

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2022
Vol.95 No.

1

特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム



特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

再生可能エネルギーの利用拡大などによるエネルギー需給環境の変化、ならびにデジタル化の進展による社会インフラや産業システムの高度化に伴い、電力の安定供給や工場・施設における設備の安定稼働のニーズがさらに高まっています。また、国際的に取組み強化が進む環境対応、機器の小型化などのニーズも同様に高まっています。

本特集では、これらのニーズに応じて富士電機が展開している、設備の安定稼働や環境対応（省エネルギー、環境負荷低減）、機器の小型化に貢献する強いコンポーネント（機器）およびシステムを支える技術について紹介します。

表紙写真

- ①大容量無停電電源装置「UPS7500WX」
- ②グローバル対応 145 kV GIS
- ③蓄電池制御システムの屋外設備



目次

特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

〔特集に寄せて〕電力の安定供給の変遷と挑戦 三谷 康範	3 (3)
--------------------------------	-------

〔現状と展望〕電力安定供給と省エネルギーに貢献する 電源システムの現状と展望 河野 正志 ・ 松本 康	4 (4)
---	-------

データセンターの電力安定供給に貢献する電源システム

データセンターの電力安定供給に貢献する 大容量無停電電源システム 瀧田 一平	9 (9)
--	-------

冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術 安本 浩二 ・ 根本 健司 ・ 北谷 裕次	14 (14)
---	---------

電力の安定供給に貢献するデータセンター向け電源切換盤 村津 宏樹 ・ 若林 郁也 ・ 徳田 剛	20 (20)
--	---------

省エネルギー・小型化のニーズに対応する 矩形大容量5脚モルトラ 永露 友宏 ・ 宮田 智一	25 (25)
---	---------

設備安定稼働に貢献する電源システム

JAXA 種子島宇宙センターの電力安定供給に貢献する 大型蓄電池制御システム 荒井 広 ・ 原 篤史	30 (30)
--	---------

鉄道の安全・安定輸送に貢献する電力管理システム 植草 秀明 ・ 山地 智文 ・ 白倉 善積	36 (36)
--	---------

素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源 渡部 幸平 ・ 岡崎 洋平 ・ 浅田 雅人	42 (42)
--	---------

リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した 中容量無停電電源装置 川崎 大介 ・ 附田 原大 ・ 筒井 重男	48 (48)
--	---------

環境負荷低減に貢献するパームヤシ脂肪酸エステル変圧器 彦坂 知行 ・ 千葉 公一郎	53 (53)
--	---------

新製品紹介論文

小型汎用自動販売機「マルチ君」	59 (59)
-----------------	---------

略語・商標	62 (62)
-------	---------

Contents

Power Supply Systems Contributing to Stable Power Supply and Energy Saving

[Preface] Transition and Challenge of Stable Electric Power Supply	3 (3)
MITANI, Yasunori	

Power Supply Systems Contributing to Stable Power Supply and Energy Saving: Current Status and Future Outlook	4 (4)
KAWANO, Masashi MATSUMOTO, Yasushi	

Power Supply Systems Contributing to Stable Power Supply to Data Centers

High-Capacity Power Supply System That Contributes to Stable Power Supply for Data Centers	9 (9)
HAMADA, Ipppei	

Power System Construction Technology with Improved Redundancy and Maintainability	14 (14)
YASUMOTO, Koji NEMOTO, Kenji KITADANI, Yuuji	

Static Transfer System Cabinet for Data Centers That Contributes to Stable Power Supply	20 (20)
MURATSU, Hiroki WAKABAYASHI, Fumiya TOKUDA, Tsuyoshi	

Rectangular Large-Capacity 5-Leg Type MOLTRA to Meet the Needs of Energy Saving and Downsizing	25 (25)
NAGATSUYU, Tomohiro MIYATA, Tomokazu	

Power Supply Systems Contributing to Stable Operation of Facilities

Large-Scale Battery Control System for Stable Power Supply Operation in JAXA Tanegashima Space Center	30 (30)
ARAI, Hiroshi HARA, Atsushi	

Electric Power Management System Contributing to Safe and Stable Railway Transportation	36 (36)
UEKUSA, Hideaki YAMACHI, Toshifumi SHIRAKURA, Yoshizumi	

Industrial-Use Power Supplies Contributing to Stable Operation of Material Manufacturing Equipment	42 (42)
WATABE, Kohei OKAZAKI, Yohei ASADA, Masato	

Medium-Capacity Uninterruptible Power Systems with Improved Replaceability and Stable Operation	48 (48)
KAWASAKI, Daisuke TSUKUTA, Motohiro TSUTSUI, Shigeo	

Palm Fatty Acid Ester Filled Transformer That Contributes to Reducing Environmental Load	53 (53)
HIKOSAKA, Tomoyuki CHIBA, Koichiro	

New Products

Compact Multi-Purpose Vending Machine	59 (59)
--	---------

Abbreviations and Trademarks	62 (62)
-------------------------------------	---------

特集に寄せて

電力の安定供給の変遷と挑戦

Transition and Challenge of Stable Electric Power Supply

三谷 康範 MITANI, Yasunori

九州工業大学 学長 工学博士



発明王トーマス・エジソンが電力事業を開始しておよそ140年が経ち、その間、ニコラ・テスラ（ウェスティングハウス・エレクトリック & マニュファクチャリング・カンパニー（当時の社名））との直流・交流論争を経て、長距離輸送のための高電圧への変換技術の点で交流が勝利して現在の大規模交流電力輸送網が築かれた。一方で、パワーエレクトロニクス（パワエレ）技術の進展によって直流を含めて種々の周波数を自在に扱うことができるようになり、交流ベースの電力系統に直流技術が浸透してきた。特に、太陽光発電や風力発電に代表される自然エネルギーは商用周波数の50Hz、60Hzとは本来関係しない発電方式であり、この点においても直流送電の価値が高まってきていると言える。また、自然エネルギーの全国融通のための連系送電網の強化においても直流送電連系が期待されている。

電力輸送網はこれまで連系強化によって巨大化し、効率化、高信頼化が図られてきた。その一方で事故波及による大規模停電を幾度となく経験して、そのたびごとに電力の安定供給策の強化が進められ関連技術が高度化してきた。一方で、地球環境問題の顕在化に伴い、省エネルギー化、低環境負荷化が重要なキーワードになり、電力系統内での自然エネルギー発電やパワエレ機器の増加に伴い、新たな問題が顕在化してきている。例えば、交流系統において晴天昼間の太陽光発電電量が増加するのに伴い、その分需給のバランスを取って周波数を一定に保つ役割を担っていた火力電源の割合が減り、変動電源の増加と需給調整電源の減少という両面からの需給調整力の急激な低下が起こる。また、同期機が本来有する自己安定性の機能である同期化力の低下や回転機器が有する慣性力の低下によって、擾乱（じょうらん）発生時の安定度が確実に弱まってきている。この問題の厄介な点は通常の運用を行っている状態では安定度の低下が見え難いことで、ひとたび大きな擾乱が発生した際に思わぬ大きな影響を生じてしまう恐れがある。北海道でのブラックアウトが発生したことは記憶に新しいが、同期化力や慣性力の低下も今後見過ごせない重要な課題になるに違いない。また、夕刻からの太陽光発電の急速な低

下に伴い、需給調整のために火力発電を急激に立ち上げなければならない、いわゆるダックカーブ問題は、自然エネルギーの増加が単純な環境負荷低減にはつながらないことを示唆している。

こうした電源や機器の多様性によって不確実性は急速に増加している一方で、例えば電力システム運用上の最大の弱点であった電力貯蔵の観点では、電気自動車の普及によって系統に接続される貯蔵要素が増加してきている。単純な効果としては、Vehicle to Homeに見られるように電力供給網の遮断によって電力供給が途絶しても電気自動車からの電力供給によって電力の利用を継続でき、その点で個々の信頼性は高まる。他にも充電時刻の調整や放電も併せて考えることができれば需給バランスの調整においても大きく寄与できることは確実である。

また、パワエレ機器の増加はそのままでは同期化力、慣性力の低下を招くが、パワエレ機器の制御の柔軟性を積極的に使えば、電力の安定供給をサポートする機能を付加することも可能になる。これに関してはGrid Forming Inverterの名称で各種研究が行われている。また、パワエレ機器は周りの状況変化に対応した柔軟な制御が可能であるために損失を低下させるための運転方式を形成することも容易で、IoT（Internet of Things）技術と組み合わせた適切な情報獲得と制御によって各種システムの省エネルギー化や電力供給の安定性および信頼性の向上にも大きく寄与するマルチな機能の実現が可能になってきた。パワエレ機器による電力制御技術の進展に加えて、5Gのように同時多接続大容量の高信頼通信技術、高性能な情報処理・情報トレース技術を安価に利用できる環境が整うことによってこれまでの非常識が常識へと転換していくことは確実である。

エジソンが現代の技術環境を手に入れて各種主張をしておれば、電力系統の様相は大きく異なったものになったであろうと思いつつ、異分野の人と人、技術と技術の新たな出会いによるイノベーション創出の重要性に改めて思いを馳（は）せている。

電力安定供給と省エネルギーに貢献する 電源システムの現状と展望

Power Supply Systems Contributing to Stable Power Supply and Energy Saving: Current Status and Future Outlook

河野 正志 KAWANO, Masashi

松本 康 MATSUMOTO, Yasushi

① まえがき

変電所、データセンター（DC：Data Center）など社会・産業インフラへの投資は、国内をはじめ北米、欧州や中長期的に経済成長が期待される東南アジア、インド、中東を含む国外においても継続しており、電力の安定供給のため、変電設備や電機盤などの需要は堅調に推移している。とりわけ DC 市場では、情報システムのクラウド化や電子商取引、コンテンツ配信サービスの増加に加え、第 5 世代移動通信システム（5G：5th Generation）通信網の拡大に牽引される IoT（Internet of Things）を活用した技術の普及に伴い、大規模 DC の建設が増加している。これに伴い、電力安定供給に貢献する無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）は、大容量化とともに小型化、省エネルギー（省エネ）化が求められている。

国内市場では、1970～1980年代に鉄鋼や化学などの素材プラントならびに鉄道会社に納入した変圧器、開閉装置など変電設備の老朽化を背景に、事故の予防や遠隔操作を含めたメンテナンスの高効率化を目的とした設備更新への投資が継続している。

また、脱炭素化やエネルギーコスト抑制の観点から、CO₂ 排出量削減や省エネに向け、工場全体のエネルギーの見える化や最適化へのニーズが増大している。電力変換効率の高い製品の導入だけでなく、最適なエネルギー需給制御を実現するエネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）を活用する機会が増加していくことが見込まれている。

本稿では、富士電機が取り組んでいる電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システムの現状と展望について述べる。

② データセンターの電力安定供給に貢献する電源システム

2.1 「電気設備まるごと提案」の推進

DC は、大規模化が進む一方、短納期での構築が要

求されている。また、効率的な将来の増設を考慮した初期設備構築、および運用開始後の短納期での増設など、システムの設計は多様化かつ高度化してきている。

それに伴い電源システム設備についても、高信頼で安定的なシステムが求められるだけでなく、大規模化や将来の増設も含めた工期短縮が強く望まれている。富士電機は上述のニーズに応えるため、個別機器の提供だけでなく、特高受変電設備、非常用発電設備、変電設備、UPS システムを含めた「電気設備まるごと提案」により、システムの最適化、設置面積の削減、工期の短縮を実現している。

図 1 に大規模 DC の一般的な電源システム構成を示す。受電所は、特高の商用電源を受電し、高圧に変換する設備であり、コストや信頼性を考慮しながら設備構成を決定する。一般的には「本線・予備線方式」と呼ばれる 2 回線で商用電源を受電し、高圧に変換する

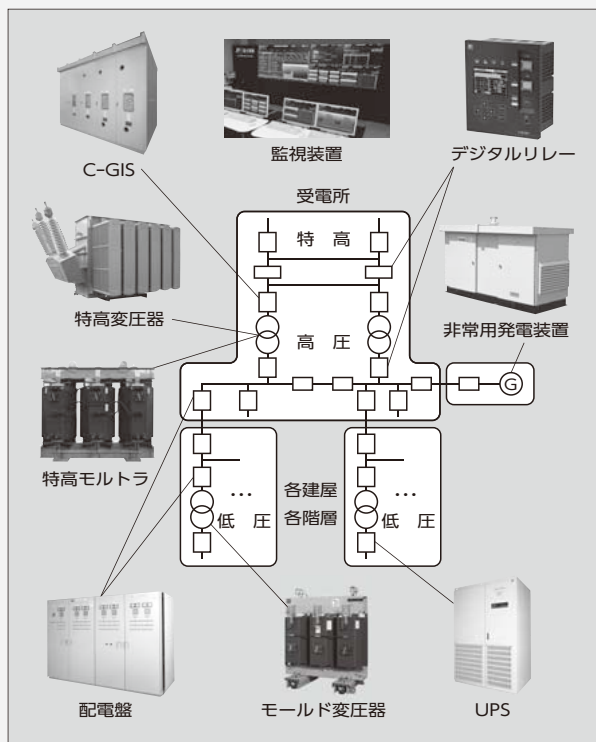


図 1 大規模 DC の一般的な電源システム構成

設備構成が多い。非常用発電装置は、商用電源の長時間停電時に負荷への給電を行うための設備である。そして、区画ごとに電力を供給するための変電設備が建屋や階層ごとにある。UPS システムは、停電時に非常用発電装置からの給電に切り換わるまでの間、給電を継続する設備である。それぞれの設備は、電力の安定供給を実現するために、機器の故障時や電源設備の保守時にも電力の供給を継続できるように冗長性を確保する設備構成となっている。

DC 向け電源システムの最も基本的な要求事項である信頼性の向上のためには、定常時の安定稼働や停電時のバックアップだけでなく、保守点検時や万が一の機器故障時の復旧対応も含めたシステム構築が重要である。富士電機は多くの DC 向け電源システムの納入経験を生かしたシステム構築技術を持っており、顧客要求に応じたさまざまな電源システムを提供している（“冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術”、14 ページ参照）。

大規模 DC の増加に伴い、DC の UPS の入力に使用する変圧器も大容量化している。これに対応するため、1,000 kVA 超過の大容量域において、従来品の設置面積を維持しつつ、標準的な変圧器盤に収まるように高さ寸法を縮小した矩形（くけい）大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」を提供している（“省エネルギー・小型化のニーズに対応する矩形大容量 5 脚モルトラ”、25 ページ参照）。

2.2 電源システムを支える UPS 技術

大規模 DC における電力安定供給の中核機器である大容量 UPS は、大容量化、省エネ化とともに入力変圧器などの周辺機器を含めた UPS システムとしての小型化や設置工事期間の短縮などが求められている。

システムの省エネ化を実現する高効率化のため、UPS において、富士電機独自の技術である RB-IGBT（逆阻止 IGBT：Reverse-Blocking IGBT）モジュールを用いた 3 レベル変換回路を整流器およびインバータに採用することで、常時インバータ給電方式として業界トップクラスの高効率を実現している。また、低負荷率時にいくつかの電力モジュールを停止させる台数制御機能を備え、電力変換モジュールが最適な効率で運転できるようにしている。さらに、正常時は商用電源から給電することで電力損失を低減し、商用電源に異常が発生した場合は瞬時にバッテリーからの給電に切り換える高効率運転モード（HE モード：High Efficiency Mode）により、電圧や周波数の安定した電源環境下において 98.4% の高効率にて電力を供給できる。

これに加えて、背面合わせで設置が可能な構造や、入出力盤や変圧器盤間を内部配線することが可能な構

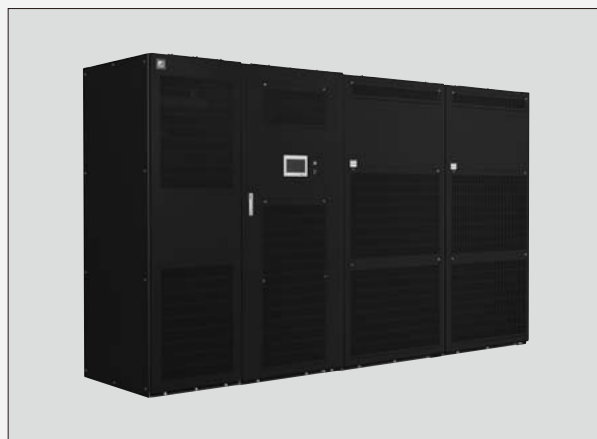


図2 「UPS7500WX」

造にすることで、UPS システムの設置面積の縮小と設置工事期間の短縮を実現している。

このような技術を適用した大規模 DC 向けの大容量 UPS 「UPS7500WX」を図 2 に示す（“データセンターの電力安定供給に貢献する大容量無停電電源システム”、9 ページ参照）。

DC において最も高信頼なシステム構成として、全体を二重化する 2N システムがある。この方式は高い信頼性を持つが、システムを切り換えるための電源切換盤が必要となり、その信頼性が全体の信頼性に大きく影響を及ぼす。これに対応するために、富士電機は高い信頼性を持つ電源切換盤を提供している。本切換盤は、切換機能の信頼性の向上だけでなく、UPS 同期機能により切換時間を短縮し、切換時の電圧安定度を向上させている（“電力の安定供給に貢献するデータセンター向け電源切換盤”、20 ページ参照）。

また、DC のみでなく一般の工場や放送・通信設備などは 200 V 系の中容量 UPS が必要とされており、UPS 単体に対して多種の容量のニーズがある。その容量のニーズに対応し、設置面積を削減することでリプレース対応を強化するとともに、設備の安定稼働性の向上のため、異常兆候検知機能による部品故障診断が可能な 200 V 系 UPS 「UPS6600FX」を開発した（“リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した中容量無停電電源装置”、48 ページ参照）。

③ 設備安定稼働に貢献する電源システム

3.1 エネルギーマネジメントシステム

(1) 分散型グリッドによるエネルギー強靱（きょうじん）化の流れへの対応

(a) 市場の動向

SDGs（持続可能な開発目標：Sustainable Development Goals）や ESG（Environment・Social・Governance）投資など環境問題への対応

が国際的に問われている中、2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。

市場では企業が使用電力の再生可能エネルギー（再エネ）への切り換えを急ピッチで検討しており、太陽光発電の自家消費や自己託送（自社発電所での発電電力を送配電ネットワークを通じて自社設備に送電）の他にPPA（電力販売契約：Power Purchase Agreement）^(※1)が注目されている。

このように、再エネの拡大は今後も継続することが期待されるが、再エネを受け入れる電力システムの強化が必須である。

一方、近年において集中豪雨や地震などの大規模災害によるエネルギー供給の長期断絶に対するレジリエンス強化も大きな課題となっている。

再エネ拡大やレジリエンス強化のため、法整備面では「強靱かつ持続可能な電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律」（エネルギー供給強靱化法）が2020年6月に国会で可決・成立し、2022年4月に施行された。エネルギー供給強靱化法は、自然災害の頻発や広域化、再エネ主力電源化に対応する強靱かつ持続可能な電力供給体制を確保するための法改正である。改正ポイントとして、災害に強い分散型電力システムと再エネ導入拡大のための系統整備がある。地域において小型の分散型電源などを含む配電網を運営しつつ、緊急時には独立したネットワークとして運用可能となるよう、配電事業を法律上位置付けることが含まれている。

このような状況の中、地域の分散型電源を核とした分散型グリッドが各地で検討されている。今後、技術検証や事業採算性の検討が進むと考えられる。

(b) 富士電機の取組み

富士電機はこれまで、離島マイクログリッドや地域エネルギーマネジメントなどの実証事業にて、関連する技術開発や検証を行い、実運用可能なシステムを提供することで、再エネ拡大やレジリエンス強化に貢献してきた。富士電機が実現する地域マイクログリッドの全体像を図3に示す。

地域マイクログリッドには、地域のエネルギー最適化によるCO₂排出量削減、災害時のエネルギー供給維持、地域エネルギーリソースの有効活用という目的がある。これらの目的を実現するため、富士電機は次の開発を行い、展開してきた。

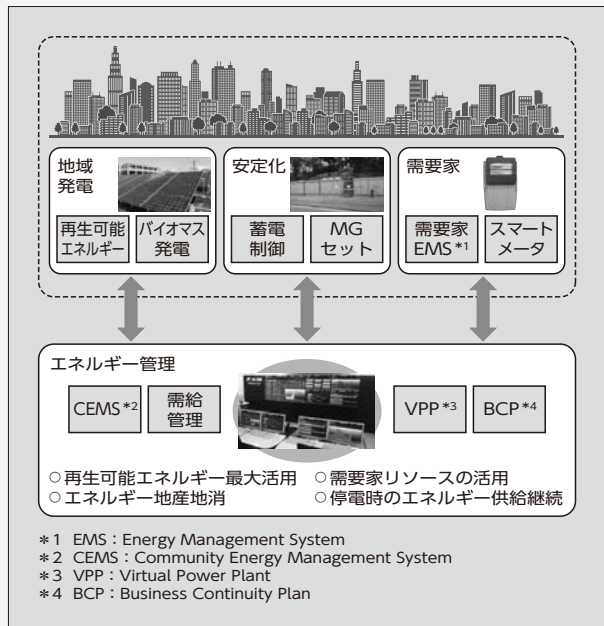


図3 富士電機が実現する地域マイクログリッドの全体像

① CEMS（Community Energy Management System）

CEMSは、地域のエネルギー需要や再エネによる発電量を予測し、最適な発電計画を立案し、制御する。さらに、デマンドレスポンスにより需要調整を行う。

② VPP（Virtual Power Plant）リソースアグリゲータ

VPPリソースアグリゲータは、需要家のリソース（大型蓄電池）を一括管理し、さまざまな要求に応じて、蓄電池システムを制御する。

③ 需給管理

需給管理は、需要を予測し、発電計画を立案する。そして、立案した発電計画に基づき必要な電力を電力卸売市場で取引する。さらに、需要実績を取得し、需要と供給のバランス状況を管理する。

④ 蓄電池制御

蓄電池制御は、蓄電池の充放電を制御することで、再エネ発電の安定化や発電機の効率的な運転を実現する。また、緊急時の独立システムの周波数の安定化を行う。

⑤ 蓄電池駆動MGセット

蓄電池駆動MGセットは、蓄電池駆動のモータと発電機を組み合わせた電源装置で、再エネの変動抑制や、独立システムの安定化などに貢献する。

図4に蓄電池制御技術を適用した、国立研究開発

(※1) PPAモデル

電力需要家がPPA（電力販売契約：Power Purchase

Agreement）事業者が発電設備設置用地を提供し、PPA事業者が発電設備の無償設置と運用・保守を行

い、発電電力料金を電力需要家に請求するモデルをいう。



図4 蓄電池制御システムの屋外設備の外観

法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA）種子島宇宙センターの蓄電池制御システムの屋外設備の外観を示す（“JAXA 種子島宇宙センターの電力安定供給に貢献する大型蓄電池制御システム”、30 ページ参照）。

(2) 電力管理システムの機能向上

安定的に電力を供給するためには、システムによる管理が不可欠となる。富士電機では、最新のネットワーク技術などを適用し、信頼性、操作性、保守性を向上させた電力管理システムを展開し、更新需要などにも対応している（“鉄道の安全・安定輸送に貢献する電力管理システム”、36 ページ参照）。

(3) 今後の開発

(a) 地域マイクログリッドシミュレータ

再生エネを含む分散型電源を中核としたマイクログリッドでは、需要想定に基づく再生エネやコージェネレーションシステムなどの主要発電設備、蓄電設備などの容量設計が必要である。通常時の他に、基幹システム停電時の運用を考慮する場合、これらは複雑に影響し合うため、最適解を求めることが難しい。富士電機では、これまで培ってきた電力シミュレーション技術をベースに、この課題を解決するためのマイクログリッドの設計支援シミュレーションシステムを開発中である。これにより、設計者の負担を軽減し、実運用可能なマイクログリッドの最適設計を支援する。

(b) 事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）対応 EMS

災害などによる長期停電に備え、地域マイクログリッドでは、分散型電源により、重要施設（避難所、病院など）への電力供給を確保することが求められる。

単独の施設や隣接施設への供給など小規模な範囲では、決められた手順による電源復旧が可能だが、広範囲になった場合、再生エネ発電を活用して電源復旧するためには、需要と供給のバランスを取りなが

ら復旧範囲を徐々に広げていくなど、高度な運用が必要となる。富士電機は、電力シミュレーション技術を活用した復旧支援機能を CEMS に搭載できるよう、開発を進めている。

3.2 電源システムを支える受変電機器技術

変圧器や開閉装置などの受変電機器は、電源システムを支える電力系統の中核を成す機器であり、その技術の発展には、絶え間ない努力が払われてきた。近年の技術開発の主流は、小型化、高効率化、高信頼性化、メンテナンスフリー化に加え、デジタル化と環境負荷低減の比重が増加しつつある。受変電機器の監視・制御・保護装置には、国際的な通信規格である IEC 61850 の適用が広がりを見せており、変圧器の油中ガス分析、開閉装置の部分放電やガス密度などの監視システムの適用例も増えてきている。

富士電機は、変圧器の高電圧・大容量化のための技術開発の後、小型化のための技術開発を継続して実施している。2018 年に最新の解析技術を駆使し、鉄心・巻線・冷却器構造などの最適化により、図 5 に示す世界最小クラスの容積・質量・油量を実現したグローバル対応 115 kV、50 MVA 変圧器を開発した。また、同技術をさらに高電圧・大容量クラスの変圧器に適用できるよう、開発を継続中である。

一方、環境負荷低減のため、植物由来の絶縁・冷却媒体を用いたパームヤシ脂肪酸エステル変圧器を開発し、発売している（“環境負荷低減に貢献するパームヤシ脂肪酸エステル変圧器”、53 ページ参照）。また、環境負荷低減に加え、引火点の高い大豆由来の天然エステルを用いて、防災性を高めた変圧器を開発し、発売した。

開閉装置については、定格電圧 300 kV までのガス絶縁開閉装置（GIS：Gas-Insulated Switchgear）を製品ラインアップしている。このたび、開閉装置関連の国際規格である IEC 62271 シリーズにおける試

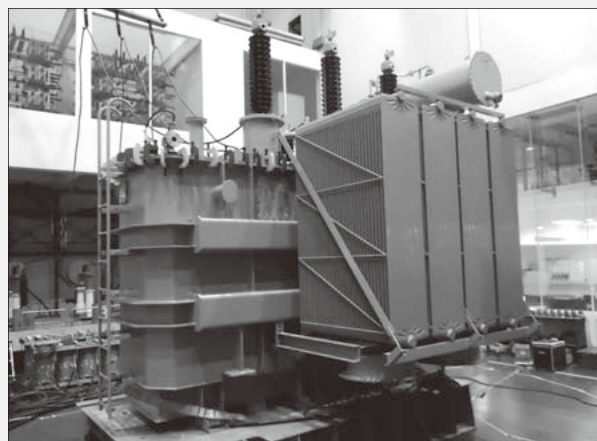


図5 グローバル対応 115 kV、50 MVA 変圧器



図6 グローバル対応 145kV GIS

験基準などの改定に対応するために、最新の遮断・解析技術を駆使して図6に示すグローバル対応 145kV GISを開発した。この技術をさらに高電圧クラスのGISに適用できるよう、開発を進めている。

GISにおいては従来、その絶縁体、消弧媒体として地球温暖化係数が非常に大きな六ふっ化硫黄 (SF₆) ガスを使用することが一般的であったが、環境負荷低減のため、SF₆ 代替ガスを使用したGISの適用が、SF₆ ガス規制の進む欧州、米国、韓国などで先行している。国際的な動向も見据え、富士電機もSF₆ 代替ガスを使用したGISの開発を進めている。

3.3 電力の安定供給を支える産業用電源機器

非鉄金属、鉄鋼、ケミカル素材やグリーン水素などの素材製造分野への設備投資は、世界的に拡大が続いている。富士電機では、これら素材製品の製造におけ

る電解、溶融、製錬などの設備の電源に用いられる産業用変圧整流装置を提供している。産業用変圧整流装置には電源品質の確保はもちろん、系統に流出する高調波の対策、設備の小型化・冗長性、機器の省エネ・高効率化、事故時における安全性の確保などさまざまな要求がある。これらの要求に対して、高調波系統解析、各種シミュレーション解析などを駆使することにより、機器単体のみでなく電源システムとしての解決に取り組んでいる（“素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源”、42 ページ参照）。

4 あとがき

富士電機が取り組んでいる電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システムの現状と展望を述べた。これからも、電力の安定供給と最適化に寄与することで社会に貢献していく所存である。



河野 正志

富士電機株式会社執行役員常務、パワエレ エネルギー事業本部長。



松本 康

パワエレシステムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部開発統括部長兼パワエレ エネルギー事業本部開発統括部長。博士(工学)。IEEE 会員、電気学会フェロー。



データセンターの電力安定供給に貢献する 大容量無停電電源システム

High-Capacity Power Supply System That Contributes to Stable Power Supply for Data Centers

濱田 一平 HAMADA, Ippei

近年、情報システムのクラウド化や電子商取引の増加に伴い、世界中で大規模なデータセンター（DC）の新設が進んでいる。このDCに安定した電力を供給するための大容量無停電電源システムの需要が高まっている。富士電機は、電源システムに関連する電気設備を製品ラインアップし、給電信頼性および経済性を高める「電気設備まるごと提案」を推進している。電源システムの主要装置である無停電電源装置（UPS）の小型化によるUPSシステムの設置面積の削減や、I/O-Mの機能を周辺盤に移管することによる設置工事期間の短縮化、HEモードによる省エネルギー化を実現した。

In recent years, there has been an increase in the number of large-scale data centers (DCs) throughout the world as companies move information systems to the cloud and expand their use of e-commerce. This trend has also increased the demand for high-capacity uninterruptible power systems (UPSs) capable of stabilizing the supply of power to the DCs. Fuji Electric, providing line-ups of electrical equipment for power systems, has been promoting its Comprehensive Electrical Equipment Proposals that enhance supply reliability and economy. We have downsized our UPSs, which are key equipment of power systems, to reduce their footprints, migrated I/O-M functions to switch-boards to shorten installation periods, and provided HE mode to save energy.

