種との対向”“部分更新対応”の6つの要素を採り入れた(図1)。

2.2 シリーズ展開

現行MELPRO-Cは、低位系リレー及び監視制御BCU(Bay Control Unit)用の“Type I”，Type Iに拡張CPU基板を追加した“Type II”，基幹系リレー及び系統安定化リレー等の大規模装置に適用する“Type III”の3種類で構成していたが、MELPRO-C2では、CPU基板の高性能化によって従来のType II相当の性能を1枚のCPU基板で実現し、“Type I”と“Type III”の2種類とした(図2)。

3. 各要素の開発内容

この章では、2.1節で挙げた各コンセプトを実現する開発要素について、その内容を述べる⁽²⁾⁽³⁾。

3.1 ハードウェア性能向上と消費電力低減

CPU基板について、現行MELPRO-Cのソフトウェア処理時間をCPU内部演算処理、主メモリアクセス、外部システムバスアクセスに分類すると、主メモリアクセスが大半を占めており、処理性能上のボトルネックであることが従来の課題であった。このため、MELPRO-C2では主メモリアクセスが高速な新規プロセッサ及びメモリアーキテクチャを採用し、CPU基板単体での処理性能を約3倍に向上させた。また、MELPRO-CではCPLD(Complex Programmable Logic Device)など数チップで構成していたプロセッサ周辺回路を、フラッシュタイプFPGA(Field-Programmable Gate Array)1チップに集約し部品点数を削減した。さらに、CPU基板性能向上に伴い、1装置あたり使用するCPU基板の枚数も削減した。この結果、デジタルリレーユニット部での消費電力を約30%低減した。

3.2 ユニバーサルデザイン適用HI

(1) パソコンHIの改善

MELPRO-Cと同様に、リレー側に実装したWebサーバ機能とパソコン上のブラウザソフトウェアを利用する構成を踏襲した。また、MELPRO-Cでの操作性を継承しつつ、ユーザビリティ向上のためユニバーサルデザインの考え方を採り入れ、視認性と操作性を改善したHI画面を開発した(図3)。主な改善点を次に挙げる。

- ①見やすさの向上：使用するパソコンの解像度に応じて適度な視認性・操作性を確保するため、文字サイズを3段階で変更可能とした。
- ②誤認識防止：画面全体の配色の見直しによって視認性を向上させた。
- ③操作の容易化：設定操作ボタンを画面右側に集中配置することで操作性を向上させた。

④誤操作防止：操作できない状態にある時はボタンを押せない状態（グレーアウト）にすることを徹底し、ユーザーが操作に迷ったり、誤った操作をすることのないようにした。

(2) HIパネルの改善

日常巡視点検や装置故障対応等の業務効率改善のため、HIパネルについても次のような改善を行った（図4）。

①全体の配色及び操作ボタンや表示用LED（Light Emitting Diode）の配置を見直し、視認性と操作性を向上させた。

②巡視点検時の一次確認用として、HIパソコンを接続することなく装置状態を確認できる簡易表示部の表示文字数を拡大し、より多くの情報を一度に確認できるようにした。

③巡視点検時の必須確認項目である自動点検回数を常時表示可能のように専用表示とした。

④LAN接続口の大きさを見直し、HIパソコン使用時のLANケーブルを接続しやすいようにした。

3.3 リスタート方式の改善

デジタルリレーは演算処理部・メモリ部等、多数のICによって構成される。これらICは、ごくまれにホットキャリアによる誤動作やソフトウェア等を引き起こすことで、一時的な故障（一過性故障）の要因となっている。この対策として、従来、保護リレー機能を正常に復帰させることを目的に、主に演算処理部の不良を検出した場合にはCPUリセットによるリスタート処理を実施してきた。

MELPRO-C2では、一過性故障の過剰検出による不要な装置停止の低減を目的に、リスタート方式の見直しを行った。リスタートの範囲を不良検出した個別CPU基板に限

定せず全CPU基板を対象とするほか、入出力部もリセット対象とすることも可能とした。これによって不良検出した部位が本来の故障原因でない場合に有効な対応となると考えられる。また、電源活殺によって故障復帰し、その後故障が再現しないケースについても対応を検討し、不良検出時に装置電源を自動活殺する機能も組み込み可能とした（図5）。装置電源自動活殺機能の組み込みについては、ニーズに合わせて選択可能としている。

3.4 現行MELPRO-Cからの資産継承

機種切り替え時の信頼性確保のため、MELPRO-Cで蓄積した資産を有効に活用できる構造とした（図6）。

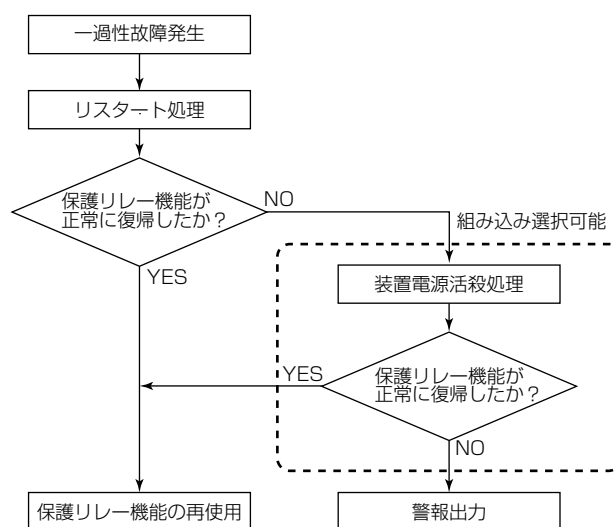


図5. リスタート処理の改善

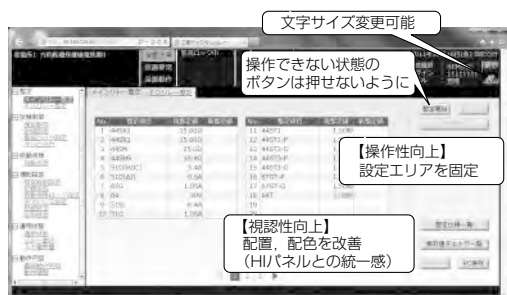


図3. パソコンHI画面例



図4. HIパネル

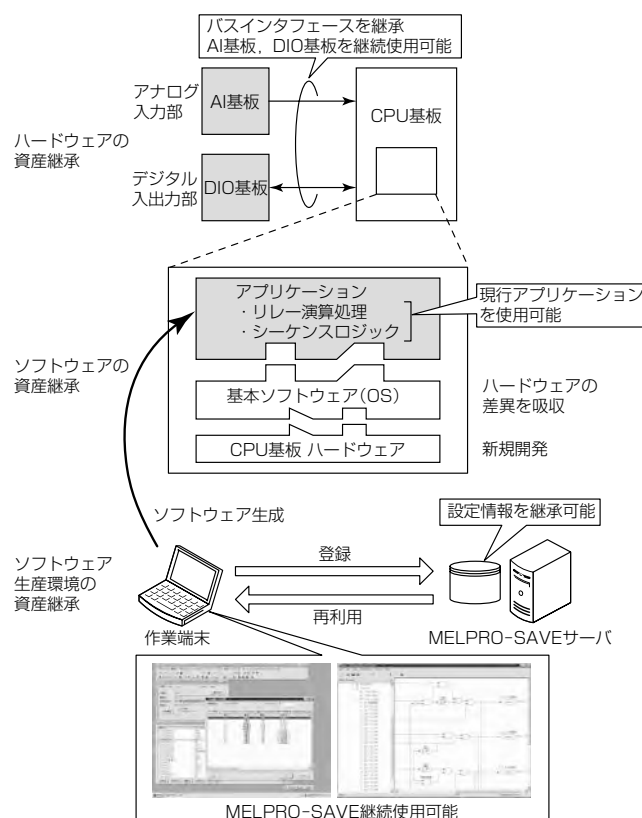


図6. 現行資産の継承

(1) ハードウェアの資産継承

CPU基板とアナログ入力部(AI)及びデジタル入出力部(DIO)のインタフェースをMELPRO-Cと同一とし、MELPRO-C2でも現行AI基板、DIO基板を継続して使用可能とした。

(2) ソフトウェアの資産継承

MELPRO-Cで実績のあるリレー演算処理、シーケンスロジック等のアプリケーションソフトウェア資産の継続使用を可能とするため、新規開発したハードウェアの現行ハードウェアとの差異を基本ソフトウェア(OS)によって吸収し、アプリケーションからは機種移行に際しインタフェースに差異が生じないようにした。

(3) ソフトウェア生産環境の資産継承

ソフトウェア生産環境であるエンジニアリングツール“MELPRO-SAVE⁽⁴⁾”も、MELPRO-C2に適用可能とした。さらに、個々のアプリケーションソフトウェアモジュールだけでなく、各モジュールを組み合わせて所望の動作を行わせるためのソフトウェア設定情報をもMELPRO-C2へ継承利用することで、機種移行に関する変更部分を極小化し、ヒューマンエラーを防止することができるようになった。

3.5 PCMキャリアリレーの現行機種との対向

従来、PCMキャリアリレー適用系統における端子増設があった場合、フィルタ性能や伝送処理の差異によって、異機種間では対向接続することができなかった。そのため、運用開始からかなりの時間が経過した後に計画される端子増設時には、既設装置と同じ機種を納入するか、又は既設装置も含め全端子を新機種にリプレースする必要があった⁽⁵⁾。

MELPRO-Cでは伝送制御回路をSRAM(Static Random Access Memory)タイプFPGAで構成している。MELPRO-C2ではフラッシュタイプFPGAを採用することとしたが、MELPRO-Cの伝送制御回路はそのまま継承可能である。さらに、アナログ入力部に要求される精度は従来機種と同等で十分であると判断し、アナログフィルタ特性についても継承することで、MELPRO-Cとの対向を可能にした(図7)。これによって、装置納入後の長期保守にも寄与できるものとする。

3.6 部分更新対応

MELPRO-CはCPU、DIOの各基板間をコネクタケーブルで接続しており、このコネクタケーブルと裏面の電源線の接続を解除すればユニットを取り外せる構造としている。MELPRO-C2ではこの基本構成を継承しつつ、さらに、ユニット構造を外枠と内部ラックの二重枠構造とすることで、内部ラック(CPU、DIOユニット)の脱着をより安全かつ容易に行えるように改良した(図8)。これによって、MELPRO-Cに比べてユニット単位での更新を容易に行うことができるようになった。

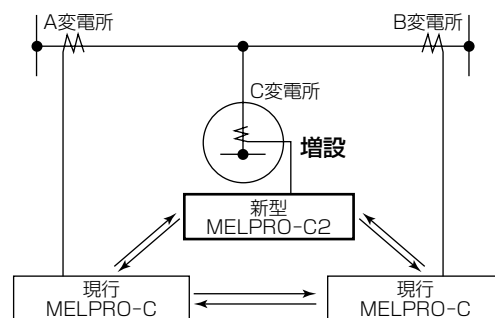


図7. 現行機種とのPCMキャリアリレー対向



図8. 二重構造ユニット

4. む す び

機能・性能・HI操作性の向上を図りつつ、現行資産を有効に活用して信頼性を向上させた新型デジタルリレーMELPRO-CHARGE2の開発について述べた。

新型デジタルリレーでは異機種間のPCMキャリアリレー対向やデジタルユニット部の部分更新対応等、長期の運用保守にも対応できる構成とし、新機種への切替え時の課題を解決した。

参 考 文 献

- (1) 保護リレーの新しい機能・性能，電気協同研究，**65**，No.2 (2009)
- (2) 松澤 勝，ほか：新型ディジタルリレーMELPRO-CHARGE2の開発コンセプト，電気学会全国大会講演論文集，6-240 (2012)
- (3) 安井有香，ほか：処理性能向上と信頼性確保を実現した新型ディジタルリレーMELPRO-CHARGE2の開発，電気学会全国大会講演論文集，6-241 (2012)
- (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)
- (5) 伊藤健司，ほか：保護制御装置更新に対応した最新技術，三菱電機技報，**83**，No.11，689～692 (2009)

次世代電力系統制御システム

藤田淳文* 鶴 薫**
黒川隆久*
飯塚 剛*

Next Generation EMS/SCADA (Energy Management System/Supervisory Control and Data Acquisition)

Atsufumi Fujita, Takahisa Kurokawa, Tsuyoshi Iizuka, Kaoru Tsuru

要 旨

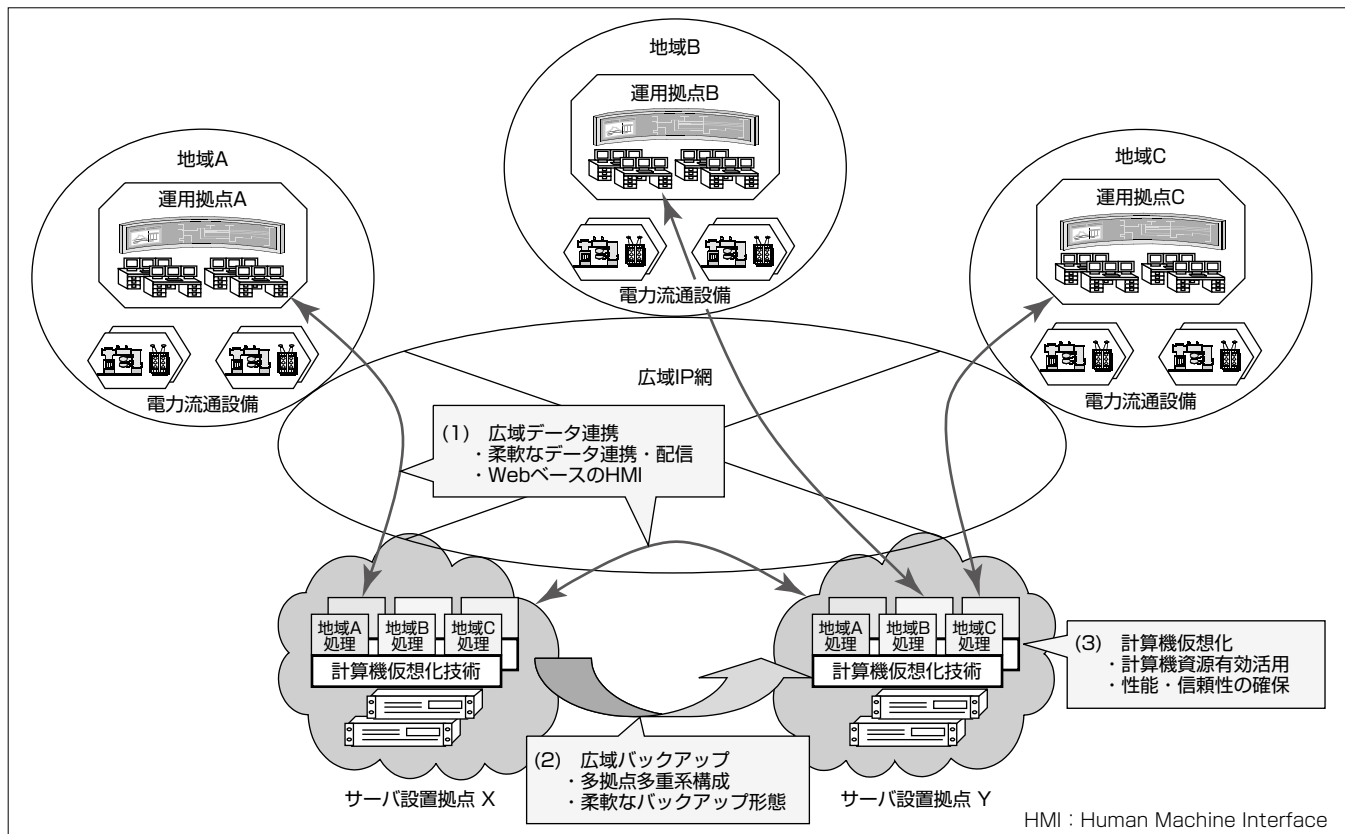
電力系統制御システムは、電力系統の状態を常時監視し、電力流通設備を合理的かつ効率的に運用して良質な電気を安定的に供給する系統運用を支えるITシステムであり、需給バランスに関する指令などを行う中央給電指令所、高圧の送電網や変電所等の監視制御を行う基幹給電制御所、地域の送電網や変電所等を監視制御する給電所・制御所等で構成される。これらのシステムに対し、近年では、被災時にも監視制御業務が継続できる信頼性向上、コストの削減、分散型電源大量導入に対する各種系統運用機能の高度化等のニーズが高くなっている。

信頼性向上とコスト削減の要求に対しては、三菱電機ではこれまで、運転員が駐在する複数の運用拠点と、監視制御処理を実行する監視制御サーバの設置拠点を分散配置した広域分散型システムを市場投入することによって、シス

テムの最適化を図ってきた。次世代電力系統制御システムでは、さらに、多重化した監視制御サーバ間を高度に広域連携することによって、サーバ拠点被災時にも他のサーバ拠点でシステムの運転が継続可能な高い信頼性を確保するとともに、計算機仮想化技術を適用することによってシステム全体のライフサイクルコストの削減を図る。

本稿では、複数の運用拠点、サーバ設置拠点を広域分散させた次世代系統制御システムの要素技術である、“広域データ連携技術”“広域バックアップ技術”の開発と、“計算機仮想化技術”による計算機資源の有効活用 の取組みについて述べる。

今後は、さらに、分散型電源の導入量拡大や系統運用の複雑化の進展に対する運転員支援機能の拡充を図り、電力の安定供給に寄与していく。



次世代電力系統制御システム

次世代電力系統制御システムでは、広域分散型システムを更に発展させ、システム全体での信頼性・柔軟性の向上、ライフサイクルコストの削減を実現した。開発にあたっては、当社のもつアプリケーション及びシステム構築に関わる各種技術と、最新のシステムインフラ技術を融合し、(1)広域データ連携、(2)広域バックアップ、(3)計算機仮想化についての強化を行った。

1. ま え が き

ITシステムを支える計算機やネットワーク等のシステムインフラ技術の進歩は著しく、これらの最新技術を電力系統制御システムに活用することによって、信頼性やコスト削減のニーズに対応することが期待されている。当社では、電力系統制御システムという高信頼性と応答性能が要求される分野で、最新のインフラ技術を適用し、高信頼性とライフサイクルコスト削減を両立させた次世代電力系統制御システムを開発し、順次市場に投入している。

本稿では、計算機システムを高度に広域連携することによる信頼性の確保と、計算機仮想化技術を適用したコスト削減の取組みについて述べる。

2. 背 景

2.1 電力系統制御システムの変遷

電力系統制御システムは、電力会社の電力流通設備を監視制御するためのITシステムであるが、技術とニーズの変遷とともに、システム構成も次のように変化してきた(図1)。

(1) 集中型システム

従来は、監視制御処理を実行する計算機群と、運転員が用いる監視制御端末(監視盤、制御卓)が同一拠点に設置され、主計算機によって集中監視制御していた。

(2) オープン分散型システム

1995年ごろから、各拠点の計算機は産業用計算機による集中型のシステム構成から、汎用サーバを用いて機能ごとに分散処理する、オープン分散型のシステム構成に移った。

(3) 広域分散型システム

2005年ごろからは、監視制御サーバが置かれるサーバ設置拠点と運用拠点を分離し、広域IP(Internet Protocol)網で接続する広域分散型システムを開発して⁽¹⁾、各電力会社に納入してきた。

現在では、東日本大震災を機に、拠点被災対策を含むシステムの信頼性の向上と、更なるライフサイクルコスト削減が求められている状況である。

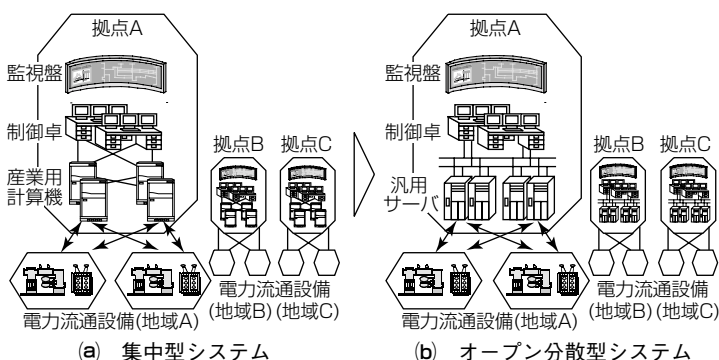


図1. 電力系統制御システム構成の変遷

2.2 次世代系統制御システムの開発コンセプト

当社では、これらのニーズに対応するために、次のコンセプトで、広域分散型システムを更に発展させた次世代電力系統制御システムを開発し実用化した。

(1) 被災を考慮したシステム信頼性の向上

広域IP網をベースに広域連携したシステムを構築することによって拠点の設置場所の制約をなくし、柔軟なシステム構成を可能にした。さらに、拠点間で広域にバックアップすることによってシステム全体の信頼性を向上させた。

(2) ライフサイクルコストの削減

最新のシステムインフラ技術を適用して、計算機資源(CPU、メモリ、ディスク、LAN)を有効活用することで、システム全体でのライフサイクルコストを削減した。

2.3 課 題

開発コンセプトの実現にあたり次の課題があった(図2)。

(1) 広域データ連携での課題

通常、広域IP網の運用では、伝送帯域、通信方法等に制約があるため、拠点間のデータ連携が課題となる。例えば、系統状態などのリアルタイムに変化するデータを、多数の計算機に対して同報通信するために用いてきたブロードキャスト通信が使用できないなどへの対応が必要である。

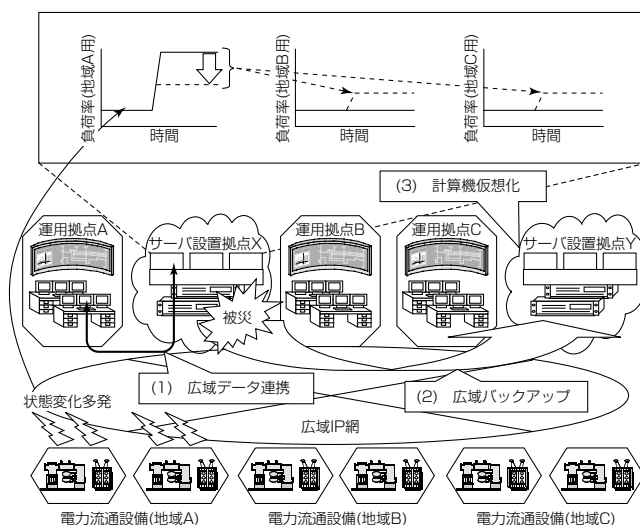
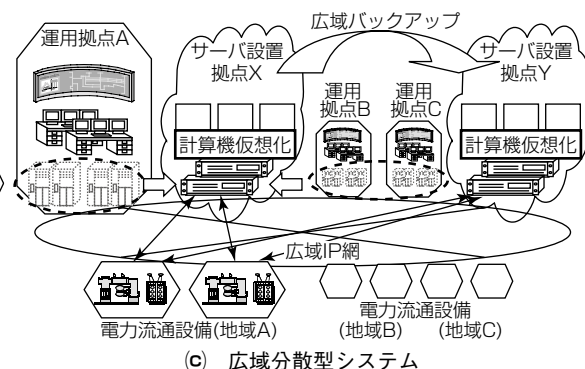


図2. 次世代系統制御システムの課題



(2) 広域バックアップでの課題

万一、サーバ設置拠点又は運用拠点が被災した場合でも、監視制御処理の継続が求められるため、広域IP網を活用した拠点間のバックアップ方法が課題となる。

(3) 計算機仮想化での課題

広域分散型システムでは、サーバを集中設置することができ、計算機仮想化技術によってサーバ統合を実現することでコスト削減が期待できる。地域用処理間でサーバを共有する際に、計算機資源の有効活用と、性能及び信頼性の確保が課題となる。

3. 次世代電力系統制御システムの開発

次世代電力系統制御システムの開発では、システムインフラにおける新技術・新方式を積極的に評価・導入して、これらの課題を解決した。

3.1 広域データ連携の実現

(1) 柔軟なデータ連携・配信

広域IP網上のデータ連携方法として、マルチキャスト通信方式やVPN(Virtual Private Network)等が通信インフラでサポートされない環境又は狭帯域の環境でも拠点間通信が柔軟に実現できるように、広域IP網上はユニキャスト通信方式だけで効率的に同報通信を可能にする機構を開発した。また、セキュリティに配慮し、暗号化やIP分離等の対策機能を実装した。

(2) WebベースのHMI

広域分散型システムでは、①伝送帯域の制約、②通信プロトコルの制約、③遠隔地のソフトウェア保守容易化の考慮が必要となる。そこで次のようにWebベースのHMIを実現し、操作性の向上とともに、これらの課題を解決した。

①監視制御端末へデータを直接配信するのではなく、一旦、HMI用サーバで画面を生成して変化部だけを配信することによって広域IP網に流れるトラフィックを削減した。

②汎用のユニキャスト通信(HyperText Transport Pro-

tocol:HTTP)だけで通信を実現し、特殊な通信ポートの開設を不要とした。

③制御卓のソフトウェア更新はサーバ設置拠点からの自動ダウンロードとし、機能拡張や制御卓増設を容易にした。

3.2 広域バックアップの実現

(1) 多拠点多重系構成

拠点被災時に監視制御処理を継続するためには、拠点間で広域バックアップする必要があるため、複数の拠点をまたがった多重系構成を可能とした。

(2) 柔軟なバックアップ形態

各電力会社のシステムの特性に応じて採用できるよう、次の3つのバックアップ形態に対応可能とした(図3)。

①専用バックアップ方式

通常の運転拠点とは別に、構成を簡素化した専用のバックアップ拠点を配置し、被災時には必要最低限の運転業務を継続可能とする方式

②相互バックアップ方式

平常時、各拠点は個別の監視制御対象を管轄するが、拠点被災時には、他方の拠点で処理を継続可能とする方式

③分散バックアップ方式

各サーバ設置拠点は同一の監視制御対象を管轄し、運用拠点はどちらのサーバ設置拠点とも接続可能とする方式

3.3 計算機仮想化技術の適用

計算機仮想化技術を適用して⁽²⁾、複数地域用のサーバを統合して台数を削減する。また、サーバ保守期間切れに伴うサーバハードウェア交換で、OSに対して新旧ハードウェアの差異を隠蔽でき、ソフトウェア資産(OS、ミドルウェア、アプリケーション)の継承が容易になり、ライフサイクルコスト削減に貢献する。

電力系統制御システムに計算機仮想化技術を適用するにあたり、次に示す設計及び機能強化を行った。

(1) 計算機資源の有効活用

複数の地域用処理で計算機資源を共有して有効活用し、

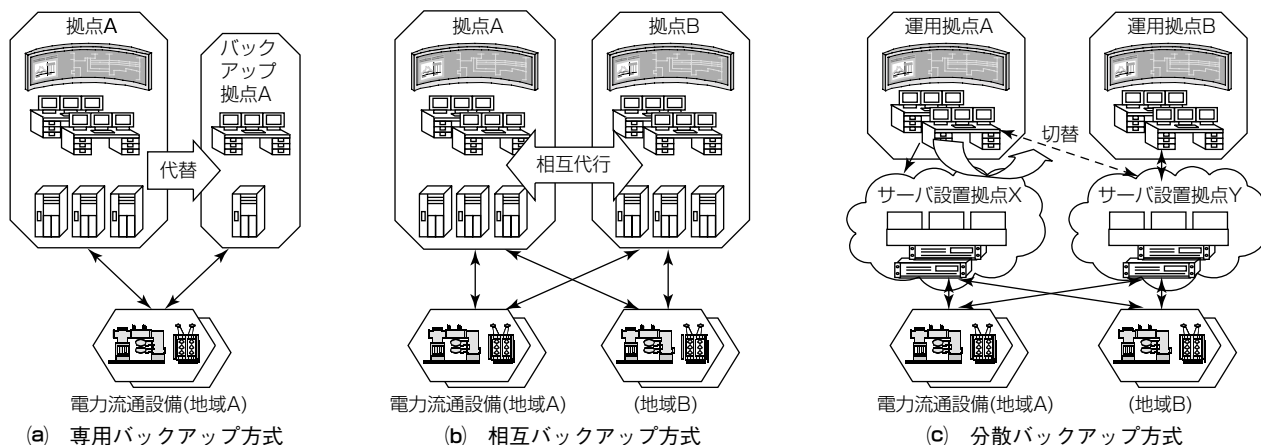


図3. 柔軟なバックアップ形態

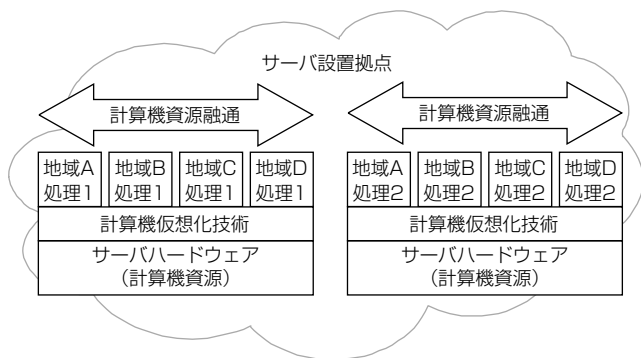


図4. 計算機資源の有効活用

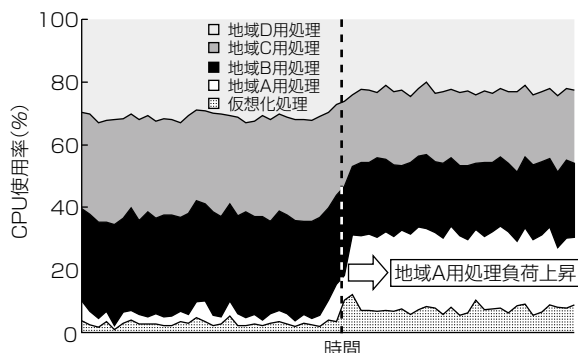


図5. CPU資源融通の結果(過負荷時の例)

かつ性能要件を満足させるため、次の対策を実施した⁽³⁾。

①仮想化オーバーヘッドの削減

計算機仮想化技術の適用では、一般的に仮想化処理によるオーバーヘッドが課題となるが、OSが仮想化を意識する準仮想化方式を採用して性能劣化を抑えた。

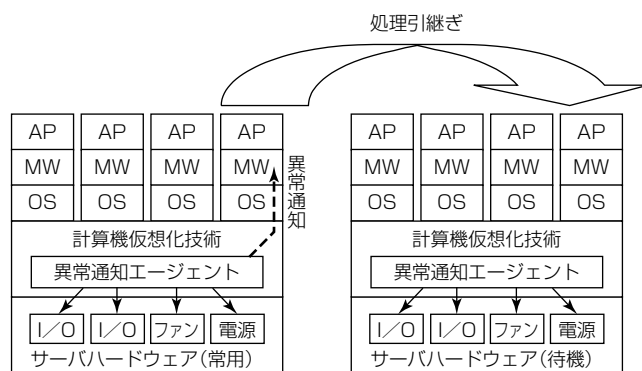
②処理の最適配置

落雷などの局地的な系統事故による処理負荷増大時には、計算機資源の融通が必要になるが、同一地域用の処理を1台のサーバに統合せず、異なる地域用の処理を統合する構成として、融通できる計算機資源を確保可能とした(図4)。

③計算機資源の融通

各地域用処理が競合する場合でも性能要件を満足させるために、必要最低限の計算機資源割当てを保証した上で、余裕がある場合には負荷の高い地域用処理に融通可能とした。

これらの対策によって、サーバ台数を大幅に削減しながら、処理負荷増大(監視制御対象の状態変化増大による)時にも、迅速かつ安定した処理を実現した。図5に過負荷時のCPU資源融通の例を示す。地域A用処理として監視制御の負荷試験を行いながら、地域B～D用処理に連続最大負荷(ビジーロード)を与えた。地域A用の負荷が軽いと他地域用にCPU資源を融通し、地域A用の負荷が増大すると地域A用にCPU資源を確保する。また、仮想化処理に割かれるCPU負荷は十分小さい(全体の1/10程度以下)ことが分かる。



AP: アプリケーションプログラム, MW: ミドルウェア

図6. 異常通知エージェント

(2) 信頼性の確保

複数の地域用処理で計算機資源を共有するため、サーバ故障による影響拡大がリスクとなるが、次の方策を講じることで、信頼性を確保した。

①異常通知エージェント

計算機仮想化技術を適用すると、OS上からはハードウェアの異常を直接検知できなくなるが、仮想化階層で検出した異常を各OS上のミドルウェアに通知する異常通知エージェントを開発し、従来と同様のミドルウェアによる待機系への処理引継ぎを可能とした(図6)。

②処理の引継ぎ確認

サーバでの処理継続に影響のあるハードウェア故障要因を洗い出し、それらを仮想化階層で模擬的に発生させ、処理の引継ぎが正常に動作することを確認した。

4. む す び

次世代電力系統制御システムでは、最新技術を積極的に適用し、広域データ連携、広域バックアップ、計算機仮想化を実現し、電力会社のニーズである高い柔軟性及び信頼性とライフサイクルコスト削減を両立させた。具体的には、柔軟なデータ連携・配信、WebベースのHMI、多拠点多重系構成、柔軟なバックアップ形態、計算機資源有効活用、性能・信頼性の確保に関する技術を確認し、実用化の先駆けとなることができた。

また、今後はさらに、分散型電源の導入量拡大や系統運用の複雑化の進展に対し、更なる運用者支援機能の拡充も図っていく予定である。

参 考 文 献

- (1) 塚原 研, ほか: 次世代系統制御システムの基本フレームワーク, 三菱電機技報, **79**, No.12, 785~788 (2005)
- (2) 計算機仮想化技術を適用した次世代電力系統制御システム, 三菱電機技報, **86**, No.1, 11 (2012)
- (3) 藤田淳文, ほか: 制御所システムへの計算機仮想化技術の適用, 電気学会全国大会講演論文集, 6-233 (2012)

スマートグリッド向け 需給制御技術

古塩正展*

小島康弘***

マルミローリ マルタ**

清水恒夫*

Demand and Supply Control Technology for Smart Grid

Masanobu Koshio, Marta Marmioli, Tsuneo Shimizu, Yasuhiro Kojima

要 旨

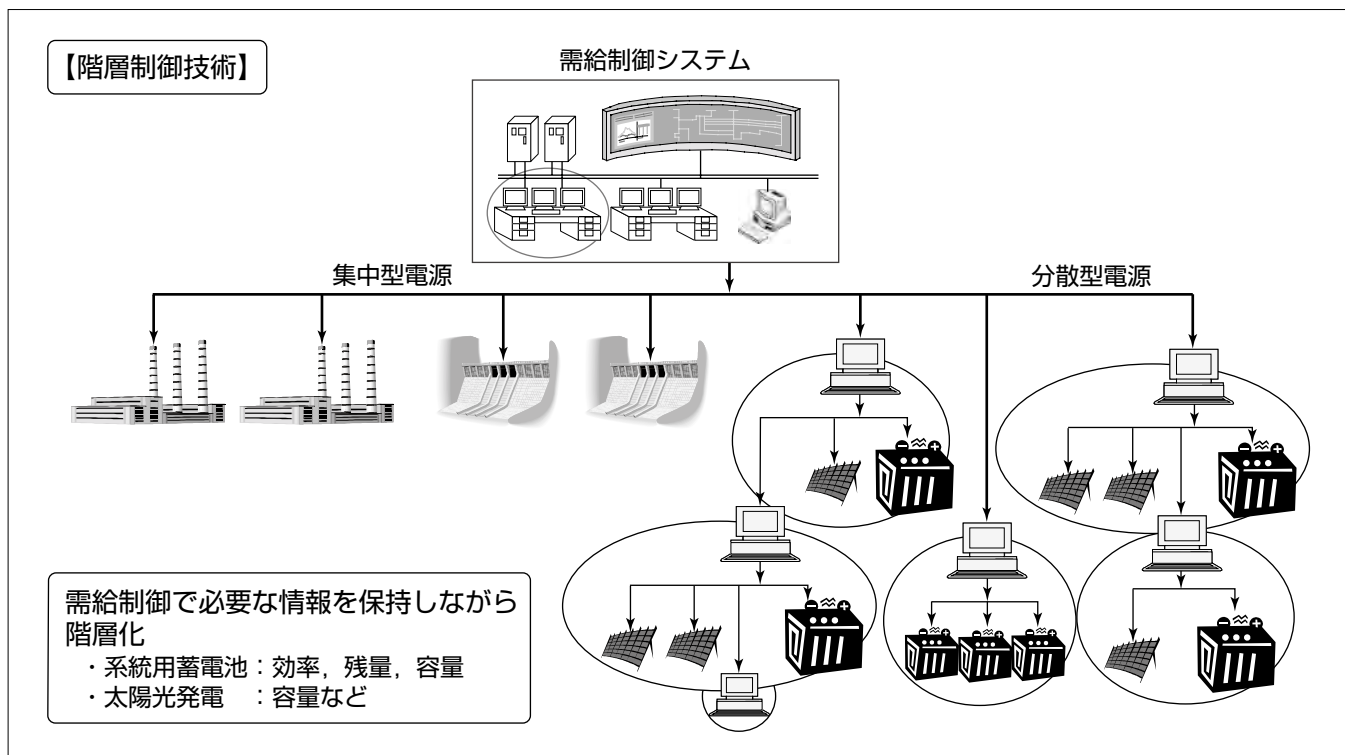
近年の低炭素社会実現に向けた国際的な動きの中で、太陽光発電(PhotoVoltaic：PV)や風力発電(Wind Turbine：WT)を始めとした再生可能エネルギーが注目されているが、これらの電源は天候の変動によって発電量が変動するという特性がある。一方電力系統では、電力の消費される量(需要)と発電する量(供給)を常にバランスさせる必要があり、これが崩れると周波数が変動する。電気機器が安定に動作できる規定の周波数(西日本は60Hz、東日本は50Hz)を維持するために、需要と供給をバランスさせる技術を需給運用・制御(以下“需給制御”という。)技術と呼ぶ。

従来の需給制御では、需要の動向を予測・監視し、多数の火力・水力、揚水等から経済性を考慮しながら適切な発電機の運転停止や発電出力を決定する需給運用を行ってきた。しかし、電力系統に発電出力が不安定なPVやWTが大量に連系した状況では、需要の予測・監視に加え、PVやWTに対する発電出力の予測・監視、これらの変動に備えた需給運用が必要となる。また近年、可変速揚水発電機

や系統用蓄電池等、PVやWTの発電出力変動の補償を目的とした大規模なエネルギー貯蔵装置の開発、又はCEMS(Community Energy Management System)やBEMS(Building Energy Management System)等、需要家サイドでのデマンドレスポンスを活用した負荷制御に関する検討も進んでおり、従来制御対象としていた発電機と、新たなエネルギー貯蔵装置や需要側との協調を取りながらPVやWTの発電を最大限活用できる、より高度な需給制御の実現が求められている。

このような背景のもと、三菱電機では、尼崎、和歌山、大船の3地区でスマートグリッドを構成する各種要素技術の開発を目的とした実証実験設備を構築して、実証実験を行っている。

本稿では、当社で開発中の需給制御技術と、尼崎地区のスマートグリッド実証設備を活用した実証によって得られた成果の一部について述べる。



当社の階層需給制御イメージ

経済性、環境性を考慮しつつ、再生可能エネルギーの発電出力変動に追従して電力品質を維持できる需給制御技術、及び分散設置される再生可能エネルギー、蓄電池等を最適に管理する階層制御技術の開発を行っている。

1. ま え が き

近年、低炭素社会実現に向けた供給力の1つ、又は我が国のエネルギー安全保障を担う供給力の1つとして、地熱発電、太陽光発電(PV)、風力発電(WT)等の再生可能エネルギーが注目されている。また、2012年7月からは“再生可能エネルギーの固定価格買取制度”が開始され、買取り価格が高く、設備導入のリードタイムが短いPVは、電力系統への連系が加速すると想定される。一方、PVやWTは天候の影響を受けやすく発電量の変動が大きいことから、PVやWTが既存の電力系統に大量に連系された場合、電力品質の低下が懸念されている。

従来の需給制御では、需要の変動に対して火力・水力、揚水等、制御可能な発電機の運転台数を調整し、発電量を追従させることで需要と供給のバランスを取り、周波数の変動を適正範囲に維持してきた。しかしながら、今後PVやWTが電力系統に大量連系された状況でも電力品質を現状程度に維持するためには、需給制御技術の高度化が必要となる。

当社では、既存の発電機と可変速揚水発電機や蓄電池等の新たなエネルギー貯蔵装置やデマンドレスポンス可能な需要側との協調を取り、PVの不確実な発電を補償しながら低炭素なエネルギーを最大限活用できる、より高度な需給制御技術の開発を進めている。

本稿では、開発中の需給制御技術と尼崎地区のスマートグリッド実証設備を活用した需給制御の実証状況について述べる。

2. スマートグリッド向け需給制御

2.1 PV大量連系に対応した階層型需給制御

PVや系統用蓄電池は、数kW程度の小規模な設備から数万kWのメガソーラーや大容量蓄電池まで、異なる特性や容量を持つ電源が分散して多数電力系統へ連系する。これら非常に多くの分散型電源について、運転状態、特性、メンテナンス計画等、様々な情報を個々に全て把握しながら需給制御を行うことは、扱うデータ量が膨大となるため、計算機能力や通信性能の面からみて非現実的である。そこで、複数のPVや系統用蓄電池、又はそれらを包含したCEMSやBEMSについて、発電効率や出力変化速度等、個別の制御特性を継承しながら階層化する。これによって、大量の制御対象機器に対し効率的な需給制御を行うことが可能となる。図1に階層制御のイメージを示す。

2.2 需給制御を構成する機能

需給制御システムを構成する機能フローを図2に示す。従来の需給制御では、天気や気温、イベント等に影響を受けて変化する需要について予測を行い、その予測結果に基づいて各種発電機の運転計画を立案し、制御を行っていた。

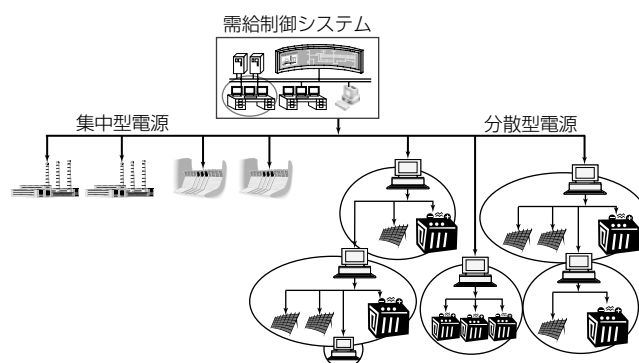


図1. PV・蓄電池大量導入時の階層型需給制御

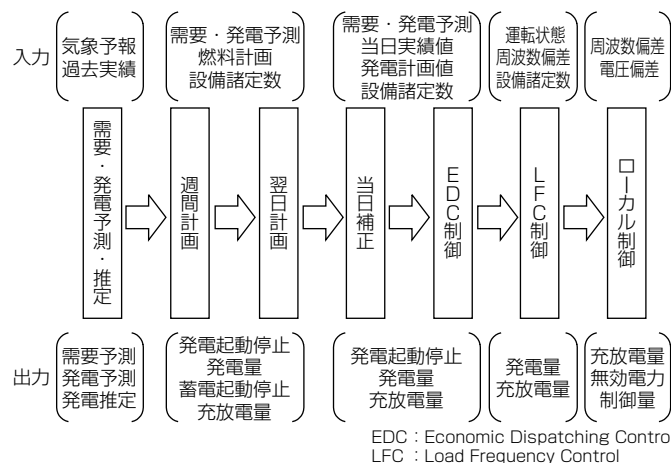


図2. 需給制御の機能フロー

しかし、PVや系統用蓄電池が電力系統へ大量連系された状況下では、需要予測に加え、PV発電の出力予測・変動予測が必要になるとともに、各

種発電機や各種系統用蓄電池の容量や特性、設置環境等に応じた協調運用が必要となる。

2.2.1 PV発電出力予測・推定

PV発電出力は日射量と相関が高い。しかし、気象庁数値予報(GPV)では日射量の予測情報は提供されないため、日射量と比較的相関の強い雲量予測情報からPV発電出力予測を行う。図3にPV発電出力予測の処理フローを示す。PV発電出力予測では、まず予測地点の最新の雲量予報データ、実績日射量、実績PV発電量データを取得(図3の①)し、③日射量予測で使用する雲量-日射量モデルと、④PV発電出力予測で使用する日射量-発電量モデルの係数を補正する(図3の②)。次に取得した気象予報データ(雲量)、予測地点の緯度、経度等から予測地点における日射量予測値を算出する(図3の③)。最後に日射量予測値から予測地点のPV発電出力予測値を算出する(図3の④)。



図3. PV発電出力予測フロー

また、ある地域内で、全PV発電量が個別に計測されていることは少ないため、需給運用上はPV発電量の実績推定も必要となる。図3の②の処理で過去の実績データから構築した日射量-発電量モデルに対し、実績日射量を入力することでPV発電出力の推定値を得る。

2.2.2 週間計画

従来の大規模電源を対象とした週間計画では、年間・月間の長期運用計画で決定される燃料消費量や貯水池水位を遵守するよう火力・水力発電機の運転停止計画を立案している。PV・蓄電池の大量連系時の需給制御では、(1)出力が

不確定なPVのkW価値、及び(2)電力貯蔵設備として(可変速)揚水発電と系統用蓄電池の特性差を考慮して、需給運用計画を立案する。特に自然エネルギーの不確定さに対応するためには、系統用蓄電池は1週間程度先まで考慮した蓄電量(State of Charge: SOC)の最適運用が重要で、後段の翌日計画・当日補正やEDCにおける蓄電池の運用指針となる。

2.2.3 翌日計画・当日補正

翌日計画・当日補正では、発電機ごとの特性データ、及び最新の気象予報データと各種実績データに基づく需要予測、PV発電出力予測データ等を入力データとし、経済性・環境性で最適な発電機の起動停止計画を立案する。翌日計画・当日補正における需給制御問題の定式化イメージを図4に示す。翌日計画・当日補正は、30分間刻みごとの発電機や系統用蓄電池運転停止状態を決定する分散系最適化問題の中に、運転が選択された時間帯について発電機の発電出力、又は系統用蓄電池の充放電出力を決定する連続系最適化問題を包含する二重の最適化問題を解くことで計画を立案する。

2.2.4 EDC

EDC(経済負荷配分制御)では、至近の需要実績から需要予測の補正を行った上で制御指令値を計算する。EDCで扱う最適化問題の構造は翌日計画、当日補正と同様となるが、最適化計算の対象範囲がより詳細となる。ここで、制御対象外のPV発電出力に関しては予測値をベースとするが、数分～数10分程度先の出力変動を高精度で予測することは現実には困難である。このためPVの短周期出力変動・予測誤差が発生することを前提に、誤差が生じた場合でも需給バランスを維持できるよう適切な運転予備力/下げ代を確保しつつ、経済性・環境性を最適化した負荷配分を行うことが重要となる。

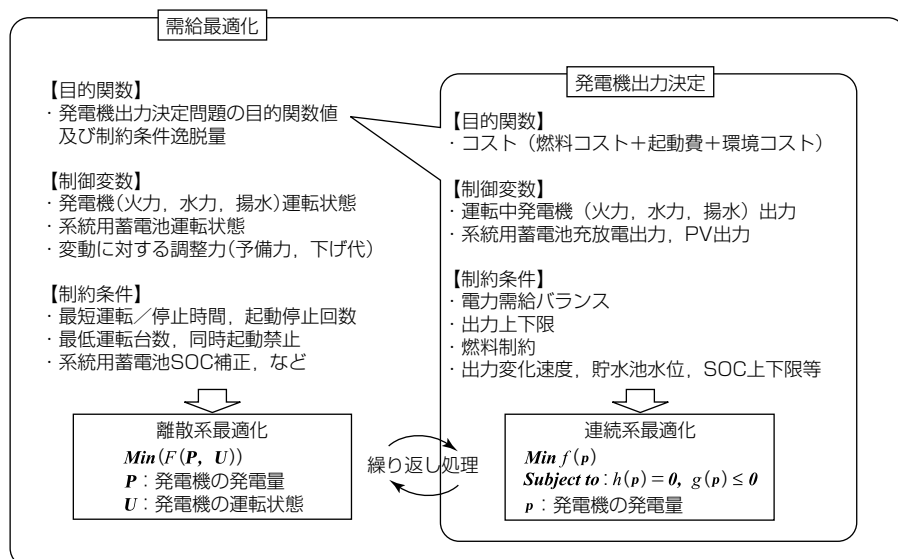


図4. 需給制御問題の定式化

2.2.5 LFC・ローカル制御

LFC(負荷周波数制御)では、秒オーダーの短周期変動は高速に充放電可能な系統用蓄電池が分担し、中長周期の変動は発電機で分担するなど、火力・水力、揚水等の各種発電機や各所に配置された各種の系統用蓄電池の特性に応じた出力配分を行う。