1 まえがき

近年、情報システムのクラウド化や電子商取引の増加に伴い、世界中で大規模なデータセンター（DC：Data Center）の新設が進んでいる。DCの大規模化に伴い、電源システムの大容量化も進んでいる。

富士電機は、大規模な電源システムを構成する発電機、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）、ガス絶縁開閉装置（GIS：Gas-Insulated Switchgear）、変圧器などの電気設備をDCに納入している。また、電源システムの給電信頼性や経済性を高める総合的な技術力を保有し、電気設備の導入検討段階から、現地施工、保守サービスまで含めた「電気設備まるごと提案」を進めて、DCの安定稼働に貢献している。

本稿では、電源システムの設置面積の削減や省エネルギー（省エネ）の要求に応えるために開発した大容量無停電電源装置「UPS7500WX」（図1）を用いた、データセ

ンターの電力安定供給に貢献する大容量無停電電源システムについて述べる。

2 大規模DCにおけるUPSシステム

2.1 概要

図2にDCにおける電源システムの構成概要を示す。変圧器、開閉器などで構成される特別高圧受変電設備、または非常用発電設備から供給された電力は、開閉器などで電源切換を行うUPS入力設備を経て、UPSシステム設備に供給され、個々のUPSシステムからサーバなどの負荷に配電される。UPSシステムは、DCの安定的な稼働のために、停電や落雷による電圧変動などの電源障害からサーバなどの情報機器を保護する機能を持つ。

図3にUPSシステムの構成例を示す。UPSシステムは高圧入力盤、変圧器盤、変圧器二次盤、UPS、出力盤で



図1 「UPS7500WX」

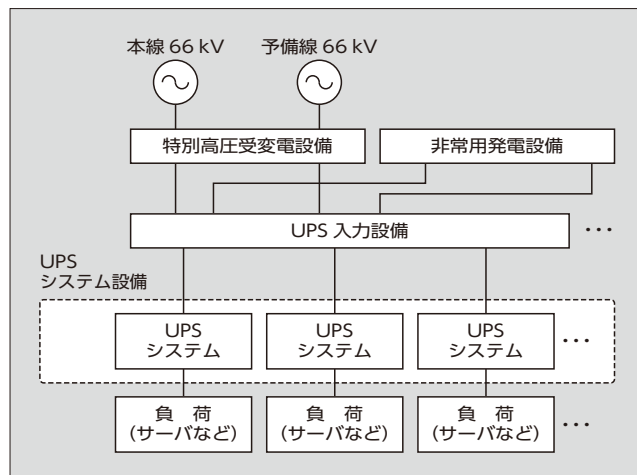


図2 DCにおける電源システムの構成概要

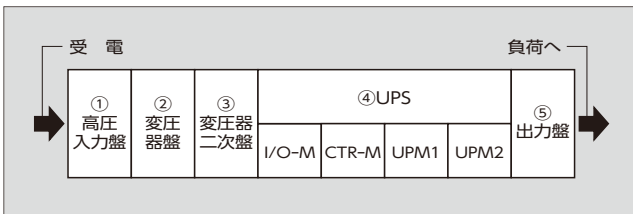


図3 UPSシステムの構成例

構成される。高圧入力盤、変圧器盤、出力盤を合わせて周辺盤とも呼ぶ。UPS 入力設備からの受電は高圧入力盤で行い、出力盤はサーバなどの負荷に接続される。UPS と周辺盤や、周辺盤同士の接続には、ケーブルやバスダクトが用いられる。

UPS は UPS システムの中核となる装置である。基本構成は、主回路ケーブルや制御信号線を接続するための入出力モジュール (I/O-M)、制御装置や内部バイパス回路を実装した制御モジュール (CTR-M)、および整流器やインバータを内蔵した電力変換モジュール (UPM1、UPM2) である。

2.2 UPS システムの課題

(1) 設置面積の削減

大容量無停電電源システムを構成する UPS システムは、次のような理由で大型となる。

- (a) 発熱量が増加するため、冷却のためのヒートシンクが大型化する。
- (b) 導体 (ブスバー) の断面積が電流値の 2 乗で大きくなるため、これを格納する I/O-M が大型化する。

一方、DC 事業者は、サーバの設置数量を少しでも増やすために、電気設備に対しては設置面積の削減を求めている⁽¹⁾。

(2) 設置工事期間の短縮

UPS システムの大容量化が進むと、UPS と周辺盤の接続に必要な端子数や、配線に用いるケーブルまたはバスダクトの本数が増加するため、配線作業工数が増加する。

DC 事業者のニーズは、速やかにサーバやストレージを稼働可能な状態にすることである。このため、UPS システムをはじめとする電源システムの現地設置工事期間の短縮も求められている。

(3) UPS システムの省エネ

サーバやストレージのような重要機器には、電圧や周波数の変動が少ない電力品質の高い給電が必要である。一方で、空調のように電圧や周波数の変動の影響をあまり受けないが、消費電力が大きい負荷もある。こうした負荷に対しては、電力品質の維持よりも、省エネを優先した UPS システムの運用が求められている。

③ 「UPS7500WX」を用いた UPS システム

3.1 UPS システム設置面積の削減

(1) UPS の小型化

UPS7500WX は、1 台当たり 600 kVA の電力変換モジュール (UPM) を、最大 4 台まで組み合わせることにより、UPS 容量を 600 kVA から 2,400 kVA まで拡張できる。そのうち、図 4 に UPS7500WX (1,200 kVA 機) の外形を、表 1 に仕様を示す。

UPS7500WX (1,200 kVA 機) の底面寸法は、幅 3,500 mm、奥行き 900 mm であり、業界最小レベルである。また背面および左右側面に保守スペース確保が不要であることから、壁面に密着させた配置や、2 台を背面合わせで使用するなど、コンパクトな設置が可能である。

(a) UPM 冷却の高効率化

UPM の内部を、発熱量の大きな機器を集めた強制風冷エリア (リアクトル・コンデンサ・整流器・インバータ) と、発熱量が小さく、強制風冷が不要な機器を集めた自冷エリア (コンタクタ・サブ制御装置) とに分離した。さらに強制風冷エリアのみに、冷たい空気を直接当てて冷却する構造とすることで冷却効率を上げ、ヒートシンクを小型化した。

(b) 上部排気と前面保守

強制風冷は、前面吸気・上部排気方式とすることで、背面の排気スペースを不要とした。また、装置前面から保守を行うことができる部品レイアウトとし、左右側面の保守スペースを不要とした。

これらの対応により、設置面積の削減を実現している。

(2) UPS システムの小型化

一般に UPS の I/O-M には、ケーブルを接続する機能に加え、落雷によるサージ電圧から電子機器を保護するサージアブソーバなどの電気部品が実装されている。UPS7500WX は、これらの電気部品を CTR-M に移設した。これにより、変圧器二次盤および出力盤の設計製作時にケーブルを接続する機能を組み込むことで、I/O-M がなくても UPS システムが構築可能となった。

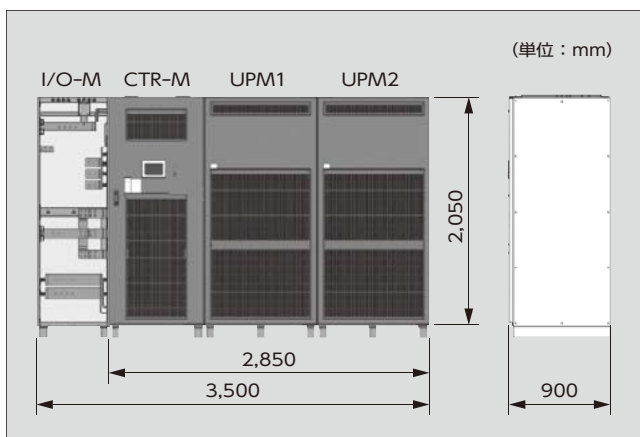


図4 「UPS7500WX」(1,200 kVA 機) の外形

表1 「UPS7500WX」(1,200kVA機)の仕様

項目	仕様	
方式	常時インバータ給電方式 (HEモード選択可能)	
定格容量	1,200 kVA / 1,200 kW	
外形寸法	W3,500 × D900 × H2,050 (mm) (I/O-M含む) W2,850 × D900 × H2,050 (mm) (I/O-M含まず)	
装置最高効率	96.6% (VFI ^{*1})、99.0% (VFD ^{*2})	
切換時間	無瞬断 (VFI)、<2 ms (VFD)	
交流入力	相数 (線数)	三相4線
	電圧	380、400、415、420 V
	周波数	50 / 60 Hz
	入力力率	0.99 (遅れ) 以上、1.0以下
	入力高調波電流	総合3%以下
バイパス入力	相数 (線数)	三相3線または三相4線
	電圧	380、400、415、420 V
直流入力	定格電圧	480 V
	種類	リチウムイオン電池、鉛蓄電池
交流出力	相数 (線数)	三相3線または三相4線
	電圧	380、400、415、420 V
	周波数	50 / 60 Hz
	出力力率	0.7 (遅れ) ~ 1.0
	電圧精度	±1%以下 (負荷平衡)
	過渡電圧変動	±3%以下 (負荷急変)
	電圧ひずみ率	2%以下 (線形負荷) 2.5%以下 (IEC 62040-3)
過負荷耐量	125% : 10 min、150% : 1 min (推奨温度時)	
環境	周囲温度	0 ~ 40℃ (推奨25℃)
	周囲湿度	5 ~ 95% (結露なきこと)
通信プロトコル	Web/SNMP、Modbus ^{*3} RTU、 Modbus TCP/IP	

*1 VFI : Voltage and Frequency Independent
*2 VFD : Voltage and Frequency Dependent
*3 Modbus : Schneider Automation, Inc.の商標または登録商標

I/O-M を含まない UPS7500WX の幅は図4 に示すように 2,850 mm で、設置面積を 19% 削減できる。

3.2 設置工事期間の短縮

UPS システムの列盤構成図を図5 に示す。

従来の UPS システムは、図5(a)のように、UPS と周辺盤を連結して構築するが、UPS と周辺盤の配線は I/O-M を介して行われる。このため、外部ケーブルやバスダクトを用いた盤外配線が必要となる。DC が大規模化するほど端子数や配線工数が増大し、ケーブル長も長くなるため、設置工事期間の長期化の原因となっていた。

一方、UPS7500WX を用いた UPS システムの場合、I/O-M を介せず配線できるため、図5(b)および図5(c)のように UPS7500WX と変圧器二次盤や出力盤との配線はすべて盤内で行うことができる。このため盤外配線は、高圧入力盤への入力と、出力盤から負荷への接続だけとなり、

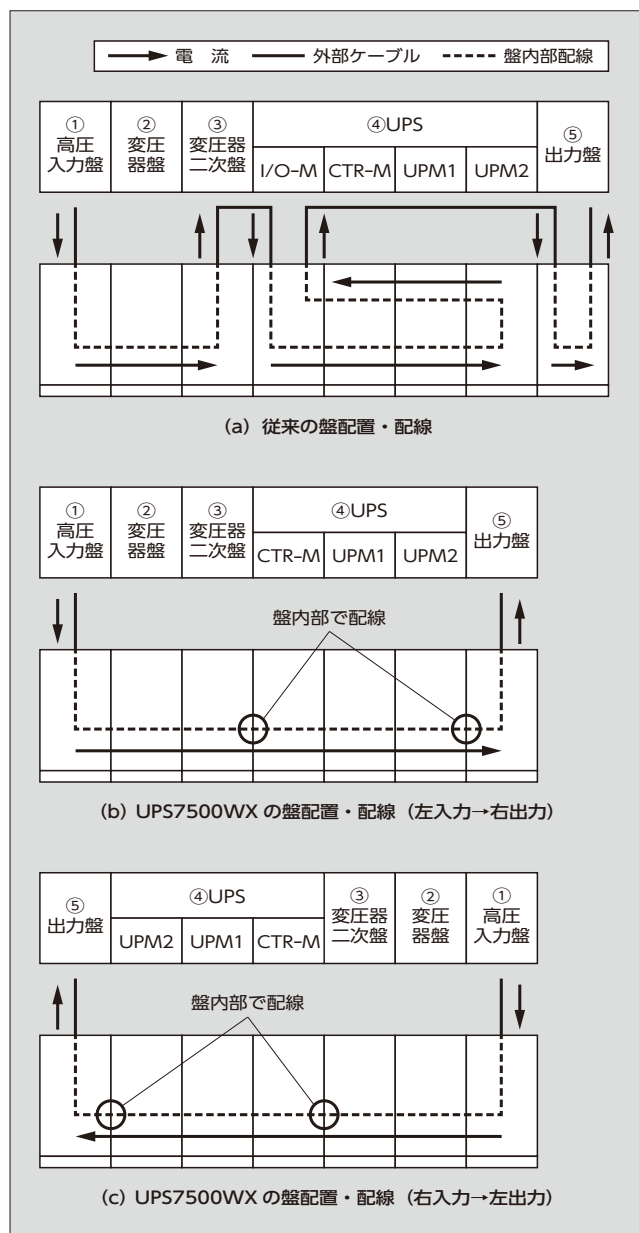


図5 UPS システムの列盤構成図

配線工数が従来に比べて削減できるとともに、設置工事期間も短縮できる。

なお、UPS7500WX は図5(b)および図5(c)に示すように、左右どちらからでも受電可能である。この理由は、CTR-M 内部の部品配置を左右入替え可能な構造としたため、左右のどちらから受電した場合でも、内部インピーダンス、インダクタンスが変わらないため、同品質の給電が可能である。

左右どちらからでも受電できる構造は、UPS システムを複数設置する場合の、設置工事期間の短縮に有効である。

図6 に UPS システムの列盤構成図 (天井図) を示す。具体例として、二つの UPS システムを背面合わせで設置するケースを示したものである。図中の①~③、⑤は、図5の①~③、⑤と同じ盤を示している。従来の UPS システムは、図5(a)に示すように、受電できるのは左右どちらか一方からだけである。このため図6(a)のように、一つの

特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

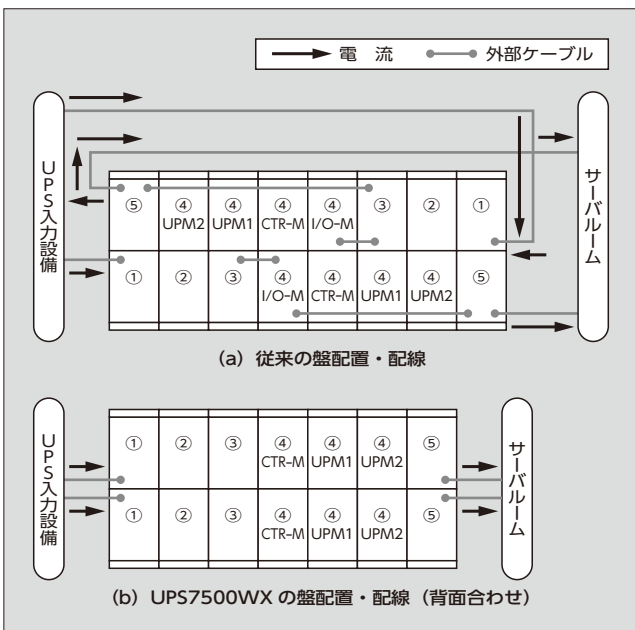


図6 UPSシステムの列盤構成図(天井図)

UPSシステムはUPS入力設備、およびサーバールームと最短で配線できるが、背面合わせしたもう一方のUPSシステムは、UPS入力設備から変圧器盤、出力盤からサーバールームまでの長距離配線が必要となる。

一方、UPS7500WXを用いたUPSシステムは、左右どちらからでも受電可能なため、図6(b)のようにUPS入力設備からサーバールームまで電気の流れを一方にすることができ、いずれのUPSシステムも最短距離で配線できる。

3.3 HEモード (High Efficiency Mode) バイパス回路による省エネルギー化

UPS7500WXは、図7に示すハイブリッドバイパス回路(図7(a))およびHEモードバイパス回路(図7(b))を搭載しており、負荷の種類に応じてこれらを選択することで、UPSシステムを効率的に運用し、省エネを実現できる。

従来品にも搭載されていたハイブリッドバイパス回路は、通常時は整流器およびインバータで電力変換する常時インバータ給電である。短時間の電流耐量で設計したサイリスタによるACスイッチと、開閉器から成る並列回路を持ち、停電などの電源異常時には無瞬断でバイパス入力に切り換わる。このときの電力変換効率は96.4%になるが、電圧や周波数の変動が小さいことから、サーバやストレージといった重要負荷への給電に適している。

一方、UPS7500WXに搭載したHEモードバイパス回路は、通常時はバイパス入力から交流出力に給電し、整流器やインバータを介さない常時商用給電方式である。連続運転可能な電流耐量で設計したサイリスタによるACスイッチと開閉器を直列回路で構成している。電力変換効率は98.4%で、ハイブリッドバイパス回路を上回る。ただし、電圧や周波数変動の影響を受けるため、空調などの電力品質への要求が低い負荷での利用に適している。常時商用給電方式であるため、システムの電力品質が高い諸外国にお

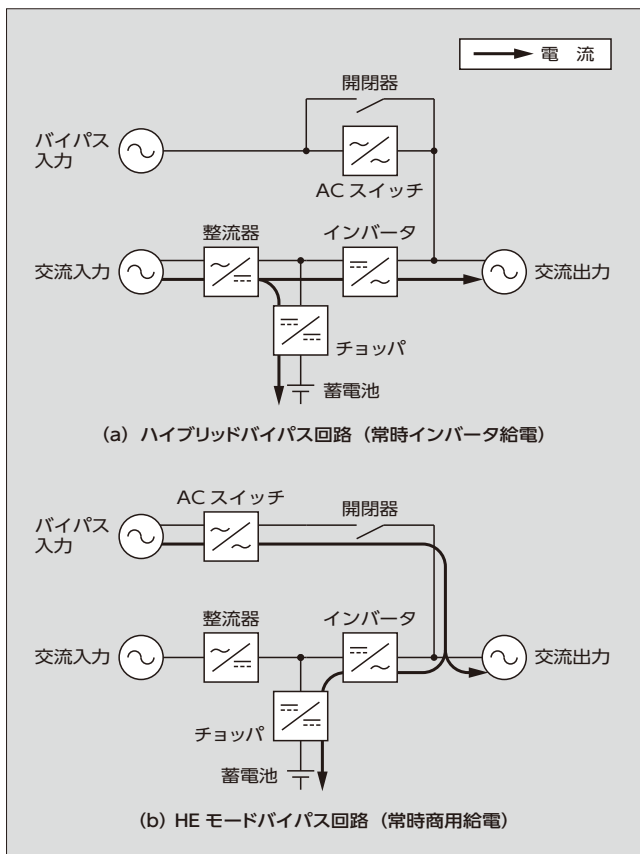


図7 選択可能な給電方式

いて省エネ目的での利用が期待される。

なお、HEモードバイパス回路選択時に、停電や落雷などによる電源異常やサイリスタの失弧を検出すると、2ms以内にインバータ給電に自動的に切り換わる。一般に、電源異常が電気・電子機器に悪影響を及ぼす時間は10msとされるが、これよりも十分に短い時間での切換えを実現している。

4 あとがき

データセンターの電力安定供給に貢献する大容量無停電電源システムについて述べた。

今後も、富士電機のエネルギー・環境技術を生かした製品・サービスを通じ、地球温暖化をはじめとするさまざまな環境負荷低減に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 岩本啓ほか. データセンター向け高圧盤の小型化. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.143-146.
- (2) 佐藤篤司ほか. ハイパースケールデータセンター向けUPS. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.147-150.
- (3) 瞬時電圧低下対策専門委員会. 瞬時電圧低下対策. 一般社団法人電気協同研究会. 1990, vol.46, no.3, p.9-13.
- (4) 松崎薫. 無停電電源システム実務読本. オーム社. 2007.



濱田 一平

UPS の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部開発統括部変換装置開発部グループマネージャー。電気学会会員。無停電電源システム標準化委員兼 IEC SC22H エキスパート。



冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術

Power System Construction Technology with Improved Redundancy and Maintainability

安本 浩二 YASUMOTO, Koji

根本 健司 NEMOTO, Kenji

北谷 裕次 KITADANI, Yuji

データセンター（DC）の大規模化に伴い無停電電源装置（UPS）の容量拡大が進んでいる。UPS を用いた電源システムでは、保守時における冗長性確保や誤操作防止をはじめ、電源切換時や大容量変圧器投入時の電圧変動の抑制が課題である。冗長性および保守性を高めた電源システムの構築を行うために、N+2 冗長システムで冗長性を確保し、回転制御キースイッチを用いたシーケンス回路により、電源切換時の誤操作を防止する。また、電源切換時の遮断器の順次投入や、2 並列の高圧変圧器を大容量化した 1 台にすることで、電圧変動の要因となる励磁突入電流を抑制できる。

The capacity of uninterruptible power systems (UPSs) has been expanding to meet the needs of larger data centers. Power systems with UPSs face various challenges, such as ensuring redundancy during maintenance, preventing erroneous operation, and suppressing voltage fluctuations during power supply switching and energizing of large-capacity transformers. The measures to build a power supply system with enhanced redundancy and maintainability include an N+2 system to ensure redundancy and sequence circuits using a rotation control key switch to prevent erroneous operation. In addition, inrush exciting current, a cause of voltage fluctuations, can be suppressed through the sequential closing of circuit breakers during a power supply switching and the replacement of two parallel high voltage transformers with a single high capacity transformer.