また系統用蓄電池は、周波数や電圧等、自端でのローカルな計測情報に基づき有効電力、無効電力の制御を高速に行うことが可能である。ただし、周波数情報を用いたローカル制御を行う場合、周波数偏差に対する制御感度(系統定数)の情報について、全系統を管理するLFC制御との協調が必要となる。

3. 実証実験の事例

3.1 PV発電出力予測・推定に関する実証事例

尼崎地区のスマートグリッド実証設備で収集したPV発電実績データを活用し、PV発電出力予測・推定に関する検証を実施中である。次に結果の一例について述べる。

2012年3月27日の快晴日におけるPVの発電出力予測値、発電実績値、及び発電推定値を図5に、当日の上層雲量、中層雲量、下層雲量に関する3:00, 9:00, 15:00, 21:00時点の雲量予報値を図6に示す。ここで発電推定値とは、最至近の日射量実績と、日射量-発電量モデルに現在の日射量を入力して算出したPV発電出力推定値である。また発電出力予測値は3時間ごとに配信される気象庁GPVに含まれる雲量データから、雲量-日射量モデルと日射量-発電量モデルを用いて算出している。

図5から、PV発電実績値とPV発電推定値は非常に近いことが分かる。これは、将来の日射量が正確に予測できれば、PV発電出力予測の精度が高いことを意味する。一方、実際のPV発電出力予測精度は特に昼間の時間帯では約

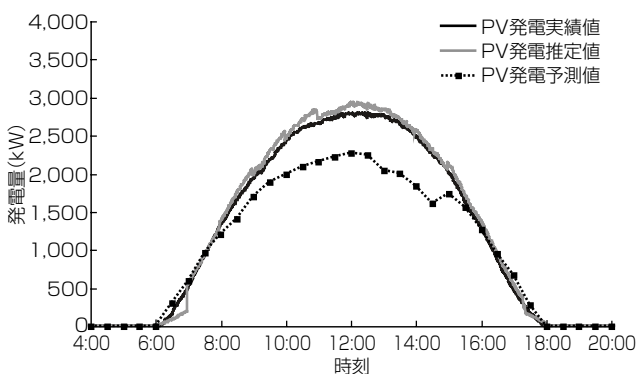
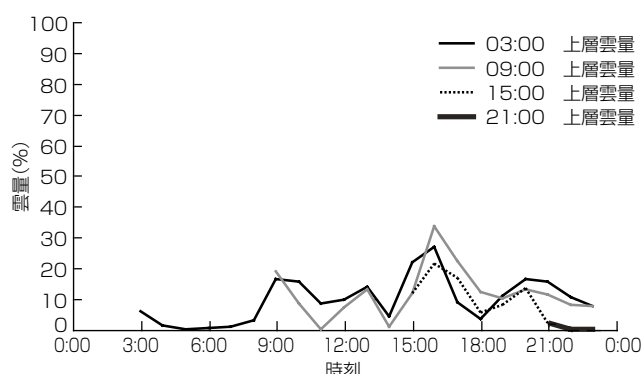
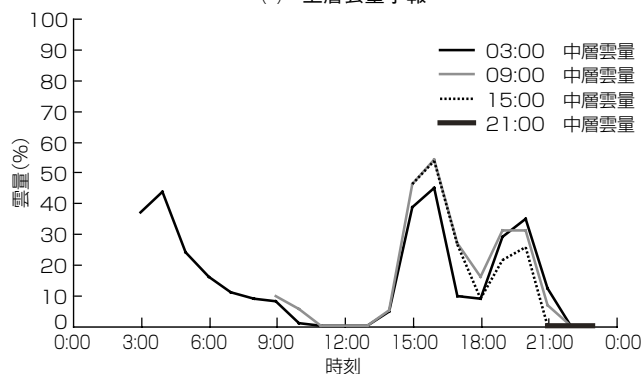


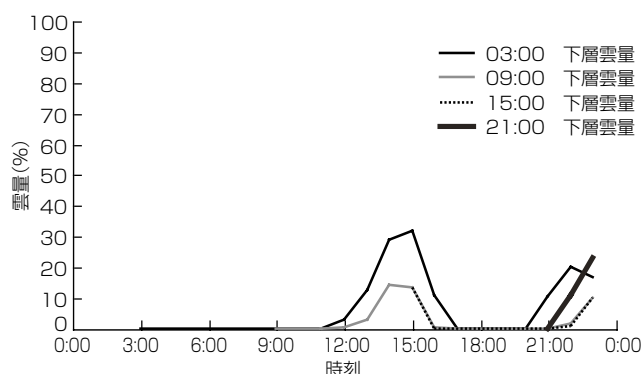
図 5. 快晴日(2012年3月27日)のPV発電出力予測・推定・実績



(a) 上層雲量予報



(b) 中層雲量予報



(c) 下層雲量予報

図 6. 快晴日の雲量予報値

20%低めに予測している。この時間帯の雲量予報値(図6)を見ると、どの時点の予報でも上層雲が発生している。このためPVは出力が低下すると予測されていることが分かる。

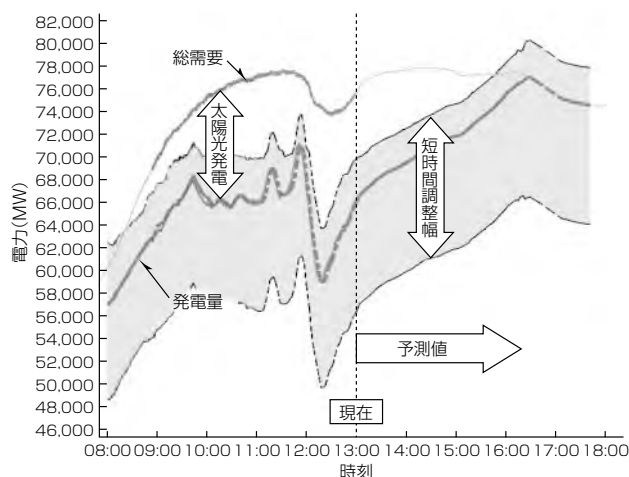


図 7. PV発電出力変動を考慮した需給制御

3.2 最適需給制御に関する実証事例

3.1節で述べたように、PV発電出力予測は気象予報に依存するため大幅な精度向上は困難である。一方、需給制御ではどのような状況でも需要と供給のバランスを保つ必要がある。このため、開発した需給制御機能では、短周期の出力変動や中周期～長周期の予測誤差の範囲を想定しつつ制御を行う方式としている。図7に検証結果の一例を示す。

図7で総需要から制御対象外の太陽光発電分を除いた値が制御対象発電機の出力合計となる。需給制御では、現状の需要・PV発電出力実績から、需要変動・PV発電出力の予測と変動範囲を想定し、予測誤差・変動が発生した場合にも需給バランスの調整が可能のように短時間(5分程度)の調整幅(図中グレーのハッチング部分)を確保する条件下で発電機出力の最適化を行っている。

4. む す び

当社で開発中のスマートグリッド向け階層型需給制御と需給制御を構成する機能、及び尼崎の実証実験環境で実証中の事例について述べた。

PVや系統用蓄電池等、系統連系する分散型電源の急速な増加が見込まれる中、当社では、本稿で述べたPV発電出力予測・推定技術を始めた、環境に優しく、安定した電力品質を確保でき、効率的な運用を実現可能な需給制御技術の実現に向け技術開発を継続する予定である。

参 考 文 献

- (1) マルミローリ マルタ, ほか: スマートグリッド実証実験, 三菱電機技報, **86**, No. 2, 105~108 (2012)
- (2) 塚本幸辰, ほか: スマートグリッド実証実験の紹介, エネルギーと動力, **279**, 秋季号 (2012) (掲載予定)
- (3) 古塩正展, ほか: スマートグリッド実証実験(その1) —実証実験設備構築—, 電気学会B部門大会論文II (2012) (掲載予定)

鉄道の世界化とカスタマイズ化

Globalization and Customization of Railway

渡邊朝紀

Tomoki Watanabe



鉄道を巡る内外の状況は大きく動いている。国内では昨年の東日本大震災で甚大な被害が生じたが、高速鉄道で犠牲者を出すことなく、旅客の安全を確保できたことは、大いに賞賛に値することである。これは過去の震災などを教訓にしているからであり、さまざまな知恵の蓄積と関係者の努力の賜物である。ここに日本の鉄道技術の粋の一端をみることができる。一方この震災と原子力災害で、電気エネルギーのありがたさ、大切さを国民すべてが身をもって体感した。そしてエネルギー管理が広く認知されてきた。

海外に目を向けると近年のアジア諸国、特に中国の発展は目覚ましい。2005年に中長期鉄道網計画が立てられ、その中で2020年までに1万2千キロの旅客専用高速鉄道の建設が計画され、2008年にはこれが2万キロに修正された。2011年7月の温州事故によるペースダウンなど紆余(うよ)曲折はあるものの、既に高速鉄道は1万キロが開業しており、中国は今や営業路線で世界最長の高速鉄道国となった。他の新興国でも経済成長とともに、鉄道を初めとするインフラへの需要には大変な勢いがある。

日本のユーザーは製品・サービスに対してこだわりがあり、それが高価格となってきた側面がある。携帯電話では早くから色々なサービスを提供できてきたにもかかわらず、日本製携帯電話が世界で広く使われることはなかった。そして日本の携帯電話メーカーの世界での存在感はごく小さなものとなってしまった。ところが今やスマートフォンの時代となって、サービス主体のビジネスモデルの競争となってきた。今がチャンスのはずであるが、世界シェアを持たない日本メーカーは苦戦している。

鉄道のようなインフラを、文化の異なる国々に受け入れてもらうためには、客観的な仕様が欠かせない。このためには国際規格など広く認知された規格に準拠していることが大きな力となる。また標準化はコストダウンに有効であり、特にソフトウェアで効果が著しい。

標準化には様々な局面がある。標準化を徹底すれば、それは幅広く新規メーカーの参入を招き、激しい価格競争となり、高賃金国のメーカーは立ち行かなくなる。

また鉄道のような大規模な投資となるインフラビジネス

を獲得するためには、それが相手先の社会の価値観に合ったものでなくてはならず、日本で実績のあるものが他の国に好ましいとは限らない。相手先の要求に対応することは、日本企業の得意とすることではあるが、高コストとなりやすい。標準化とカスタマイズ化をいかに両立させるかが重要である。また現地生産も求められることが多い。

鉄道では今世紀に入ってから、海外ビジネスで安全性認証が求められるケースが増えている。そのやり方はまず文書でリスクを洗い出して分析し、リスク緩和措置を積み上げてリスクを許容範囲に納め、次に製造などの各段階で計画・設計通りか検証していく。一方国内ではこの考え方は定着していないが、QC活動や現場の改善提案などの積み上げによる高品質化、高信頼度化の蓄積がある。

国内には危険はあってはならないとする考えから、リスクの数値化に抵抗のある人も少なくないが、その場合リスクに遭遇したときの検討がおろそかになりやすい。これからは数値化して工学的に合理的に対処することが必須になると思う。

鉄道は様々な利便性を求めてどんどん複雑化していくので、安全の担保はますます大掛かりになっていく。システムが複雑になるほど、コンセプトから安全を確認するアプローチは魅力を増す。日本の企業には本社から現場に至る様々な部署にノウハウが存在する。これをIEC 62278なり、欧米流の考え方なりで説明できるようにすることが内外差をなくす鍵となり、そこからイノベーションが生まれるのではないかと。鉄道オペレータとメーカーのビジネスの分析から、標準化すべき部分とすべきでない財産部分が見通せて、そこから現地カスタム化や現地生産、委託生産の位置づけが見えてこよう。その先にグローバル化に対応可能な鉄道オペレータとメーカーの新たなビジネスモデルが出てくると信じる。

鉄道サービスを維持しながら、エネルギーをトータルで管理することは、震災にあった日本だからこそ、ニーズを強く持ち、世界に先行して開拓していける分野である。それが上述の様々な壁を乗り越えて、国内のみならず広く海外でも受け入れられるようになることを期待する。

巻頭論文

鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションへの取り組み



四方 進*

Total Railroads Solutions, Supporting Progress Toward a Low-carbon Society

Susumu Shikata

要 旨

三菱電機は、幅広い高度な技術で社会に貢献する交通システムプロバイダーとして、基幹製品である車両システムを始めとして信号、通信、指令、電力、駅、車両基地等の鉄道システムの各分野で開発実績を積み重ねてきた。また鉄道の省エネルギー化に向けて、車両搭載製品の小型軽量化や制御の高効率化、回生電力の有効利用等、業界に先駆けて取り組んできた。

一方、世界的には地球温暖化防止と経済成長を両立させる低炭素社会の実現に向けて、次世代社会インフラの構築が急務となっている。国内では東日本大震災以降のエネルギー政策の見直しや電力供給事情の変化を背景にスマートコミュニティ、スマートグリッドと呼ばれる新たな取り組みが加速している。

当社はこのような社会的背景も踏まえ、これまでの取り組みを更に進めて、鉄道のエネルギーの全体最適化を目指す

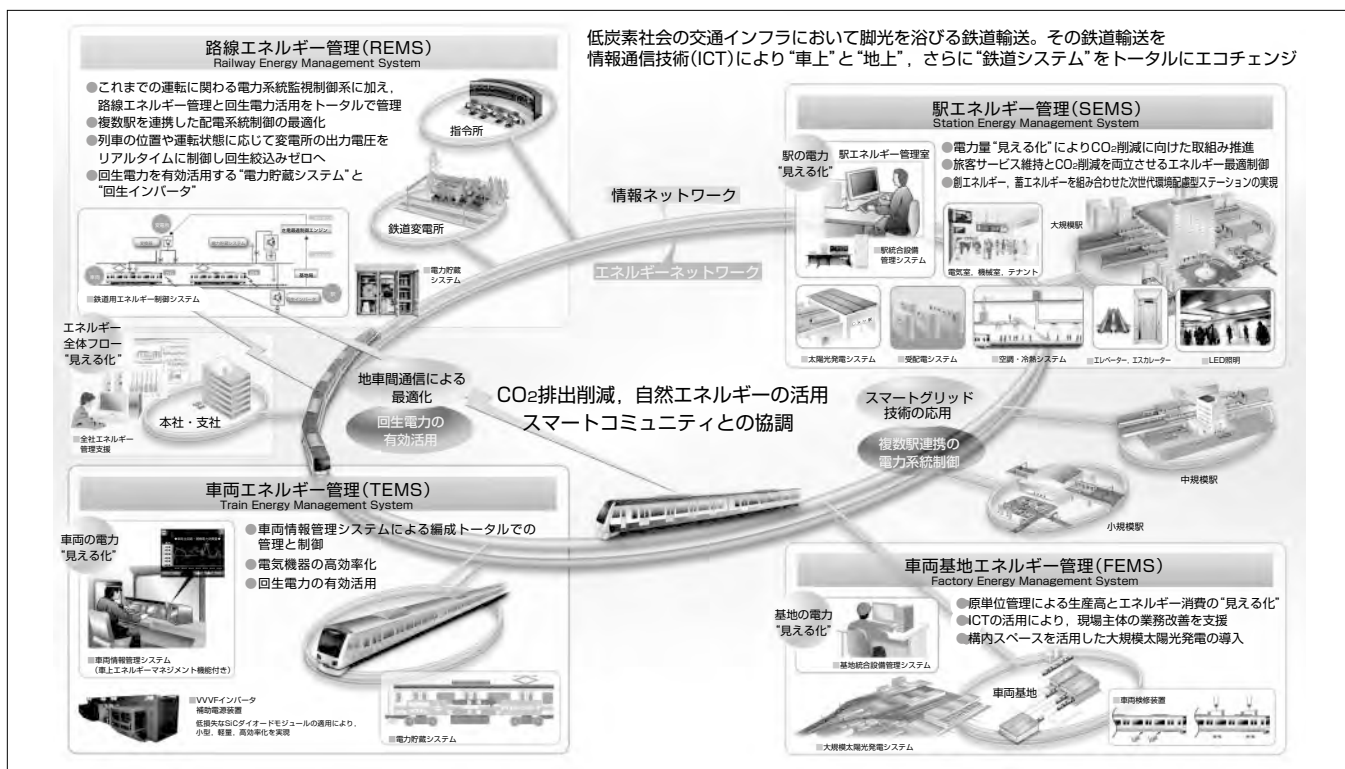
ソリューションに新たに取り組んでいる。

広範で多様な鉄道設備を対象としたソリューションを推進するにあたり

- ・列車における車両エネルギー管理(TEMS^(注1))
- ・駅における駅エネルギー管理(SEMS^(注2))
- ・車両基地における車両基地エネルギー管理(FEMS^(注3))
- ・路線全体を対象とした路線エネルギー管理(REMS^(注4))

の4分野を定義した。この各々の分野で、創エネルギー、蓄エネルギーを実現する新たなエネルギー機器の導入や個別設備の高効率化に加え、情報通信技術(ICT)の活用によって設備群を協調・連携させることによる高効率化を推進し、鉄道システム全体のエネルギー最適化を目指すものである。

この“鉄道トータルエネルギー・環境ソリューション”の取り組みによって来るべき低炭素社会の牽引(けんいん)役でもある鉄道の更なる発展に貢献していく。

特集
II


(注1) Train Energy Management System

(注2) Station Energy Management System

(注3) Factory Energy Management System

(注4) Railway Energy Management System

鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションへの取り組み

当社は、低炭素社会の牽引役を担う鉄道のエネルギー全体最適化を目指し、車両エネルギー管理、駅エネルギー管理、車両基地エネルギー管理、そして路線エネルギー管理の各分野で、創エネルギー、蓄エネルギーを実現する新たなエネルギー技術と情報通信技術(ICT)を活用したトータルなエネルギー・環境ソリューションを提供していく。

1. ま え が き

地球温暖化防止と経済成長を両立させる低炭素社会の実現に向けた動きとして、発電所を中心とした従来の集中・片方向型から、需要側で自然エネルギーをできる限り導入した分散・双方向型に社会のエネルギー供給のあり方が移行しつつある。鉄道でも既に車両や駅又は電力系統のそれぞれの領域で創エネルギー、蓄エネルギー等の新たなエネルギー技術や製品の導入検討が進みつつあるが、現時点では部分的又は実験的な取組みの段階である。

本稿では、これらを更に進め、鉄道のエネルギー全体最適化の実現に向けて当社が取り組んでいる“鉄道トータルエネルギー・環境ソリューション”について述べる。

2. 鉄道トータルエネルギー・環境ソリューション

2.1 これまでの鉄道の省エネルギー化の取組み

鉄道におけるエネルギーの需要と供給の関係を図1に示す。鉄道の電力需要は、列車を運行するための運転エネルギーと駅や車両基地等の地上施設を運営するための駅(群)エネルギーで構成される。運転エネルギーはき電系統、駅(群)エネルギーは配電系統と呼ばれる自営電力系統を通じて負荷である列車、駅等にそれぞれ供給される。

電力需要の大半を占める運転エネルギーの省エネルギー化は古くからの命題であり、これまでも当社は業界をリードした取組みを進めてきた。

一つは車両システムの高効率化を目指す取組みであり、主電動機、空調装置等個々の車両機器の高効率化・制御の高度化、回生ブレーキシステムの実用化とともに、それらを車両編成全体として制御する車両情報統合管理装置の開発に取り組んできた。

また、回生電力の有効活用にも取り組んできた。当社は列車ブレーキ時に運動エネルギーを電力に変換する回生ブレーキを実用化し、列車から発生する回生電力の有効活用による運転エネルギー利用の効率化を進めてきた。しかし、回生車導入率の増加に伴い力行車(電力を消費して加速する列車)が回生電力を吸収しきれない状況が発生したこと

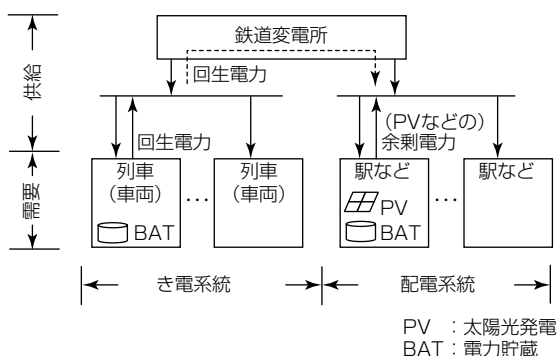


図1. 鉄道におけるエネルギーの需要と供給

から、余剰回生電力を地上側で吸収するための地上余剰回生電力吸収装置(回生インバータ)を導入してエネルギー利用率の向上を図ってきた。

2.2 新たに取り組むソリューションの狙い

これまでの鉄道の省エネルギー化の主な取組みについて述べたが、エネルギー消費の最小化、自然エネルギーの最大活用とエネルギーの高度利用を目指した低炭素社会の実現に向けて、これから鉄道に求められるキーワードは全体最適化である。部分的・個別的な省エネルギーから地域社会との協調も視野に入れてエネルギーの全体最適化を見据えた“鉄道のシステムチェンジ”が必要になるものと考えられる。

そのキーとなるのは系統上に分散し時々刻々変化する需要と供給の関係をリアルタイムに把握して全体として協調連係させる情報通信技術(ICT)である。

鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションは、新たなエネルギー技術とICTを活用したエネルギー管理システムの構築によって鉄道のエネルギー全体最適化を目指す。

2.3 鉄道エネルギー管理の構成

図1に示すように鉄道におけるエネルギー需要の基本単位は列車と駅等の施設であり、それを系統(き電・配電)が束ねる構造となっている。そこで図2に示すような4つのエネルギー管理の分野を定義した。

- ・車両エネルギー管理(TEMS) : 列車を対象
- ・駅エネルギー管理(SEMS) : 駅を対象
- ・車両基地エネルギー管理(FEMS) : 車両基地を対象
- ・路線エネルギー管理(REMS) : 路線全体を対象

TEMS, SEMS, FEMSはそれぞれエネルギー需要単位ごとのエネルギー管理であり、REMSはき電系統の“運転エネルギー管理”と配電系統の“駅(群)エネルギー管理”を包含した路線全体のエネルギー管理に位置付けられる。このようなエネルギー管理の構成によって列車、駅等の建物それぞれ独自に行う部分最適化と路線全体の最適化を並行して進めていこうとするものである。

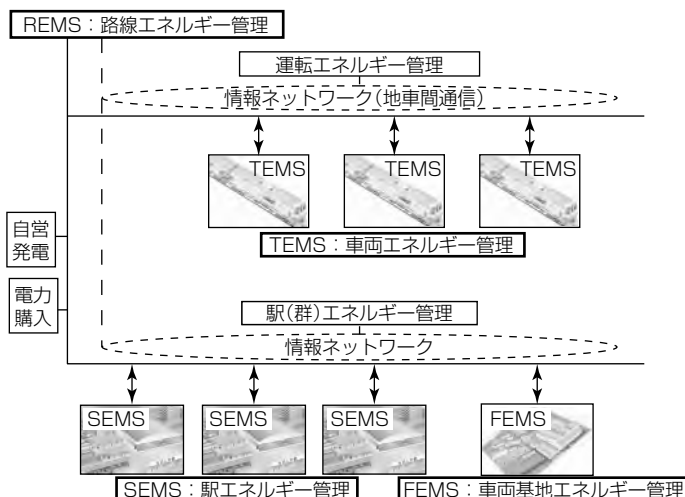


図2. 鉄道エネルギー管理

3. エネルギー管理システムへの取組み

各エネルギー管理システムでは3つの観点・階層で取組みを進めている。1点目は、個々の設備・機器によって省エネルギー、創エネルギー、蓄エネルギーを推進する取組みである(設備・機器層)。2点目は、設備・機器ごとの制御とそれらの間の協調によって最適化制御を推進する取組みである(制御層)。3点目は、エネルギーの需要と供給の状況を管理して継続的に改善を進めるための取組みである(管理層)。