① まえがき

近年、情報システムのクラウド化や電子商取引の増加に伴い、データセンター（DC：Data Center）の建設が進んでいる。DC ではサーバやストレージ機器の大容量化、高集約化が進み、電力消費量が増加するため、負荷に給電する無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の効率化や容量拡大が求められている。

富士電機は、効率化に向けて、3 レベル制御三相 4 線式 UPS、⁽¹⁾ 常時インバータ給電と常時商用給電方式を合わせ持つ UPS、⁽²⁾ 並列冗長構成での台数制御などの開発を進めてきた。また、リチウムイオン電池を採用した UPS ⁽³⁾ も提供している。さらに、大規模 DC 向けに大容量 UPS システムの開発を進めている。

一方で、大容量機器の採用に伴う課題も存在する。UPS 容量の増大に伴い高圧変圧器の容量も増大し、励磁突入電流が大きくなるため、電源投入時の電圧降下が大きくなる。こうした電源品質の低下は、負荷の停止や不必要な電源切換の原因となり、復電時や保守時において発生する。また、^(注1) N+1（1 台を予備として待機設置するもの）冗長システムでは、保守時や故障時には冗長性がなくなるため、その間の冗長性確保の要望もある。保守時や故障時にも冗長性を持たせた N+2 冗長システムがあるが、これに最適な機器構成の検討が必要である。

本稿では、冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術について述べる。

〈注 1〉 N：UPS の構成は、一般に N という用語を使用する。N とは負荷容量と同等な UPS 台数のことである。

② 大規模電源システムの概要

大規模 DC の電源システムの構成例を図 1 に示す。電源システムは、特高受変電設備、サブ変電設備、UPS システム設備、非常用発電設備で構成する。

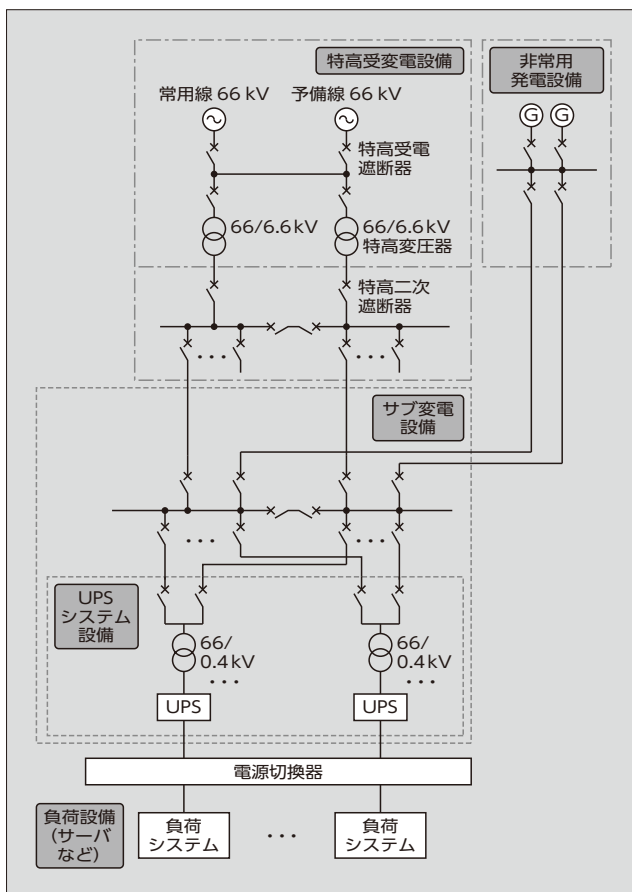


図 1 大規模データセンターの電源システム構成例

特高受変電設備は、受電の形態として一般的に常用・予備方式が採用され、特高受電遮断器、特高変圧器、特高二次遮断器は二重化される。受電電圧 66 kV の最大契約電力は 50 MW であり、25 ～ 30 MVA の特高変圧器が 2 台または 4 台で構成される。したがって、1 台の特高変圧器から受電する容量 3 MVA のサブ変電設備は 8 ～ 10 か所となる。UPS システム設備は、大容量の UPS システムを複数設置し、かつ予備機も設置して冗長化されている。非常用発電設備は、常用機と予備機を備えることで冗長化を図っている。

3 従来の電源システムの課題

3.1 保守時の冗長性確保

UPS システムの冗長方式は、これまで N+1 の構成が多く採用されているが、保守中および故障中には予備機が存在しなくなるため、冗長性の確保が課題である。

3.2 保守時の誤操作防止

UPS の保守には電源切換を行うが、その際、UPS のインバータ給電と商用給電の併用を防止するインタロックを解除する必要がある。しかし、インタロックを外した後、誤って電源供給に必要な遮断器を開放すると給電が停止する可能性があるため、誤操作防止が課題である。

3.3 保守時の電源切換による電圧変動の抑制

次に示す理由により、保守時の電源切換に起因する電圧

変動を抑制することが課題である。

- (a) UPS システムにおいて共通予備方式や 2N (N 台を予備として待機設置するもの) は信頼性が高い。しかし、UPS がそれぞれ異なる特高変圧器から受電する場合は、特高変圧器の負荷率の違いから、各 UPS の出力電圧に位相差が発生する。こうした非同期状態で負荷切換器を操作すると、UPS の切換えに 0.1 ～ 0.2 s を要するため、この間負荷への電源供給が停止する。
- (b) 常用・予備方式の受電では、特高受変電設備の特高受電遮断器、特高変圧器、特高二次遮断器は二重化されているが、それらの機器の保守時の電源切換に伴い、サブ変電設備が停電する。
- (c) 大容量 UPS の採用で、高圧変圧器容量が増大する。このため、電源切換時の遮断器の開閉ノイズや変圧器励磁突入電流が小容量に比べて大きく、電圧変動も大きくなる。

4 冗長性および保守性を高めた電源システムの構築

4.1 保守時の冗長性確保

(1) N+2 冗長 UPS システムの比較

保守時の冗長性確保のため、UPS システム設備を N+2 (2 台を予備として設置) にする方法がある。N+2 冗長 UPS システムにおける並列冗長・待機冗長・共通予備 (キャッチャー方式) の比較を表 1 に示す。

表 1 N+2 冗長 UPS システムにおける並列冗長・待機冗長・共通予備 (キャッチャー方式) の比較

	並列冗長	待機冗長	共通予備 (キャッチャー方式)
構成図			
システム運用	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全てのUPSが負荷を分担して並列運転 ○ 負荷はAまたはB母線から選択して受電 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 共通予備機は2並列 ○ 負荷は常用機と共通予備機から選択して受電 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 共通予備機は2並列 ○ 負荷は常用機と共通予備機から選択して受電
信頼性	<ul style="list-style-type: none"> ○ 無瞬断バイパス回路の分散で給電が確保 ○ 短絡事故時は全てのUPSから短絡電流が流れるため、短絡保護協調に注意が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 故障時に無瞬断バイパス回路への切換えが必要 ○ 複数台故障時の電源切換器の制御が複雑 ○ 短絡事故時は常用UPSと予備UPS共に短絡電流が流れるため、短絡保護協調に注意が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 故障時に無瞬断バイパス回路への切換えが必要 ○ バイパス回路には電源切換器が不要 ○ 短絡事故時、短絡電流は該当UPSのみにしか流れないので、他のUPSの影響は小
UPS出力	同期	同期	非同期 (外部同期制御を付加することで同期可能)
保守性	冗長を確保したUPS給電を継続しながら1台ずつ保守	UPS給電を継続しながら1台ずつ保守	UPS給電を継続しながら1台ずつ保守

*2 A B C D: 同じ記号同士で接続する

(a) 並列冗長

1 台の UPS 出力が短絡すると、残り全ての UPS に短絡電流が流れるので、短絡保護協調および母線回路の絶縁対策が必要である。

1 台の UPS が故障して停止した場合は、健全な UPS で負荷への給電を継続するが、複数台が故障した場合は、負荷集中により健全な UPS も過負荷状態となり停止する。このため、負荷への給電を継続するには、全ての UPS で無瞬断バイパス回路への切り換えが必要である。

(b) 待機冗長

常用機の UPS 出力が短絡すると、該当する UPS は無瞬断バイパス回路に切り換わり、同時に共通予備機の UPS が給電を継続する。ただし、共通予備機の UPS にも短絡電流が流れるため、こちらも無瞬断バイパス回路に切り換わる。このため、遮断器の動作順序を決める短絡保護協調が必要である。

常用機の UPS が故障した場合は、故障した UPS の無瞬断バイパス回路に共通予備機を接続して、給電を継続する。ただし、複数台が故障した場合は、常用機の UPS の無瞬断バイパス回路に設置した電源切換器で適切に切り換える必要があり、制御が複雑である。

(c) 共通予備（キャッチャー方式）

常用機の UPS の出力が短絡しても、他の UPS には短絡電流は流れず、影響を与えない。このため、共通予備機の UPS からの給電に切り換えて負荷運転を継続できる。常用機の UPS が故障した場合、無瞬断バイパス回路に切り換わるため給電は継続する。

このように信頼性が高く、また、他方式と比べて非常にシンプルな回路構成となる点も特徴である。

上述のことから、信頼性と経済性を総合的にみると、共通予備（キャッチャー方式）が優れているといえる。

(2) 外部同期方式による UPS 切換時の電圧変動抑制

共通予備（キャッチャー方式）の常用機の保守時には、電源切換器で常用機から共通予備機に切り換える。しかし、常用機と共通予備機の電圧位相がそれぞれ異なる非同同期状態では、切換えに電圧変動を伴う。

このため、どのような状況下においても各 UPS の電圧出力が同期状態を保つループ接続を用いた外部同期方式を採用し、負荷に影響を及ぼさない 5 ms の高速切換を実現している。

ループ接続を用いた外部同期方式は、図 2 に示すように各 UPS に通信基板を設け、通信ケーブルでループ接続する。通信ケーブルの断線や通信基板の破損があっても、各 UPS 間の接続が保たれるため、同期制御が継続できる特徴がある。なお、同期制御の概要は次に示すとおりである。

- 各交流入力電源が同期していれば各 UPS のバイパス電源に同期する。
- 交流入力電源の位相が変動した場合は、正常な UPS 出力を選定してその位相に合わせて運転する。
- 交流入力電源が停電した場合、正常な UPS 出力を

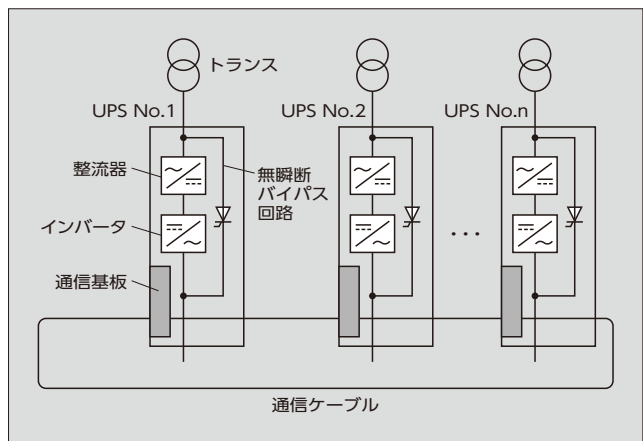


図2 ループ接続を用いた外部同期方式の構成

選定してその位相に合わせて運転する。

4.2 保守時の誤操作防止

回転制御キースイッチを用いた誤操作防止回路を採用した。回転制御キースイッチは、ソレノイドとキースイッチの補助接点を持ち、ソレノイドを励磁することで、キースイッチを回転できる。シーケンス回路によりキースイッチの回転を制御し、操作不可時にはキーが抜けない構造である。

例として、回転制御キースイッチを用いた誤操作防止機能を持った UPS システムの保守手順を図 3 に示す。

(1) 通常運用時

UPS 出力遮断器はオンで操作不可、保守バイパス遮断器はオフで操作不可。保守バイパス遮断器の回転制御キースイッチに挿入したキーは操作禁止位置で固定されて抜けない。

(2) インバータ給電からバイパス給電への切換え

バイパス給電に切り換えると、保守バイパス遮断器の回転制御キースイッチが回転可能な状態になる。これを遮断器ロック解除（キーあり）位置にすると、遮断器操作ランプが点灯し、保守バイパス遮断器が操作可能となる。

(3) 保守バイパス回路への通電

保守バイパス遮断器をオンすると UPS 出力遮断器の遮断器操作ランプが点灯し、UPS 出力遮断器が操作可能となる。保守バイパス遮断器側のキーを UPS 遮断器側に差し換える。

(4) UPS システム保守の実施

UPS 出力遮断器をオフにすると、保守バイパス遮断器側の遮断器操作ランプが消灯し、保守バイパス遮断器が操作不可となる。UPS 出力遮断器は、保守中の UPS への通電を防止するため、回転制御キースイッチを操作ロック（キーあり）位置にして、操作不可にする。その後、UPS システムの保守を行う。

4.3 保守時の電源切換による電圧変動の抑制

(1) 無停電での電源切換

特高受変電設備やサブ変電設備および UPS システム設

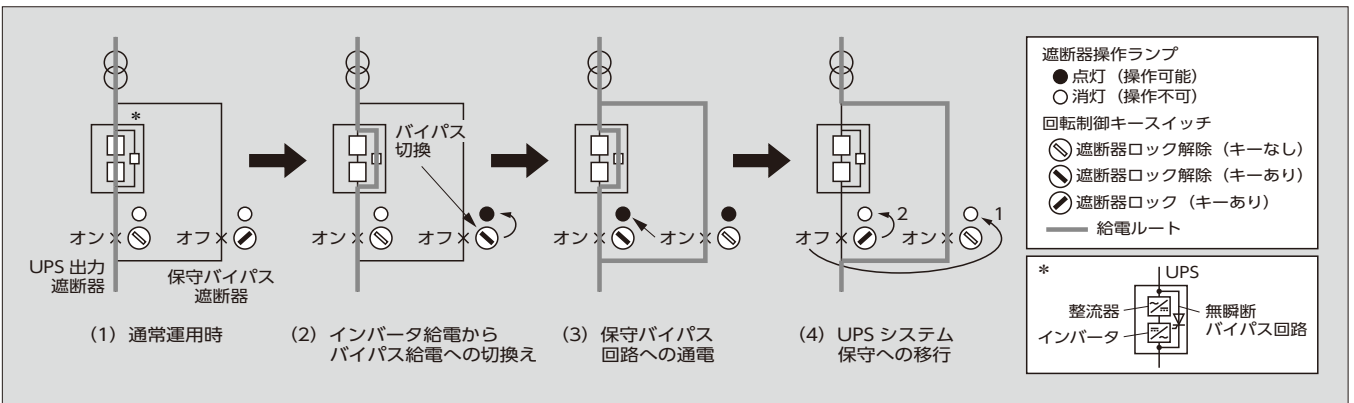


図3 UPSシステムの保守手順

備を保守する場合、電源切替が必須となる。保守時における無停電電源切替を図4に示す。

(a) 特高受電遮断器の保守時

常用線と予備線の受電遮断機を投入し、ラップ状態(注2)とするループ切替により無停電にて電源切替が可能となる。ただし、ループ切替中、両系統のインピーダンスの違いや系統側の負荷率によって常用線、予備線間に横流が流れるので、短絡および地絡継電器の整定値や切替中の継電器ロックなどについて一般送配電事業者と充分協

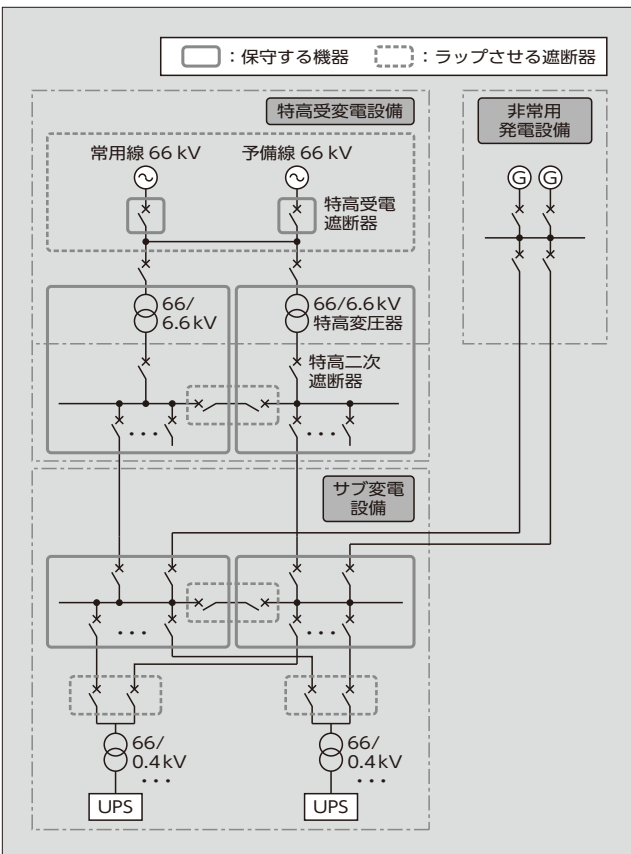


図4 保守時における無停電電源切替

〈注2〉ラップ状態：2系統の回線を一つの母線に接続した状態をいう。

議の上で実施する必要がある。

(b) 特高変圧器の保守時

特高変圧器二次側の高圧母線を連絡する遮断器を投入（ラップ中）後、変圧器二次側の遮断器を開放する。ラップ中の短絡事故時、特高変圧器二次母線以降（以降）の遮断器には、2倍の短絡電流が流れるため、2倍の遮断容量の機器を選定する。

(c) 特高変圧器二次高圧回路の保守時

特高変圧器二次側の高圧母線を連絡する遮断器をラップした後、サブ変電設備側の高圧母線を連絡する遮断器をラップする。その後、保守する特高変圧器二次高圧回路を停止させる。ただし、ラップ中は特高変圧器二次側とサブ変電設備の高圧母線同士を2回線で送電するので、各ケーブルのインピーダンスの違いにより三相電流のバランスが崩れて地絡を誤検出することがある。したがって、ラップしている間は地絡継電器をロックさせておく。

(d) サブ変電設備の高圧回路の保守時

特高変圧器二次側の遮断器、サブ変電設備の遮断器、UPS一次側の遮断器をラップすることで、保守できるようになる。

(2) 高圧変圧器投入時の電圧変動抑制

(a) 変圧器励磁突入電流による電圧降下

富士電機の高圧変圧器の励磁突入電流は定格電流の約8倍で、時定数は容量の増加に比例して大きくなる。高圧変圧器励磁突入電流(注3)による瞬時電圧降下の計算結果を表2に示す。計算条件は、系統側の短絡容量が

表2 高圧変圧器励磁突入電流による瞬時電圧降下の計算結果 (投入する変圧器容量は 2,000 kVA)

電源系統	容量 (MVA) × 台数 (台)	電圧降下率 (%)
商用電源	25×1	8.1
非常用発電設備	6×2	20.3

〈注3〉変圧器励磁突入電流：変圧器が無電圧の状態では電圧を印加した場合に生じる突入電流をいう。

2,500 MVA、瞬時過渡リアクタンスが 28% である。商用電源による給電時の高圧変圧器投入による電圧降下は最大 8% である。また、非常用発電設備による給電時は、発電機の過渡リアクタンスが大きいので、電圧降下が 20% を超える場合もある。

(b) 高圧遮断器の順序投入

電圧降下は、負荷の停止や不必要な電源切換の原因となるため、高圧変圧器の同時投入は避ける必要がある。このため、時定数^(注4)の 2 倍程度の間隔を空けて、高圧遮断器 (HVCB : High-Voltage Circuit-Breaker) を順次投入する。

66 kV の特高受変電設備では、サブ変電設備は 8 ~ 10 か所となる。特高変圧器 1 台に対し、サブ変電設備用の HVCB が 10 台あるとすると、80 ~ 100 台の HVCB を順序投入させる必要が生じる。

サブ変電設備の HVCB 投入パターンには、両系復電時、片系復電時、保守中の復電時、発電機給電時がある。

このように HVCB の数が多く、投入パターンも各種あるが、全ての HVCB が同時投入とならないように投入間隔を設計する。商用復電時のフローチャートの例を図 5 に示す。

二つのサブ変電設備を一つのグループとし、グループ内の HVCB は 1 s 間隔で投入する。各サブ変電設備の復電後の HVCB 投入間隔は共通とし、特高変圧器二次側からの投入指令をグループごとに 0.3 s の間隔を取ることで、各 HVCB の同時投入を防止する。

(c) 大容量高圧変圧器の励磁突入電流の抑制技術例

UPS システム容量の増大に伴い、大容量高圧変圧器の励磁突入電流による電圧降下は無視できないレベルとなりつつある。例えば 2,400 kVA の UPS システムには

表 3 1,500 kVA×2 台と 2,660 kVA×1 台における励磁突入電流の比較

項目	1,500 kVA×2 台 (並列)	2,660 kVA×1 台 (自冷 2,000 kVA)
冷却方式	自然冷却	ファン冷却
%Z (%) / 定格容量	5.4	8.3
励磁突入電流 (A) (波高値)	1,520×2台=3,040	1,700
定格効率 (%)	99.3	98.8
75% 容量効率 (%)	99.4	99.0

UPS の損失分、バッテリー充電のための容量を加えるため 2,660 kVA の高圧変圧器が必要となる。高圧変圧器の標準品の最大容量が 2,000 kVA であるため、一般的には 1,500 kVA を 2 並列で用いるが、2 台の励磁突入電流が重なるリスクがある。また、新たに 2,660 kVA の高圧変圧器を開発する場合、励磁突入電流を抑制するために、鉄心の磁束密度を下げるか、巻数を増やしてインダクタンスを増加させるといった対策が必要であり、大型化、質量増加といった新たな問題が生じる。そこで、寸法、質量、励磁突入電流を抑えるために自冷容量 2,000 kVA 変圧器を用い、これをファンで冷却する方式を採用し、容量 2,660 kVA を確保した。

1,500 kVA×2 台と 2,660 kVA×1 台における励磁突入電流の比較を表 3 に示す。2,660 kVA×1 台の場合は台数削減により、小型・軽量化と同時に、励磁突入電流が大幅に抑制される。2,660 kVA×1 台の UPS システムを N+1 冗長システムで運用した場合、通常運転時の負荷率 (N=3 における 75% 容量効率) は 99.0% を確保できる。

5 あとがき

冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術について述べた。

N+2 冗長 UPS システムでは、共通予備 (キャッチャー方式) の採用により、信頼性、経済性で優れていることを示した。また、UPS の外部同期制御、電源のラップによる停電切換を避ける方法や大容量変圧器の強制冷却の採用などにより、保守時に電圧変動を抑制できることを示した。

今後も、信頼性の高い電源システムを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 安本浩二ほか. 三相4線式無停電電源装置を活用した高効率電源システム. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.1, p.54-59.
- (2) 安本浩二ほか. 常時商用給電方式と台数制御機能を付加した高効率UPS「UPS7000HX-T4」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.151-155.
- (3) 安本浩二ほか. リチウムイオン電池採用の「UPS7000HXシリーズ」「UPS6000DX シリーズ」. 富士電機技報. 2018,

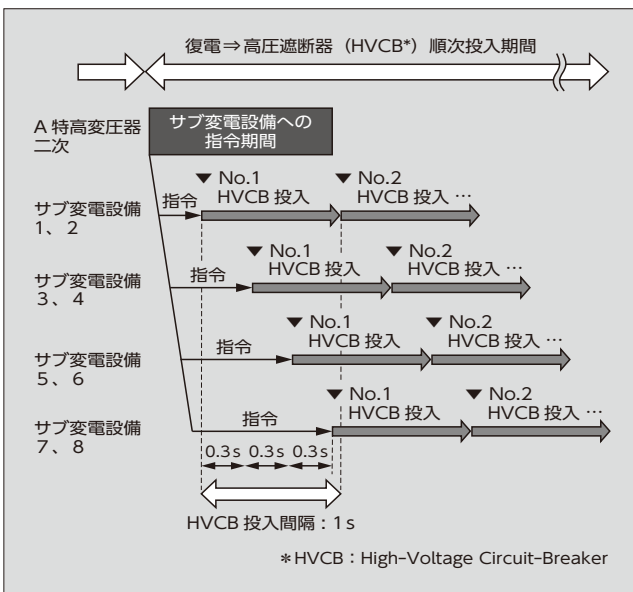


図 5 商用復電時のフローチャートの例

〈注 4〉 時定数：突入電流が 1/e に減衰するのに要する時間をいう。

vol.91, no.4, p.246-251.

- (4) 安本浩二ほか. 大容量UPSを用いたデータセンター向け共通予備システム. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.1, p.72-77.



安本 浩二

道路用電気集じん装置、液晶ガラス基板恒温装置、無停電電源装置の研究・開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部電源システム技術第一部。博士（工学）。技術士（電気・電子部門）。



根本 健司

中大容量無停電電源装置のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部電源システム技術第一部。



北谷 裕次

電源システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部電源システム技術第一部。



電力の安定供給に貢献する データセンター向け電源切換盤

Static Transfer System Cabinet for Data Centers That Contributes to Stable Power Supply

村津 宏樹 MURATSU, Hiroki

若林 郁也 WAKABAYASHI, Fumiya

徳田 剛 TOKUDA, Tsuyoshi

情報システムのクラウド化や電子商取引の増加に伴い、サーバなどの情報機器への電力の安定供給のニーズが高まっている。電源システムの冗長構成の一つである 2N（二重化）システムにおいて、電源システムの切換えに必要な電源切換盤を開発した。切換えの高速化と、低損失・小型化を実現するため、機械式スイッチと半導体スイッチを併用したハイブリッド型切換器を採用した。また、保守バイパス用のブレーカの内蔵や、主要機器の冗長化、UPS 同期機能による切換時の負荷への影響低減などにより、電源システムの信頼性を向上することで、電力の安定供給に貢献する。

The need for supplying stable power to information equipment, such as servers is increasing as the use of cloud information systems and e-commerce are expanding. Fuji Electric has developed a static transfer system cabinet necessary for transferring in a 2N (duplex) system, a redundant configuration for power supply systems. It has a hybrid switch that uses mechanical switches and semiconductors switch together to speed up transferring, lower loss, and downsize the cabinet. It also deliver functions, such as accommodating a built-in bypass breaker for maintenance, supporting the redundancy of major components, and reducing the effect on the load when switching under UPS synchronization, to improve the reliability of power systems, contributing to stable power supply.

1 まえがき

情報化社会の主要な役割を担うデータセンター（DC：Data Center）において、サーバなどの情報機器への電力の安定供給のニーズが高まっている。

電源システムの信頼性向上のため、予備の電源装置を初めから接続しておき、一方の電源装置に異常が発生した場合も、他方の電源装置で運用を継続可能にする手法（冗長化）が取られる。この電源システムの切換えを行うのが電源切換盤であり、その信頼性が電源システム全体の信頼度大きく影響を及ぼす。

本稿では、電圧安定性ととも保守性も向上し、電力の安定供給に貢献するデータセンター向け電源切換盤について述べる。

2 電源切換盤の概要

2.1 電源システムの冗長化

無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）を用いた電源システムの代表的な構成例を図1に示す。

UPS の必要台数を“N”とした場合、UPS1 台を余分に構成することで、いずれかの UPS が異常となった場合も残りの UPS から電源供給が可能な“N+1”、受電システムも含めた電源システム全体を二重化する“2N”などの構成が挙げられる。表1にそれぞれの利点を示す。“2N”の電源システムは其中最も信頼性が高くなる一方で、2系統の電源システムの切換えを行うための電源切換盤が必要となる。

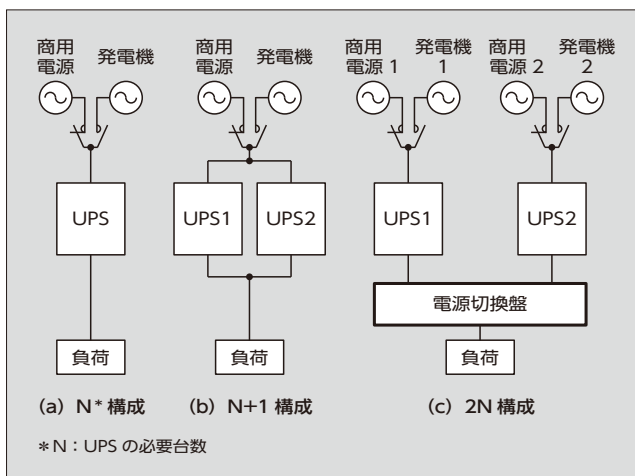


図1 電源システムの代表的な構成例 (N=1の場合)

表1 電源システム構成の比較

○：有利、△：標準的、×：不利

	N	N+1	2N
コスト	○ 最もシンプルな構成で低コスト	△	× 最も機器数が増えるため高コスト
信頼性	× UPS故障時は停電、瞬停への対応不可	△ 一つのUPSが故障しても停電、瞬停への対応可能。ただし、UPS入出力部などの共通部で事故が発生した場合は、給電停止するリスクあり	○ UPSだけでなく上位系統（電源、発電機など）の故障やトラブルにおいても給電可能

2.2 電源切換盤を用いた電源システム構成

図2に電源切換盤とUPSを組み合わせた電源システムの構成例を示す。負荷容量に応じてUPSの出力を分岐さ

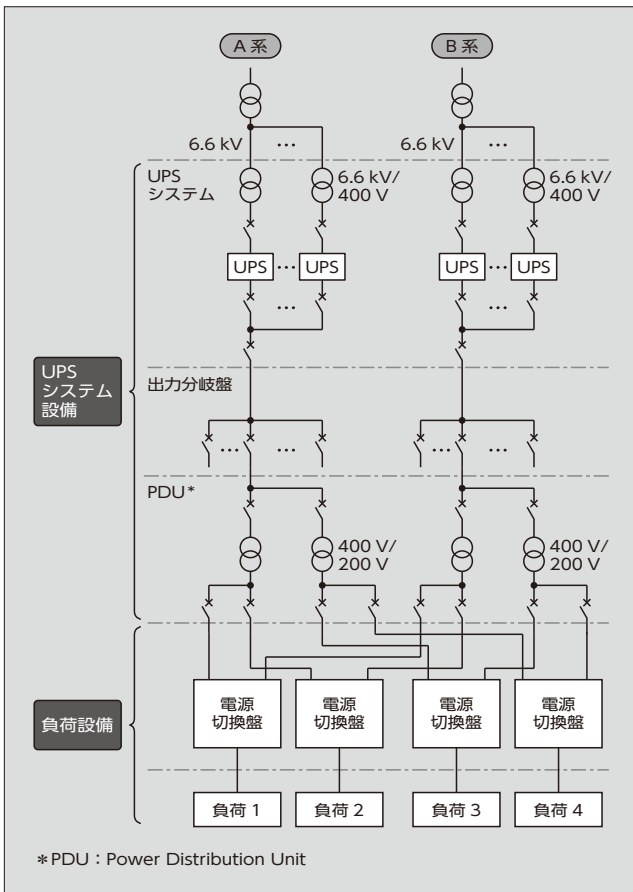


図2 電源システムの構成例

せ、個別にトランスを設けた上で電源切換盤にて負荷設備への給電システムの切換えを行う構成となっている。これにより、いずれかの系統で異常が発生した場合においても、もう一方の系統からの給電を継続することができるため、信頼性の高い電源システムを提供することが可能となる。

2.3 電源切換盤の内部構成

図3に電源切換盤の内部構成を示す。A系、B系の電源入力と母線出力を結び、開極動作が高速な双投式電磁接触

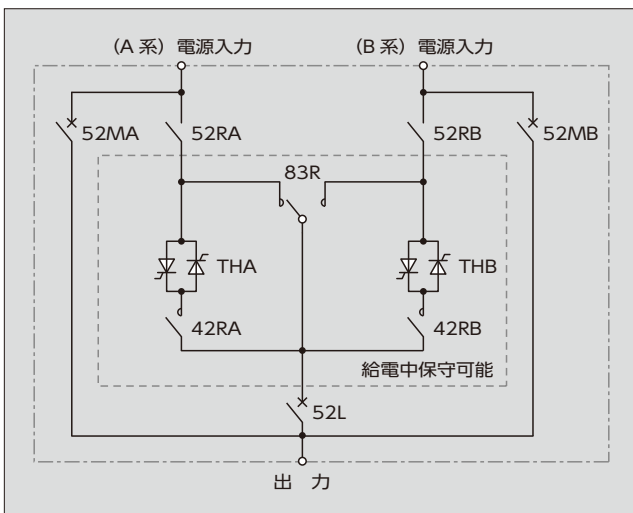


図3 電源切換盤の内部構成

器（機械式スイッチ）（83R）と、83Rに並列に接続された短時間定格の双方向半導体スイッチ（THA、THB）、入力開閉器（ノントリップスイッチ）（52RA、52RB）、保守バイパス用のブレーカ（52MA、52MB）、および出力母線遮断器（52L）で構成する。出力電磁接触器（42RA、42RB）は電源入力部で停電が発生した際に、もう一方の電源からの回り込みの防止と、半導体スイッチの故障時に切り離すために設けており、通常時は投入状態である。

52RA、52RB、52Lは保守目的のブレーカで、運用中は常時投入状態となる。

3 従来の電源切換盤の課題

3.1 切換えの高速化と低損失・小型化の両立

電源切換にかかる時間は負荷への給電が瞬断する時間となるため、切換動作を高速で行うことが電源切換盤の動作としては重要である。

このため、従来は応答性の高い連続通電の半導体スイッチが使用されてきたが、常時通電が必要なことから損失が大きく、また周波数依存性があるため電力品質に影響を及ぼすといった欠点があった。さらに、半導体スイッチを冷却するための冷却器、冷却装置が必要であり、設備が大型化していた。

こうした課題に対応するため、切換えに半導体スイッチではなく機械式スイッチを採用する場合もあったが、投入時間が通常数十ms、高速のものでも10～20msかかることから、高速化には適していなかった。

3.2 保守性の向上

電源切換盤の信頼性を維持するために、定期的な保守が不可欠である。しかし、従来の電源切換盤では、通電を継続しながらの保守を可能とするバイパス回路がなく、盤外部で配線し、保守作業を行う場合があった。また、こうしたバイパス回路を盤内に内蔵すると、配線の増加などにより盤が大型化するという課題があった。

3.3 切換時の負荷への安定給電

DCについては、地震リスクに対する評価、UPSの信頼性など、さまざまな項目を基にTier^(注)と呼ばれる格付けが定められている。Tierレベル（重要度）は1～4でランク分けされており、この中で重要度の高い負荷に使われるTier4の電源システムでは、冗長化された（N+2あるいは2N）送電経路が用いられる。そのため、電源切換盤を用いた2Nシステムが必要となる場合があるが、サーバ機器のような重要度の高い負荷への安定給電という点では、異なる電源への切換えに伴う電圧変動などを抑制し、負荷

〈注〉Tier：データセンターのファシリティを評価し、格付けする基準である。UPTIME INSTITUTE（アメリカの民間団体）や日本データセンター協会などが制定したものである。

に影響を与えないようにする必要がある。

4 新規開発した電源切換盤

4.1 概要

図4に電源切換盤の外観を、表2に電源切換盤の仕様を示す。400 A、600 A、800 Aの3種類の容量に対応しており、それぞれ三相3線入力と单相3線入力に対応している。

4.2 切換えの高速化と低損失・小型化の両立

機械式スイッチと半導体スイッチを併用したハイブリッド型切換器とすることで、切換時に出力が無電圧となる時間を短縮し、負荷機器への影響を低減することを可能とし

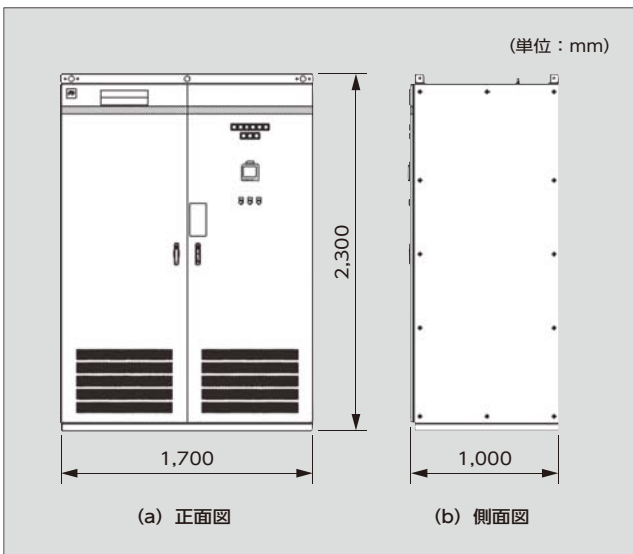


図4 電源切換盤 (800 A)

表2 電源切換盤の仕様

項目		仕様
定格電流		400 A、600 A、800 A
交流入力 交流出力	定格電圧	3φ3W 100 V、105 V、200 V、210 V 1φ3W 200/100 V、210/105 V
	電圧変動範囲	±10%
	周波数	50/60 Hz
	周波数変動範囲	±5%
交流出力	過電流耐量	800% 1 s (通常時) 300% 1サイクル/125% 1 s (切換時)
同期条件	電圧差	8 V以内
	周波数差	5 Hz以内
	位相差	8.5°以内
切換時間	手動切換	5 ms以下
	自動切換	5 ms以下 (同期時) 0.3 s以内 (非同期時)
構造仕様	寸法	400 A : W1,200×D1,000×H2,300 (mm)
		600 A : W1,300×D1,000×H2,300 (mm)
		800 A : W1,700×D1,000×H2,300 (mm)

ている。

このハイブリッド型切換器の構成は、富士電機のUPS内部でも使用している構成であり、今回の電源切換盤においては、UPSの制御装置、検出回路技術を用いることで高速での切換動作を実現している。

(1) 切換えの高速化

切換時の動作タイムチャートを図5に示す。A系からの電源供給時は、機械式スイッチA側(83R)が通電状態となっており、半導体スイッチA側(THA)は非通電状態となっている。これを手動でB系に切り換えた場合、機械式スイッチB側(83R)および半導体スイッチB側(THB)に通電指示が行われる。まず、約1 ms後に半導体スイッチB(THB)が通電状態となり、B系からの電源供給を開始する。また、切換えから数十ms後に機械式スイッチB側(83R)が通電状態となるが、これ以降は機械式スイッチB側が通電を継続し、半導体スイッチB

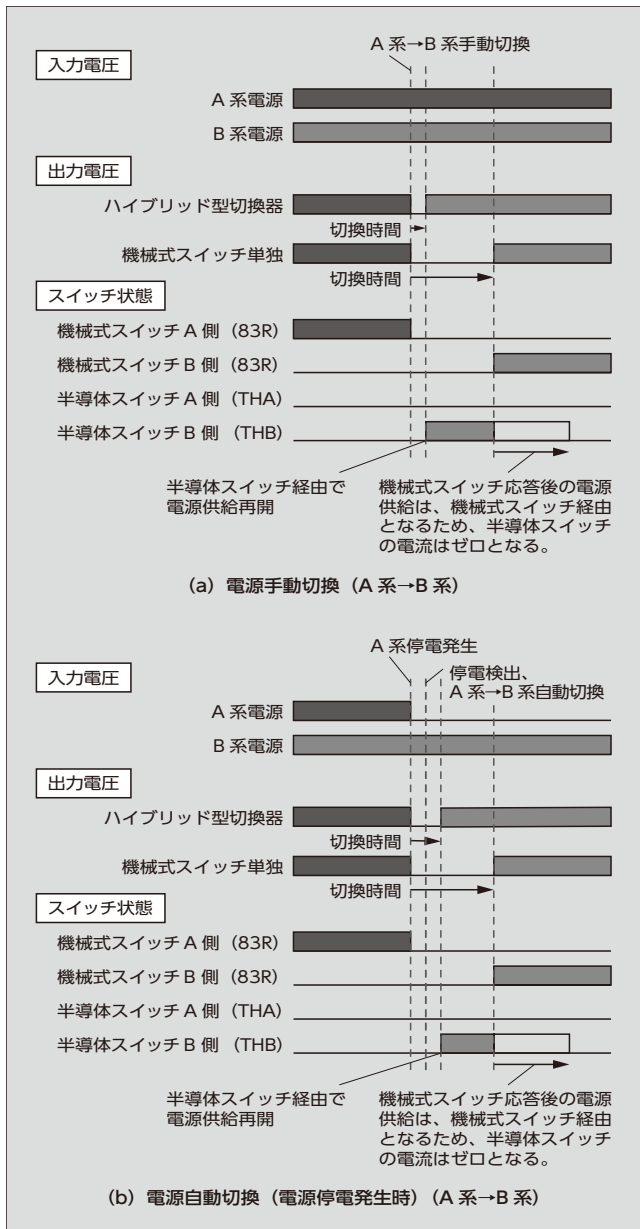


図5 切換時の動作タイムチャート (イメージ図)

は非通電状態となる。このように、機械式スイッチ（83R）の切換動作中に半導体スイッチ B（THB）から電源供給することで、無電圧時間を短縮するのがハイブリッド型切換器の特徴である。

図6にA系からB系への電源手動切換時の電圧・電流波形を示す。切換えに要する時間は0.4msと短く、出力電圧の変動もないことから、負荷停止を引き起こすことなく安定して給電を継続することが可能である。

図7に停電が発生した際のA系からB系への電源自動切換時の電圧・電流波形を示す。高速で停電を検出することで即座に切換えを行っており、今回の電源切換盤では約1.5msと出力が瞬断する時間を最小限に留めることができる。なお、図7には示していないが、機械式スイッチを単独で使用した場合は、瞬断する時間が10msとなる。

上述の動作は、B系からA系への切換えの際も同様である。

(2) 低損失・小型化

今回の電源切換盤においては、常時通電時は機械式スイッチを通して給電することで、損失を低減することができる。また、半導体スイッチへの通電は、切換時の短時間のみとなるため、連続通電電流に対して小さい容量のものを選定することができる上、冷却の必要はなくなる。そのため、従来盤に比べて装置の低損失・小型化が可能となる。

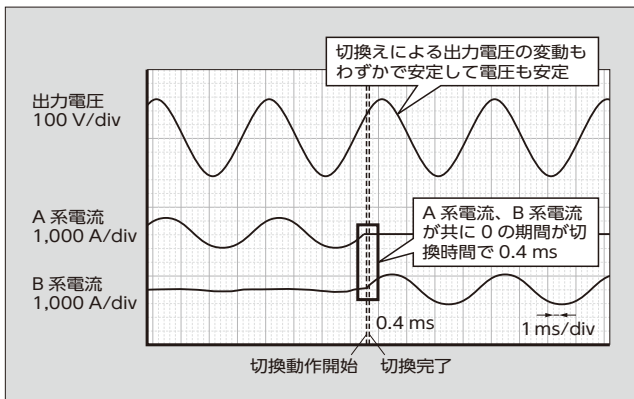


図6 電源手動切換時の電圧・電流波形（A系→B系）

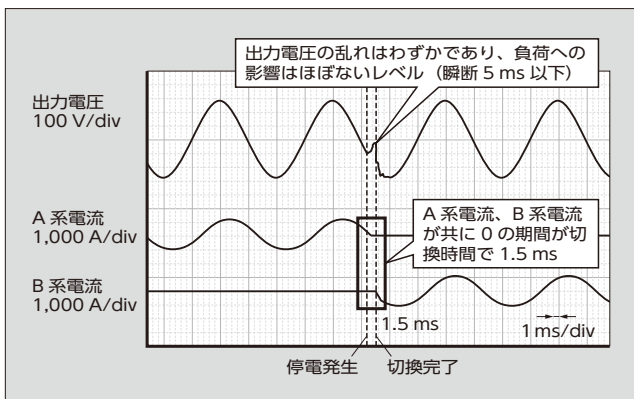


図7 電源自動切換時の電圧・電流波形（A系→B系）

4.3 保守性の向上

電源切換盤の保守手順例を図8に示す。電源切換盤内には保守バイパス用のブレーカ（52MA、52MB）を内蔵しており、保守時には、52MAか52MBのいずれか一方を投入した状態で52RA、52RB、52Lを遮断することで、特定部分が無電圧状態にすることができ、負荷給電を継続しながら内部機器のメンテナンスや交換作業、動作確認が可能である。

電源切換盤では、切換盤内に保守時に電源を残すエリアと、非通電のエリアを設け、非通電のエリアに電源、スイッチ類、制御回路などの定期交換部品を集約させたレイアウトとすることで、切換盤の大型化も防止し、負荷給電を継続しながらの保守を可能としている。

また、電源切換盤内の電源や停電検出・半導体スイッチの駆動などの制御回路に、UPSの装置内で使用しているものと同一の部品を使用することで、UPSとの保守部品の共通化を図ることができ、電源システム全体としての保守部品種類を削減し、確実な部品確保による故障時の迅速な回復を実現することを可能としている。

なお、電源切換盤の内部で使用する機器のうち、制御電源や器具駆動用の電源などに関しては、二重化して、万が一電源に異常が発生しても切換えに支障をきたさないような回路構成とするなどの対策も行っている。

4.4 切換時の負荷への安定給電

電源品質の向上を目的とし、電源切換盤は、A系電源入力とB系電源入力の2系統を同期させた状態で切換えを行うことで、電圧や位相の跳躍を防止し、負荷への影響を軽減している。

UPSは、通常は自らのバイパス電圧に同期することで、装置異常時に電圧変動することなく商用電源に切り換えることが基本動作となるが、本切換盤を使用した2Nの電源システムの場合は、2系統の電圧が常に同期していることが必要となる。そのため、負荷給電していない側のUPS出力が、負荷給電している側のUPS出力電圧に同期するようにUPSとの信号のやり取りと制御を行う。

UPSの別系統への同期機能を用いた電源切換盤の電源システム構成例を図9に示す。電源切換盤がA系の電源から負荷への電力供給を行っている場合は、電源切換盤からの信号を受けて、B系UPSはA系の出力電圧に同期する。また、A系のUPSがB系の出力電圧への同期を行わないように、B系UPSがA系UPSに信号を発信してインタロックする。このインタロックを行わないと、同時にお互いの出力への同期を行おうとするため同期が完了せず、また、電源切換盤が同期完了を認識して次の動作に移行することができなくなるためである。

こうしたUPS同期機能と電源切換盤との連携により、電源ソリューションとしての信頼性を向上させた。

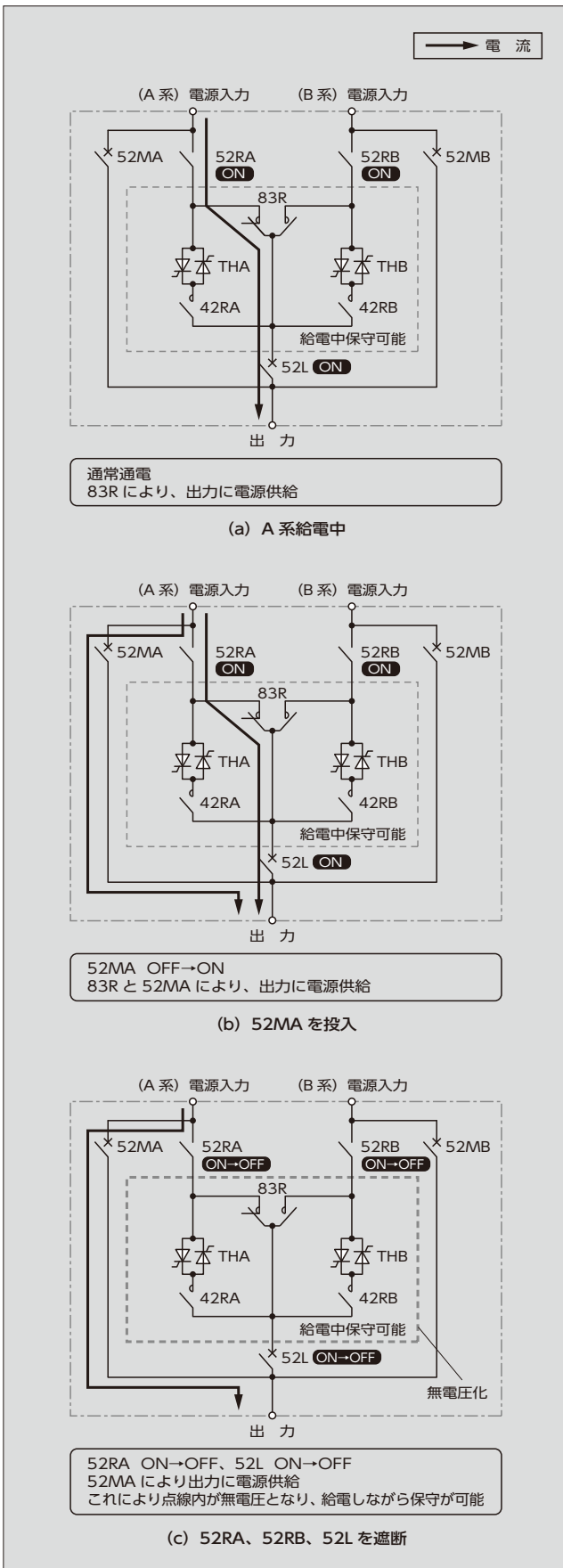


図8 電源切換盤の保守手順例

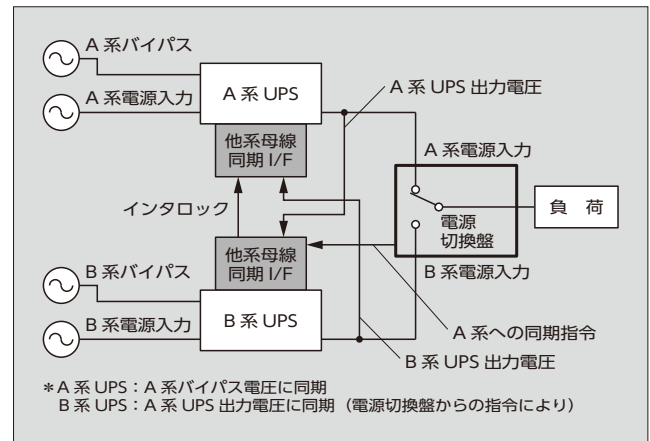


図9 UPSの別系統への同期機能を用いた電源切換盤の電源システム構成例

5 あとがき

電力の安定供給に貢献するデータセンター向け電源切換盤について述べた。データセンター以外にも高信頼性が要求される電源設備への広い適用が期待できる。

今後も新技術を取り入れ、お客さまの期待に応える電源システムを提供していく所存である。



村津 宏樹

中大UPS、PCSの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部神戸工場施設電機電源盤装置部主任。



若林 郁也

中大UPSの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部神戸工場施設電機電源盤装置部。



徳田 剛

中大UPSシステムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部電源システム技術第一部主査。

省エネルギー・小型化のニーズに対応する 矩形大容量 5 脚モルトラ

Rectangular Large-Capacity 5-Leg Type MOLTRA to Meet the Needs of Energy Saving and Downsizing

永露 友宏 NAGATSUYU, Tomohiro

宮田 智一 MIYATA, Tomokazu

カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けて、電気設備に対してはエネルギー効率の向上による温室効果ガスの排出量低減が求められている。近年、データセンター（DC）や半導体工場では、電力需要の高まりを受け、モールド変圧器の大容量化が進んでいるとともに、機器の小型化も求められている。これに応えるため富士電機は、矩形（くけい）大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」を開発した。このモルトラは、鉄心とコイルを矩形にした 5 脚巻鉄心を採用している。これにより、従来品同等の省エネルギー性能および設置面積を維持しつつ、高さ寸法 15% の縮小を実現した。

Electrical facilities are being required to improve energy efficiency to reduce greenhouse gas emissions and achieve carbon neutrality. Meanwhile, data centers and semiconductor factories have recently become using larger capacity cast resin transformers (MOLTRA) to respond to rising power demand, however, also requiring downsizing. To meet this need, Fuji Electric has developed the “V-ECO MOLTRA,” rectangular large-capacity 5-leg type MOLTRA. It uses a 5-leg wound iron core whose core and coils are rectangular shaped. As a result, its height is 15% lower while maintaining the same energy-saving performance and footprint than that of the conventional product.

1 まえがき

2050 年カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けて、電気設備に対してはエネルギー効率の向上による温室効果ガス排出量の低減が求められている。

デジタル化社会の進展により、市場が拡大しているデータセンター（DC：Data Center）や半導体工場では、電力需要が高まる中、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の大容量化が進み、これに伴い変圧器の大容量化も進展している。また、これら受配電機器を屋内に設置する事例も増加しており、機器の小型化が重要になっている。

モルトラ^(注1)は「エネルギーの使用の合理化等に関する法

律」（省エネ法）の特定機器に指定されており、2014 年 4 月に施行された第二次判断基準に対応する製品（トップランナー変圧器^(注2) 2014）として、富士電機は「トップランナーモルトラ 2014」を展開している。

上述の大容量、高効率、小型化（屋内設置）というニーズに対して、富士電機は従来品同等の省エネルギー（省エネ）性能および設置面積を維持しつつ、高さ寸法を縮小した矩形（くけい）大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」（図 1）を開発した。

2 大容量モルトラ

2.1 概要

富士電機はトップランナー変圧器 2014 に対応したトップランナーモルトラ 2014 を発売している。また、主に小・中容量向けには超高効率製品として「アモルファスマルトラ」、「スーパーエコモルトラ II」をそれぞれ発売している。製品ラインアップを図 2 に示す。

2.2 構造

トップランナーモルトラ 2014 の容量区分ごとのコイル形状と鉄心構造を表 1 に示す。1,000 kVA 以下の場合、図 3 (a)のようにコイル形状は矩形で、鉄心には 3 脚の巻鉄心を採用している（3 脚巻鉄心）。一方、1,000 kVA 超過の

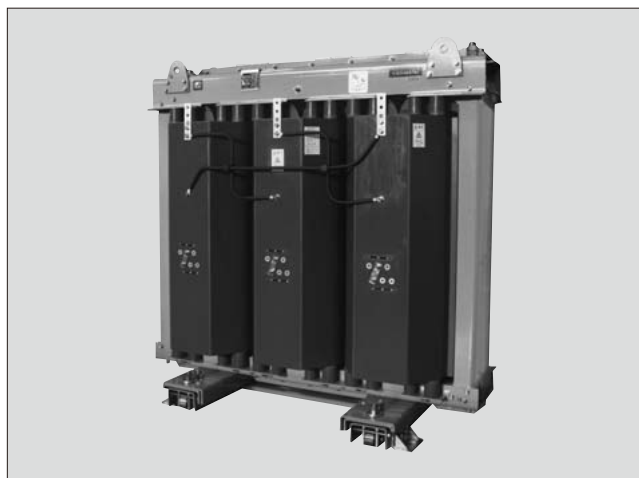


図 1 矩形大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」

〈注 1〉モルトラ：富士モールド変圧器（富士電機株式会社の登録商標）

〈注 2〉トップランナー変圧器 2014：省エネ法特定機器変圧器の「変圧器の性能の向上に関する製造事業者等の判断の基準等」（平成 24 年経済産業省告示 71 号）に規定する第二次判断基準の基準エネルギー消費効率以上の効率を達成した変圧器の呼称

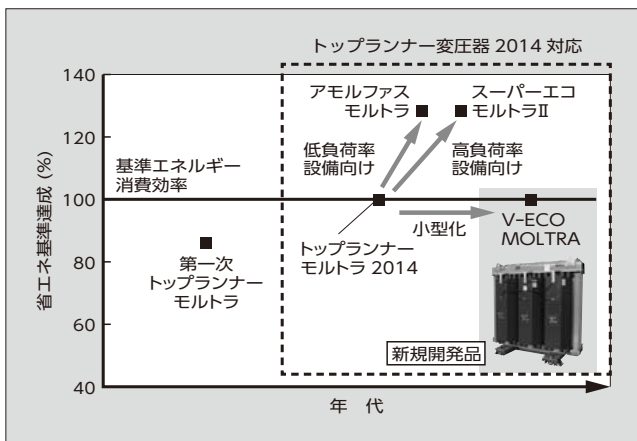


図2 製品ラインアップ

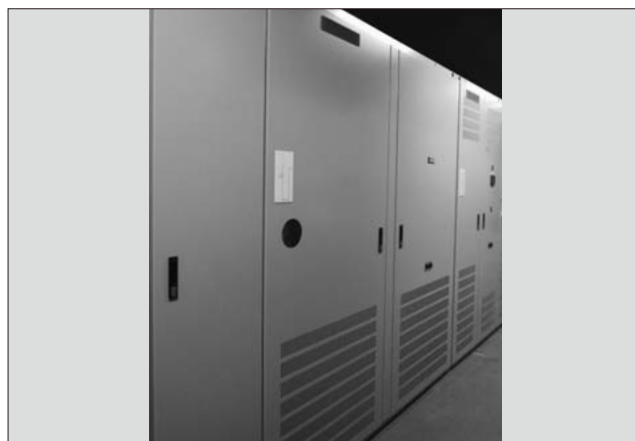


図4 配電盤

表1 「トップランナーモルトラ 2014」の coils 形状と鉄心構造

相数	容量	コイル形状	鉄心	
			脚数	種類
三相	1,000 kVA以下	矩形	3脚	巻鉄心
	1,000 kVA超過	円形	3脚	積鉄心

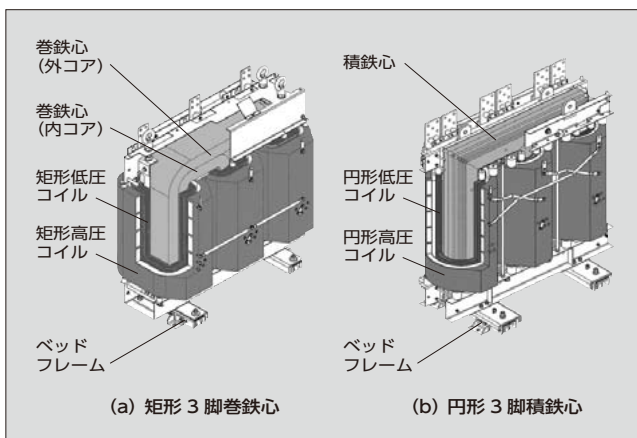


図3 モルトラの構造

場合、図3(b)のようにコイル形状は円形で、鉄心には3脚の積鉄心を採用している(3脚積鉄心)。

2.3 課題

DCや工場などで使用されるトップランナーモルトラ2014は、一般的に図4のような配電盤に収納されている。図5はモルトラの収納状態である。この配電盤は、電気を使用するために発電所や変電所から供給される高圧の電気を低圧の電気に変圧する設備である。配電盤を設計する場合、電気室の広さや天井高、天井配線スペースの確保、および搬出入ルートなどの寸法の制約により、盤筐体(きょうたい)の高さを標準的な2,300mm以下とし、できる限り設置面積を小さくすることが望ましい。また、配電盤内への配線ケーブルなどの引込み方法は設置状況によりさまざまであるが、上部から引き込む場合、図5のようにモルトラと配電盤上部の間に配線スペースが必要である。そ