3.1 車両エネルギー管理システム(TEMS)

車両エネルギー管理システム(TEMS)は列車のエネルギー最適化を進める取組みである。

TEMSでは図3の構成で、主に新たなデバイスを適用した電気機器の効率改善・機能向上と、複数機器を連携制御した改善の2方向からのアプローチで取り組んでいる。

電気機器の効率改善・機能向上として、現在、2つのデバイスの適用システムを重点的に開発中である。1点目は、SiCデバイス適用推進制御装置と高効率全閉形誘導電動機を組み合わせた新型主回路システムで、新型素子を活用した効率向上と回生領域の拡大等の機能向上効果が得られる。これについては特集論文“環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向”に述べる。2点目は、蓄電デバイスの適用で、回生電力の利用拡大や、ディーゼル車の効率改善が実現できる。これについては特集論文“蓄電デバイスの車両推進制御システムへの応用”に述べる。

複数機器を連携制御した改善の1点目は“編成制御及び省エネルギー機器制御”であり、編成でのブレーキブレンディング制御の適用や、機器を稼働させるタイミングの最適化などによる改善である。2点目は“省エネルギー運転制御”である。ATOを用いている路線では、通常運行時には最適な走行パターンによる省エネルギー走行が可能だが、運転変更やダイヤ乱れ等があった場合でも、地上設備からリアルタイムに情報を入手することで、ATO運転による最適な省エネルギー走行が継続できるようにする取組みである。これらの2つの点については特集論文“省エネルギー化に取り組む列車運転制御システムの最新動向”に述べる。

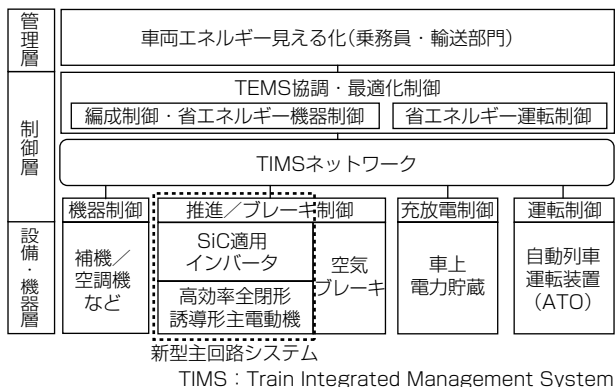


図3. 車両エネルギー管理(TEMS)

またTEMSでは、車両情報統合管理装置(TIMES)ネットワークと地車間連携ネットワーク(無線通信)を活用し、編成ごとの詳細な電力データや走行条件等を取得し“車両エネルギーの見える化”を実現する。この見える化を推進エンジンとして、適用する各種省エネルギー施策について定量的に評価し、効率的な車両システムを実現していく。

3.2 駅エネルギー管理システム(SEMS)

駅エネルギー管理システム(SEMS)は駅のエネルギー最適化を進める取組みで、その概要を図4に示す。

駅では、乗客が安心・安全に、また快適に鉄道を利用するための諸設備(空調、照明等)に加え、今後は立地条件や規模等、駅の特성에応じて太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーや電力貯蔵等の新たなエネルギー機器の積極的な導入が期待される。

また今後、エネルギー事情の変動が想定される中、乗客に対するサービスをどのように成立させていくかが課題となる。そのために、駅に必要なサービス、駅特有の設備を考慮した省エネルギー制御、及び駅エネルギーの需要と供給を最適化する仕組みが必要になると考えられる。

そこで当社はこれらを実現するSEMSとして3つのテーマで取組みを進めている。

1点目は、駅におけるエネルギーの需要と供給を計測し、関係部門に必要な情報を提供する“駅エネルギーの見える化”である。現時点では駅内のエネルギーに関する計測、収集の仕組みが十分構築されておらず、エネルギー消費の実態や改善見通しが分からないことが多いのが実態である。何を計測し、収集データをどのように活用するのか明確化するとともにシステム開発と実証実験を進めている。

2点目は、照明・空調といった主要な駅設備の電力消費を抑制する“駅設備の省エネルギー制御”である。設備ごとの制御の高度化による省エネルギー化に取り組むとともに、従来ビル分野で培ってきたエネルギー管理技術を進化、発展させ、サービスと省エネルギーを両立させる最適な制御方法を検討している。

3点目は、様々な特性を持つ駅への再生可能エネルギーの導入とその安定的な利用を目指す“再生可能エネルギーの導入と制御”である。商業施設を包含して今後も電力需

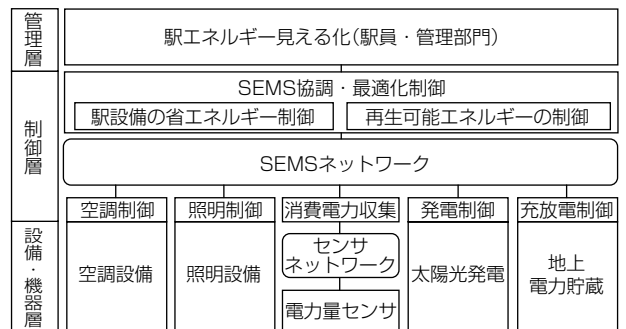
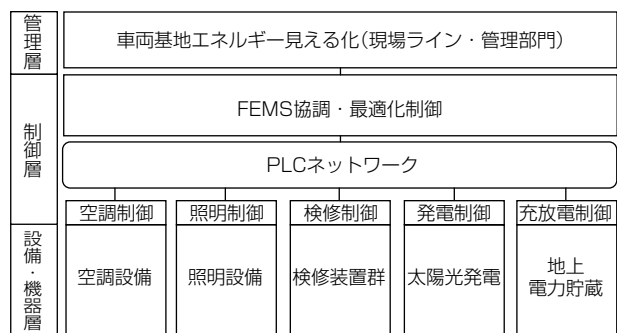
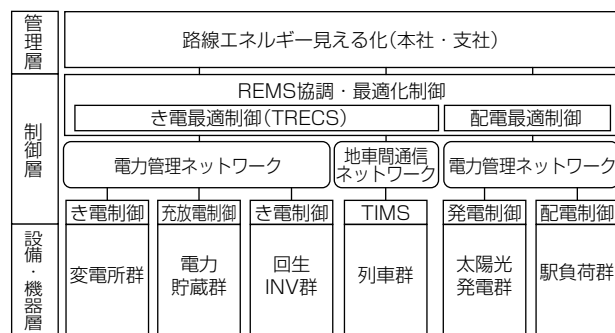


図4. 駅エネルギー管理(SEMS)



PLC : Programmable Logic Controller

図 5. 車両基地エネルギー管理(FEMS)



INV : INVerter

図 6. 路線エネルギー管理(REMS)

要の増大が想定される都市圏の大規模駅、電力需要は小さく比較的スペースに余裕があるため太陽光発電の設置に適している郊外の小規模駅、その中間の駅等、それぞれの立地条件に適した太陽光発電導入の取組みと安定的で効果的な利用のため、電力貯蔵を含めた各種のスマートグリッド技術の適用を検討している。SEMSについては特集論文“駅エネルギー管理システム”に述べる。

3.3 車両基地エネルギー管理システム(FEMS)

車両基地エネルギー管理システム(FEMS)は車両基地(車両工場などを含む)のエネルギー最適化を進める取組みで、その概要を図5に示す。

車両基地では駅と同様の空調、照明等のユーティリティ設備に加えて車両の定期的な検査・修繕業務のための検修装置、機械設備が数多く稼働している。また車体、台車、機器各々のメンテナンスを行う複数のラインがあり、これらの設備・機器やライン全体を対象としたエネルギー管理が課題となっている。

そこでこれらの装置や設備を制御しているPLC及びPLCネットワークを活用して車両基地全体の設備管理を高度化するソリューションに取り組んでいる。各装置・設備の稼働状態、メンテナンスの生産高、消費エネルギー等の情報をPLCネットワークを通じて収集・データベース化してエネルギー原単位管理を導入することによって、生産性と省エネルギー化の両面で検査・修繕業務の継続的な改善に貢献することを目指している。

また車両基地には比較的広いスペースがあり大規模な太陽光発電の立地条件として適していると考えられるため、自然エネルギーの供給基地としての可能性を検討している。

3.4 路線エネルギー管理システム(REMS)

路線エネルギー管理システム(REMS)は路線全体のエネルギー最適化を進める取組みで、その概要を図6に示す。

REMSでは、列車の運転エネルギーを供給するき電系統と駅や車両基地等の地上施設にエネルギーを供給する配電系統のエネルギー最小化・最適化を図る制御システムの開発を推進している。

き電系統では回生電力の活用が最大の課題である。従来、変電所に回生インバータを設置して回生電力を有効利用する手法が取られて来たが、設置場所の制約、新旧車両による回生電力の制御特性の違い等の理由によって、路線全体で見ると必ずしも100%回生電力を利用できていなかった。この課題を解決し、き電系統の最適化を図るため、車上の車両情報統合管理装置(TIMs)、地車間通信ネットワーク、電力管理ネットワーク等のICT技術やシステムを活用して、移動体である車両からリアルタイムに収集した情報に基づいて変電所の出力電圧や電力貯蔵システムの充放電量を協調・最適化制御する“き電最適制御システム(TRECS)”の開発を進めている。TRECSについては特集論文“路線全体の回生エネルギー有効活用”に述べる。

もう一方の系統である配電系統でも太陽光発電・分散電源や電力貯蔵といった創エネルギー、蓄エネルギー機器が積極的に導入されることで、複数駅にまたがる需要と供給の協調や系統の最適化制御が課題となる。これらの解決には一般の電力系統で検討されているスマートグリッド技術の適用が有効と考えている。当社は伊丹地区に構築されたスマートグリッド・スマートコミュニティ実証実験設備を用いて配電系統の技術検証が可能であり、REMSへの適用検証にも活用していく予定である。

また本社や支社の設備管理部門、エネルギー管理部門等、組織の役割に応じてエネルギー需要、供給に関する情報を適切に提供することが求められる。REMSでは路線全体のエネルギーに関する情報を収集、データベースに蓄積して役割に応じた“路線エネルギー見える化”を進めている。

4. む す び

鉄道のエネルギー最適化に向けて当社が推進するトータルエネルギー・環境ソリューションへの取組みについて述べた。当社はこれまで蓄積した幅広い技術力とたゆまぬ研究開発によって新たなチャレンジに取り組み、今後の低炭素社会を支えるインフラとしてますます重要性を高める鉄道システムの発展に貢献していく所存である。

環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向 ～SiC適用インバータシステム，補助電源装置～

中嶋幸夫* 出井和徳*
草野健一* 田中 毅*
山下良範*

The Latest Trend of Environment-Friendly Power Electronics Equipment for Railway Vehicles~Traction Inverter System with SiC Power Device & Auxiliary Power Supply System~
Yukio Nakashima, Kenichi Kusano, Yoshinori Yamashita, Kazunori Dei, Takeshi Tanaka

要 旨

近年，環境負荷の少ない移動輸送手段である鉄道の重要性が高まり，国内外で鉄道インフラ整備が進んでいる。

三菱電機は，鉄道車両用インバータについては従来Si（シリコン）を用いたパワーデバイスを適用した製品を製造してきたが，更なる環境負荷低減への取組みとして，SiC（シリコンカーバイド）を用いたパワーデバイスを適用したインバータシステムを開発した。

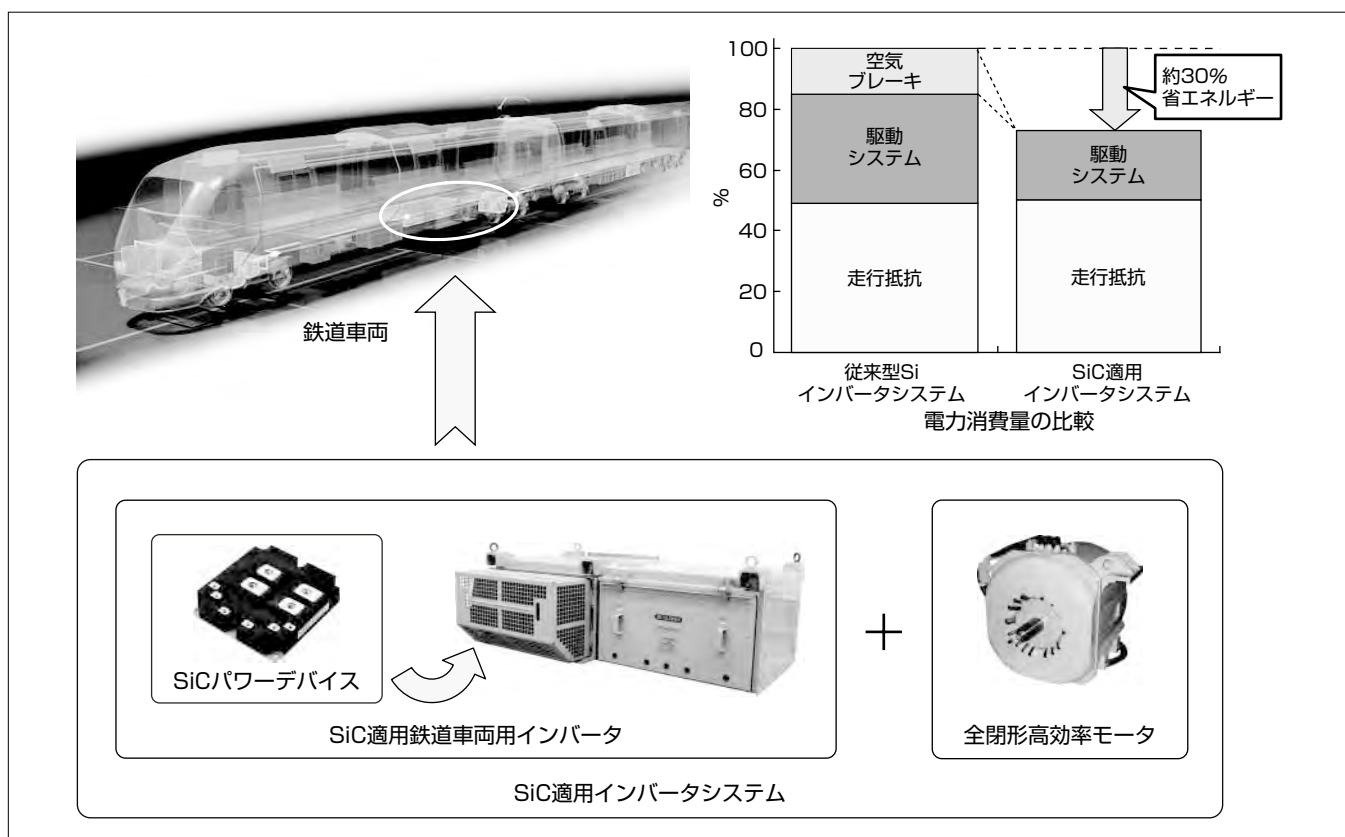
SiCパワーデバイスは，低損失・高温動作の特長を持った，Siパワーデバイスに代わるキーデバイスである。この特長を持ったデバイスを鉄道車両用インバータシステムに適用することによって，電力回生ブレーキ領域の拡大，高周波スイッチングによるモータ損失の低減等，主回路シス

テム全体の更なる省エネルギー化を実現した。

また，車内照明や冷暖房装置等の電源として使用される補助電源装置については，最新技術として高周波リンク方式があり，ここにSiCパワーデバイスを適用することによって装置として更なる小型・軽量化，省エネルギー・高効率化が期待できる。

本稿では，SiCパワーデバイスの特長とともに，車両エネルギー管理システム（TEMS）における新型主回路システムを担うSiC適用インバータシステムについて省エネルギー技術を述べる。また，補助電源装置の最新技術とSiCパワーデバイス適用への期待についても述べる。

特集
Ⅱ



SiC適用インバータシステム

1.7kV/1.2kAの大容量SiCパワーデバイスの適用によって，回生ブレーキ性能を向上，Siパワーデバイス適用従来装置と比較してインバータ損失を低減，SiCパワーデバイス対応全閉形モータはSiCパワーデバイスの高周波スイッチング駆動によって発生損失を低減した結果，主回路システム全体として従来型インバータシステムに対し30%の省エネルギーを実現した。

1. ま え が き

近年、地球温暖化対策として、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減が求められており、その対策の1つとして環境負荷の少ない移動輸送手段である鉄道の重要性が高まり、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

その中で、当社は従来Siパワーデバイス適用の鉄道車両用インバータシステムによって省エネルギー化や環境負荷の低減に寄与してきた。

今回、更なる省エネルギー化や環境負荷低減への取組みとして、大容量SiCパワーデバイスを適用した鉄道車両用インバータシステムの開発を行い、世界に先駆けて^(注1)製品化した。

本稿では、SiCパワーデバイスの特長とともに、SiCパワーデバイスを適用した鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー技術について述べる。また、補助電源装置についても、その最新技術に加え、SiCパワーデバイス適用への期待について述べる。

(注1) 2011年10月3日現在、当社調べ

2. SiCパワーデバイスの特長

図1にSiダイオードとSiCダイオードの構造を示す。SiCはSiに比べて、高温動作が可能で、さらに、絶縁破壊電界強度が約10倍となるため、半導体の厚さを薄くすることが可能となる。これによって従来のSiに比べ大幅なオン抵抗の低減が可能となる。

その結果、従来の高耐圧用ではオン抵抗が大きく採用できなかったショットキーバリアダイオード(SBD)の使用が可能になる。SBDはユニポーラデバイスであり、従来のSiダイオードでの逆回復が存在せず、ダイオードのターンオフ損失の大幅な低減が可能となる(図2)ほか、ダイオードの逆回復電流がないため、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のターンオン損失も低減する(図3)。

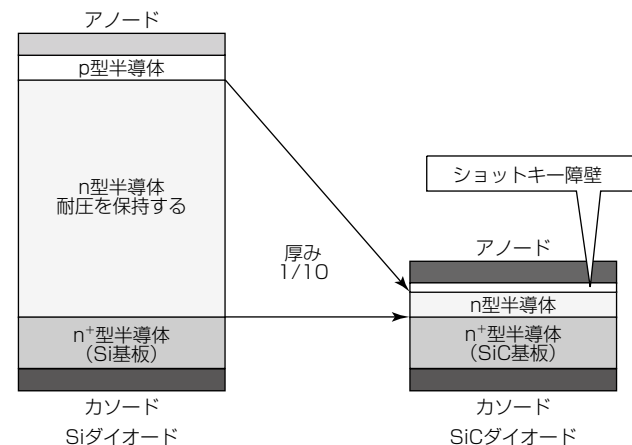


図1. ダイオード構造の比較

3. 鉄道車両用SiC適用インバータシステム

3.1 鉄道車両における消費電力の分析

Si-IGBT及びSiC-SBDを搭載したSiCパワーデバイスを適用することによって、従来の大容量Siパワーデバイスに比べてインバータ電力損失が約30%低減することが報告されている。

しかし、図4に示すように、従来の鉄道車両用主回路システムにおける入力電力量に対する発生損失の内訳によると、インバータの電力損失は、主回路システム全体での発生損失に対して占める割合が低いことが分かる。このこと

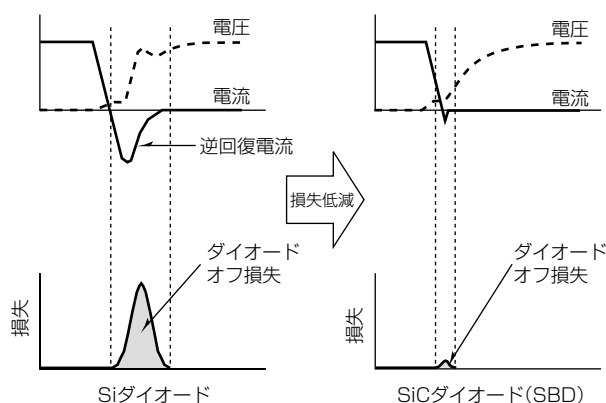


図2. SiダイオードとSiCダイオード(SBD)のターンオフ波形と発生損失比較

IGBTターンオン時にはダイオードの逆回復電流が重畳するが、SiC-SBDを適用した場合、逆回復電流がないため、IGBT側の損失も低減。

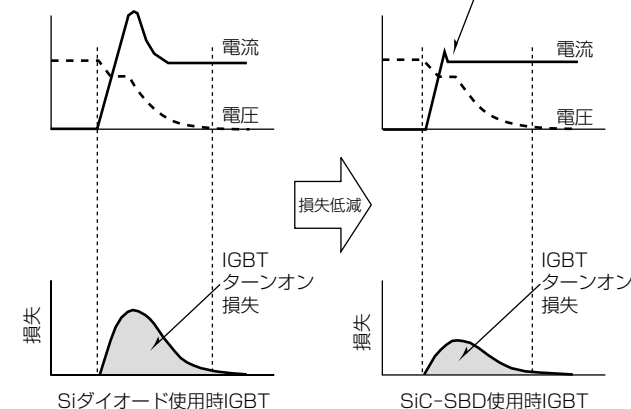


図3. IGBTターンオン波形と発生損失

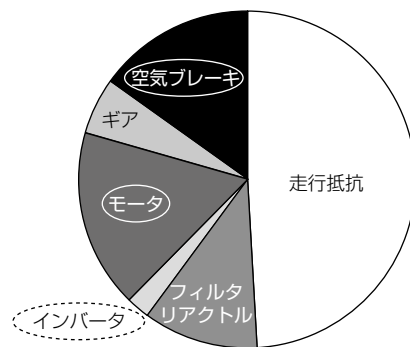


図4. 入力電力量に対する発生損失の内訳例

から、従来の主回路システムでSiパワーデバイスからSiCパワーデバイスに変更しても、SiCパワーデバイスの本来の機能が十分に活用できない。むしろ、“モータ”及び“空気ブレーキ”で多くの電力の消費がみられ、当社としては、SiCパワーデバイスを適用することによる、これらの電力消費の低減に着目して開発・設計を進めた。

3.2 省エネルギー化の方策と設計

一般にインバータ電流及びスイッチング周波数の増加はパワーデバイスの発生損失を増大させるが、低損失を特長とするSiCパワーデバイスの使用によって、インバータ電流及びスイッチング周波数の増加が実現可能となった。

図5に従来のSiパワーデバイスを適用したインバータシステムのブレーキ時の性能曲線と今回のSiCパワーデバイスを適用したインバータシステムのブレーキ時の性能曲線を示す。従来のSi適用システムでは、高速領域で熱的及びモータ電流の制約によって回生ブレーキが制限され、空気ブレーキの補足で車両としてのブレーキ力を保っている。

一方、SiC適用システムでは、高速領域から回生ブレーキとして回生電力を向上させ、主回路システム全体としての省エネルギー効果を高めている。

図5の下側のグラフのような回生動作を実現するためには、高速領域のブレーキ力上限値(停動トルク)を増加させるための低インピーダンスのモータ設計が必要となる(トルク

は電圧の二乗に比例し、周波数とインピーダンスの二乗に反比例する。)。そこで、今回開発したSiC適用インバータシステムに対応したモータでは、モータ電圧の速度比(V/F)が低くなるように設計した。必要なトルクを確保するためにSiC適用インバータシステムのモータ電流は従来のモータ電流に比べて高くなるが、SiCの特長である低損失である点を生かして、素子面積の増大を抑制し、インバータの小型化との両立を可能としている。さらに、パワーデバイスのスイッチング周波数を高く設定することによって、モータ自体の高調波損失も低減した(図6)。