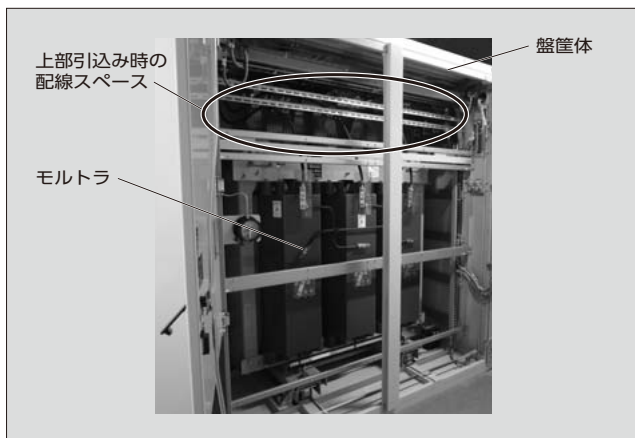


図5 モルトラの収納状態

のため、モルトラには、標準高さの盤筐体に納まるだけでなく、配電盤上部に配線スペースを確保できる寸法とすることが求められている。したがって、大容量になるにつれて、外形寸法の小型化が課題となっている。こうした小型化は、受配電機器を屋内に設置する事例が増えていることから重要となっている。

③ 矩形大容量5脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」の概要

2.3節で述べた課題に対応するため、1,000kVA超過の大容量モルトラを対象にトップランナーモルトラ2014と同等のエネルギー消費効率で、高さ寸法を縮小したV-ECO MOLTRAを新たに開発した。

3.1 小型化

1,000kVA超過のトップランナーモルトラ2014に対して、高さ寸法を15%縮小し、盤筐体の標準的な高さ2,300mmに納まる構造とした。また、設置面積は従来品と同等の小型化を実現した。次にその具体的な手段について述べる。

1,000kVA超過のモルトラは、一般的に図6(a)のような3脚積鉄心を適用しているが、高さ寸法を縮小する手段と

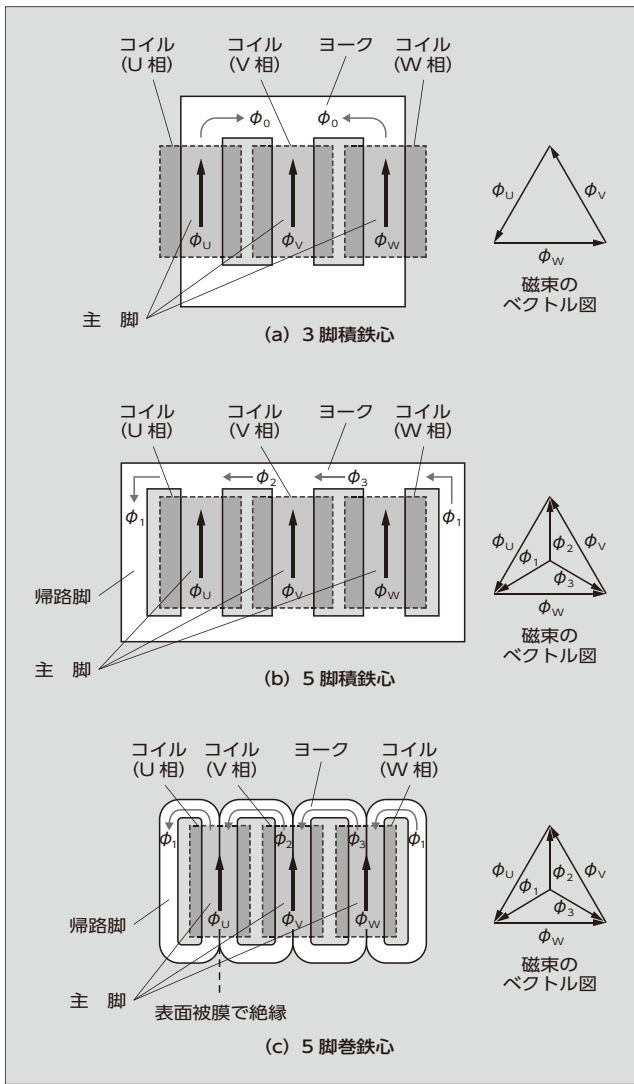


図6 3脚鉄心および5脚鉄心の構造

して5脚鉄心を検討した。なお、図6では鉄心内の磁束を、矢印とベクトル図で表している。

5脚積鉄心は、図6(b)のようにコイル(U相、W相)の外側にも鉄心(帰路脚)が配置される構造である。一方、5脚巻鉄心は、図6(c)のように巻鉄心を四つ並べた構造であり、鉄心間が表面被膜で絶縁されている。それぞれ構造が異なるが、磁束のベクトル図は共通であり、同じ磁束分布を持っている。

3脚積鉄心は主脚とヨークに流れる磁束量が全て一様で、両者の関係は式(1)で表される。

$$|\overline{\phi_0}| = |\overline{\phi_U}| = |\overline{\phi_V}| = |\overline{\phi_W}| \dots\dots\dots(1)$$

ϕ_U 、 ϕ_V 、 ϕ_W : 主脚の磁束量 (Wb)
 ϕ_0 : ヨークの磁束量 (Wb)

これに対し、5脚積鉄心や5脚巻鉄心は、磁束が帰路脚にも流れるため図6(b)、図6(c)のベクトル図のとおり、ヨークと帰路脚に流れる磁束量が主脚より少なくなる⁽²⁾。主脚とヨーク、帰路脚の磁束量の関係はそれぞれの磁気抵抗の差によっても異なるが、磁気抵抗の大きさが同じである

と仮定すると式(2)で表される。

$$|\overline{\phi_1}| = |\overline{\phi_2}| = |\overline{\phi_3}| = \frac{1}{\sqrt{3}}|\overline{\phi_U}| = \frac{1}{\sqrt{3}}|\overline{\phi_V}| = \frac{1}{\sqrt{3}}|\overline{\phi_W}| \dots\dots\dots(2)$$

ϕ_U 、 ϕ_V 、 ϕ_W : 主脚の磁束量 (Wb)
 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 : ヨークと帰路脚の磁束量 (Wb)

また、主脚の磁束密度 B_1 (T) およびヨークと帰路脚の磁束密度 B_2 の計算式は、それぞれ式(3)、式(4)で表される。なお、占積率は一律と仮定する。

$$\overline{B_1} = \frac{\overline{\phi}}{S_1 \times \text{占積率}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\overline{B_2} = \frac{\overline{\phi}}{S_2 \times \text{占積率}} \dots\dots\dots(4)$$

B_1 : 主脚の磁束密度 (T)
 B_2 : ヨークと帰路脚の磁束密度 (T)
 S_1 : 主脚の鉄心断面積 (m^2)
 S_2 : ヨークと帰路脚の鉄心断面積 (m^2)

主脚とヨークの磁束密度を均一な設計とする場合、3脚積鉄心では主脚とヨークの断面積を同じにする。一方、5脚積鉄心や5脚巻鉄心で主脚とヨーク、帰路脚の磁束密度を均一にするためには、式(2)よりヨークと帰路脚の磁束量が主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍であることから、式(3)、式(4)よりヨークと帰路脚の断面積は主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍とすればよい。したがって、5脚積鉄心や5脚巻鉄心は3脚積鉄心よりもヨークの高さが低減可能となり、モルトラの高さ寸法が縮小可能となる。

このように5脚鉄心の適用で、モルトラの高さ寸法が縮小可能であることが分かったが、その一方でコイルの外側にも鉄心が配置される構造であるため、特に5脚積鉄心は、図6(b)のように3脚積鉄心と比較して幅寸法が大きくなる欠点がある。

そこで、V-ECO MOLTRAには、図6(c)のような巻鉄心を四つ並べた5脚巻鉄心を採用し、コイル形状は矩形とした。矩形コイルは円形コイルと比較して、図7(a)のように奥行寸法は大きい幅寸法は小さい。このため、図6(b)の5脚積鉄心のような幅寸法増加が抑制でき、コンパクトな設計が可能となるためである。さらに、5脚積鉄心と比較して製造が容易な利点もある。

しかし、矩形形状の低圧コイルは、図8に示すように幅方向の導体間に空隙が発生しやすく、そのままでは幅寸法の削減効果は小さい。また、この空隙により巻線内の熱伝導による熱の移動が阻害され、コイルの放熱性能が低下する。そこで、図8に示すように低圧コイルの幅方向に対し、専用の治具を使用して矢印の方向から圧縮力を加えることにより、導体間の空隙の発生を抑制した。その結果、低圧コイルの幅寸法を縮小し、図9(a)に示すように、5脚巻鉄心においても3脚積鉄心と同等の幅寸法を実現した。

なお、モルトラの奥行寸法は図9(b)に示すようにベッド

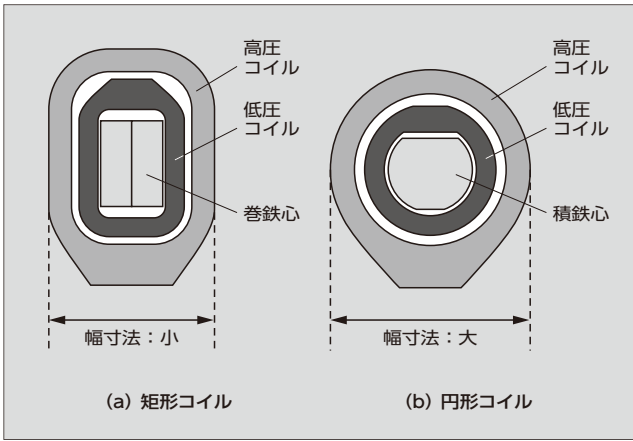


図7 コイル部断面図

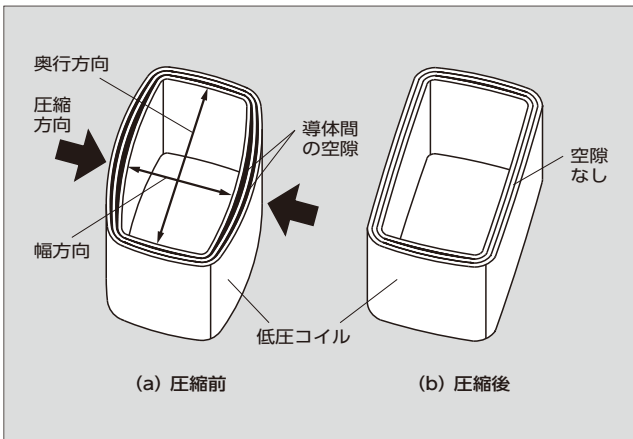


図8 低圧コイルの圧縮（簡略図）

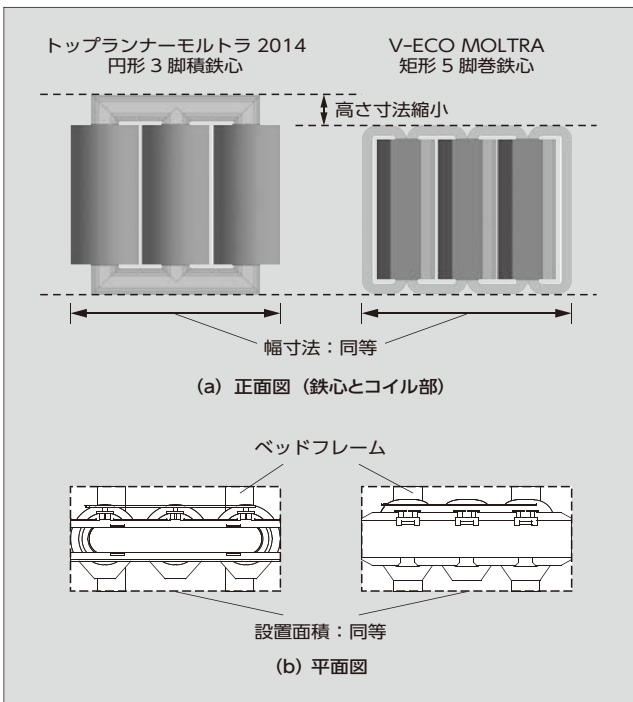


図9 モルトラの外形式比較

フレームが最大となる。ベッドフレームは配電盤へのモルトラ据付けと転倒防止を目的として使用する。5脚巻鉄心

構造は3脚積鉄心構造と比較して、磁路長が長くなるため質量が重くなるが、重心の高さが低いため、地震などの加振時にベッドフレームの据付ボルトなどに働くモーメントは小さくなる。そのため、従来品である3脚積鉄心構造のトップランナーモルトラ 2014 と同じサイズのベッドフレームで安定した据付けが可能となり、従来品同等の設置面積を実現した。

また、5脚巻鉄心は、幅方向の外側が非充電部（鉄心）であるため、外側が充電部（高圧コイル）である従来の3脚積鉄心に対して、盤側面との絶縁距離（離隔距離）を短く抑えることができる。この結果、設置面積は従来機種と同等だが、モルトラを収納する盤の幅寸法を縮小した。

3.2 設計の最適化

開発したV-ECO MOLTRA は、1,000 kVA 超過のトップランナーモルトラ 2014 に対して、同等の省エネ性能を持っている。次に5脚巻鉄心の設計の最適化と省エネ性能について述べる。

5脚積鉄心の鉄心は、主脚、帰路脚、ヨークごとに電磁鋼板を積み重ねて、図6(b)に示すような一体型とする。このため、主脚や帰路脚では電磁鋼板の幅方向の寸法を、ヨークでは電磁鋼板の高さ方向の寸法をそれぞれ変えることで、主脚、帰路脚、ヨークの断面積の調整が可能である。したがって、ヨークと帰路脚の断面積を、主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍にすることは容易である。

一方、5脚巻鉄心の鉄心は、電磁鋼板を渦巻状に巻き重ねて成形した巻鉄心を、図6(c)に示すように四つ並べて利用する。このため、一つ一つの巻鉄心の断面積は、どの部位においても同一であることから、主脚の断面積は、巻鉄心二つ分の断面積に相当する。このため、ヨークと帰路脚の断面積は主脚の $1/2$ 倍となり、5脚積鉄心よりさらに高さ寸法を縮小できる。その一方で、5脚巻鉄心のヨークと帰路脚は、磁束量が主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍であり、断面積が主脚の $1/2$ 倍であるため、式(3)、式(4)より磁束密度は主脚の $2/\sqrt{3}$ 倍となる。このためヨークと帰路脚の磁束密度が主脚より大きくなることを考慮し、鉄心が飽和して変圧器としての機能を損なうことがないように、主脚の磁束密度を低めに設計した。また、5脚巻鉄心は3脚積鉄心よりも質量が大きくなることで損失が増加するため、損失の増加を抑制するために、磁束密度の低減に加え、低損失の鉄心材料を採用した。

こうした設計の最適化を行った結果、トップランナーモルトラ 2014 と同等のエネルギー消費効率（1990年代型式品に対してエネルギー消費効率を40%改善）を維持することができた。

3.3 その他の特徴

省エネ・小型化への対応に加え、V-ECO MOLTRA は次のような特徴を持っている。

- (a) 1990年代型式品に対して大幅な低騒音化（-10 dB）を実現した。

- (b) 高い難燃性を実現し、IEC 60076-11の形式認定を取得した。
- (c) 真空環境下で注型したモールド巻線を適用することで、部分放電の発生を抑制し、高絶縁信頼性を実現した。

4 あとがき

省エネルギー・小型化のニーズに対応する矩形大容量5脚モルトラについて述べた。

今後もお客さまのニーズを捉え、最適なモルトラの製品開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 安本浩二ほか. 大容量UPSを用いたデータセンター向け共通予備システム. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.1, p.72-

77.

- (2) 大岡登, 前川定雄. 標準電気機器講座〈第6巻〉変圧器. 第1版. 東京電機大学出版局. 1968, p.409.



永露 友宏

モールド変圧器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第一部。



宮田 智一

モールド変圧器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第一部課長。



JAXA 種子島宇宙センターの電力安定供給に貢献する 大型蓄電池制御システム

Large-Scale Battery Control System for Stable Power Supply Operation in JAXA Tanegashima Space Center

荒井 広 ARAI, Hiroshi

原 篤史 HARA, Atsushi

JAXA 種子島宇宙センターには、ロケット発射場として、電力供給のさらなる信頼性、電力品質の向上、経済性が求められている。富士電機は、これらのニーズに応えるため、大容量 NAS 電池に組み合わせ、既存の発電機の運転状況によって充放電を行う大型蓄電池制御システムを納入した。これにより、発電機故障時でも蓄電池のバックアップ機能で電源冗長性の維持を図り、電力供給の信頼性を高めた。負荷変動は蓄電池の充放電で緩和させ、電源周波数の安定化と電力品質の向上を図った。発電機負荷率を高効率領域にする蓄電池充放電により、燃料削減につながる経済的な発電機運転を実現した。

The JAXA Tanegashima Space Center is a rocket-launch complex, which requires enhanced power supply reliability, power quality, and cost effectiveness. To meet these needs, Fuji Electric has delivered a control system for a large-scale NAS battery to charge and discharge the battery according to the operating status of existing generators. The control system allows the power supply system to maintain its redundancy with the storage battery backup even in the event of generator failure, enhancing reliability in power supply. Charging and discharging the battery can mitigate load fluctuations to stabilize power frequency and improve power quality. Charging and discharging the battery so that the generator load factor became highly efficient was able to achieve economical generator operation that leads to fuel savings.

1 まえがき

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、日本の宇宙開発利用を技術で支える中核の実施機関として、国内外に多くの事業所を保有している。その中で、種子島宇宙センターは、国内最大のロケット発射場であり、ロケットと人工衛星の組立・結合、ロケットの打上げ、打上げ後のロケット追尾までの一連の作業が計画的に行われている。作業に必要な電力は、自家用発電機によって構内各施設に供給されており、その安定供給がロケットと人工衛星の安全性や品質に関係する。種子島は落雷や台風など自然災害に曝 (さら) されることが多く、商用系統による電力供給はその影響を受けやすい。このため、種子島宇宙センターでは、計画に従った作業を進められるように商用系統から独立し、24 時間 365 日、電力安定供給を第一に自家用発電機が稼働している。

宇宙産業の拡大や商業化の進展に伴い、種子島宇宙センターの役割は高まっており、電力供給の信頼性、電力品質の向上、経済性が求められている。加えて、クリーンエネルギーの電源利用など電源の多様化も見据えていく必要がある。

富士電機は、これらの必要性に応えるため、大容量 NAS 電池^(注1)に組み合わせて、発電機の故障バックアップ対応、周波数安定化、高効率運転対応を行う大型蓄電池制御

〈注1〉NAS 電池：東京電力ホールディングス株式会社の商標または登録商標である。ナトリウム - 硫黄電池で繰返しの充放電が可能である。また、“NAS”は、東京電力ホールディングス株式会社および日本硝子株式会社の商標または登録商標である。

システム (蓄電池制御システム) を納入した。本稿では、そのシステム構成や主要機能について述べる。

2 これまでの電源システム運用と課題

種子島宇宙センターは、基本的に構内にある発電所によってその電力が賅われている。図1に納入した蓄電池制御システムを含めた電源システムを模式的に示す。

図1の既設範囲の構成において、発電所内には常用用途の複数の自家用ディーゼル発電機 (2,500 kVA) が設置され、法令点検などの整備期間を除き、電力を供給している。

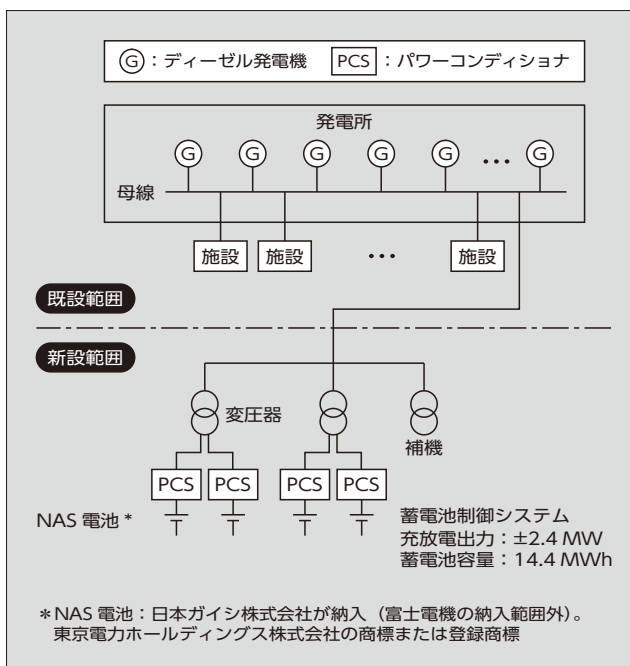


図1 種子島宇宙センターの電源システム

発電機によって運転時間の偏りが生じないように、運用中の発電機の運転と停止は数日から数週間の周期でローテーションする。

負荷需要はロケットの打上げに関わる一連の作業の中で、日から週の単位で 1,000 ~ 2,000 kW 変動する。大型負荷の投入などでは、数百 kW の突発的な増大をみることもある。このため、オペレーターは負荷需要の変動を見込み、運転する発電機の台数を決定して手動にて運転操作を行っている。台数決定の考え方は、通常、負荷需要に対して過不足ない発電機運転台数（負荷充足可能台数）に冗長の 1 台分を加えている。

既設範囲の概要は上述したとおりであるが、さらなる設備の稼働安定化や省エネルギー化に向けて、次のような課題があった。

(1) 発電機故障停止時の電源冗長性維持

図 2 に発電機故障停止時の冗長機補完運転の例を示す。ここでは、負荷充足可能台数 2 台（発電機 A と発電機 B）と冗長機 1 台（発電機 C）による通常時運転で電力供給している状況とする。

この 3 台稼働において発電機 A が故障停止した場合、発電機 B と発電機 C の出力をそれぞれ上げて、発電機 A が負担していた供給電力を補うことで、電源供給はそのまま継続可能である。しかし、冗長性の観点では、1 台分減っているために、発電機 D（予備機）を後発で立ち上げないと冗長性は保てない。予備で停止待機している場合、非常用発電機ではないため、送電可能な状態になるまで 20 ~ 30 min を要する。このため、発電機 A の故障停止後、発電機 D（予備機）が起動するまでの冗長性確保には、この間を補完する電源が必要であった。

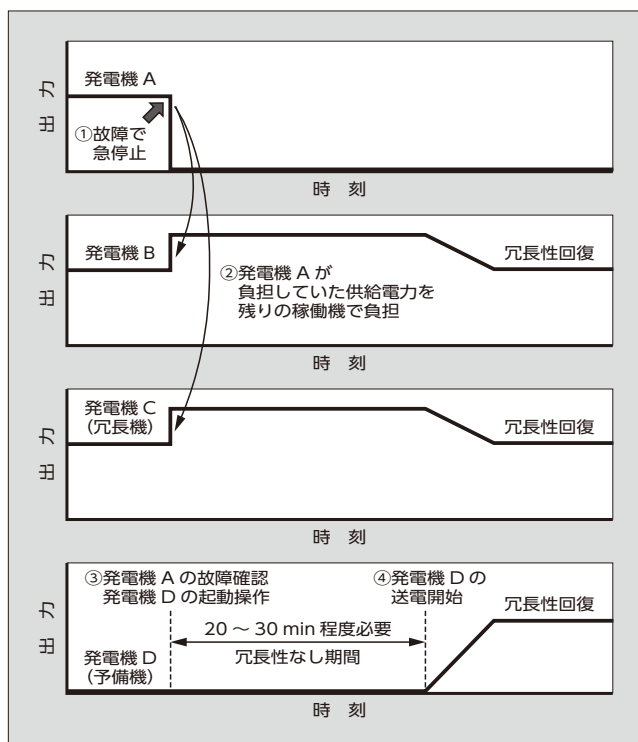


図 2 発電機故障停止時の冗長機補完運転の例

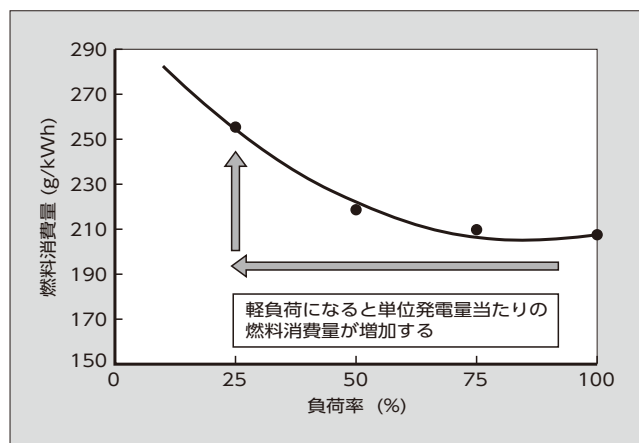


図 3 既設発電機の負荷率と燃料消費量の関係

(2) 電源周波数の安定化

電力を供給する先には、冷凍機などをはじめ、数十~数百 kW の負荷が多数存在している。負荷の運転・停止に伴う電力需要の変化には、既設の自家用発電機の出力応答で対応するが、発電機の出力応答性は、ガバナ（発電機調速機）の応答速度や自動電圧調整制御の周期に依存し、既設の発電機の制御系では、単機当たりの対応可能な出力変化速度は 70 kW/s 程度である。このため、瞬間的に発生する負荷変動には追従できず、周波数変動が構内系統に現れる。構内で行われる重要な作業には、より電力品質のよい電力供給が求められており、この周波数の安定化を図ることが課題となっていた。さらには、再生可能エネルギーを用いた電源などの将来の導入に備え、需給変動への事前対策も講じる必要があった。

(3) 発電機運転の高効率化

既設発電機の負荷率と燃料消費量の関係について図 3 に示す。負荷率が低いと単位発電量当たり、より多くの燃料が必要である。

ディーゼル発電機を軽負荷で運転すると、エンジンが不完全燃焼となり、必要な出力が得られず、余分な燃料供給で燃料消費量が増加する。

電力供給の信頼性を高めるために運転台数を冗長化すると、単機当たりの負荷率が低下し、燃料消費量の大きい運用となる。したがって、冗長性を保ちつつ、負荷率を高め発電機の運転を高効率化する必要があった。

③ 納入したシステム構成と主な機能

3.1 蓄電池制御システムの構成

図 1 の新設範囲に設置した蓄電池制御システムは 14.4 MWh の NAS 電池を用い、発電所に対してシステム全体で ±2.4 MW の充放電出力を行うことができる。パワーコンディショナ (PCS : Power Conditioning System)、高圧盤類、変圧器、NAS 電池、蓄電池制御盤などで構成され、構成機器の主な仕様を表 1 に、蓄電池制御システムの屋外設備の外観を図 4 に示す。

蓄電池用 PCS は、AT-NPC (Advanced T-type

表1 構成機器の主な仕様

場所	装置	主な仕様・概要	数量
屋外	蓄電池用PCS	定格容量：600kVA 交流側：電圧210V 直流側：350～800V（入力電圧範囲） 変換効率：最大97.3%（内部電源あり） 主たる通信：SXバス通信 PCSコンテナ内に収納、NAS電池向けカスタマイズ対応品	4台
	蓄電池制御盤	機能：SXバス通信機能、監視制御機能 統合コントローラ実装（MICREX-SX） PCSコンテナ内に収納	1面
	PCSコンテナ	ISOコンテナ：40フィートハイキューブ 重耐塩塗装	1式
	主変圧器盤	屋外高圧盤（変圧器収納用）6.6kV、 JEM1425 三巻線油入変圧器（6.6kV/210V/ 210V、1,250kVA） 重耐塩塗装	2面
	所内変圧器盤	屋外高圧盤（変圧器収納用）6.6kV、 JEM1425 内接デルタ油入変圧器（6.6kV/440V/ 220V、500kVA） 重耐塩塗装	1面
	NAS電池*1	1セット当たり定格容量：3.6MWh （20フィートコンテナタイプ×3直列） 全体定格容量：14.4MWh（4セット合計）	1式
屋内	受電盤	屋内高圧盤 6.6kV、JEM1425 VCB、DS、保護リレー、高速トランス デューサ*2実装	1面
	主変圧器 フィーダ盤	屋内高圧盤 6.6kV、JEM1425 励突防止形LBS、保護リレー、高速トランス デューサ実装	1面
	所内変圧器 フィーダ盤	屋内高圧盤 6.6kV、JEM1425 励突防止形LBS、保護リレー、高速トランス デューサ実装	1面
	リモートス テーション盤	機能：監視・計測信号の集約機能、SX バス通信機能 統合コントローラ実装（MICREX-SX）	2面
	監視制御端末	機能：監視や制御操作、設定入力機能 パーソナルコンピュータ、15インチ液 晶モニタ	2式
	発電機出力計 測用トランス デューサ	既設発電機盤内に高速トランスデューサ 追加取付	各盤

*1 NAS電池：日本ガイシ株式会社が納入（富士電機の納入範囲外）。東京電力ホールディングス株式会社の商標または登録商標
*2 高速トランスデューサ：応答速度は交流1周期+10ms

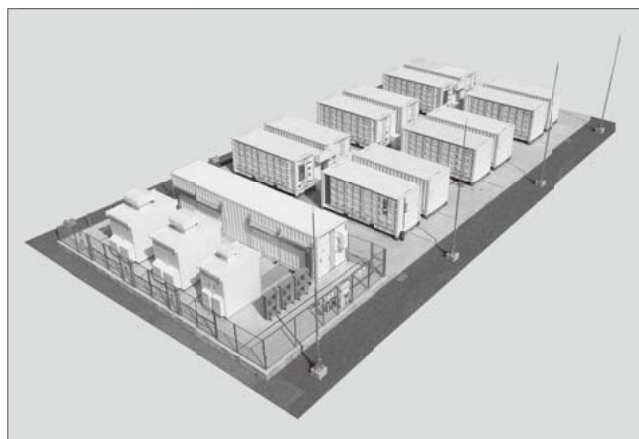


図4 蓄電池制御システムの屋外設備の外観

Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを搭載し、高効率化と低ノイズ化を行った富士電機製PCS「PVI800-3/750」⁽¹⁾を用いた。直流側入力範囲はNAS電池の使用電圧に合わせるため、今回カスタマイズを行った。

主変圧器は三巻線油入変圧器を採用し、低圧（蓄電池用PCS側）2回路分を集約している。所内変圧器は内接デルタ巻線の油入変圧器を用い、1台でNAS電池補機（ヒータなど）用の440Vと、制御電源や空調機用の220Vの2電圧を供給している。これにより、両変圧器とも省スペース化を図り、重耐塩塗装を施した屋外高圧盤に収納して耐候性を高めている。

既設発電機盤、受電盤、主変圧器フィーダ盤には高速トランスデューサを実装し、発電機の出力変化とそれに対応する蓄電池の応動を高速に検出している。

3.2 主要機能と効果

種子島宇宙センターの電源システム運用上の課題に関し、蓄電池制御システムが提供する主要機能を次に示す。

(1) 発電機故障バックアップ機能による電源冗長性維持

発電機の送電中に、万一、故障などによる停止が発生した場合、図5に示すように故障機が供給していた電力を蓄電池で補完する。

具体的には、当該発電機出力の移動平均値と瞬時値の差分が一定のしきい値を超えたら故障停止と判定し、その時の移動平均値をホールドする。そして、そのホールド値に相当する電力を瞬時に蓄電池から供給し、その供給状態で一定期間運転する。

蓄電池制御システムは故障バックアップ対象の発電機を判別し、不要な蓄電池出力を構内系統に供給しないようにしている。

これは、発電機点検時の遮断器投入状態や計測回路状態を把握することにより、試験操作を行っている発電機や計測回路に異常のある発電機を故障バックアップ対象から除外することで、それらの発電機の出力計測値の振る舞いによる不要な蓄電池のバックアップ補償出力を抑制し、構内系統に擾乱（じょうらん）が生じないようにするものである。

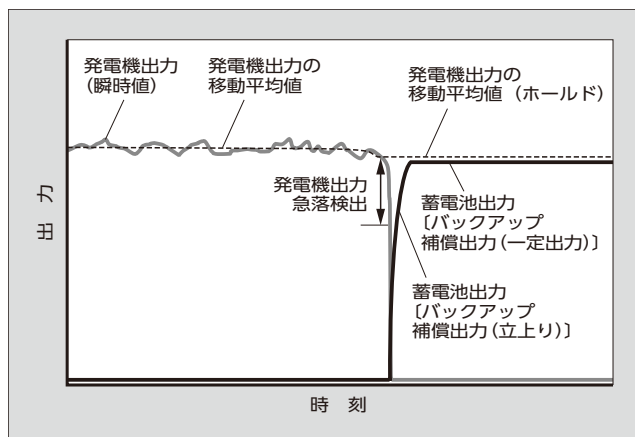


図5 発電機故障時の蓄電池バックアップ補償動作

蓄電池制御システムは、図6に示すように蓄電池バックアップ補償動作である一定出力運転を行った後、発電機と同様の負荷追従運転に遷移する。後発の発電機が起動すると、蓄電池の放電出力を徐々に下げ、蓄電池の負荷を後発機に渡す。放電出力があらかじめ設定したしきい値より小さくなったら、負荷移行が完了と判定し、放電出力を0kWとして次のバックアップ補償動作に備えて待機状態に戻す。

発電所の実発電機2台と水抵抗器を用いた試験用負荷回路を構成し、蓄電池制御システムによるバックアップ補償動作の検証例を図7に示す。

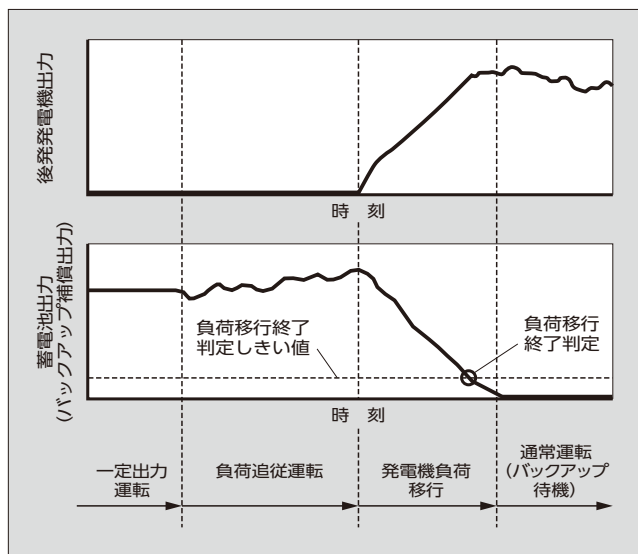


図6 蓄電池バックアップ補償動作の遷移

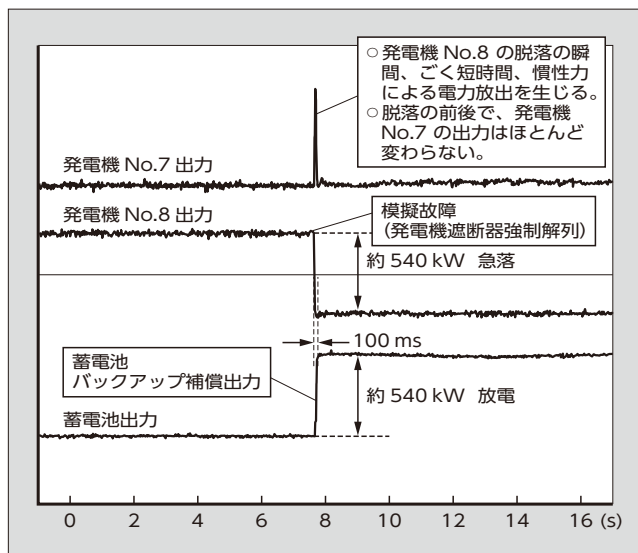


図7 蓄電池バックアップ補償動作の検証例

〈注2〉水抵抗器：水を満たした容器に電極を差し込んで形成する抵抗器である。大きな電流容量が必要な場合に用いる。電極を水に浸ける深さを変えることで無段階に抵抗値を変えることができる。

発電機 No.8 を強制的に故障停止させたものであるが、蓄電池制御システムは 100 ms で応答し、発電機 No.8 の供給電力と同量の放電によって、発電機故障バックアップ機能を実現している。運転を継続している発電機 No.7 には、発電機 No.8 の故障停止後、その分の負荷が乗ることがない。これにより、発電機の急停止を生じても、蓄電池が肩代わりする放電を行い、後発機の立上りまで、運転中の発電機の余力や冗長性が維持できる。

(2) 発電機負荷平滑化制御機能による電源周波数の安定化

蓄電池用 PCS 単体の出力応答性向上 (0 ~ 定格 90% の出力応答：従来 50 ms → 2 ms) や高速な計測機器と専用回線による計測制御系により、蓄電池制御システムの負荷変動に対する出力応答性は、検出から制御出力完了までで 21.6 MW/s 程度になる。これは前述の発電機の負荷変動への応答性より格段に速い。

このため、発電機では変動に追従しにくい数分未満の短周期変動や突発的な負荷変化を蓄電池の充放電で吸収し、発電機が対応可能な出力変化速度以下に抑える。これにより、発電機から見た負荷変動を平滑化し、周波数変動を抑制する。

図8に発電機負荷平滑化制御機能の概要を示す。図8(a)は負荷需要の変化を表し、図8(b)はそれに対して発電機のみで電力供給する場合の出力変化を表している。発電機はその負荷変動に対し自らの出力を合わせるように、可能な限りの出力変化速度 S_{max} で追従する。しかし、負荷増減の速さに追従できない部分があり、それが周波数変動として表出する。

図8(c-1) ~ (c-3) は図8(a)の変動に対し、蓄電池出力と発電機出力を組み合わせて電力供給を行う場合を示すものである。ここで、蓄電池制御システムの制御パラメータとして、発電機が負荷追従動作する際、単機当たりの目標出力変化速度を S とおく。

送電回路が成立し、出力計測も正常にできている発電機台数を N とすると、 $S \times N$ は系統に電力供給している発電機全体の目標出力変化速度 S_0 となる。この S_0 となるように蓄電池の充放電を図8(c-1) のように行くと、発電機が分担する負荷変動は S_0 (傾き θ_0) となる。この結果は図8(c-2) に示す発電機出力のようになる。このとき、 S の値を実際の発電機が対応できる出力変化速度 (ここでは 70 kW/s 程度) より小さい値に設定すれば、発電機の負荷追従性能の範囲内になるため発電機運転が安定化し、周波数の変動を抑えることができる。蓄電池と発電機の合成出力は、図8(c-3) のように負荷変動に追従する。 S の値をより小さくすると S_0 (傾き θ_0) がさらに小さくなり、発電機から見た負荷変動は平滑化される。この結果、周波数をより安定化することができる。ただし、周波数安定化を強めた設定とすると、蓄電池の充放電容量が大きくなるため、実際のシステムでは S の値を必要以上に小さくしない運用としている。

発電機負荷平滑化制御機能のオン時とオフ時の周波数偏差の比較を図9に示す。オフ時の周波数偏差 ± 0.15 Hz 程

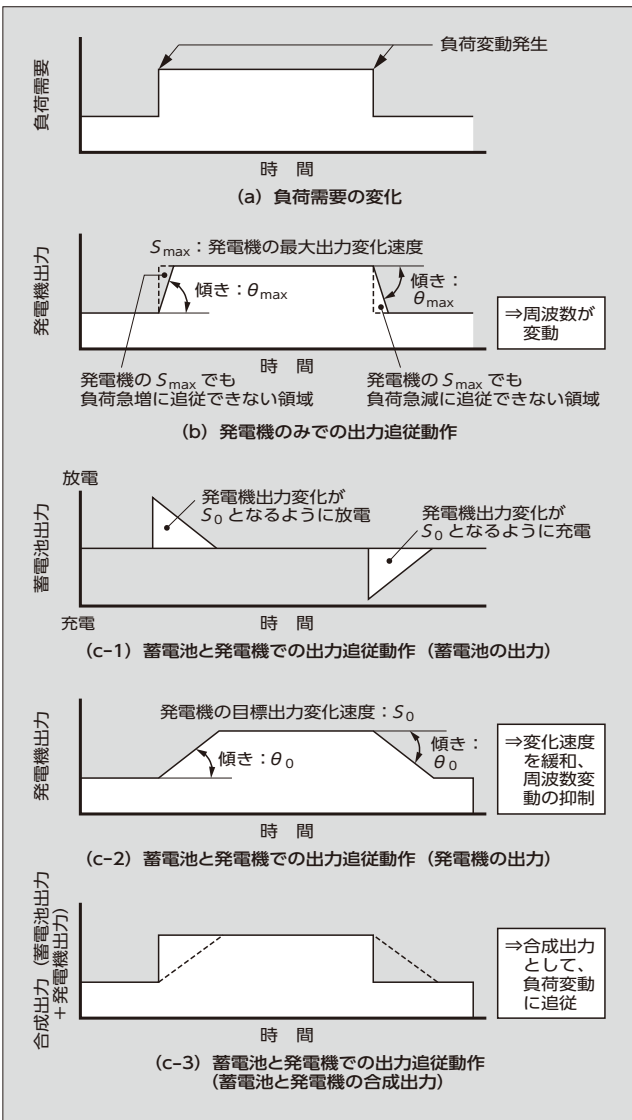


図8 発電機負荷平滑化制御機能の概要

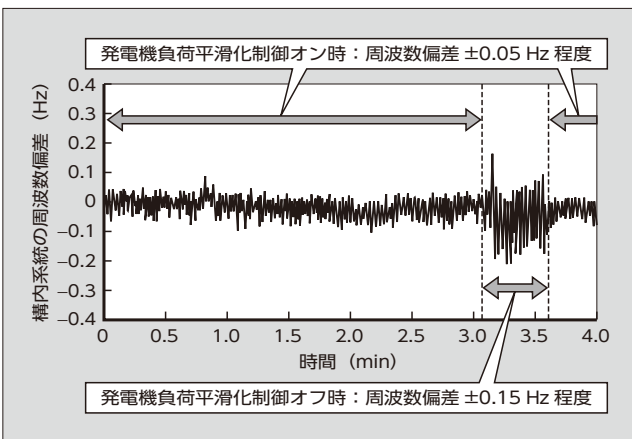


図9 周波数偏差の比較

度に対して、オン時は ± 0.05 Hz程度となっており、偏差の大きさが1/3に軽減している。このように、発電機負荷平滑化制御機能により、周波数の安定化を実現している。

(3) 発電機負荷率上下限監視制御機能による運転の高効率化

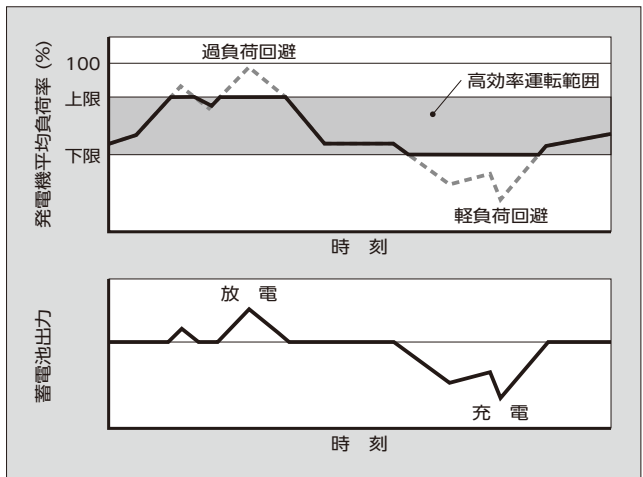


図10 発電機負荷率上下限監視制御機能の概要

図3の特性から発電機の負荷率が高くなるように運転すれば、単位発電量当たりの燃料消費量が少なく、高効率化を図ることができる。このため、複数台の発電機が運転する実環境に合わせ、発電機の平均負荷率が高効率な範囲になるように、蓄電池を充放電させる機能を設けている。図10に発電機負荷率上下限監視制御機能の概要を示す。

発電機の負荷率が75%を超える範囲では、図3のように燃料消費量を下げることが飽和すること、また、過負荷となるリスクも出てくるため、本機能では制御上のしきい値として、発電機の平均負荷率に上限を設けている。この上限を超えたら蓄電池を放電させ、発電機の平均負荷率を下げる。

逆に下限を下回る場合は、蓄電池の充電により発電機の平均負荷率を高める。この上下限値のしきい値で挟む平均負荷率の範囲を高効率運転範囲に合わせることで、発電機の運転を高効率に維持する。

図11に、発電機負荷率上下限監視制御を行った場合の発電機の運転試験結果を示す。

図11(a)は、発電機の平均負荷率70%を上限に設定した際、負荷需要が単純に増加した場合の蓄電池の放電動作と発電機出力総計を表したものである。平均負荷率70%を超えると蓄電池の放電によって、上限以下となるように発電機出力が抑制されている。

図11(b)は、発電機の平均負荷率40%を下限に設定した際、平均負荷率が変わった場合の蓄電池の充電動作、および発電機出力総計の変化を表したものである。ただし、この動作では機能検証のため、本来、負荷需要の変化で平均負荷率が変わることを、発電機の台数を強制的に増減させて、模擬的に平均負荷率が変わる状況を作っている。発電機の運転台数が増えることで、平均負荷率が40%を下回ると、蓄電池の充電によって発電機出力が増加することが分かる。発電機の出力増加も急変せず、緩やかな変化速度で制御され、平均負荷率は下限設定を下回らないように維持されている。発電機の運転台数が減ると平均負荷率が40%以上となり、この領域では蓄電池の充電を徐々に弱める。この結果、負荷需要と発電出力総計のつり合いで、

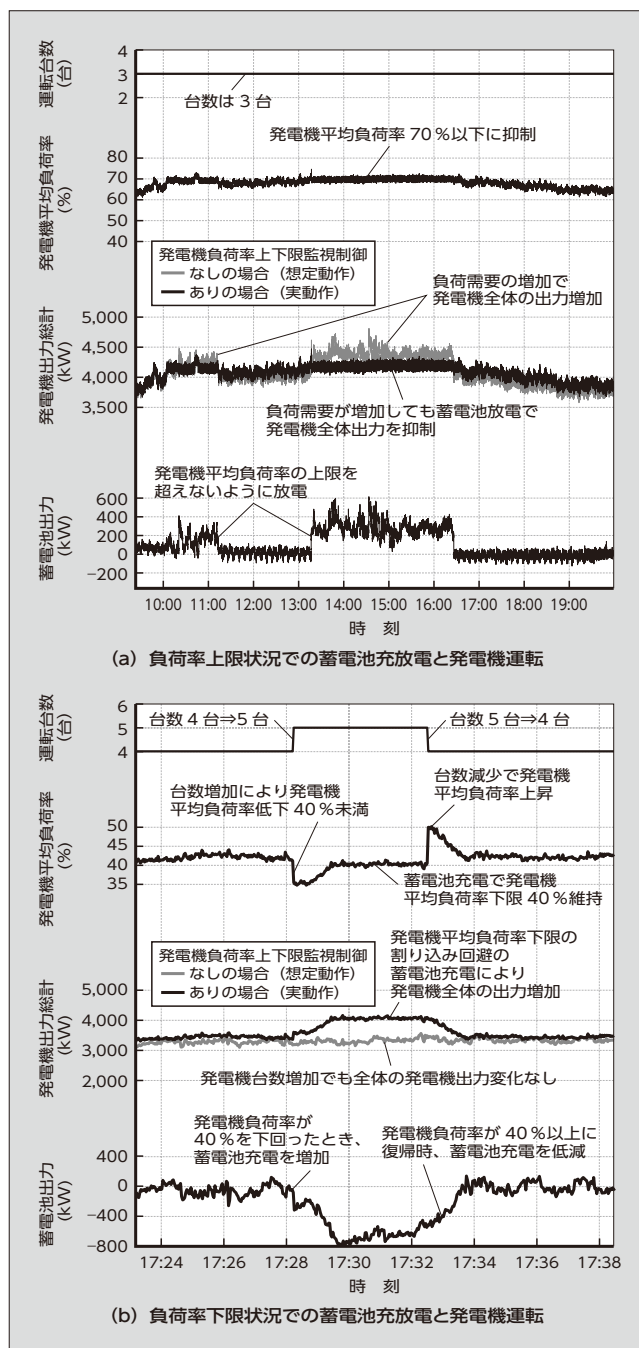


図 11 発電機負荷率上下限監視制御による発電機運転試験結果

平均負荷率が下限設定以上になる状態に復帰する。なお、蓄電池の充電を弱める場合においても、発電機の出力を緩やかに変化させる制御で、発電機出力の急変を避けている。

上述した発電機負荷率上下限監視制御により、発電機を平均負荷率上限と下限で挟んだ高効率領域で運転することができる。これにより、最適な設定で運用できた場合は、8%程度の燃料削減効果が期待できる。

4 あとがき

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 種子島宇宙センターの安定稼働に貢献する大型蓄電池制御システムについて述べた。JAXA では 2030 年までにロケット発射場 (射場) の電力基盤における “D&3E” の確立、さらには将来の “射場のエネルギー自給自足” を目指している。今後の社会インフラの中では、デジタル化技術を通して経済性と環境性の両立を図り、かつエネルギーの安定供給を実現するシステムが求められる。富士電機は、こうした要請に応える優れた技術とシステムを提供することで、グリーン・デジタル社会に貢献する所存である。

最後に、本システムを納入するに当たり、お客さまである JAXA 殿をはじめ、株式会社九電工殿、日本ガイシ株式会社社殿には多くのご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 椎橋哲也ほか. 国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.3, p.159-164.



荒井 広

電力・エネルギー分野の蓄電池制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部エネルギー制御技術部課長補佐。



原 篤史

大規模施設の変電設備、発電設備のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部施設電機技術第一部。

〔注 3〕 D&3E：電源システムなどのインフラ改善における次の項目の略記である。

- 監視機能のデジタル化 (Digitalization)・高度化
- その指令による安定した電力供給 (Energy Security) システムの構築
- 高効率、コンパクト化、ダウンサイジングを図り経済効率性 (Economic Efficiency) を確保
- 脱炭素化・CO₂削減といった環境性 (Environment) を積極的に推進できるシステムの技術開発・実装

鉄道の安全・安定輸送に貢献する電力管理システム

Electric Power Management System Contributing to Safe and Stable Railway Transportation

植草 秀明 UEKUSA, Hideaki

山地 智文 YAMACHI, Toshifumi

白倉 善積 SHIRAKURA, Yoshizumi

変電所やき電区分所から電車・駅に電力を供給するために、電力システムを集中管理する電力管理システムには、安定した電力を継続的に供給するという役割に加え、変電所などの系統運用や保守運用を効率化する機能が求められている。

富士電機は、こうした顧客ニーズに対応した電力管理システムを提供することにより、故障復旧機能などを充実させるとともに画面表示の視認性の向上やシステムのコンパクト化を実現し、鉄道の安全・安定輸送に貢献している。

The electric power management system centrally manages the power system to feed power from railway substations and sectioning posts to trains and railroad stations. In addition to stable, continuous power supply, it is required to deliver the functions to improve the efficiency of the operation and maintenance of the power system including railway substations. Fuji Electric offers the electric power management system that meets these needs to enhance functionality such as failure recovery, improve screen visibility, and streamline the system configuration, contributing to safe and stable railway transportation.

① まえがき

鉄道は公共性が高い交通機関であるため、電車の遅延や運休などによる社会的影響は非常に大きい。このため鉄道向けの変電所やき電区分所などは、安定した電力を継続的に供給しなければならないという重要な役割を担っている。最近ではそれに加え、変電所などの効率的な系統運用や保守運用の必要性が高まっている。電力管理システムはこうした役割を持つ極めて重要なシステムである。

本稿では、このシステムの稼働安定性向上と変電所の復旧処理を効率化するための機能拡充に対応した、鉄道の安全・安定輸送に貢献する電力管理システムについて述べる。

② 電力管理システムの概要と課題

電気鉄道では、一般に変電所が電力会社から電力を受電し、降圧や整流を行い、電車および駅などに電力を供給している。電車線路への電力供給のために、鉄道沿線に変電所やき電区分所などの被制御所が設置され、事故時や保守作業時に電源区分を行う電力系統構成としている。そのため、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（第49条第4項）」で“被監視変電所（自動変電所、被遠隔制御監視変電所及び取扱者が常駐しない移動変電所をいう。）及び開閉所は、監視及び制御することができる機器を備えた監視所を有し、かつ、事故、災害及び故障の発生時に対処することができるものでなければならない。”と記されている。

電気鉄道向け電力管理システムは、この電力指令（司令）業務を集中した箇所（指令所など）で総合的に行うものである。

2.1 従来のシステム構成

本システムは、制御所（指令室、機器室）に設置された卓処理装置、中央処理装置、遠制親局装置と、被制御所（変電所、き電区分所など）に設置された遠制子局装置から成る。図1にIP（Internet Protocol）ネットワークを使用したシステム構成例を示す。

遠制子局装置は変電所などの機器や運転状況の情報を収集し、遠制回線を経てこれを遠制親局装置に送信する。中央処理装置および卓処理装置の計算機は、相互に連携してこれらの情報を処理、記録したのち、操作卓に表示する。

指令室のオペレーターは、表示された情報を基に、電力システムを監視し、必要に応じて操作卓を用いて変電所に対する運転や機器の開閉制御などの指令を出す。遠制回線を通じて遠制子局装置に伝えられたこれらの指令に基づき、変電所機器が作動する。

遠制回線は、メタル回線によるHDLC（High-Level Data Link Control）手順通信などが主流であったが、IPネットワークの普及に伴い、TCP/IP通信とPMCN^(注1)通信も利用できるようになっている。

冗長性を持たせるために複数の中央処理装置で構成する場合は、主系・従系・待機（停止）としてそれぞれ運用し、主系装置に異常が発生した時は、従系装置を主系に自動で切替え、運用を継続する。

〈注1〉PMCN：Protocol for Mission Critical industrial Network useの略であり、一般社団法人日本電機工業会（JEMA）規格（2005年10月制定）の産業用ミッションクリティカルネットワークプロトコルである。

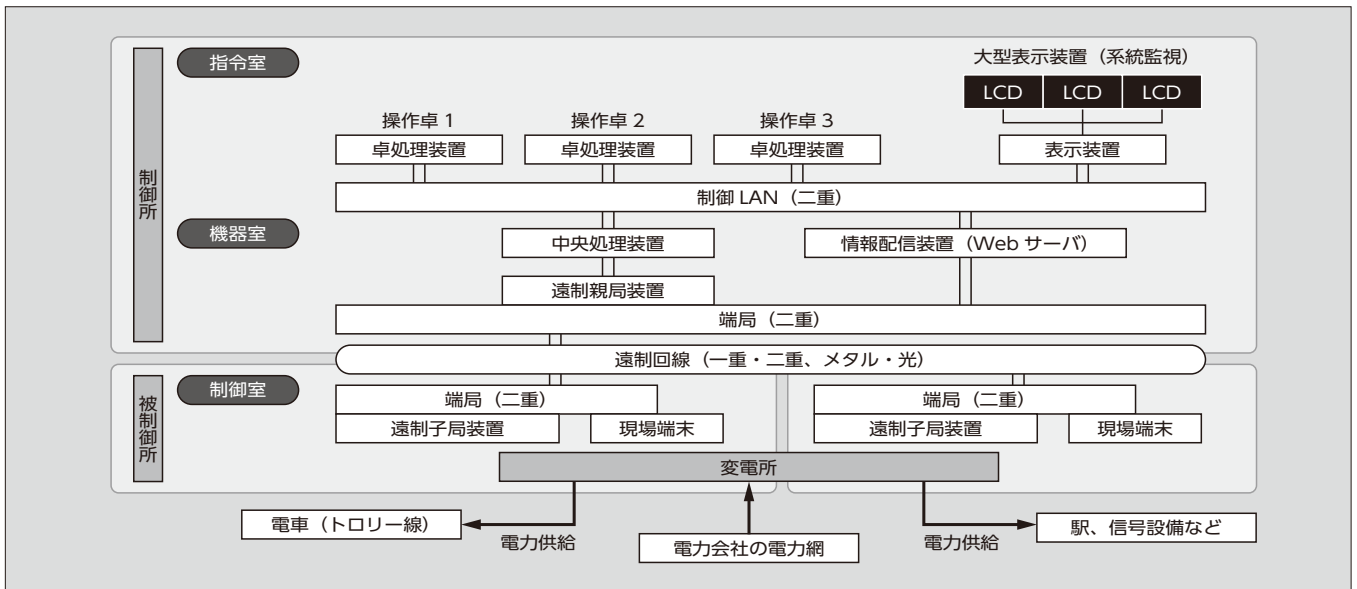


図1 IPネットワークを使用したシステム構成例

2.2 従来システムの機能概要

電力管理システムは、必須の基本機能と、顧客要望に応じて選択できる拡張機能で構成されている。

(1) 基本機能

(a) 系統監視機能

- ① 操作卓の系統画面（電力系統を図示した画面）上に、変電所の運用状況・計測情報を表示する。
- ② 故障発生時は、警報を鳴動し、該当変電所の系統画面などの情報を操作卓に自動表示する。
- ③ 変電所の電力量を30分スケールでグラフ表示する（デマンド監視）。実績値が警戒値または、契約値を超えた時はデマンド警報を鳴動する。
- ④ 系統画面に付箋（ふせん）式メモを表示する。交代勤務のオペレーター間での監視業務引継などに活用できる。