このように、SiCパワーデバイスの低損失を生かし、低インピーダンスモータによる電力回生ブレーキの拡大及び高周波変調によるモータ損失の低減を可能とした。

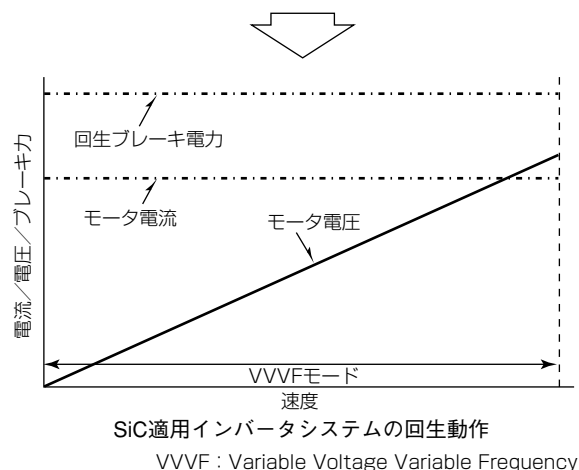
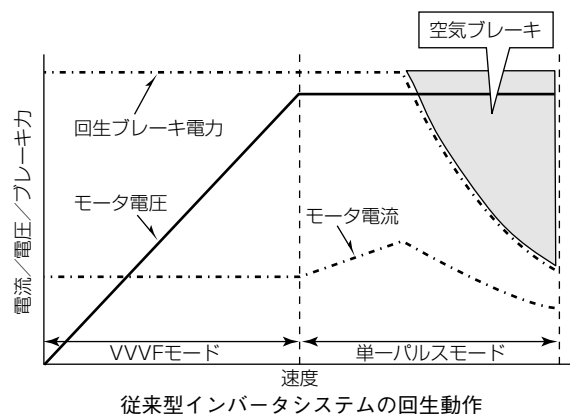


図5. ブレーキ時性能曲線

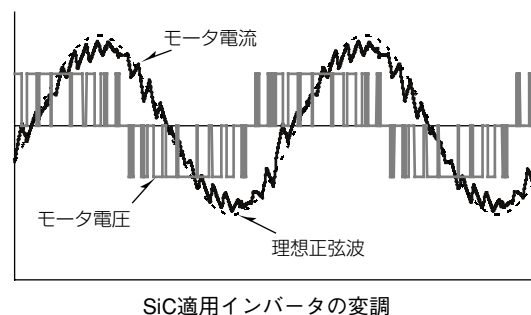
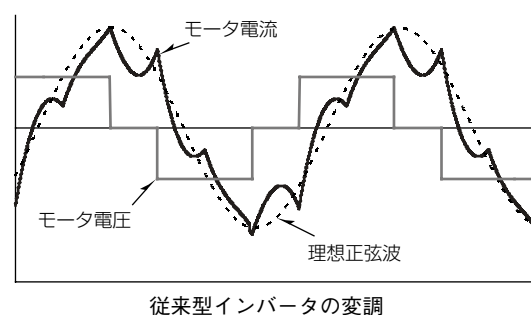
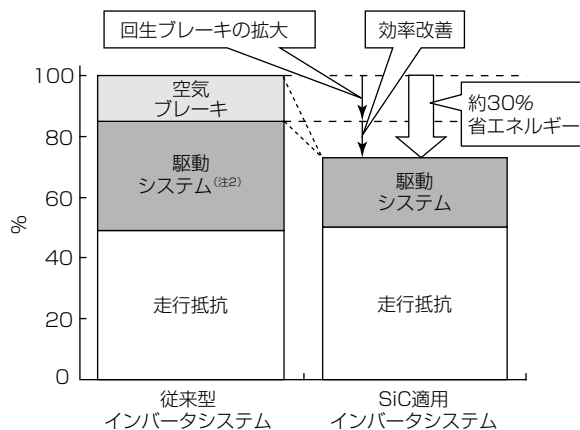


図6. 従来型とSiC適用時のモータ電圧・電流の比較



(注2) 駆動システム：フィルタリアクトル、インバータ、モータ、ギアを合わせた電力消費

3.3 シミュレーションによる評価結果

図7に実路線におけるランカーブシミュレーションから得られた電力消費量を示す。回生ブレーキ性能の向上によって、これまで空気ブレーキで消費されていた運動エネルギーが回生され、実消費電力量が低減される。さらに低損失であるSiCパワーデバイスによるインバータ電力損失の低減、高周波変調によるモータ損失の低減によって、駆動システムの消費も低減されている。SiCパワーデバイスによるこれら効率改善を適用した結果、鉄道車両用インバータのシステムの全エネルギー消費は30%の低減が期待できる。また、空気ブレーキの使用が低減することから、シューメンテナンスの低減も期待できる。

3.4 SiC適用インバータとモータの製品化

鉄道車両用として主回路システム全体での省エネルギー化の考え方に基づいて、最新のSiCパワーデバイスを用いた鉄道車両用インバータを開発した。図8に示すように搭載しているSiCパワーデバイスは、2組のSi-IGBT(1,700V/1,200A)及びSiC-SBD(1,700V/1,200A)で構成している。SiCパワーデバイスの低損失化と高温動作によってパワーデバイスの冷却面の大きさを低減でき、これによってインバータ箱の体積及び質量を低減できる。

今回開発したSiC適用インバータ装置は、従来Siパワー

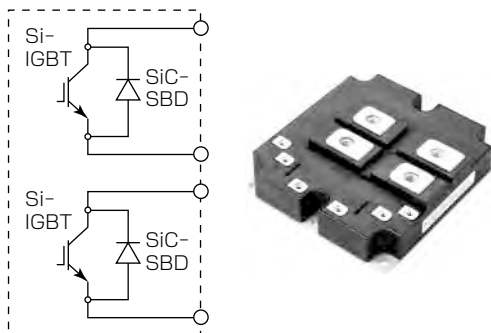


図8. SiCパワーデバイスの回路図と外観



図9. SiC適用インバータ装置

表1. 開発インバータの諸元

入力(架線)電圧	DC750V
主回路構成	2レベル電圧型PWMインバータ
モータ駆動容量	180kW級モータ×4台
冷却方式	走行風自冷

PWM: Pulse Width Modulation

デバイス適用のインバータ装置に対して体積、質量を40%低減した。製品化したインバータ装置の外観を図9に、装置仕様を表1に示す。

また、SiC適用インバータに対応したモータについては、モータ電圧の速度比(V/F)を低くすることで低インピーダンス設計が可能になり、体積を従来の開放型モータから増加させることなく全閉形化でき、高効率と省メンテナンス性を実現した。SiC適用インバータに対応した全閉形モータの外観を図10に示す。

このように、SiCパワーデバイスの適用によってインバータ装置の大幅な損失低減、小型・軽量化が実現できるとともに、さらに、先に述べた全閉形モータとの組合せによって、主回路システムの電力消費の大幅な削減が可能となる。

3.5 SiC適用インバータとモータの組合せ試験

SiC適用インバータ装置とモータの組合せ試験を実施し、従来型インバータシステムとの比較を行った。

図11は従来型インバータシステムでの動作チャートを示す。非同期変調から同期変調へとパルスモードが切り替わる際にモータ電流の跳ね上がりがみられる。

一方、図12に示すSiC適用インバータシステムでは、高周波スイッチングによる全領域非同期変調を適用し、パルスモードの切換えがないため、動作チャート内のモータ電流には電流の跳ね上がりはない。その結果、騒音を従来型インバータシステムに比べ6デシベル低減できた。

4. 補助電源装置の最新技術とSiCパワーデバイス適用時の期待

4.1 小型・軽量化への方策

図13に示すように、補助電源装置は入力の高圧回路と出力の低圧回路との絶縁のために商用周波のトランスを適用しており、このトランスが装置の小型化・軽量化の妨げとなっていた。

この対策としては、図14に示すような直流中間リンク回路で一旦、DC-DCコンバータで入出力を絶縁する高周波リンク方式が有効となる。この方式は、DC-DCコンバータ部を高周波スイッチングすることによってトランスの小型・軽量化が図れる一方、高周波化によるパワーデバイ



図10. SiC適用インバータ対応全閉形モータ

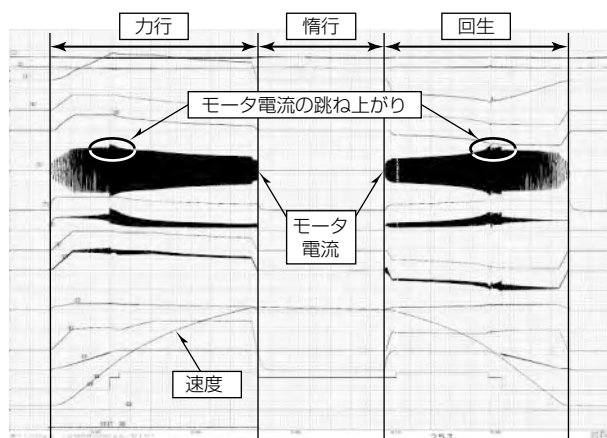


図11. 従来型インバータシステムでの動作チャート例

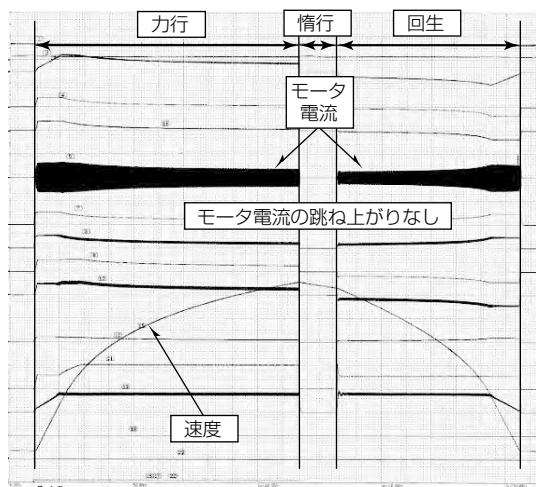


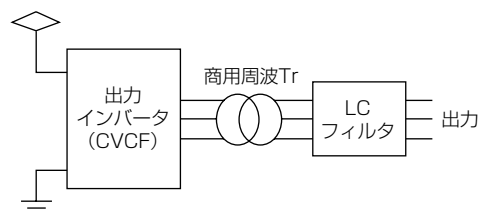
図12. SiC適用インバータシステムでの動作チャート例

スのスイッチング損失の増大によって、装置効率が低下する、又は冷却器が大型になるという課題があり、大容量の補助電源装置への適用が困難であった。しかし、スイッチング損失の少ないSiCパワーデバイスの適用によって、冷却器の大型化が不要となるとともにトランスの小型・軽量化が実現でき、大容量の補助電源装置でも、一層の小型・軽量化が見込める。

4.2 高効率化・高信頼性への方策

補助電源装置は冗長性を考慮して車両編成内に2台以上搭載されるのが一般的で、一台が故障した場合に健全な他方によって車両編成内の電源が確保される。冗長性確保の方式としては、大きく分けて延長給電方式と並列同期運転方式とに分けられる。

その中の一つとして、当社は、各装置を独立して運転しつつ出力電圧・周波数を同期制御する自律分散型並列同期制御による並列運転を提案している。この方式は、装置間の同期制御線が不要という特長があり、回路構成の簡素化によって電源確保の信頼性を向上させることができる。さらに、補助電源装置は軽負荷時に電源効率が低下する傾向にあるため、暖房・冷房を必要としない軽負荷時には並列



CVCF : Constant Voltage Constant Frequency
LCフィルタ : コイル(L)とコンデンサ(C)によるローパスフィルタ

図13. 従来型補助電源装置

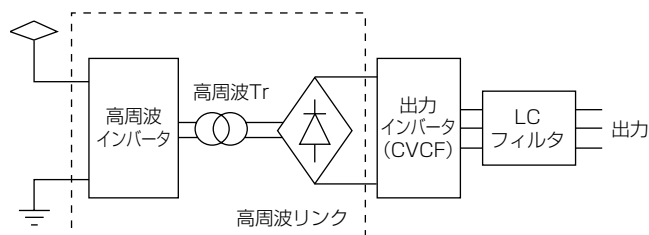


図14. 高周波リンク型補助電源装置

運転台数を制限し、車両編成全体として常に高効率の状態で運転制御する軽負荷休止制御も提案している。この方式によって、車両編成内における補助電源システム全体としての高効率化が期待できる。

5. む す び

当社における最新のパワーデバイスであるSiCパワーデバイスの特長を述べるとともに、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率モータとの組合せによる主回路システム全体としての省エネルギーを実現するための技術、及び補助電源システムの最新技術とSiCパワーデバイス適用時への期待について述べた。

地球規模での更なる環境負荷低減及び省エネルギー化が求められる中、鉄道システムに対する期待は大きく、鉄道車両用インバータシステム及び補助電源装置の適用拡大が考えられる。

当社としては、鉄道という高効率大量輸送手段をこれまで以上に環境に優しいものとするために、SiCパワーデバイスの更なる高性能化を進め、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率モータを組合せた主回路システム、SiCパワーデバイスによって小型化した鉄道車両用インバータ装置及び補助電源装置の製品化を展開していく。

参 考 文 献

- (1) 中山 靖, ほか: SiC-SBD適用インバータによる鉄道車両用電動機評価, 2010年電気学会全国大会講演論文集, 4-139 (2010)
- (2) 生方伸幸, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー運転について, 2011年電気学会全国大会講演論文集, 5-078 (2011)

蓄電デバイスの 車両推進制御システムへの応用

根来秀人* 北中英俊*
 畠中啓太* 岡田万基*
 山崎尚徳**

Application of Energy Storage Device for Traction System

Hideto Negoro, Keita Hatanaka, Hisanori Yamasaki, Hidetoshi Kitanaka, Yuruki Okada

要 旨

近年、リチウムイオン電池を始めとする電力貯蔵デバイスの性能が向上し、自動車分野はもとより、鉄道分野でも、回生電力の吸収や架線電圧の補完用途など、実用化にむけた開発が進められている。

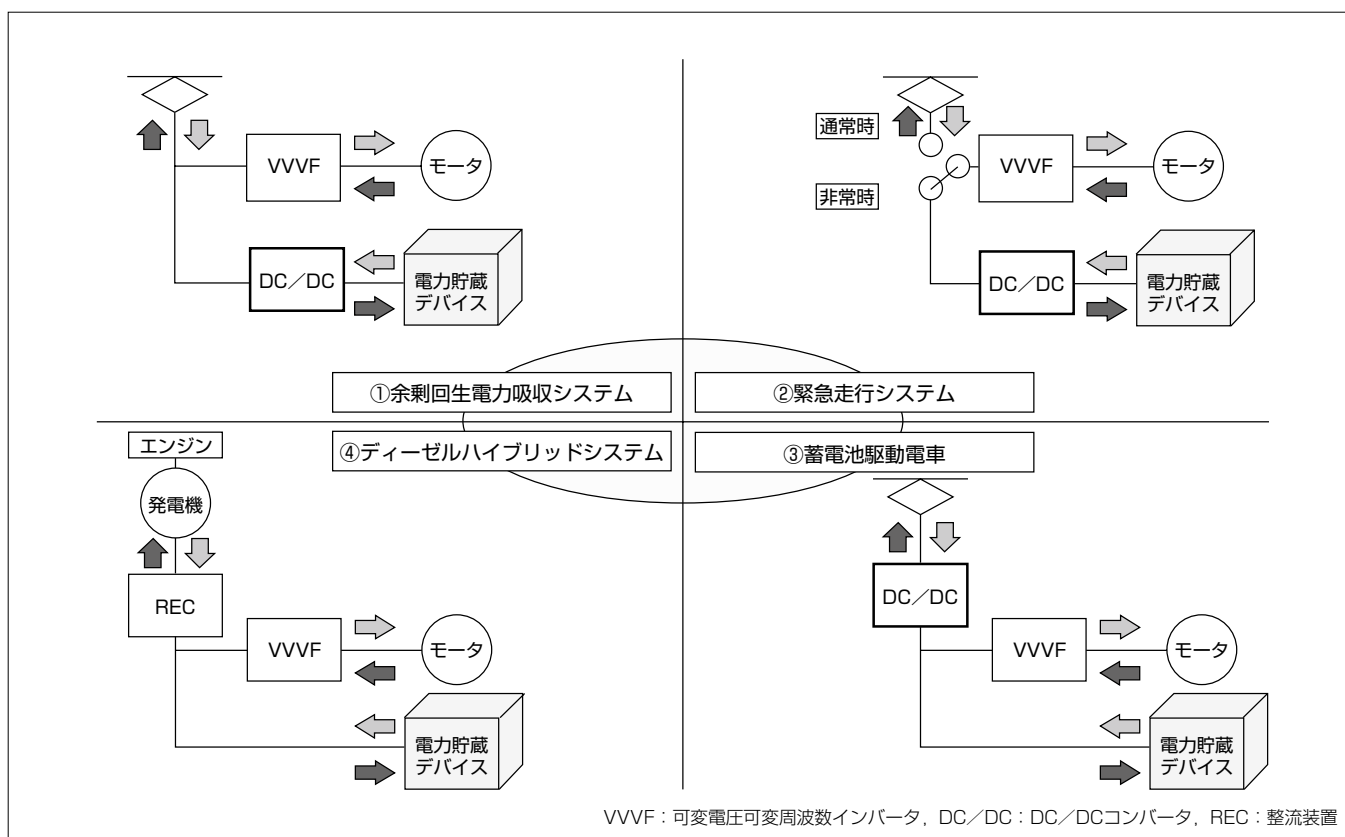
三菱電機は、車両エネルギー管理システム(TEMS)の構成要素の一つとなる電力貯蔵デバイス応用の車両推進制御システムを開発し、その一部は、既に、東日本旅客鉄道㈱と小田急電鉄㈱の協力を得て、実車両での試験を終了し、営業投入が可能な段階へと進んでいる。

電力貯蔵デバイス応用の車両推進制御システムとしては、基本的に、①既存の電車システムに電力貯蔵デバイスを追設し余剰な回生電力を吸収することで回生率向上を図る余剰回生電力吸収システム、②架線停電時に電源を電力貯蔵

デバイスに切り換えて最寄り駅までの走行を可能にする緊急走行システム、③非電化区間でのCO₂の低減、排出ガスのゼロ化、低騒音化を実現する蓄電池駆動電車、④気動車の燃費向上、排ガス及び騒音の低減を実現するディーゼルハイブリッドシステムの4つの方式がある。当社はこの4つの全ての方式について開発を推進し、今回、それぞれ実車両に適用可能な状態まで仕上げた。

今後、これらシステムの実用化を推進していくとともに、電力貯蔵デバイスとディーゼルエンジンとの組合せなどによる更なる高効率システムを提案していく。

本稿では、TEMSにおける上記の各種電力貯蔵システムの紹介と、それら各方式の詳細及び開発状況について述べる。



電力貯蔵デバイスを応用した車両推進制御システム

電力貯蔵デバイスを応用した車両推進制御システムは大きく4つに分類される。①余剰回生電力吸収システム、②緊急走行システム、③蓄電池駆動電車、④ディーゼルハイブリッドシステムである。①は車両がブレーキをかける際に発生する回生電力を、路線上に負荷がない場合に電力貯蔵デバイスに蓄え、力行時に使用するもの、②は架線停電時等の非常時に、電力貯蔵デバイスを利用して最寄り駅までの車両の移動を確保するものである。③は電力貯蔵デバイスを利用して非電化区間を走行するためのシステムであり、④は電力貯蔵デバイスの利用によって気動車の省エネルギー化、低排出ガス化、低騒音化を図るシステムである。

1. ま え が き

近年、地球温暖化対策として、CO₂排出量削減や、化石燃料消費量低減が求められている。その対策の1つとして環境負荷の少ない移動輸送手段である鉄道の重要性が高まり、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

一方で、リチウムイオン電池を始めとする電力貯蔵デバイスの性能が向上し、自動車分野では既に実用化が進められ、鉄道分野でも、回生電力の吸収や架線電圧の補完用途等への期待が高まっており、開発が急ピッチで進められている。

そのような状況の下、当社は、東日本旅客鉄道㈱と小田急電鉄㈱の協力を得て、電力貯蔵デバイスを応用した車両推進制御システム開発を推進してきた。

本稿では、それらの開発内容を述べるとともに、今後の展望として、車両編成全体の情報を管理する車両情報統合管理装置(Train Integrated Management System：TIMS)が、電力貯蔵デバイスやディーゼルエンジンを統合管理し車両編成内のエネルギーを高効率に制御する方式について述べる。

2. 電力貯蔵デバイスを応用した車両推進制御システム

電力貯蔵デバイス応用の車両推進制御システムとして、以下の4つの用途で、実車両での開発検証を行ってきた。

- (1) 余剰回生電力吸収システム
- (2) 緊急走行システム
- (3) 蓄電池駆動電車
- (4) ディーゼルハイブリッドシステム

以下に、それぞれの詳細について述べる。

2.1 余剰回生電力吸収システム

電車が減速する際にモータが発電する電力を架線に戻す回生ブレーキで、例えば同じ線区内を走る車両が少なく、使用される電力が少ない場合、回生電力は一部しか利用されずに減速時のエネルギー(回生エネルギー)の多くが機械ブレーキによって熱として消費される。

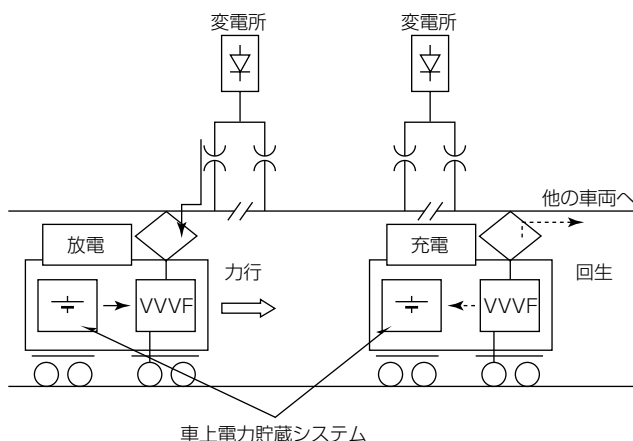


図1. 車両への電力貯蔵デバイスの搭載

図1は、この回生エネルギーの有効活用のために、車両内に電力貯蔵デバイスを搭載したものであり、この電力貯蔵デバイスによって、ブレーキ時の回生電力の一部を吸収し、加速(力行)時にその電力を消費することでトータルでエネルギー消費量の削減を可能とする。また、安定した回生ブレーキの確保によって、車両性能の向上を図ることができる。

今回、実車両に電力貯蔵デバイスとその蓄電電力を制御(充放電制御)する電力変換装置とを搭載し、走行試験を実施した結果、回生率2～5%の改善が得られることを実証した。

なお、今回は、電力貯蔵デバイスとして、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が、これ以外の電力貯蔵デバイスの使用も可能であり、今後、最適な電力貯蔵デバイスの選択を行っていく。

2.2 緊急走行システム

緊急走行システムの構成を図2に示す。このシステムは、架線停電時に本線上で車両が立ち往生することを防ぐため、最寄り駅まで自力回送するためのバックアップ電源として、電力貯蔵デバイスを利用することを目的としている。

このバックアップ電源を用いた主回路システムの動作確認として、実車両でパンタグラフを下ろし、電源を電力貯蔵デバイスのみとした状態で走行試験を実施した。その結果、編成の消費電力を制限した状態で、10両編成が約800m移動できることを確認した。