(b) 系統制御機能

- ① 操作卓上の系統画面を操作することで、変電所機器の入り、切り、モード切替を行い、電力を制御する。
- ② 通常運転では、あらかじめ設定（登録）した機器の開閉パターンを実現する自動運転が可能である。
- ③ 変電所や路線に緊急事態が発生した際は、操作卓から変電所に非常停止指令・き電停止指令を出力する。

(c) 記録機能

- ① 変電所機器の状態変化や故障の有無、操作情報、自動制御動作状況などを記録・保存する。
- ② 各変電所の電力量、電圧、電流を収集し、日報、月報、年報などの帳票としてこれらデータを管理、保存する。
- ③ 計測データは、操作卓上にトレンドグラフとして表示されるだけでなく、このグラフデータを取り出して活用できる。

(d) システム管理機能

- ① 電力管理システムの構成装置の状態を定期的にチェックし、故障などの異常検出時にはオペレーターに報知する。
- ② 中央処理装置に異常が発生した場合は、主系・従系切替を自動で行う。

(2) 拡張機能

拡張機能は、故障時対応の自動化や、保守管理の効率化など、顧客要望に応じて選択できる機能である。要望に応じて設備追加や、卓処理装置と中央処理装置のプログラム変更を行い、機能拡張を図る。

(a) 大画面表示機能

電力系統全体の情報を指令室の大型表示装置に表示し、情報の見える化、共有化を図る。

(b) 連絡遮断バックアップ制御機能

直流き電線の事故などの発生時には、変電所内に設置された保護リレーおよび連絡遮断装置が瞬時に作動し、事故発生と同一き電区間のき電を停止する。これに加えて、連絡遮断装置の故障に備え、中央処理装置が同一き電遮断器に開放指令を出力し、より確実にき電を停止する。

(c) 故障復旧機能

変電所で発生した保護リレー動作や遮断器トリップなどの状態変化の情報から故障判定を行い、故障に応じた復旧処理として、次に示す自動制御を中央処理装置で行う。

- 受電系統切替制御（2回線受電の変電所）
- 高配自動切替制御
- き電再開路制御
- 整流器再開路制御
- 整流器振替制御

(d) 情報配信機能

電力系統情報などを、ネットワークに接続された変電

所や保守部門の現場端末に配信し、表示する。

(e) 作業計画・管理・制御機能

受電・高配系統の系統切替や、保守などの作業スケジュールを計画する際、作業が停電を伴う場合は、手順（制御内容）をあらかじめ登録しておくことで、その内容に沿った機器の自動制御を行うことができる。操作ミスによる停電や事故を回避できる。

また、保守作業員が現場から電話機のプッシュボタンを操作することで、現場到着、作業開始・終了などの作業進捗状況を操作卓上に表示できる。作業の進捗状況を現場と指令室が共有し、操作タイミングのミスによる作業員の事故の防止に有効である。

(f) シミュレーション機能

実際に事故が起きた際の対応や復旧操作の記録を基に、運転員の異常対応訓練のシナリオが作成できる。また、システムの操作訓練や計画制御の事前確認を目的としたシミュレーションを行うことができる。

2.3 従来システムの課題

(1) ソフトウェア管理と更新作業の簡易化

従来のシステムは、卓処理装置と中央処理装置の関係がクライアント・サーバ形式であり、それぞれに監視制御システムパッケージ群(注2)および電力管理機能ソフトウェアが分散配置されている。安定したシステムを構築できる一方で、両者の機能分担が不明確なため、機能アップを目的としたシステム改造の際は、クライアントとサーバの双方への対応が必要である。こうした作業に時間を要するだけでなく、ソフトウェアの管理や更新作業が煩雑であるという課題があった。

(2) データ表示と管理レベルの高度化

近年、画像、動画、音声情報などを組み合わせたデータ表示へのニーズが高まっている。このため、系統状態や異常の有無などを視聴覚的に正確に把握できるような、データ表示の高度化への対応が求められている。

また、OA化の普及に伴い、帳票（変電所の稼働情報）を電子化して長期保管し、必要に応じて電子化された帳票を印刷、参照するといった運用のニーズが高まっており、データをExcel(注4)などの汎用ソフトウェアと連携させるなど、データ管理レベルの高度化が求められている。

(3) システムのコンパクト化

従来のシステムは、現場の電力系統情報を配信するための情報配信装置や、緊急時に警報を発するための警報装置が必要であった。一方で、顧客ニーズが多様化し、シンプルなシステムやリモート対応が求められるようになった。

こうした背景から、付帯設備を含めたシステム全体のコンパクト化が求められている。

3 新システムの特徴

(1) ソフトウェア管理と更新作業の簡易化

新システムの電力管理機能ソフトウェアは、モデル・ビュー・コントローラ（MVC）モデルを適用している。MVCモデルは、ソフトウェアをモデル、ビューおよびコントローラに役割を分けて開発するもので、機能分担が明確なため、ソフトウェアの新規開発やカスタマイズが容易であるという特徴がある。図2に従来と新システムのソフトウェアモデルを示す。

このMVCモデルを採用した新システムでは、機能アップを目的としたシステム改造は、アプリケーションサーバだけで行われる。このため、クライアントのソフトウェアの管理を行う必要がなくなり、更新作業も容易となった。

(2) データ表示と管理レベルの高度化

新システムのソフトウェアは、どのOSでも使用できるようにJavaプラットフォームに改めた。また、データをデータベース（DB）に集約して管理し、分散配置したDBをレプリケーションにより同期させ、データの操作性を向上した。

図3に従来方式と新方式のソフトウェア構成を示す。

新システムは、Windows環境でもLinux環境でも動作可能である。信頼性重視のサーバはLinux、オペレーターへの表示や操作などを重視する操作卓はWindowsといっ

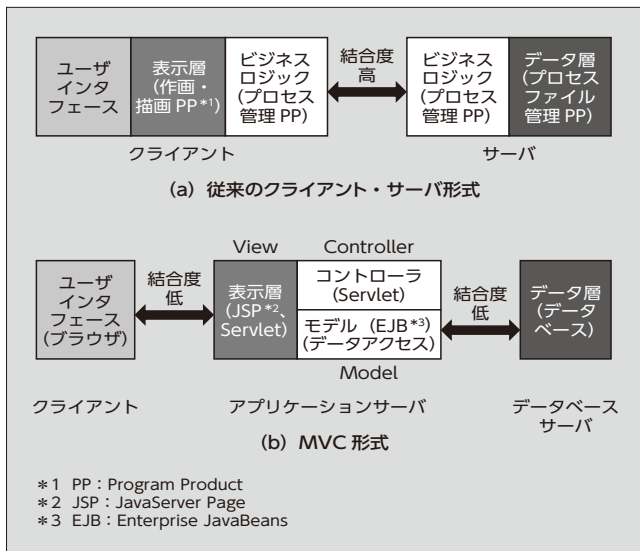


図2 従来と新システムのソフトウェアモデル

〈注2〉監視制御システムパッケージ群：富士電機製、PFILE・FSINET・ROSE・fensterを指す。

〈注3〉電力管理機能ソフトウェア：電力管理システムの各機能を実現するアプリケーションソフトウェアである。

〈注4〉Excel：Microsoft Corporationの商標または登録商標

〈注5〉Java：Oracle Corporationおよびその子会社、関連会社の米国およびその他の国における商標または登録商標

〈注6〉Windows：Microsoft Corporationの商標または登録商標

〈注7〉Linux：Linus Torvalds氏の日本およびその他の国における商標または登録商標

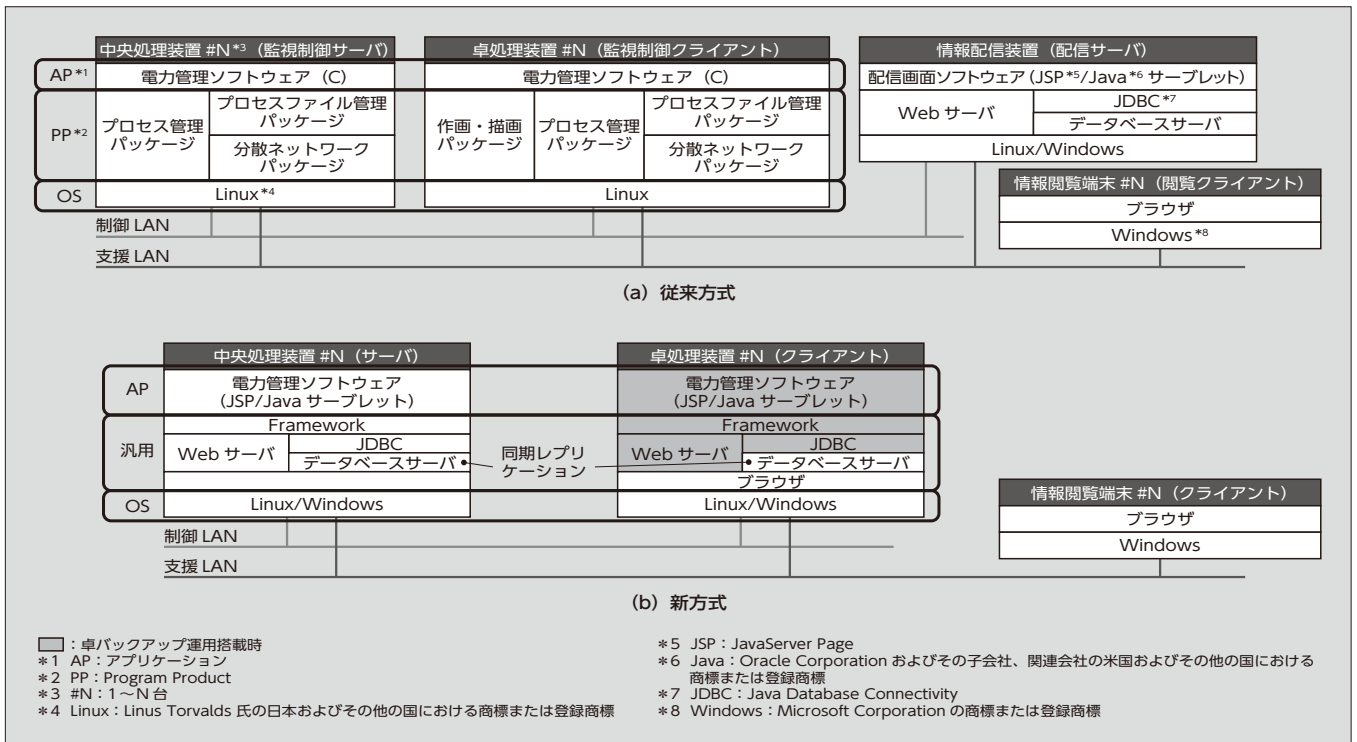


図3 従来方式と新方式のソフトウェア構成

た組合せも可能となった。

操作卓で表示する画面 (Web 画面) では、部品単位に情報が更新され、リアルタイム (1~2 秒ごと) の表示を行う。また、異常状態を色替えやフリッカ表示で示すだけでなく、アニメーション表示や変電所の故障箇所のカメラ映像をポップアップで系統画面に映し出すことも可能である。系統画面の背景色、シンボルのサイズや色などの制限がなくなり、視認性が向上した。

日報、週報、月報といった帳票は、PDF ファイルとしたことでプレビュー表示が可能となり、また Excel との連携によりデータ活用の汎用性が広がった。

(3) システムのコンパクト化

新システムは、Web サービスによる中央集中管理としたことで、系統状況などを配信する専用の情報配信装置が不要となった。配信画面は、権限による閲覧制限が可能であり、情報セキュリティにも配慮がされている。

卓処理装置と中央処理装置を 1 台のハードウェアで構築することもできる。また、警報音に WAV ファイルが利用できるため、警報装置の外付けが不要となった。このようにシステム全体のコンパクト化が進んでいる。

富士電機は、こうした新システムの特徴を基本とし、さらに個々の電力管理システムの要求に即した機能を具現化している。4章では、これらの電力管理システムの導入事例として、東武鉄道株式会社の“東武東上線”“東武越生線”、および横浜高速鉄道株式会社の“みなとみらい線”の電力管理システムについて述べる。

4 電力管理システムの導入事例と特徴

4.1 東武鉄道東上線電力管理システム⁽¹⁾

東上線電力管理システムは、東武東上線池袋駅から寄居駅間および東武越生線坂戸駅から越生駅間において 15 か所の変電所と 2 か所のき電区分所の計 17 か所の遠方集中監視制御を行っている。

図4に東上線電気指令室の外観を、図5に東上線電力管理システムの構成を示す。

このシステムは、2.2 節で述べた基本機能および拡張機能を備えているとともに、次の特徴を持っている。

(1) 異常事態対策の強化、システム強度の向上

操作卓は 3 台構成とした。また、メイン計算機 (制御サーバ) も 3 台構成とし、2 台の制御サーバに加え、東武



図4 東上線電気指令室

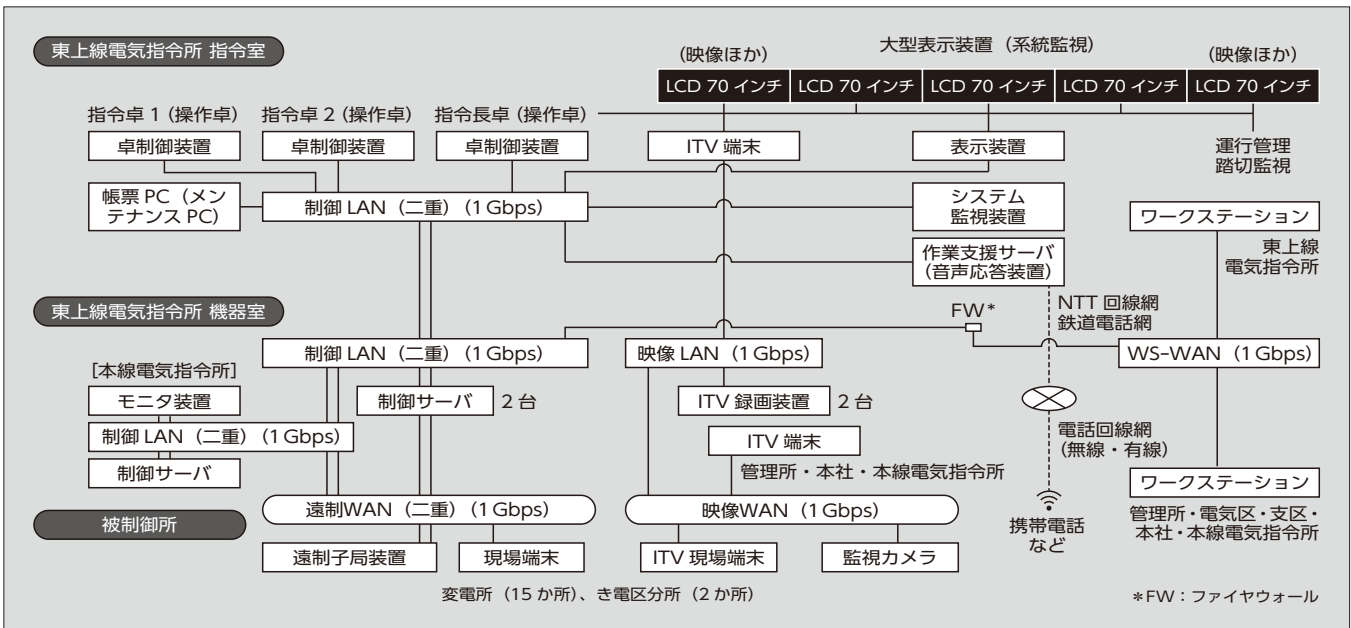


図5 東上線電力管理システムの構成

東上線・東武越生線沿線外に制御サーバ1台とモニタ装置を配置した。制御サーバは、それぞれが主系・従系・待機（停止）のいずれの役割も担えるようにすることで、東上線電気指令所が災害などに機能しない場合でも、東上線変電所の運転状況などの監視を行えるようにしている。

(2) 高速伝送と信頼性の向上

遠制回線は1ループ二重化構成の光回線であり、TCP/IP通信方式とすることで遠方監視制御装置親局（TCM：Telemeter Control Master）を削減した。リング状に接続した伝送端末装置は異常時のループバック機能（迂回機能）を備えるため、単なる回線の二重化以上の高信頼な遠制回線としている。

(3) 映像モニタリング

変電所内外の状況をカメラ映像により、東上線電気指令所指令室および保守部門の端末でモニタできる。映像は常に録画しており、1週間前まで遡（さかのぼ）り確認できる。東上線電気指令所指令室では映像を大型表示装置に表

示可能で、火災や部外者侵入を検知した際は、自動で当該変電所の映像を表示する。カメラの旋回やズーム操作および指令卓のマイクから注意喚起放送を行うことも可能である。

(4) 事故電流波形表示

き電電流事故発生時の電流波形データを、被制御所のき電線故障選択装置から収集して操作卓に表示を可能としている。

4.2 横浜高速鉄道みなとみらい線電力管理システム

横浜高速鉄道みなとみらい線の電力管理システムは、横浜駅から元町・中華街駅間の変電所2か所、開閉所1か所、配電所6か所の監視制御を行っている。横浜高速鉄道みなとみらい線電力管理システムの構成を図6に示す。システムは、2.2節で述べた基本機能、故障復旧機能、情報配信機能およびシミュレーション機能を備えている。また、次に示す特徴を持っている。

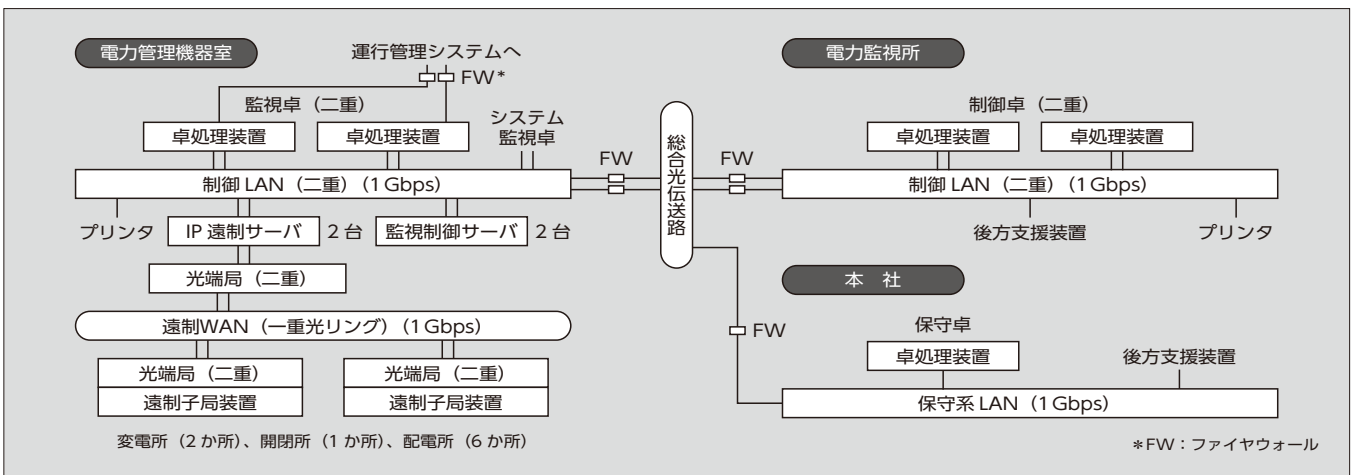


図6 横浜高速鉄道みなとみらい線電力管理システムの構成

(1) 設備冗長化による障害時運用継続性の確保

電力監視所に設置する制御卓は、同一構成の機器を2台設置し、1台故障時には他方の制御卓で運用継続を可能とする。また、電力監視所以外にも電力管理機器室に監視卓2台と本社に保守卓1台を設置している。

(2) 受電停電時の非常配電機能

2か所ある変電所において受電停電が発生したときに備えて、発電機設備を持っている。電力管理システムは、発電機設備の制御、および配下の配電所への負荷制限を行う非常配電機能を備えており、停電状況に応じて自動で配電所に負荷制限を行い、発電設備からの配電を制御する。

(3) 配電状況の認識性の向上

電力管理システムでは、運行管理システムからの列車走行位置情報を受信して、全体系統図の中に列車位置を重ねて表示している。全体系統図の画面例を図7に示す。

(4) 遠制子局装置と切替盤の省スペース化

遠制子局装置を設置する機器室のスペース上の制約から、遠制子局装置は、新旧システム切替に必要な切替盤に積み

上げて設置する構造とした。その外形を図8に示す。切替盤を先に現地に設置すると、現地作業を前倒して進めることができる。また、切替盤は次のシステム切替作業での活用も可能なように、遠制子局装置と分離している構造とした。

5 あとがき

鉄道の安全・安定輸送に貢献する電力管理システムについて述べた。

これからの電力管理システムは、効率的な運用に加え、点検業務の省力化、帳票管理の電子化をはじめとする管理レベルの高機能化、変電所機器の故障の兆候検知、重要インフラのセキュリティ対策などの機能拡張が必要である。

富士電機は、多変量解析技術を用いた劣化診断機能の開発、国土交通省のガイドライン⁽²⁾に準拠したセキュリティ対策を進めて、鉄道の安全・安定輸送に貢献していく所存である。

最後に、更新システムの納入に当たり、ご指導いただいた関係各位に心から謝意を表する。

参考文献

- (1) 小熊恒大. “東上線電力管理システム更新工事について”. 鉄道と電気技術. 2021, vol.32, no.8, p.39-43.
- (2) 鉄道分野における情報セキュリティ確保に係る安全ガイドライン第4版. 国土交通省. 2019.

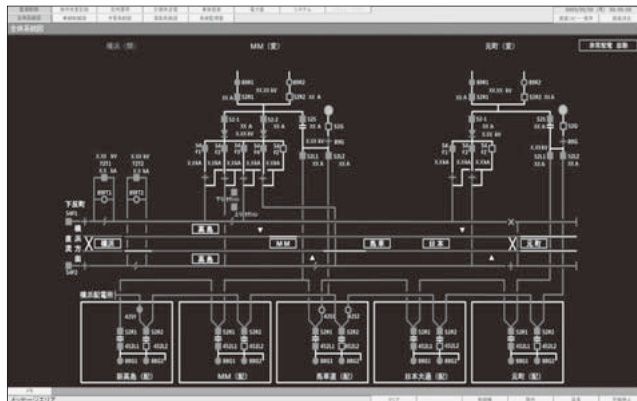


図7 全体系統図の画面例

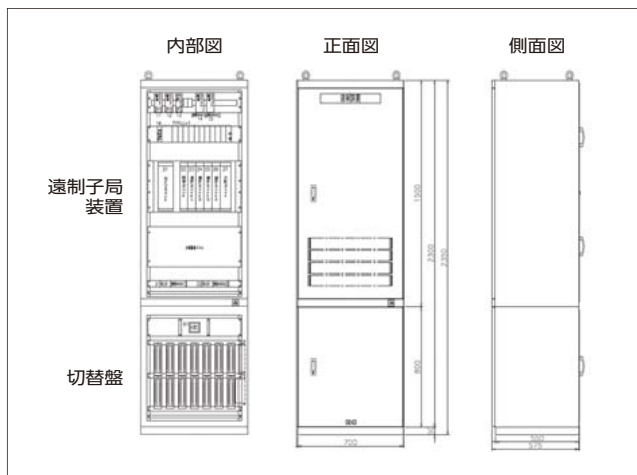


図8 遠制子局装置と切替盤 (外形図)



植草 秀明

電気鉄道情報制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部変電システム事業部交通技術第一部グループマネージャー。



山地 智文

電気鉄道情報制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部変電システム事業部交通技術第一部主任。



白倉 善積

電気鉄道情報制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部変電システム事業部交通技術第一部主任。

素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源

Industrial-Use Power Supplies Contributing to Stable Operation of Material Manufacturing Equipment

渡部 幸平 WATABE, Kohei

岡崎 洋平 OKAZAKI, Yohei

浅田 雅人 ASADA, Masato

素材製造設備にはその用途に応じてさまざまな産業用電源が使用されている。中でも、アルミニウム製錬に使用される変圧整流装置は1台当たり数百MVAを超える大容量であり、それに起因する特有の課題がある。こうした課題解決のため、各種シミュレーションや高調波系統解析を活用した最適設計を進めた。その結果、各種解析精度の向上や材料の最適化による変圧整流装置の小型化や信頼性の向上、整流器内での短絡事故シミュレーションによる事故時の安全性確認、変圧整流装置から発生する高調波の解析による電源システム全体の電源品質低下防止などを実現した。

Various types of industrial power supplies are used in material manufacturing equipment depending on the application. Among them, transformer rectifiers for aluminum smelting have large capacities more than several hundred MVA per unit, posing specific issues. To address the issues, Fuji Electric has adopted an optimum design based on various simulations and harmonic system analyses. As a result, we have downsized the transformer rectifier and improved its reliability by increasing analysis accuracy and optimized materials, confirmed the safety in an accident by simulating the short-circuit fault in the rectifier, and prevented power quality deterioration in the entire power supply system by analyzing the harmonics generated from the transformer rectifier.