2.3 蓄電池駆動電車

蓄電池駆動電車の構成を図3に示す。これは、非電化区

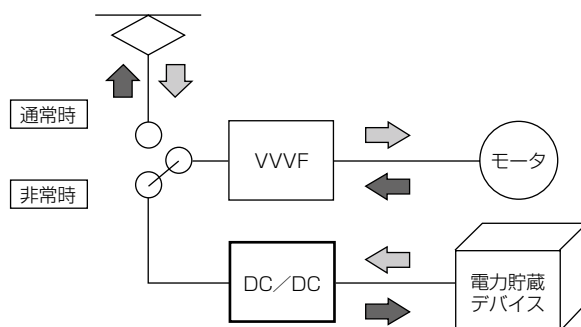


図2. 緊急走行システム

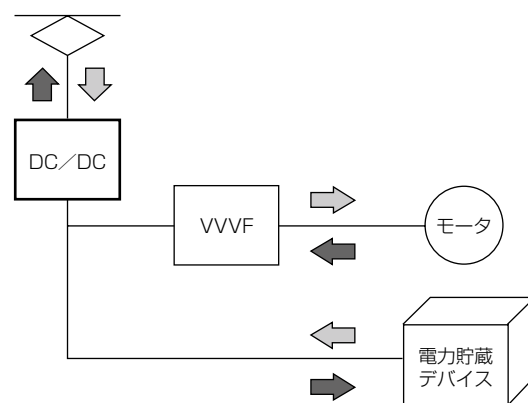


図3. 蓄電池駆動電車

間の走行で、既存の気動車と比較してCO₂排出量の低減、燃費向上、低騒音化を目的としたシステムであり、以下の特長を持つ。

- (1) 非電化区間は電力貯蔵デバイスを電力源として走行
- (2) 電化区間は電力貯蔵デバイスと架線からの電力を併用。
架線の電圧低下を補償
- (3) 電化区間／非電化区間の直通運転が可能
- (4) 非電化区間でのシステム効率を高めた回路構成

この蓄電池駆動電車では、実車両で検証を実施し、電化区間走行や地上側バッテリーポストへの充電、非電化区間での電力貯蔵デバイスのみを用いた走行等、各種機能の性能検証を終えている。図4に実車両の写真を示す。

2.4 ディーゼルハイブリッドシステム

ディーゼルハイブリッドシステムとは、ディーゼルエンジンで駆動する発電機と電力貯蔵デバイスを電力源として、車両駆動用電動機を駆動するシステムである。従来の気動車に比べ、ブレーキ時の回生電力を電力貯蔵デバイスで吸収できること、さらに、エンジン稼働中も、電力貯蔵デバイスを電力のバッファとして利用することで、エンジンの高効率運転を実現できる。このシステムでは、エンジンの高効率運転による燃料費の低減や排ガスの削減、エンジン稼働タイミングの最適化による駅周辺での低騒音化等が見込める。

今回、表1に示す検証設備で、このディーゼルハイブリッドシステムの動作検証を実施した。その結果を図5に示す。起動時には電力貯蔵デバイス(蓄電池)から電力が放出され、定常運転時にはディーゼル発電機がほぼ一定の定速運転を実施しながら充電、さらに減速時には回生電力が充電されることを確認した。この検証によって、ディーゼルエンジンの高効率運転と電力貯蔵デバイスとの併用による省エネルギー運転の実現を実証した。

また、このシステムでは、発電機から送出する電力と電力貯蔵デバイスから送出する電力の2つの電力が存在するため、それらの電力分担の最適化が重要なポ



図4. 蓄電池駆動電車

イントとなる。具体的には、以下の条件に基づいて、電力分担が決定される。

- (1) 電力貯蔵デバイスの充電量の使用範囲(寿命を考慮した充電量の使用範囲を設定)
- (2) 路線情報(連続勾配、駅間距離等)
- (3) 車両性能(最高速度、加速度等)
- (4) 運行情報(特急、各駅停車等)

図6で、この電力分担の最適化について述べる。例えば特急車両①の場合、ブレーキの頻度が少なく電力貯蔵デバイスによる回生電力吸収がほとんど期待できないため、電力貯蔵デバイスの効果が小さくなる。この場合、エンジン出力を大きく取り、電力貯蔵デバイスの容量を小さくする方が価格的に好ましい。

逆に、近郊一般車両②の場合、ある程度の頻度で回生電力の吸収が期待できるため、電力貯蔵デバイスの出力を大きく取り、エンジンの出力を小さくすることによって、回生電力を効率的に吸収・利用して、省エネルギー化、低騒音化、低排ガス化を図ることができる。

表1. 検証設備の仕様

駆動用電動機	60kW × 2 台
発電機	330kW
蓄電池容量	18kWh

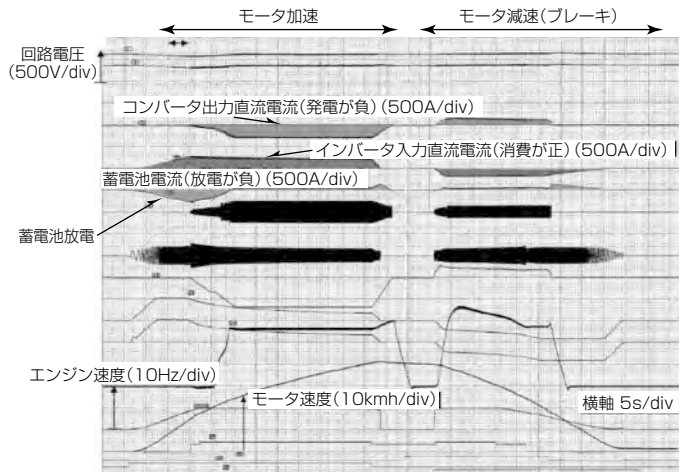
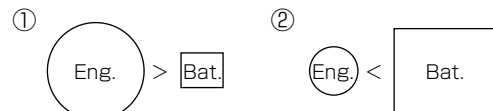


図5. ディーゼルハイブリッドシステムの動作



	①	②
適用する用途	特急車両	近郊一般車両
連続勾配／連続走行	有利	不利
エンジン運転の高効率化	可能	可能
省エネルギー効果	小	大
低騒音／低排ガス効果	小	大

Eng.: Engine, Bat.: Battery

図6. ディーゼルハイブリッドシステム内での電力分担

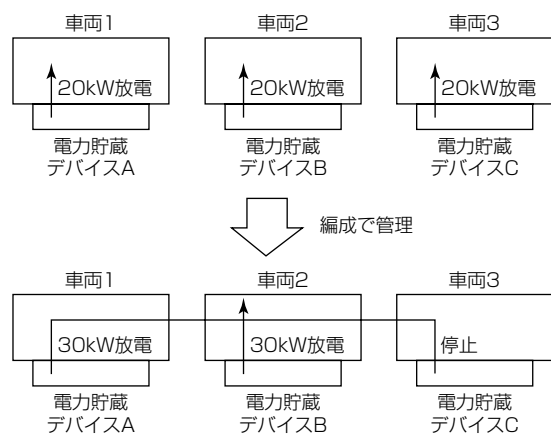


図7. 使用する電力貯蔵デバイスの限定による充放電回数低減，長寿命化

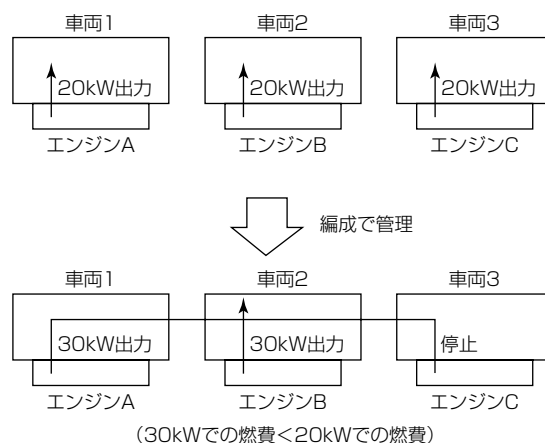


図8. 使用するエンジンの選択による編成での燃費最小化

3. 電力貯蔵デバイスを用いたシステムの更なる効率化

電力貯蔵デバイスを用いたシステムの更なる効率化・安定化を考えた場合，車両内での効率化を図るだけでなく，もう一段上位の視点に立ち，TIMSの利用によって，編成内の複数の電力貯蔵デバイス及びエンジンを統合的に管理し，編成全体での効率化，又は電力貯蔵デバイスの長寿命化を図る必要がある。その手法として，以下の2つが挙げられる。

(1) 編成全体での電力貯蔵デバイスの長寿命化

図7に示すように，編成内に複数の電力貯蔵デバイスが存在する場合，車両の使用条件によっては，デバイスごとに同一電力で充放電を行うのではなく，使用する電力貯蔵デバイスを限定し，残りのデバイスの充放電回数を抑制することで，長寿命化を図ることができる。

(2) 編成全体でのエンジン燃費の最小化

図8に示すように編成内に複数のエンジンが存在する場合，それぞれが同一の出力で運転するのではなく，車両の使用条件によっては，編成全体でエンジンの燃費が最小となるよう，動作させるエンジンとその出力を選択することによって，更なる効率化を図ることができる。

4. む す び

車両エネルギー管理システム (TEMS) として，電力貯蔵デバイスを車両推進制御システムに応用し，以下の点で，更なる環境負荷の低減と利便性の向上を図るシステムを確立した。

- (1) 省エネルギー化
- (2) 低騒音化及び低排ガス化
- (3) 架線停電時などの緊急時における最寄り駅までの退避や，電化／非電化区間直通運転等の利便性の向上

具体的には，余剰回生電力吸収のため電力貯蔵デバイスを導入することによる回生率の向上，また，架線停電時における最寄り駅までの自走や非電化区間の電力貯蔵デバイスの電力を用いて走行することによる，CO₂の低減，排出ガスのゼロ化，低騒音化及び電化／非電化区間直通運転，さらに，気動車の省エネルギー化，低騒音化，低排ガス化である。

加えて，編成内の電力貯蔵デバイスやエンジンの統合制御で，車両の使用条件によっては，電力貯蔵デバイスの充放電回数抑制による長寿命化や，編成全体でのエンジンの燃費最小化によって，更なる効率化を図ることができる。

今後，ここで得た実証結果を基に，電力貯蔵デバイスの車両推進制御システムへの適用を拡大していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 山田健一，ほか：車上用電力貯蔵システムの開発，第46回 鉄道サイバネシンポジウム論文集，514 (2009)
- (2) 北中英俊，ほか：蓄電池技術を応用した車両推進制御システム，三菱電機技報，83，No.11，650～652 (2009)

省エネルギー化に取り組む 列車運転制御システムの最新動向

山本 律* 玄田和行*
白鳥弘敏* 田原一浩*
中桐慶之*

Latest Development in Train Control System Contributing to Energy Savings

Tadashi Yamamoto, Hirotooshi Shiratori, Yoshiyuki Nakagiri, Kazuyuki Genda, Kazuhiro Tahara

要 旨

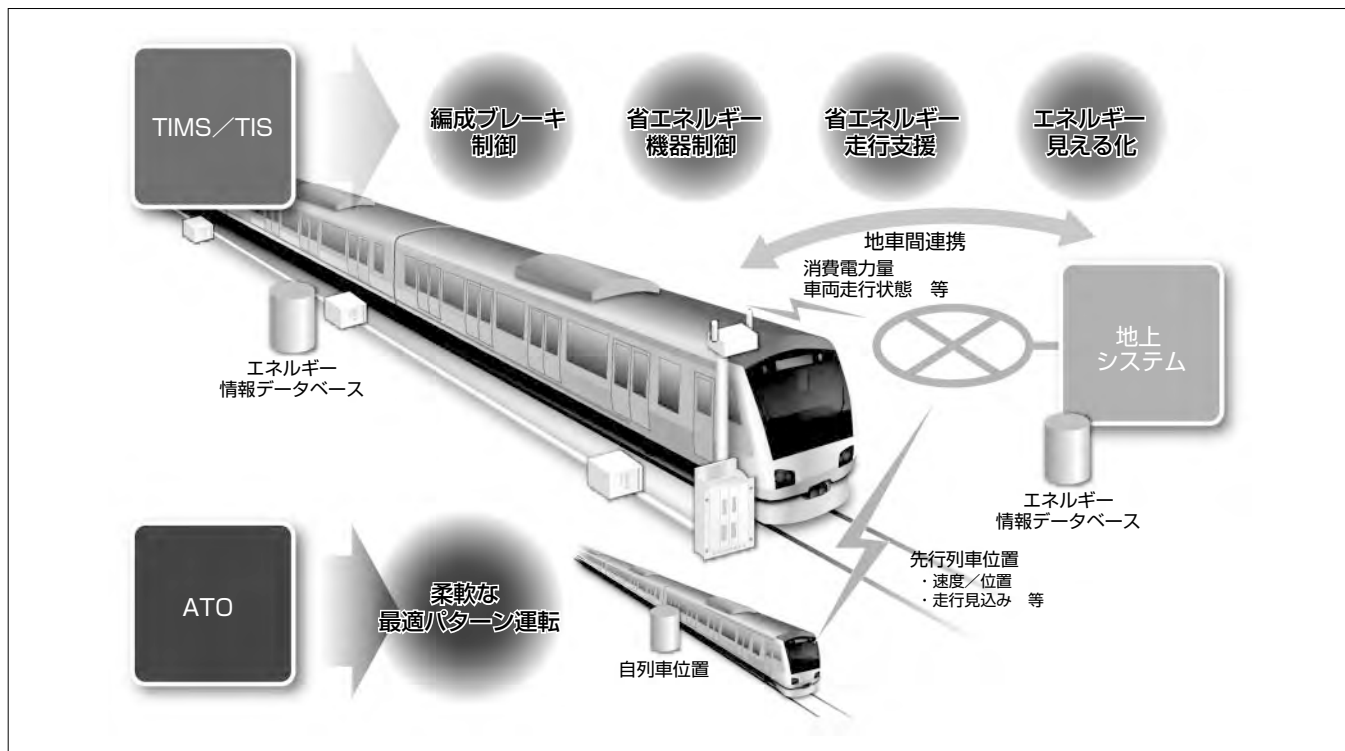
鉄道車両では、パワーエレクトロニクス技術の進歩や回生ブレーキの実用化など、各機器で省エネルギーに関する取組みが従来実施されてきた。近年省エネルギーに対するニーズがより一層高まる中で、定時性、利便性及び快適性を維持・向上させることと更なる省エネルギー化を両立させる施策として、情報通信技術 (ICT) の活用による列車運転制御システムの高度化が必要である。

本稿では、車両エネルギー管理システム (TEMS) の取組みの中で、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), 自動列車運転装置 (Automatic Train Operation : ATO) 及び地車間連携など、ICT を活用した列車運転制御システムの最新動向について述べる。

車両システムに TIMS / TIS を適用することで、編成内のブレーキ分担を最適化して回生ブレーキを最大限活用する“編成ブレーキ制御”や、回生ブレーキ使用時にタイミン

グ良く負荷機器を稼働させる制御、及び車両走行状態 (時刻、位置情報、季節等) に応じてサービス機器の能力を制御する“省エネルギー機器制御”などによる省エネルギー化が可能となる。また、車両機器のモニタリングの延長線上で実現できる“車両エネルギーの見える化 (消費電力や付帯情報のエネルギー情報データベース化)”を適用することで、省エネルギー施策を定量的に評価し、推進することが可能と考える。

一方、ATO などによる運転制御でも、省エネルギーの観点から最適化された走行パターンでの走行が有効であり、安全性や定時性を確保しつつ、これを実現するには詳細な路線情報とそれに応じた制御を行う必要がある。近年インフラが整いつつあるデジタル無線伝送を用いた常時接続できる地車間連携ネットワークを活用することで、柔軟かつリアルタイムな制御や、実績データを活用した走行条件の改善を行うことができる。



省エネルギーに取り組む列車運転制御システムの最新動向

車両エネルギー管理として複数の機器・地上システムを連携させた改善に取り組んでいる。TIMS/TISを活用した複数機器を連携した制御による改善と、地車間連携ネットワークを活用した、最適な走行パターンによる走行の実現が可能である。また、エネルギーの見える化を推進エンジンとして、省エネルギー施策を立案・実施した結果のフィードバックを行い、更なる改善につなげる。

1. ま え が き

列車のエネルギー最適化を目指す車両エネルギー管理システム (TEMS) のうち、TIMS/TIS及び地車間連携による情報共有をベースとして、複数機器・システムを連携した列車運転制御システムにおける最新動向について述べる。

まず2章ではTIMS/TISを用いた省エネルギー化として、編成制御や省エネルギー機器制御について述べ、3章ではATOによる省エネルギー運転制御の考え方や課題と改善策、及び運行管理との連携などについて述べる。

2. TIMS/TISによる省エネルギー化

2.1 編成制御による省エネルギー化

TIMS/TISを用いて編成内複数の機器を最適制御することで省エネルギー化が可能となる。その実現方法を以下に述べる。

(1) 編成ブレーキ制御(編成ブレンディング制御)

TIMS/TISはブレーキ指令時に編成で必要なブレーキ力と各車で負担すべきブレーキ力を算出し、主回路制御装置 (VVVF) が負担できる回生ブレーキ量を除いた不足分を、各車の空気ブレーキ力で負担するようブレーキ装置 (BCU) に指令する。これによって編成内の回生ブレーキを最大限活用することが可能となり、運転エネルギーを改善できる。図1にそのイメージを示す。

(2) 補機・サービス機器の回生電力有効利用

TIMS/TISを用いて、回生ブレーキ動作中に補機やサービス機器のタイミング制御を行うことで、自編成の回生電力を有効利用できる。

ブレーキ用コンプレッサの場合、元空気タンクの空気圧が規定値を下回ると間欠稼働を行うが、当該空気圧を常時監視し、可能な範囲で回生ブレーキ動作中にコンプレッサを稼働させる。

空調装置の場合、冷房は駅停車時のドア開の乗降中に室内温度が上昇することが予想されるため、室内温度を監視し設定温度しきい値に近い場合は回生ブレーキ動作中に空調を稼働させる。図2にそれらのイメージを示す。

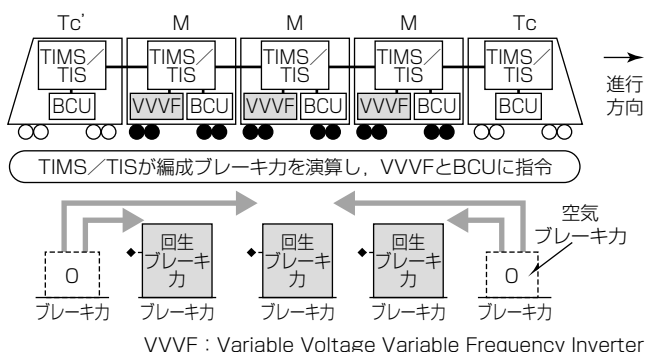


図1. 編成ブレーキ制御のイメージ

(3) 運転台数の編成制御

並列同期運転が可能な補助電源装置 (SIV) を複数搭載している場合、SIVの負荷を監視し、軽負荷の場合にはSIVの運転台数を制限することで省エネルギー化ができる。

ディーゼルハイブリッドシステム等で電力貯蔵デバイスやディーゼルエンジンを複数搭載する場合、充放電状況に応じて使用する電力貯蔵デバイスを限定し長寿命化を図ることや、編成全体の負荷状況に応じてエンジンの運転台数をコントロールして省エネルギー化を図ることが可能と考える。

2.2 省エネルギー機器制御

TIMS/TISを用いてサービス機器の稼働状態を最適化することで、省エネルギー化ができる。

空調装置の場合、空調の基準温度設定を季節ごと、時間帯ごと及び営業運転中、回送中並びに泊車中等の車両運用状態ごとに最適に設定することで節電する。

表示器や車内照明機器なども、前述同様の車両運用状態に加え、駅停車中又は走行中などの判断によって、きめ細かなON/OFF制御を行い節電する。

2.3 エネルギーの見える化

近年は編成内のエネルギーの見える化が注目されている。TIMS/TISで収集した機器のモニタリング情報は、従来、機器の故障や動作回数等、車両保全に関する情報を中心に活用し、自編成の消費電力に関する情報については積極的な活用に至っていなかった。

編成内のエネルギー見える化を実現するために、TIMS/TISが収集する機器のモニタリング情報の消費電力を示す情報に、車両走行状態（時刻、位置情報、運転情報）を付帯情報として記録する。それらのデータを地車間連携ネットワーク（デジタル無線通信）を活用して地上へ送る仕組みを構築し、編成の消費電力を示すデータベース（以下“エネルギー情報データベース”という。）を新たに構築する。このエネルギー情報データベースを活用することで、省エネルギーにつながる次のようなことが実現可能となる。

(1) 編成内エネルギー見える化

エネルギー情報データベースを解析することで車両の各編成の編成内エネルギー見える化を行う。それによって、

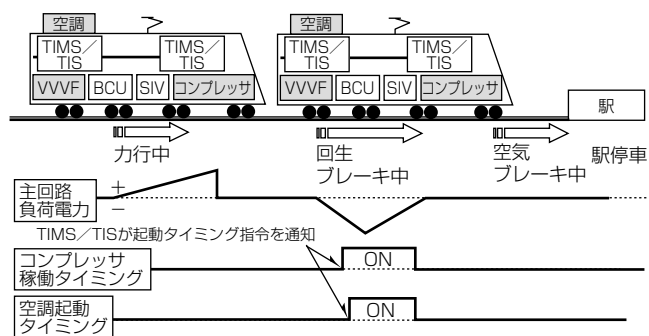


図2. 回生電力有効利用のイメージ

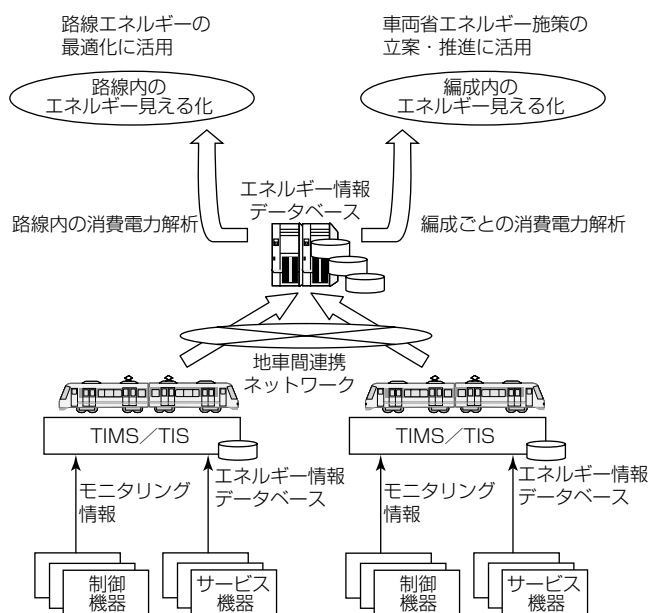


図3. エネルギー見える化のイメージ

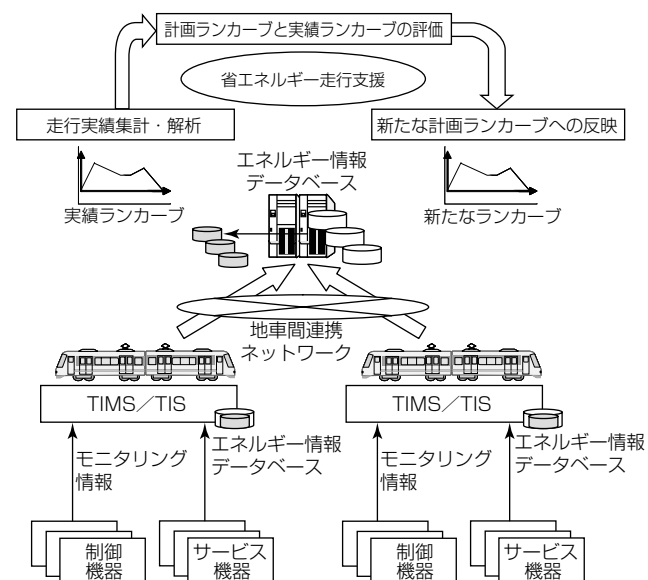


図4. 運転エネルギー効率を考慮したダイヤ計画への反映についてのイメージ

車両に搭載されている各種機器の効率改善や回生有効活用などの省エネルギー施策について、節電による費用対効果まで定量的に評価できるようになり、総合的かつ効率的な車両システムの立案・推進に活用できる。図3にそのイメージを示す。

(2) 路線内エネルギー見える化

収集したエネルギー情報データベースを路線ごとに解析することで路線ごとの回生エネルギーの有効利用状況の検証や、地上電力設備の検証が可能となる。図3にそのイメージを示す。また、地上変電設備とTIMS/TISを連携することで車両状態に応じた、き電最適制御システム(TRECS)が構築可能となり、き電システム全体の省エネルギー化に貢献できる。TRECSについては、特集論文“路線全体の回生エ

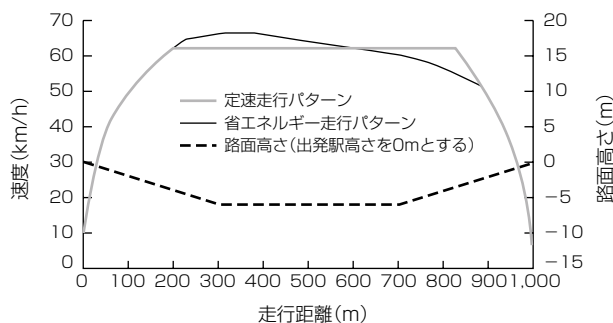


図5. 列車走行シミュレーション結果

ネルギー有効活用”に述べる。

(3) 運転エネルギー効率を考慮したダイヤ計画の立案

編成ごとのエネルギー情報データベースから、走行ごとに消費電力情報や位置情報と運転情報(速度、ノッチ情報等)を抽出することで、走行ごとの実績ランカーブと消費電力を把握できる。この実績ランカーブの消費電力と地上側輸送計画システムで作成した計画ランカーブの消費電力を比較検証することで、省エネルギー化の観点から最適なダイヤ計画を立案し、運転エネルギーの削減につなげることができる。図4にそのイメージを示す。

また後述のATO運転パターンへの適用や手動運転時における走行支援との連携も可能である。

3. 省エネルギー運転制御

3.1 従来ATOによる運転制御

列車走行については同一駅間を同一時分で走行しても、走行パターンによって消費電力量が変化することが知られている⁽¹⁾。運転時分を考慮しつつ、省エネルギーの観点から最適化された走行パターンによって、列車を走行させる手法として、ATOを用いる方法が有効である。従来のATOの走行パターンは、鉄道事業者が運転士向けに設計した運転曲線をそのまま利用していたが、省エネルギー化に最適化した走行パターンとすることも可能である。

当社で実施した列車走行シミュレーション結果(図5)では、惰行(惰性走行)を活用することで、運転時分を変更することなく消費電力量を11%削減できることを確認した⁽²⁾。また、実車に適用して走行試験を行った結果、数～十数%の電力量削減効果を得た実績がある。

通常走行時の省エネルギー化については前述のような走行パターンの最適化が効果的であるが、列車遅れなどダイヤ乱れが発生している場合の最適な運転パターンは、通常のものとは異なる。

列車遅れ時にダイヤ回復を優先するために力行を多用する必要がある一方、先行列車との間隔が十分ではない場合には、自動列車制御装置(Automatic Train Control: ATC)によるブレーキが動作する可能性が高まる。省エネルギーの観点や乗心地の観点から、不要な加速やブレーキ

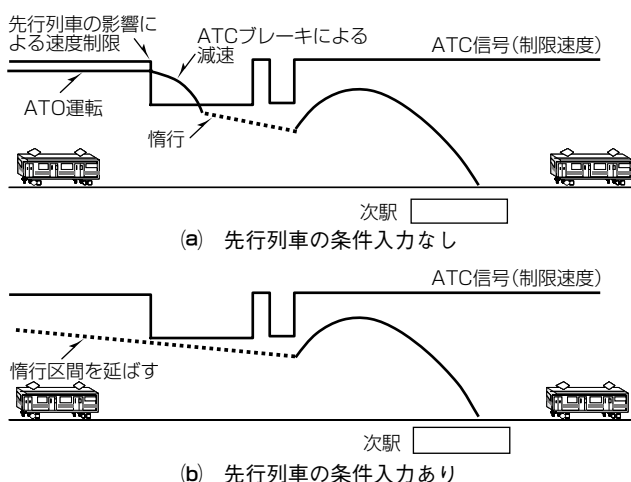


図6. 先行列車の条件入力の有無によるATO走行パターンの違いのイメージ

動作を避けることが望ましい。このため当社は、単独の列車に与えられた情報を基にした解決策として、ATCの予告信号を活用することで不要な加速を防ぐ方法を提案⁽²⁾している。

3.2 地車間連携を含めた改善

3.1節ではATOを使用した単独編成による省エネルギーへの取組みを述べた。これに対し、地車間ネットワークを活用して、ATOに先行列車の位置、速度及び今後の走行見込みを入力することで、より省エネルギー化と乗り心地の改善を実現する列車制御を検討している。

図6にそのイメージを示す。先行列車の条件を入力しない状態でATO走行を行った場合、先行列車との間隔が狭まるとATCの速度制限による常用最大ブレーキが動作する。しかし、ATOに先行列車の状態を入力すれば、力行が不要と判断して惰行区間を延ばし、力行及びATCによるブレーキを最小限にすることができる。これによって省エネルギー化と乗り心地の改善を図ることができる。

地車間ネットワークを使用した具体的な走行パターン決定手順を次に示すとともに図7にそのイメージを示す。

ATOは自列車の現在位置や現在速度及び制限速度を考慮して次駅の到着予定時刻を求め、その情報を地車間ネットワークによって運行管理システムへ伝送する。運行管理システムでは受信した車上からの情報を基に信号機制御の競合判断を行い、進路制御タイミングを求める。このように、車上で管理する正確な位置や速度から走行予測した時刻を用いて運行管理システムが競合判断することで、信号機競合判断の高精度化、進路制御タイミングの最適化が可能となる。

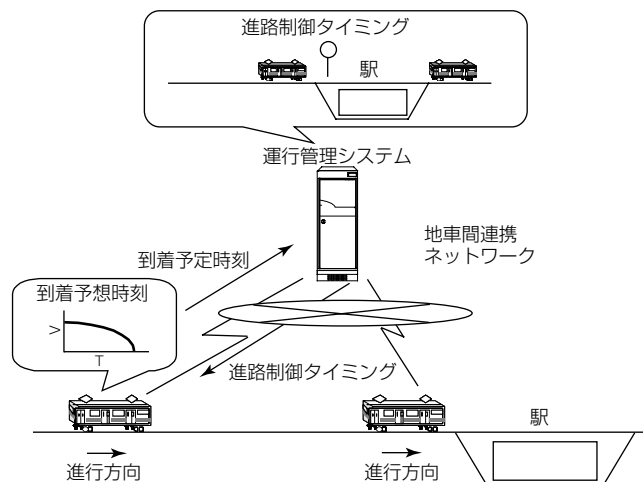


図7. 先行列車の状態に応じた列車運転イメージ

3.3 手動運転時における省エネルギー走行支援

3.2節ではATOによって省エネルギー化を実現する方法を提案した。一方で、ATOが導入されない手動運転の路線でも、TIMS/TISからメッセージや警報等を出力することで、乗務員への注意を喚起する方法も検討している。この方法であればATOを導入しない区間でも、先行列車の状態に応じて、省エネルギー化を考慮した運転を支援することができると思う。

4. む す び

列車運転制御における省エネルギー化について、TIMS/TISの活用や省エネルギー運転制御及び地車間連携ネットワークの活用など、ICTを活用した列車運転制御システムの最新動向について述べた。

世界的に地球温暖化防止と経済成長を両立させる低炭素社会の実現を目指しており、国内でも東日本大震災以降のエネルギー政策の見直しや電力供給事情の変化を背景に、省エネルギーに対するニーズが今後より一層高まると考えられる。このような社会的背景の中、汎用・高速な通信技術が普及期を迎え、ここに述べた地車間連携システムの構築も具体化されつつあるため、実用化に向けてひきつづき開発を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 田部典之, ほか: 省エネで電車を運転する, RRR, 60, No.6, 6~9 (2003)
- (2) 吉本剛生, ほか: 列車運転制御における省エネルギー化, 三菱電機技報, 83, No.11, 660~663 (2009)

駅エネルギー管理システム

白石広幸* 丸井一也*
 村山 聡* 竹村文吾**
 曾田圭一*

Station Energy Management System

Hiroyuki Shiraishi, Satoshi Murayama, Keiichi Soda, Kazuya Marui, Bungo Takemura

要 旨

地球温暖化防止に向けたCO₂削減要請や東日本大震災以降の急激な電力供給事情の変化を背景にスマートコミュニティ・スマートグリッドと呼ばれる次世代社会インフラ構築への取組みが加速している。

駅では空調・照明を始めとして昇降機や自動改札機等、乗客が安心して快適に鉄道を利用するための多くの設備が稼働している。三菱電機はこれまでも駅設備管理システムや高効率機器の提供によって駅運営の安定化、業務効率化、省エネルギー化に貢献してきた。しかし低炭素化社会の実現に向けて地球規模で再生可能エネルギーの導入が加速する中、これからの駅はその立地条件や規模に応じて太陽光発電を中心としたエネルギー供給施設の役割も担っていくことになる。そのためにはこれまで電力の需要家を前提としていた駅の設備管理を、エネルギーの需要と供給のバ

ランスを最適化するデマンドサイドマネジメントの業務基盤として見直していく必要がある。そこで当社はこれを駅エネルギー管理システム(SEMS)として、その実現に向けて大きく3つのテーマで取組みを進めている。

(1) 駅エネルギーの見える化

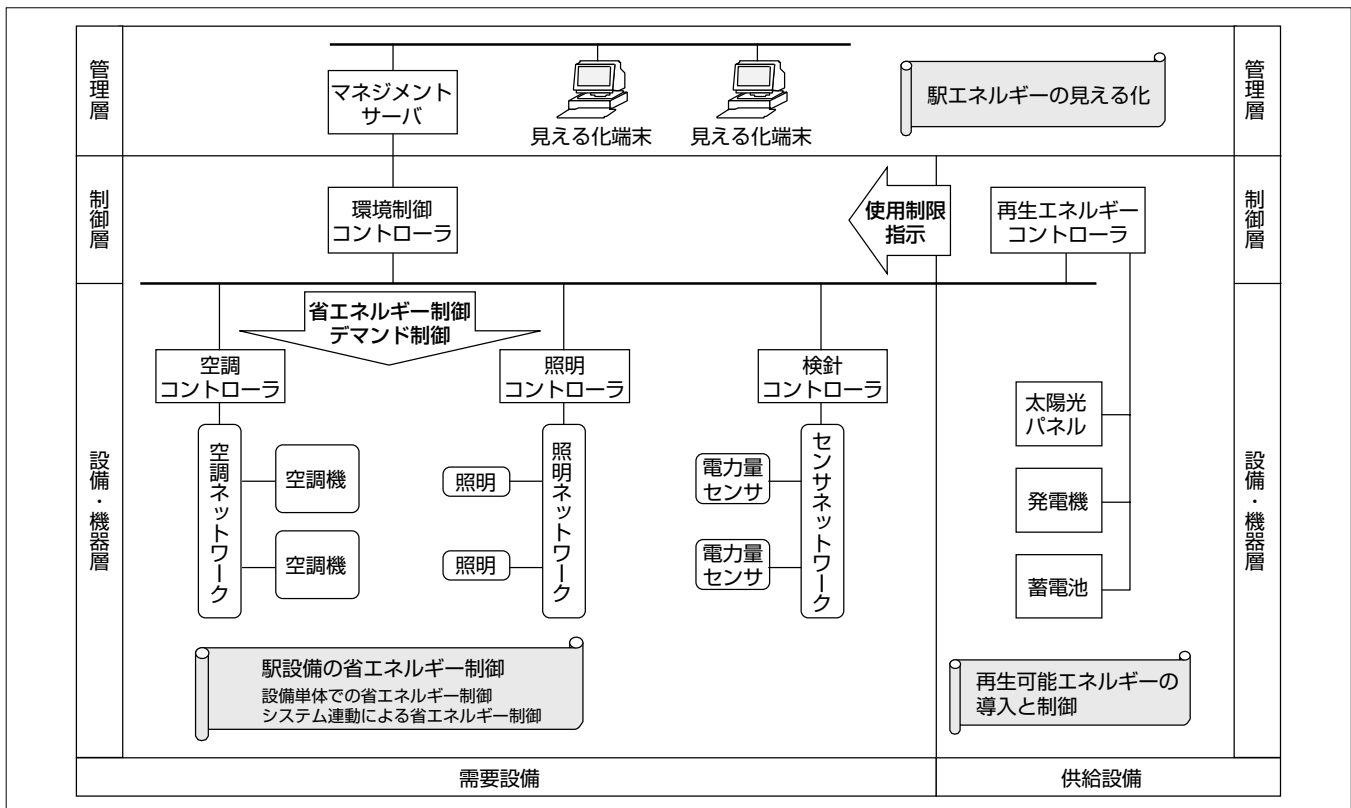
駅における電力消費や再生可能エネルギーの電力供給を計測し、設備ユーザーやエネルギー管理者に必要な情報を提供する。

(2) 駅設備の省エネルギー制御

照明・空調といった主要な駅設備のエネルギー効率を上げ電力消費を抑制する。

(3) 再生可能エネルギーの導入と制御

駅に再生可能エネルギーを導入し、安定的な電源として使用する。



駅エネルギー管理システム

駅の主な需要設備(負荷設備)は、空調・照明設備であり、各設備で単体の省エネルギー制御を行うとともに、各システム連動による省エネルギー制御を行い電力需要の低減を図る。供給設備は、需要設備(負荷設備)の規模や特性に応じた構成とし、再生可能エネルギー導入に伴って電源の安定供給を行うための制御が必要となる。エネルギー見える化は、供給電力及び消費電力を計測・表示し、適切な電力供給・電力消費を推進するためのものであり、設備ユーザーやエネルギー管理者に必要な情報を提供するものである。

1. ま え が き

地球温暖化防止対策や東日本大震災以降の電力供給事情の変化を背景にスマートコミュニティ・スマートグリッドと呼ばれる次世代社会インフラ構築への取組みが加速している。

駅では空調・照明を始めとして昇降機や自動改札機など、乗客が安心して快適に鉄道を利用するための多くの設備が稼働している。当社はこれまでも駅設備管理システムや高効率機器の提供等によって駅運営の安定化や効率化に貢献してきた。しかしながら低炭素化社会の実現に向けて地球規模で再生可能エネルギーの導入が進む中、これからの駅は立地条件や規模に応じて太陽光発電を中心としたエネルギー供給施設の役割も担っていく可能性が大きい。これまで需要家を前提としていた駅設備の管理をエネルギーの需要と供給のバランスを需要家側で最適化するデマンドサイドマネジメントの業務基盤として見直していく必要がある。

本稿では駅におけるエネルギー管理の現状、及び当社の駅エネルギー管理システム (SEMS) への取組みについて述べる。

2. 駅エネルギー管理の現状と課題

当社ではこれまでも駅や付帯施設に導入される各種設備の監視及び運用・保守業務の効率化を主な目的として駅設備監視システムを納入してきた(図1)。機械・電力・通信・信号など多岐にわたって広域に設置される駅設備を情報ネットワークによって集中的に監視制御するものである。省エネルギーに関しても熱源設備の台数制御や蓄熱によるピークカット制御、外気取り入れ制御等のエネルギー制御機能を持っているが、設備を“安全・安心な”状態に保ち“乗客へのサービスの提供”を確保することが最優先であり、省エネルギーやエネルギー管理の重要度は高いものではなかった。

しかしながら2011年の東日本大震災後に発生した電力供給逼迫(ひっばく)による計画停電や節電要請など、必要な電力が必ず供給されるとは限らない状況を今後は想定する必要がある。すなわち従来のように必要な電力ありき



図1. 駅設備監視システム事例

の施設や設備の運営に対して、電力供給が変動することを前提にした見直しが必要である。電力会社からの電力供給とともに、今後、駅に導入が進むと想定される太陽光発電による再生可能エネルギーを含めて、変動する供給と需要をどうバランスさせていくかを需要家側、すなわち駅内で管理していく必要がある。これはデマンドサイドマネジメントと呼ばれ、供給と需要を双方向に制御する仕組みである。

一方、駅のエネルギー消費は空調、照明、昇降機など基本的に乗客サービス利用が中心であり、乗客の安全・安心の確保にも深く関わるため、デマンドサイドマネジメントの構築でエネルギー利用とサービスレベルのバランスをいかにとっていくかも課題となる。エネルギー制約時に駅の施設・設備をどう運営すべきかに関する業務ルール作りも含めた検討が必要となってくる。

このように駅設備の運用と監視制御システムはエネルギー管理の優先度を上げ、デマンドサイドマネジメントを実現する方向で見直していく必要があり、当社は駅エネルギー管理システム (SEMS) としてその課題解決に向けた検討に取り組んでいる。そのためSEMSの構成要素として①駅エネルギー見える化、②駅設備の省エネルギー制御、③再生可能エネルギーの導入と制御の3つのテーマに分けてシステム検討を進めている。

3. 駅エネルギー管理システムへの取組み

3.1 駅エネルギーの見える化

エネルギー管理の導入では、エネルギー消費又は供給の計測と見える化が不可欠である。しかし既存の駅では前述の通り設備の運用監視はできてもエネルギーをモニタリングする仕組みはほとんど構築されておらず、したがってエネルギー消費の実態や改善見通しが分からないことが多いのが実態である。そこでエネルギー総量管理からその詳細管理へと、段階的に計測と見える化の導入を推進していくことを提案している。

3.1.1 ステップ1(デマンド監視システム)

見える化のステップ1としてデマンド監視システムの導入によって駅の消費電力の総量管理を実現する。一般的にデマンド(需要電力)とは電力会社からの受電部における30分間の平均電力であり、過去1年間の最大デマンド(最大需要電力)によって契約電力が決められる。デマンド監視システムを用いて、デマンドが契約値を超えないよう監視することで電力コストを抑制できるメリットがある。昨年発動された電力使用制限令のようにピーク時の電力消費が制限される場合には、契約電力とは別のしきい値を設けることでピークカットのための電力消費監視を比較的小規模なシステムで実現することができる。

導入事例として2011年度夏季の電力使用制限令対策で、東日本旅客鉄道(株)東北・上越新幹線の大口需要駅向けにデ

マンド監視システムを納入した。

“データ収集サーバ(デマンド監視部+電力監視部)”には当社省エネデマンド監視サーバ“E-Energy”を適用することでコンパクトな構成となっている。E-Energyを用いたシステム構成例を図2に示す。先の導入事例では、このシステムで目標デマンドに対する監視を行い、電力使用制限令の15%ピークカットを達成した。

3.1.2 ステップ2(駅エネルギー見える化)

ステップ2では、ステップ1で把握した消費電力総量の内訳(各負荷設備、機器の系統別消費電力量の把握)の見える化へと発展させる。すなわち受電点から分岐した配電系統の各計測ポイントで消費電力を計測することによって設備・機器の系統別消費電力量を把握し、消費電力総量の内訳管理を実現する。

図3に駅エネルギー見える化システムの画面例を示す。エリアや用途別に消費電力量を表示し、対前年度比較等の分析機能を持っており、駅設備の省エネルギー運用をサポートする仕組みとなっている。

省エネルギーの実践では、エネルギーの無駄を発見、そしてその対策といったPDCA(Plan Do Check Action)サイクルを回して改善を図っていくことが重要であり、駅エネルギー見える化の実現による効果が期待できる。

駅における各負荷設備、機器の消費電力量データの収集

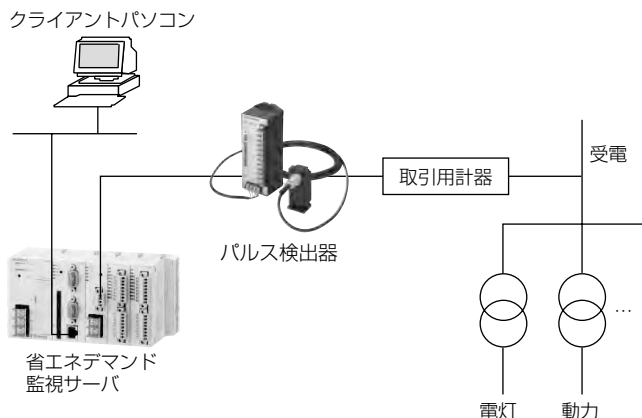


図2. デマンド監視システム構成例



図3. 駅エネルギー見える化の画面例

方法としては、計測装置を設置してオフラインで収集する方法や、当社省エネデータ収集サーバ“EcoServerⅢ”を用いたオンラインによる収集方法が実現可能である。また今後は、特定小電力無線を用いた計測機器によって、機器設置工事費用の削減を図る方法が期待される。当社では実際の駅機械室における電波伝播(でんぱ)調査を実施し良好な結果が得られ、適用のめどをつけた。

3.1.3 ステップ3(駅全体のエネルギー見える化)

ステップ3ではステップ2の見える化を、鉄道事業者全体や各支社等で管轄する複数駅を束ねて、全体の見える化に発展させる。

図4は、複数駅を束ねて電力需要と太陽光による創エネルギーによる供給とのバランスを分かりやすく見える化した例である。図3が現場改善型のマイクロ視点での見える化を実現しているのに対して、図4は経営型のマクロ視点での見える化を提供する例となる。経営層に対する環境経営実践の支援や、利用客に対する環境経営実践の情報発信の役割としてのエネルギー見える化の機能として重要な役割を果たすものであると考える。

また、現在“駅エネルギー見える化”を容易に行える仕組みとして、2012年度から“駅エネルギー見える化クラウドサービス”の提供を検討している。

3.2 駅設備の省エネルギー制御

エネルギー最適化の2つめのテーマは“駅設備の省エネルギー制御”である。大きく、設備単体での省エネルギー制御と、システム連動による省エネルギー制御に分類できる。

3.2.1 空調・照明の設備単体での省エネルギー制御

設備単体での省エネルギー制御としてはLED(Light Emitting Diode)照明導入による消費電力低減が挙げられる。調光制御に応じて消費電力が低減するため、必要な照度を確保しながら消費電力を抑制することができる。また、発熱が小さくなるため空調負荷の低減にも寄与することになる。

当社では照明コントローラ“メルセーブ”を用いることによって照度・人感センサと連動した消費電力削減が可能になっている。また、3.2.2項のシステム連動によって更なる省エネルギー制御を実現している。



図4. 需要と創エネルギーによる供給バランスの見える化例

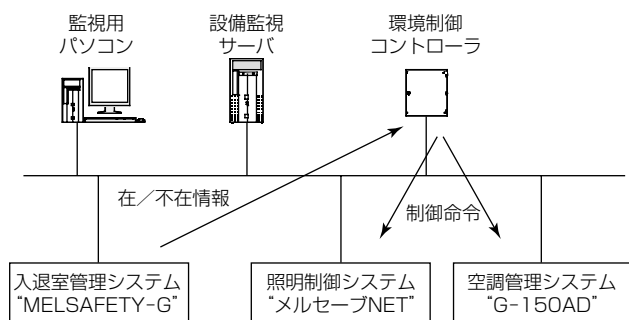


図5. システム連動による省エネルギー制御例

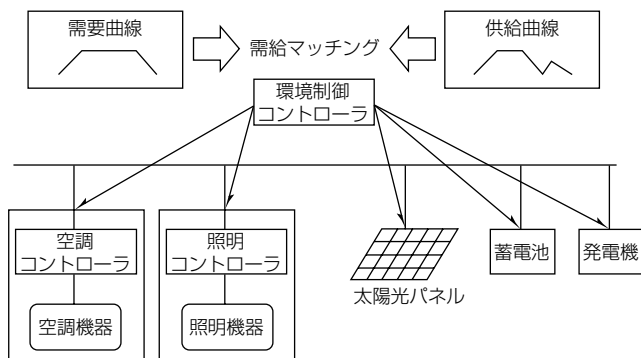


図6. 再生可能エネルギーの導入と制御

3.2.2 システム連動による省エネルギー制御

システム連動による省エネルギー制御として、従来ビル分野では在／不在情報と連動した空調・照明の消し忘れ制御が行われてきた。当社ではシステム連携を深め、入退室管理システムの在席情報によって、部屋単位から人単位での空調・照明のON／OFF制御、照明調光制御を行うシステムを開発している（図5）。

鉄道分野でも、さらにこの考え方を進め、乗客の分布や動向を始め、温度・湿度、エネルギー需給バランスをパラメータとして、最適な省エネルギー制御の方法を検討している。

3.3 再生可能エネルギーの導入と制御

エネルギー最適化の3つめのテーマは“再生可能エネルギーの導入と制御”（図6）であり、いわゆるスマートコミュニティ・スマートグリッドの鉄道への適用推進を行うものである。再生可能エネルギー（太陽光発電など）と分散型電源（ガスタービン、蓄電池等）を組み合わせ、エネルギー需要に応じた安定的なエネルギー供給を行うことで電力ピークカット、ゼロ・エミッションを目指すものである。

当社は、駅単体に閉じた取組みと、複数駅連携での取組みを行っている。

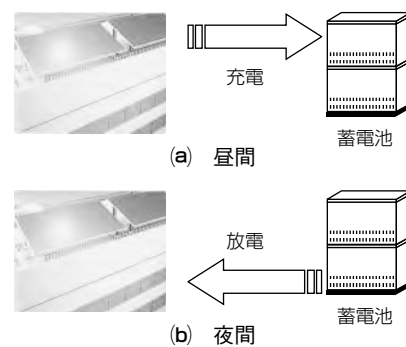


図7. 小規模駅におけるゼロ・エミッション化

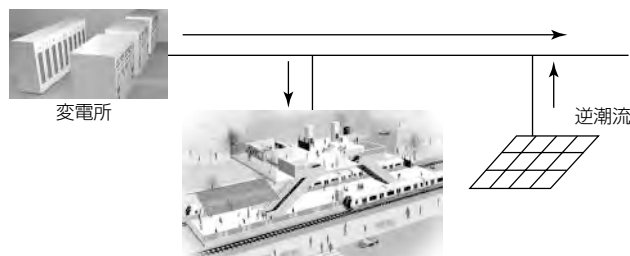


図8. 路線規模での配電系統安定化

3.3.1 駅単位での取組み

東日本旅客鉄道株平泉駅向けにゼロ・エミッション・ステーションを目的とした太陽光発電とリチウムイオン電池の組み合わせによるシステムを製作している。このシステムは、太陽光発電の昼間の余剰電力を蓄電し、それを夜間利用し、電気の逆潮流を発生させずに安定した電源供給を行うものである（図7）。

3.3.2 複数駅連携での取組み

駅や車両基地に太陽光発電を始めとした自然エネルギーが多数導入されると、逆潮流により配電系統の電圧が不安定となる可能性が高くなるため、配電系統電圧を適正に制御する方式に取り組んでいる（図8）。

4. む す び

一般的にこれまで生産性の効率化や安全への配慮等が重視され、ややもするとサービス過剰な環境となっていたが、諸般の社会環境の変化から、適切なサービスの提供、無駄エネルギーのカットが求められ、さらにはエネルギー供給事情に応じてサービス低下を伴う省エネルギー化が必要となった。

当社は従来鉄道事業者へのサポート及び駅利用者への利便性向上を行う設備・システムを製作・納入してきた。これらに加え、鉄道のエネルギー全体最適化、ひいては社会への貢献を目指し、引き続き、駅エネルギー管理システム（SEMS）の開発に取り組んでいく。

路線全体の回生エネルギー有効活用

松村 寧*
 葛山利幸*
 藤田敬喜**

Effective Usage of Regenerative Power in Traction Power Supply System

Yasushi Matsumura, Toshiyuki Katurayama, Keiki Fujita

要 旨

従来のき電システムは変電所に回生インバータを設置し回生エネルギーの有効利用を行ってきたが、整流器との循環電流に関する制約、新旧車両の回生ブレーキの制御特性の違い等の理由によって、路線全体で見ると必ずしも回生エネルギーを有効に利用できていなかった。

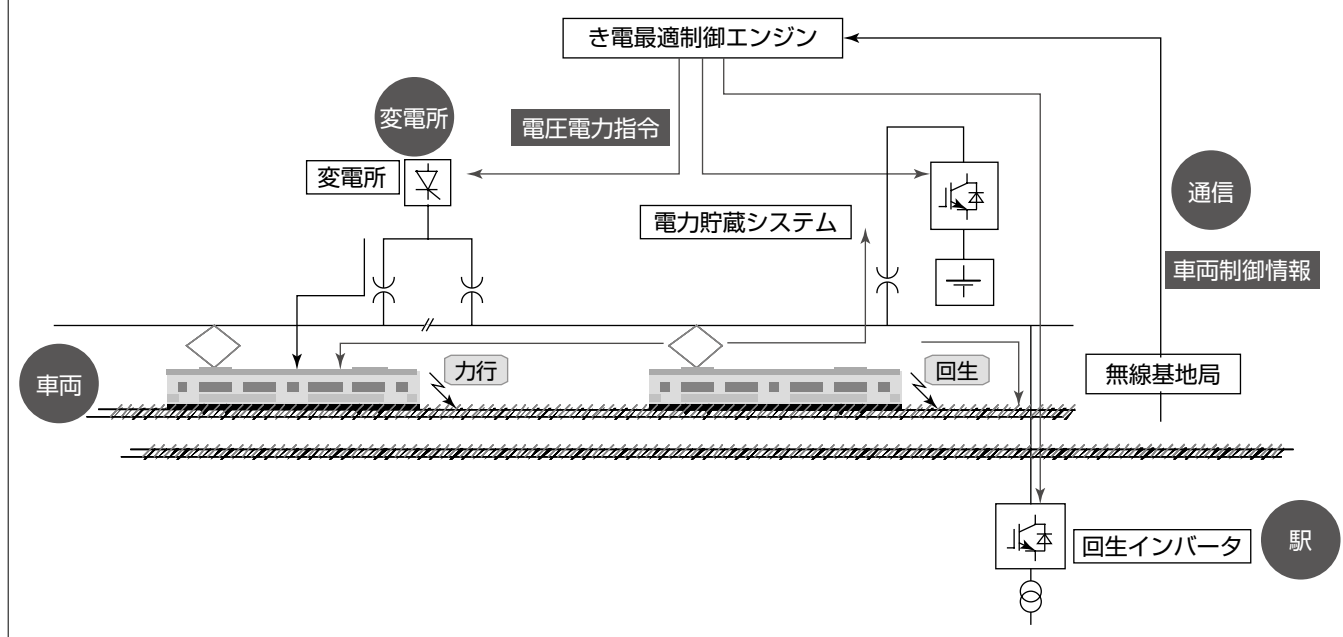
この課題を解決するためには、情報通信技術(ICT)を活用し、車両の運転状態に基づいて架線電圧を制御することが必要であり、その具体的な取組みとして、“き電最適制御システム(Traction Energy Control System：TRECS)の開発を進めている。

TRECSとは、三菱電機が考えるき電システム全体で消費するエネルギーを最小化するシステム概念であり、路線エネルギー管理システム(REMS)のうち、列車の運転エネルギーを供給するき電システムにおけるエネルギー最適化・最小化を目指すものである。TRECSでは、車両が消費する電力

の情報を無線ネットワークを通じてリアルタイムに地上に配信し、地上に設けたき電最適制御エンジンが、変電所出力電圧、電力貯蔵システムの充放電量を制御し、地上通信ネットワークによって、車両のパンタ点電圧を決定する。その結果、車両回生絞り込みゼロと送電線ロスの最小化を同時に実現することが可能となる。

本稿では、現状の省エネルギー対策と課題をまず示し、当社が取り組んでいるTRECSを使ったき電システム全体のエネルギー最適化について、さらには制御の中核を担うき電最適制御エンジンについて述べる。次にき電システム最適化に向けたサポートツールである、電力の見える化や電力シミュレーション技術について述べる。最後にTRECSを構成する、駅舎補助電源装置、自動式変換器、電力貯蔵システムといった変電機器、車両から地上へ情報を伝送する地車間連携システムについて述べる。

- これまでの運転に関わる電力系統監視制御系に加え、路線エネルギー管理と回生電力活用をトータルで管理
- 列車の位置や運転状態に応じて変電所の出力電圧をリアルタイムに制御し回生絞り込みゼロへ
- 回生電力を有効活用する“電力貯蔵システム”と“回生インバータ”



き電最適制御システム(TRECS)への取組み

き電最適制御システムはREMSのき電システム部のエネルギー管理を行うもので、無線ネットワークを通じて車両情報を配信し、地上の管理システムが変電所出力、電力貯蔵システム等を有機的に制御し、路線全体で消費するエネルギーを最小化する。地上管理システムの中心となるのがき電最適制御エンジンで、リアルタイムに変電所の自動式変換器によって出力を制御し、同時に電力貯蔵システム、回生インバータの動作も制御する。

1. ま え が き

地球温暖化に加え、東日本大震災以降のエネルギー問題によって、地球環境保全を図りつつ経済成長を進展させるために、エネルギー需要と供給を見直すことがますます求められるようになっていく。

鉄道事業分野では、車両でのエネルギー管理、駅でのエネルギー管理として各単位での省エネルギーも図られているが、鉄道システム全体でのエネルギー管理による省エネルギー化が求められている。

当社ではエネルギーの管理及び有効活用のために、ICT技術を活用して、き電システムにおける車両回生エネルギーの有効活用に取り組んでいる。

本稿では、現状の省エネルギーの方法、課題を述べるとともに、当社が目指すエネルギーの有効活用のシステム(全体最適化)及び現状の具体的な取組みについて述べる。

2. 現状の省エネルギー対策と課題

2.1 現状の省エネルギー対策

近年の鉄道車両の制御方式はVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ方式を多く採用しており、直流のき電電力を車両内で任意の電圧、周波数に変換し駆動用交流モータに供給することで、車両の走行を制御している。

車両が駅などで停車する場合、通常は電気(回生)ブレーキを使用し、モータを発電機として制動エネルギーを直流変換してき電システムに回生する。

現状の省エネルギー対策としては、変電所における整流器、変圧器等機器単体の高効率化による使用電力の削減が図られてきた。それに加えて車両の回生エネルギー活用として①変電所に設置する電力回生インバータによって回生エネルギーを変電所の空調、付帯設備等の高圧配電システムで消費する方法、②変電所のき電電圧低減による車両間融通の促進等が実施されている例がある。

2.2 現状の省エネルギー対策の課題

現状の省エネルギー対策は上記のように機器個別での対策を中心に行ってきたが、機器単体の取組みでは回生エネルギーを有効活用しきれない課題があり、それについて述べる。

まず車両の回生エネルギーが有効活用しきれない車両回生システムのメカニズムについて簡単に述べる。回生エネルギーを使用する車両がない場合では、回生車両からの回生エネルギーによってき電電圧が上昇し、車両に過電圧などの問題が発生する。このき電電圧の上昇に対し、車両側では一定の電圧値以上に上昇した場合、電気(回生)ブレーキの使用を減少させ(絞り込み)、空気ブレーキを併用することで、き電への回生エネルギーの供給を絞り込んでいる。

(1) 回生絞り込み特性差による絞り込み

車両の回生絞り込み特性は、機器特性に依存するため、

厳密には列車ごとに異なり、同一運用でも同一の回生エネルギー放出とはならない。複数の回生車両が存在する場合は他車両の回生電圧によって一方の車両が回生絞り込みを行うなど、回生エネルギーを効率よくき電システムに変換することができない課題がある。

(2) ダイヤ乱れによる車両間融通の阻害

列車の運行は通常一定のダイヤに沿って運用されているが、雨風などの自然条件、旅客集中等によってダイヤの乱れが生じることがある。

ダイヤの乱れによって、車両間の力行、回生のタイミングが乱れ、変電所の電力供給を調整しないかぎり回生エネルギーの融通が低下する課題がある。

(3) 回生電力の交流システムでの逆潮流

電力回生インバータを変電所に設置し、車両回生エネルギーを変電所高配系で使用方法は、大電力の回生エネルギーの吸収に適しており、効果的であるが、回生車両が重なるなど、高配負荷容量をオーバーする場合は、電力会社からの受電システムへの逆潮流の可能性が生じる。

き電線路には分散的に変電所が設置されているため、1変電所に集中した回生エネルギーの分散、遠方車両間融通が可能となれば逆潮流も減少する。

3. 全体最適化

2章で述べたき電システムにおける現状の省エネルギー対策、及び課題は、機器単体の省エネルギー化を適用してきたが、更なるき電システムの省エネルギー化には全体最適化を行うことが必要となる。全体最適化とは、情報通信ネットワークを使用し、車両の状態、位置等をリアルタイムに地上側で認識し、地車間を連携してき電全体に配置された車両に対して、最適なき電条件を与えることであり、そのために変電所などの電力機器をリアルタイムに制御する必要がある。

当社では上記き電システム全体を最適に制御するシステム概念をき電最適制御システム(TRECS)と称し、各変電所群機器を有機的に制御するアルゴリズムをき電最適制御エンジンと称している。

また、き電最適制御システム(TRECS)を構築するため、既存技術の適合化を図るとともに、個別機器開発、通信技術、ネットワーク技術の応用開発を順次進めている。地車間連携とき電最適制御システムを図1に示す。

き電システムの最適化を行う主要機器・サブシステムとしては、5章で述べる、地車間連携のための地上-車上間通信(情報通信ネットワーク)、変電所間ネットワーク、変電所自励式変換器、電力貯蔵システム、駅舎補助電源装置がある。これら主要機器・サブシステムを有機的に制御することで2.2節の課題である車両回生エネルギーの絞り込みを極小化することが可能となり、送電におけるロスも最小化することが可能となる。

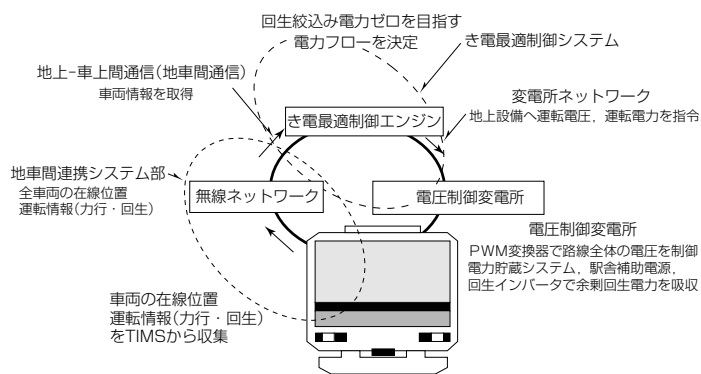


図1. 地車間連携とき電最適制御システム

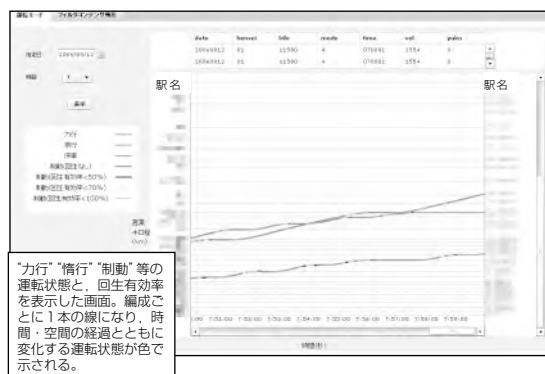


図3. き電電圧の“見える化”例

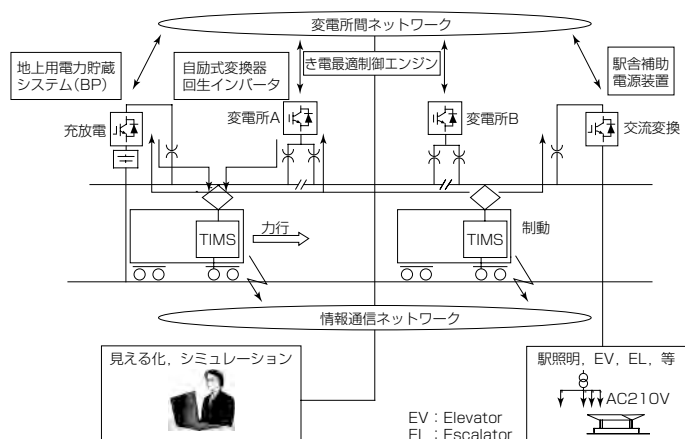


図2. き電システム最適化の構成要素

き電最適制御エンジンは、変電所群内の機器(自動式変換器、回生インバータ、電力貯蔵システム等々)を、車両情報を基に有機的にかつリアルタイムで制御するアルゴリズムである。このアルゴリズムは、変電所内の機器特性を数式化し、多変数の数学的な最適化問題に置き換え、き電全体に配置される車両情報に基づき、き電エネルギーの最小化を行うため変電所群の各機器の動作を制御するものとなっている。

また、全体最適化のためには、現状のき電状態の把握“見える化”が必要であり、かつあるべき状態を確認・検討するための電力シミュレーションが必要である。き電システム全体最適化の構成要素を図2に示す。

4. “見える化”と電力シミュレーション

現状把握のための“見える化”，き電システムを解析して対策の検討・立案を行うための電力シミュレーションについて次に述べる。

4.1 見える化の取組み

鉄道のき電システムにおける電力フローは、実際には分かっているようで分からないのが実情である。

車両の力行、回生状態、電力の入出力等の状態は、車両単独では計測可能で、確認することもできるが、路線全体の中で、時刻、各車両の位置、他車両と関連付けた状態で

の把握はできていなかった。

き電システムの最適化を行う上で、このき電全体での車両の状態、電力フローを把握することは重要で、回生・力行・回生絞り込み等の実態を時刻と位置の二次元で“見える化”することで、回生絞り込みがいつ・どこで・なぜ発生するかを把握することができる。

当社では、この“見える化”に取り組んでおり、車両に搭載される車両情報統合管理装置(TIMs)から取得した膨大なデータを環境統合データベースに格納し、刻々と変化する運転状態やパンタ点電圧(き電電圧)を素早く描画、一目で見渡すことが可能なシステムを構築している。これによって車両回生エネルギーの状況が“見える化”され、省エネルギー化の目標が明らかとなるとともに、対策後の状態も視覚的に確認することができる。“見える化”の例を図3に示す。

4.2 電力シミュレーション

き電の電力シミュレーションは、従来き電システムの電力フローを解析し、変電所の整流器、回生インバータ等の設備容量や地上／車上に置く電力貯蔵システムの最適配置を検討する手段として利用されてきた。

当社では、従来の電流源モデルの電力シミュレータに対し、VVVF車両、電力貯蔵システム等電力源として動作する機器に対してもより精度よく解析可能な電力源モデルを開発し、き電システムの解析に取り組んでいる⁽¹⁾。

電力シミュレーションに用いる入力データは、車両の力行、回生特性、運転曲線、乗車率、車両質量等の設計値又は仮想データを基にして行うのが通常で、実際には運転曲線にしても運転によって偏差が生じており、実情を把握するのが難しい状況にある。

当社では、車両情報統合管理装置の情報を電力シミュレータに取り込み、実運用の車両データからき電の電力シミュレーション可能なシミュレータの機能拡張も行っている。

この電力シミュレータは、3章のき電最適制御エンジンのアルゴリズムとリンクして、き電の電力フローをシミュレーションすることで、単に現状のき電状態を確認するだけでなく、き電最適制御を行った場合の電力フローの省エネ

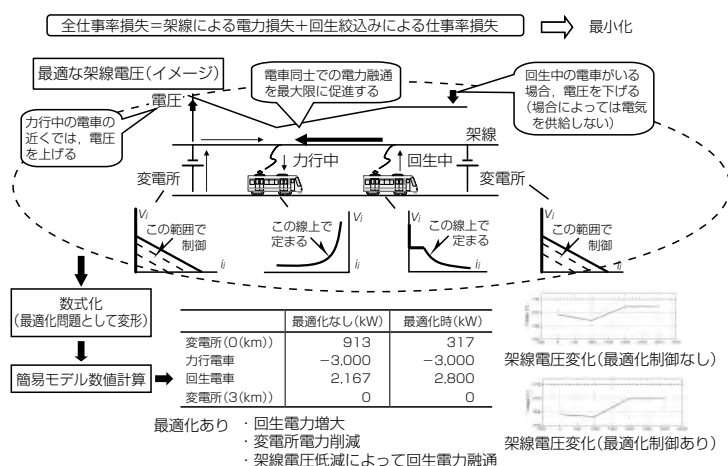


図4. 最適制御による電力削減計算例

ギー効果を確認することが可能であり、図4に一例を示す。

図4のように変電所の出力を、車両状態によって制御することで、き電電力の最小化が可能となることが分かる。

き電最適制御を行うことによって、力行電車の使用エネルギーは同一であるが、変電所出力を低減し、架線電圧を低く抑え、回生電車のエネルギーの融通が増加している。

5. 主な機器、サブシステム

き電システムの最適制御を行うためのキーとなる機器、サブシステムについて次に述べる。

5.1 駅舎補助電源

車両回生エネルギーは駅停止時の回生ブレーキによって発生するものがほとんどであり、発生場所の直近での利用が最も効果的と言える。

駅舎に設置し、駅での車両停止時に発生する直流回生エネルギーの余剰分を、駅舎の交流配電システムへ逆変換して駅舎で使用するためには小型の駅舎補助電源装置がある。

駅舎補助電源装置は車両の補助電源装置(SIV)を応用し、単独運転防止機能など、系統連系に必要な種々の機能を持たせている。

駅舎の低圧系への連系によって、駅舎での負荷容量に合わせて回生エネルギーの余剰分を逆変換するため、小容量(200kVA程度)でも多頻度で回生エネルギーを活用でき、十分省エネルギーに貢献できる。

5.2 自励式変換器

自励式変換器は、整流器出力機能と回生電力吸収機能を併せ持つ変換器であり、力行電圧、回生電圧ともに任意に制御できる特徴を持っている。

自励式変換器によって車両状態に応じてき電電圧を制御して、車両間融通をアシストしたり、さらには整流器出力と回生電力吸収機能の切り換え制御をすることで、車両回生エネルギーを最大限利用することが可能となる。

当社は、自励式変換器の納入実績があるが、更に小型化に向けて取り組んでいる。

5.3 電力貯蔵システム(BP)

自励式変換器は、き電電圧を制御することで、回生エネルギーの活用には非常に有効であるが、回生吸収機能の場合、交流系統へエネルギーを返すため、交流系統の負荷によっては、回生エネルギーを消費しきれない課題がある。

そのために回生エネルギーを交流系統に返すのではなく、蓄電池に一旦貯蔵し、車両の力行時に力行エネルギーとして放出する電力貯蔵システム(BP)がある。

BPは直流き電電圧を蓄電池電圧に変換するチョップ装置(DC-DCコンバータ)とエネルギーを蓄える蓄電池で構成している。

回生エネルギーの電流立上り応答、間欠大電力の充放電に対応する必要から、蓄電池としてはリチウムイオン電池が用いられる。

当社は、蓄電池を充放電制御するチョップ装置を製作しており、き電システムで十分機能することを確認している。

5.4 地車間連携システム

き電システムの最適制御に重要な要素は、車上情報と地上設備との連携であり、その連携を担うのが、車両情報統合管理装置と地上-車上間通信(情報通信ネットワーク)である。

当社は、この特集の論文にもあるように、車両情報統合管理装置(TIMs)及び車両情報制御装置(TIS)によって列車全体の制御を行うとともに、各種車両情報を計測して運転支援などを行う技術を持っている。

また、地車間通信でも、アナログ無線からデジタル無線まで技術を持っている。

上記TIMs、TISによる車両情報はデジタル無線などによって、地上の基地局に集められ、さらに地上の変電機器などを制御するサーバなどに情報が伝達され、き電最適制御エンジンによって車両状態に連携したき電最適制御が行われる。

6. む す び

鉄道システム全体、特にき電システムの省エネルギー化に対する当社の取組みの一端について述べた。

情報・通信ネットワークの発達によって、き電システム全体での省エネルギー化は、社会全体での省エネルギー化の機運の中ですまます期待されるものであり、継続的な取り組みが必要である。

当社は今後更にシステム開発、要素開発を着実に進めることで、鉄道システムの省エネルギー化に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 長門秀一、ほか：電力貯蔵システムを考慮した直流き電回路計算の一考察、電気学会産業応用部門大会講演論文集、No.3-22 (2010)