1 まえがき

非鉄、鉄鋼、ケミカル素材、半導体用材料、グリーン水素などの素材製造設備には、その用途に応じて変圧整流装置（直流電源）、電力調整器、特殊波形電源、高周波電源、フリッカ補償装置、無効電力調整装置などのさまざまな産業用電源が使用されている。

産業用変圧整流装置は、素材製品の製造における電解、溶融、製錬などの設備の電源に用いられる装置である。素材製造産業は全ての産業の基盤であり、設備投資は世界的に拡大傾向が続いており、産業用変圧整流装置の市場も拡大している。

中でも、アルミニウム製錬に使用される変圧整流装置は数百MVAを超える大容量であることから、高調波対策、小型化、事故時の安全性確保といった課題を抱えている。富士電機は、シミュレーション解析技術を駆使した機器の最適設計など、変圧整流装置単体のみでなく、電源システムとしての検証を含めて解決に取り組んでいる。

本稿では、素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源について述べる。

2 変圧整流装置の概要

変圧整流装置は、高圧や特別高圧の交流電力を低圧大電流の直流電力に変換する装置である。各種金属の製錬プロセスや化学プラントの電解プロセスなどに用いられる。

富士電機は、幅広い容量の産業用変圧整流装置を、60年にわたり世界に提供してきた。また、変圧整流装置の開発および設置・施工には、大電流応用技術（部分加熱抑制、磁束制御）、システムへの影響の低減を考慮したシステムの最適化・高信頼性設計などが必要であり、これらについての



図1 アルミニウム製錬設備向け変圧整流装置

高い技術力を持っている。

図1に、アルミニウム製錬設備向け変圧整流装置の全景を示す。

アルミニウム電解は溶融塩電解であるため、直流電源の喪失は溶融したアルミニウムの凝固を招いて電解設備に多大な損害を与えることから、1時間以上の直流電流喪失は許されない。そのため整流器には、比較的信頼性の高いダイオード素子を適用するのが一般的である。また、複数台の整流器を設置することで故障時における冗長性を確保する。

図2に、一般的なアルミニウム製錬設備の単線結線図を示す。特別高圧の交流電源を電圧調整用変圧器で降圧し、整流器用変圧器と整流器を経由して電解設備に直流電力を給電する。また、電源品質確保のために高調波フィルタを設置することで、力率の改善と電源に流出する高調波の低減を図っている。

溶融塩電解中に発生する陽極効果（AE：Anode Effect）により、操業中に負荷抵抗が一時的に上昇する。

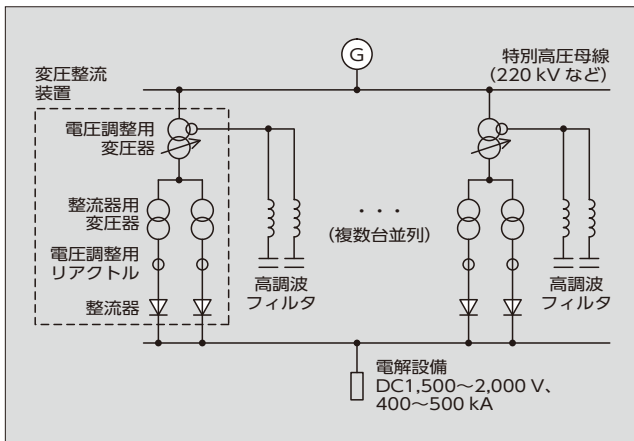


図2 一般的なアルミニウム製錬設備の単線結線図

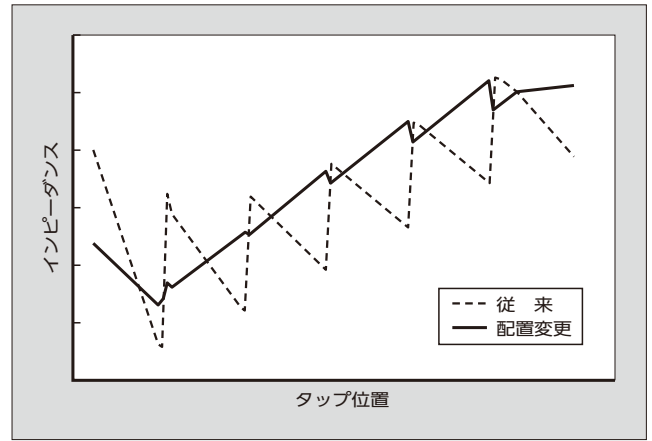


図3 一次-二次間インピーダンスの変化例

表1 アルミニウム製錬設備の要求電気仕様

	1960年代	1990年代	2010年~現在
直流電圧	500 V	1,250 ~ 1,600 V	1,800 ~ 2,000 V
直流電流	50 ~ 120 kA	310 ~ 370 kA	400 ~ 500 kA
直流電力	25 ~ 60 MW	350 ~ 500 MW	700 ~ 900 MW

これを補償して定電流での操業を可能とするため、変圧整流装置には直流電圧粗制御用の負荷時タップ切換装置（電圧調整用変圧器に内蔵）と、微調整用の電圧調整リアクトル（VCR：Voltage Control Reactor）を搭載している。

表1に示すように、電解設備側の要求電気仕様は年々増大しており、これに対応するため変圧整流装置も大容量化が続いている。大容量化に伴い、変圧整流装置は次のような課題が生じている。

- 電源品質低下防止のための高調波対策
- 小型化(省フットプリント化)
- 高電圧化や大電流化に対応した設計の信頼性向上
- 安全性の確保

これらの課題解決に向けて、変圧器、整流器、電源システム全体に対して富士電機が行っている取組みについて述べる。

3 変圧器における取組み

3.1 巻線配置変更によるインピーダンス変動の抑制

アルミニウム精錬設備向け変圧整流装置の電圧調整用変圧器には、0Vから定格電圧（最大2,000V）まで、直流電圧を連続制御することが求められる。このため、107タップという多段の負荷時タップ切換器（OLTC：On-Load Tap Changer）を採用することが多い。

タップ位置が変わるとインピーダンスが変動し、電源品質低下の原因となるが、特に粗タップ位置が変化するところではインピーダンスの変動が大きい。このため最新の設備では、従来の巻線配置から一次巻線と二次巻線を入れ替えた構成を採用した。図3に、一次-二次間インピーダンスの変化例を示す。巻線配置変更後の方がインピーダンス

の変動が小さいことが分かる。

インピーダンス変動が小さくなることで、インピーダンスと電流の積として求められる無効電力の変動も抑えられることから、システムの安定性は向上する。また、こうした電源品質の低下を防止する効果に加え、OLTCの限流抵抗値に対するストレスが低減することから、本対策は、OLTCの信頼性向上にも寄与している。

3.2 設備の小型化

前述したように、電圧調整用変圧器は、107タップのOLTCとすることが多い。107タップを実現するために、従来は6セクションの粗タップと18セクションの密タップを持つ結線を採用していた。最新の設備では、密タップを突き上げ方式（粗タップに電圧を足す方式）からぶら下げ方式（粗タップから電圧を引く方式）にすることで、粗タップを5セクションにして製品体格をコンパクトにしている。この対策により、変圧器の体格を従来比88%に小型化した。

図4に最新の電圧調整用変圧器の結線図を、図5にタッ

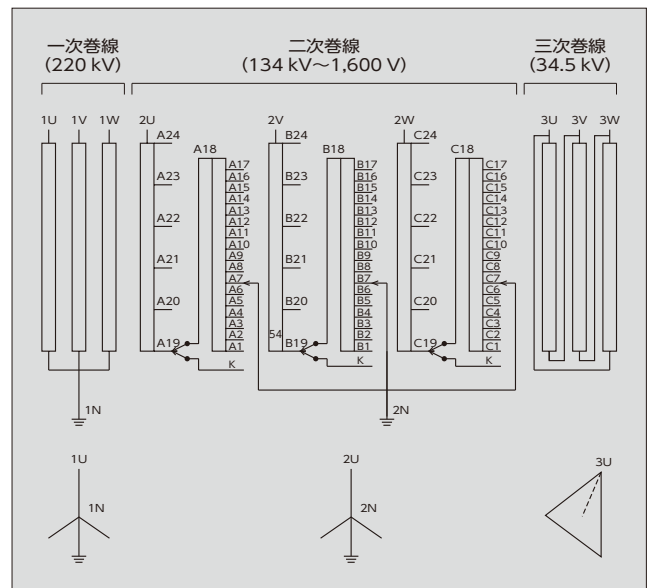


図4 電圧調整用変圧器の結線図

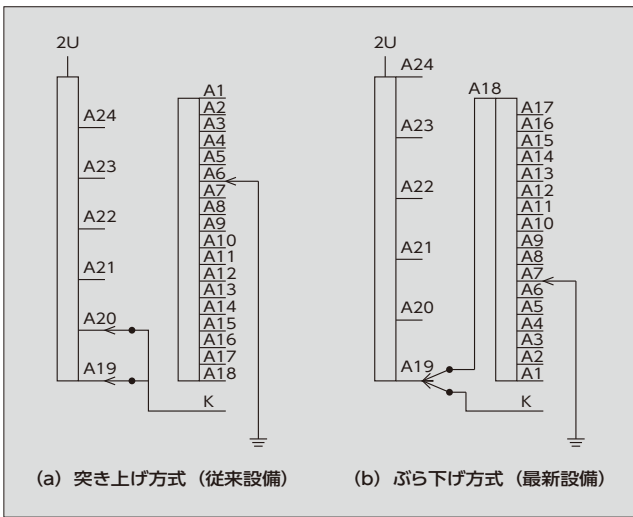


図5 タップ構成の比較

図5の比較を示す。

3.3 高信頼性設計（絶縁破壊の防止）

最近のアルミニウム製錬設備の受電電圧は220kV程度が一般的で、産業用の変圧器としては最高電圧クラスである。このため中間電圧も高い。一方で、電圧調整用変圧器の二次巻線は、図4の電圧調整用変圧器の結線図に示すとおり、107タップを実現するために複数の粗タップと一つの密タップで構成されており、通常の変圧器と比較して端子数は非常に多い。このため二次巻線の絶縁破壊を防止するためには、印加端子だけではなく、各端子における電位振動や電界分布を正確に把握して、絶縁設計に反映する必要がある。解析内容の代表例について述べる。

(1) 電位振動解析

一次巻線(1U、1V、1W)に220kV印加したときの、二次巻線の各端子の移行電圧と電位分布、ならびに二次巻線(2U)に印加したときの、二次巻線の各端子の電位分布を、電位振動解析に基づく自社開発プログラムで試算した。一例として、電位分布の試算例を図6に示す。図6は、二次巻線(2U)に印加したときの2U端子-GND間の印加波形と、A23端子-GND間に発生した電位を、ある絶縁設計条件を適用して算出した結果であるが、A23端子-GND間に発生した電圧は、全ての時間帯において100%を下回っている。このことから、印加による絶縁破壊は発生しておらず、適用した絶縁設計条件は有効と判断できる。こうした解析から、二次巻線や端子において必要な絶縁距離や絶縁紙の厚さを確保し、絶縁破壊を防止している。

なお、製作完了時に電位分布測定を実施し、解析結果と実測値がほぼ合っていることも確認した。

(2) 電界解析

有限要素法で計算する自社開発のプログラムにより、上述の電位振動解析結果に基づいた各端子の電位を入力し、各巻線部の電界分布と強度をシミュレーションした。図7に二次巻線と三次巻線間の電界分布の例を示す。二次巻

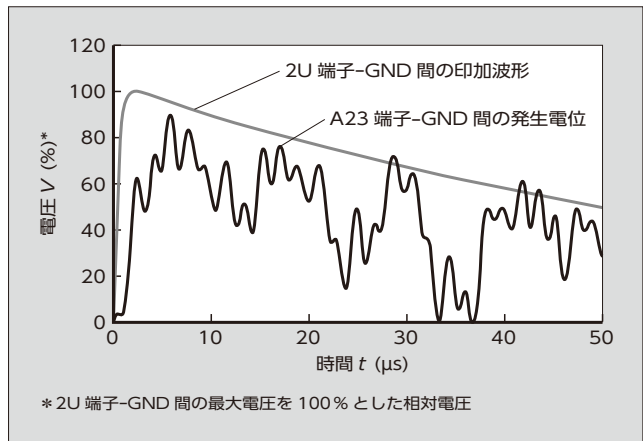


図6 電位分布の試算例

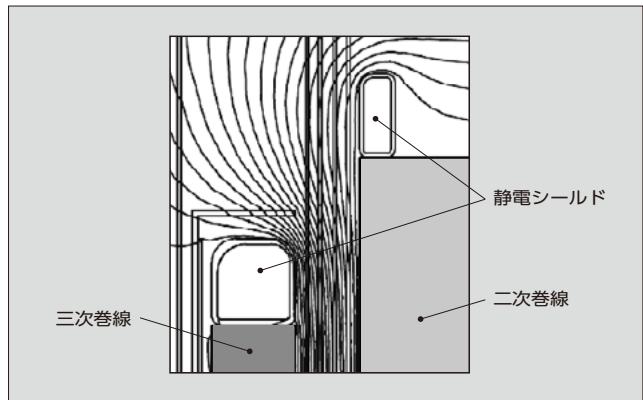


図7 二次巻線と三次巻線間の電界分布の例

線-三次巻線間だけでなく、各端子間の電界強度をシミュレーションし、各部の電界強度が許容値以下であることを確認し、必要な絶縁距離を確実に確保できる設計としている。

また、上述に加え、各タップでの磁界分布解析、インピーダンスの計算、機械的強度の計算および渦電流損の計算を行い、その結果を設計に反映することで、タンク温度、インピーダンス、機械力、損失などの顧客要求値を満たしている。

4 整流器における取組み

整流器の大電流化に伴い、内部短絡事故の未然防止策だけでなく、万一の事故発生時に被害を最小化する取組みが必要である。

4.1 整流器の内部短絡事故の未然防止策

整流器の素子に異常電流（過負荷・過電流・短絡、電流の回り込み）が流れると素子内部の圧力が上昇する。その際、素子ケースが内圧に耐えきれないと破裂し、整流器函内（容積38.3m³）にガスを放出する。その対策として実施していることを次に示す。

(1) ヒューズによる素子の保護

異常電流から素子を保護し、他の素子への影響を最小限にするために、ヒューズを直列に繋げている。ヒューズに

は、整流器に合う電圧・電流仕様を満たすだけでなく素子ケースの破裂前に異常電流を遮断する速断性が求められる。特に、アルミニウム製錬設備では大電流が用いられることから、ヒューズの遮断性能証明のため、実証試験にて確認を行っている。図8(a)に実証試験内容の試験回路を、図8(b)に素子と素子保護用ヒューズから成る素子模擬短絡試験装置を、図8(c)に短絡電流の波形を、図8(d)にヒューズ遮断時の電流波形を示す。図8(c)に示す短絡電流（最大254 kA）が試験回路に流れた場合、素子保護用ヒューズにより電流が遮断されるが、図8(d)のように遮断までの期

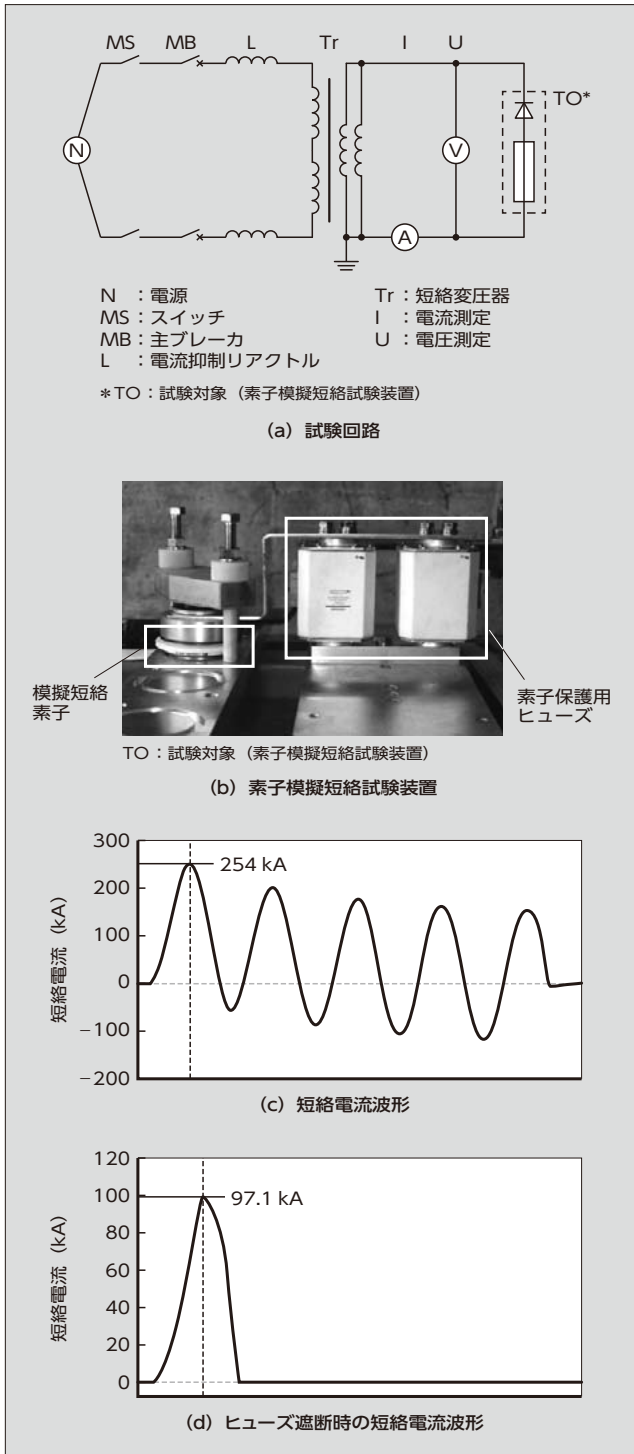


図8 実証試験内容

間に素子に電流が流れる。ただし、遮断電流値は97.1 kAに抑えられ、素子破壊を生じる99.5 kAを下回っていることから、素子ケースの破壊には至らない。

(2) バリア設置による内部短絡事故防止

異常電流により素子ケースが破裂した場合、整流器函内に放出されたガスによる内部短絡事故を防止するため、図9に示すように主回路導体 (P、N 極端子) の間にバリア

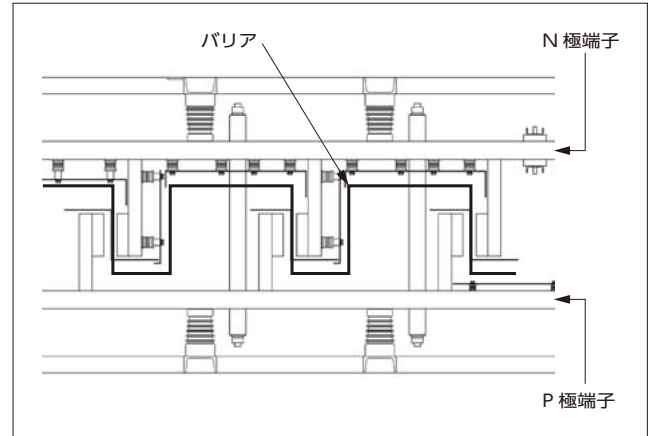


図9 極間バリアの配置 (平面図)

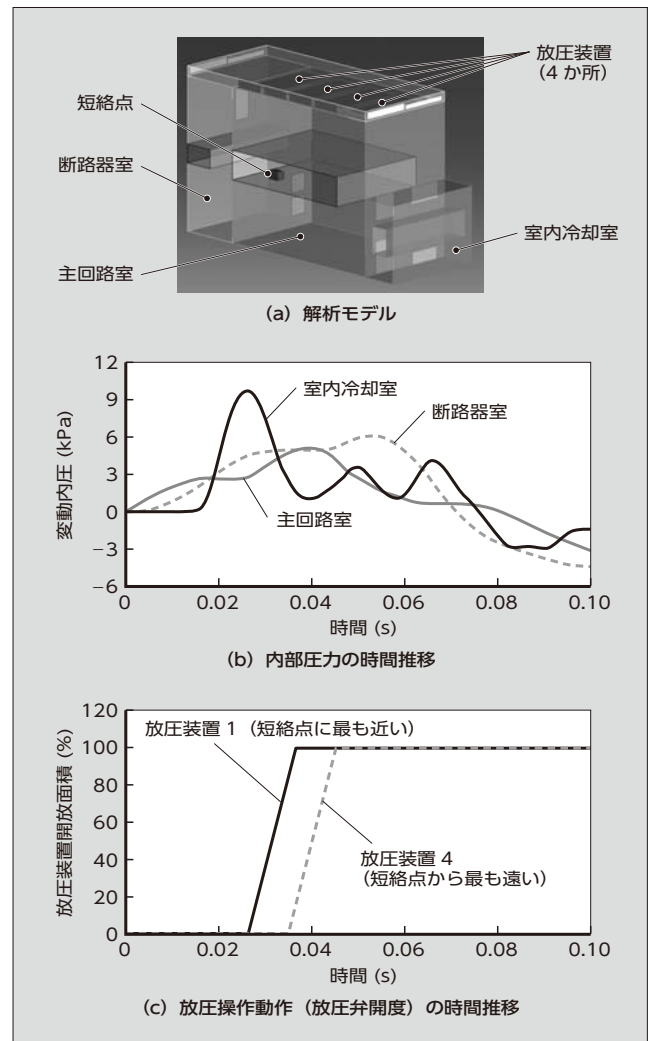


図10 アークエネルギーと内部圧力上昇の推移

特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

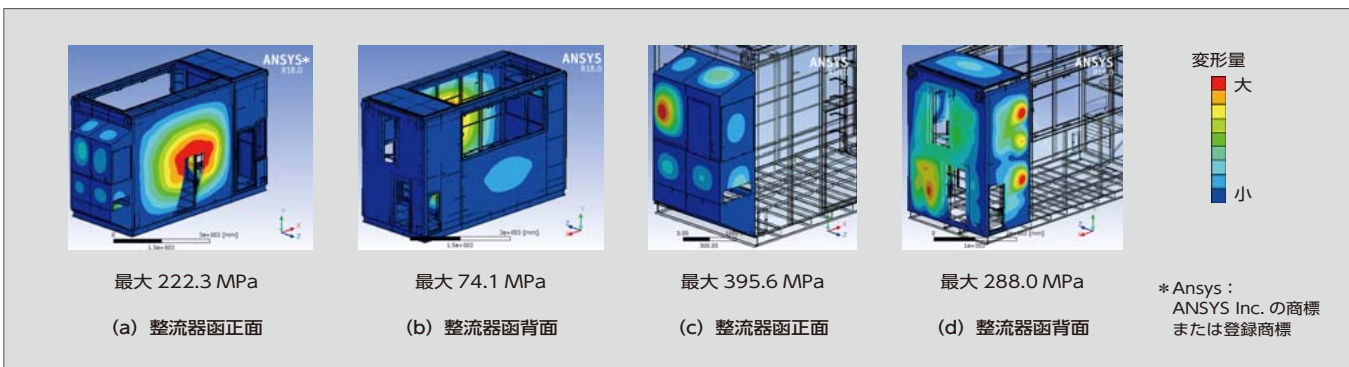


図 11 整流器函の応力解析による変形量の確認

(仕切板)を入れて双方を物理的に隔離している。

4.2 事故発生時の整流器函損傷防止策

整流器の内部短絡事故に対して十分な未然防止策を施してはいるが、万一内部短絡事故が発生した場合、内部圧力の上昇による破損を防止するため、整流器の天井部に放圧装置を設置している。この放圧装置が動作し、内部圧力を函外に逃がす間の整流器函の損傷有無を次の方法で解析し、評価した。

(1) 整流器函内の内部圧力上昇値の算出

図 10 にアークエネルギーと内部圧力上昇の推移を示す。図 10 (a)のような解析モデルを設定し、主回路導体間の距離が最少となる位置を短絡の起点(短絡点)と仮定した。まず、この短絡点からの距離、および整流器運転点で発生する短絡電流の関係から、発生するエネルギー(アークエネルギー)を算出した。次いで、アークエネルギーが函内部の空気温度を上昇させることで生じる圧力変化を試算した。結果は図 10 (b)のように、主回路室、断路器室、室内冷却室のいずれも目標としていた 10 kPa 以下となった。なお、図 10 (c)に示すように短絡から約 0.03 s で短絡点に最も近い放圧装置 1 が作動し、短絡点から最も遠い放圧装置 4 が全開放となったのは、短絡から約 0.05 s 後であった。このように短時間で放圧装置が作動することで、函内の圧力上昇を抑制できた。

(2) 整流器函の応力解析

前述の内部圧力の上昇に対して、整流器函の壁面にかかる応力を解析し、その応力から整流器函の変形量を確認した。図 11 に整流器函の応力解析による変形量の確認結果を示す。図中の赤色の箇所が変形量の大きい部分であるが、破損に至らない応力(400 MPa 以下)であることを確認した。

結果として、仮に整流器内部で短絡が発生しても、整流器函が破裂に至る前に放圧装置が動作して内部圧力を函外に放出するため、整流器函は破損しないことを確認した。

5 変圧整流装置の高調波対策

アルミニウム製錬設備では、変圧整流装置だけでなく、交流電源や高調波フィルタも冗長化する構成が一般的である。しかし、近年は変圧整流装置の電源構成が複雑化し、構内自家発電機に加えて構外商用電源から受電することも多い。このため電源系統には複数の運転パターンが存在し、その都度、変圧整流装置から見た電源側の高調波インピーダンスが変動することになる。さらには、装置の大容量化に伴う高調波発生量も増加している。

富士電機では、現地での高調波発生量をより正確に予想するため、系統解析技術の開発を続けている。特に、アルミニウム製錬設備向けの変圧整流装置では、EMTP-RV^(注1)に代表される汎用系統解析ソフトウェアを用いて、次に示す解析モデルの精緻化に取り組んでいる。

- (a) 複数台構成による多相整流モデル(72 相整流など)
- (b) 複数台の同号制御アルゴリズム
- (c) OLTC モデルと電圧調整リアクトルモデル

これらに加え、電源系統および直流負荷設備をモデル化することで、現地での運転条件を精緻に予想し、従来は難しかった三相アンバランスによる偶数調波や非理論調波の発生量を推測することが可能となっている。

6 あとがき

素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源について述べた。変圧整流装置は、近年拡大を見せているグリーン水素などの素材製品の製造にも欠かせない設備であり、今後ますますその重要性が高まっていくと思われる。富士電機が培ってきた技術を活用し、低炭素社会の実現に向けた取組みに今後も貢献していく所存である。

〈注 1〉 EMTP-RV : Electro Magnetic Transient Program - Restructured Version の略であり、電力系統の瞬時値解析プログラムである。



渡部 幸平

産業用大容量変換装置のプラントエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレエネルギー事業本部変電システム事業部産業電源技術部主任。



浅田 雅人

整流器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第二部主任。



岡崎 洋平

変圧器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第一部。



リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した 中容量無停電電源装置

Medium-Capacity Uninterruptible Power Systems with Improved Replaceability and Stable Operation

川崎 大介 KAWASAKI, Daisuke

附田 原大 TSUKUTA, Motohiro

筒井 重男 TSUTSUI, Shigeo

停電や電源トラブル時の給電継続のため、工場や放送設備向けの中容量無停電電源装置（UPS）は需要が高まっている。各負荷設備の仕様に対応するため、中容量 UPS は多様な製品ラインアップが求められる。また、設備更新ニーズへの柔軟な対応や、安定稼働を実現する予知保全も望まれている。富士電機が新たに開発した中容量 UPS 「FX シリーズ」は、設置面積削減やバッテリー適用電圧範囲の拡大により、リプレースにおける多様なニーズに対応が可能である。また、異常兆候検知機能による部品故障診断で、劣化が進んだ部品を故障前に交換でき、安定稼働性を向上させた。

The need to continue to supply electricity even in a power outage or power supply malfunction has been increasing the demand for medium-capacity uninterruptible power systems (UPSs) in factories and broadcasting facilities. The product line of medium-capacity UPSs need to include varied types to meet the specifications of individual load equipment. Also required are flexibly meeting the need for equipment replacement and predictive maintenance for stable operation. Fuji Electric has newly developed its “FX Series” medium-capacity UPSs to meet various needs for replacement by reducing their footprint and expanding the range of the battery voltage. A component failure diagnosis with abnormality symptom detection functions has allowed degraded parts to be replaced before failure, improving operational stability.

1 まえがき

工場や放送設備、通信設備などは中容量（10～100 kVA）200 V で稼働するものが多い。こうした設備では、小規模でさまざまな容量の電源システムが構築されており、停電や電源トラブル時でも給電を継続するため無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の需要が高まっている。

そこで従来製品の仕様範囲を維持した上で、設置面積の最小化、バッテリー適用電圧範囲の拡大により、既設更新ニーズに柔軟に対応し、さらに富士電機独自の異常兆候検知機能による部品故障診断が可能な、中容量 UPS 「FX シリーズ」を新たに開発した。本稿では、リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した中容量無停電電源装置について述べる。

2 従来の中容量 UPS

2.1 概要

UPS は電圧変動や停電などの電源障害が発生しても、バッテリーに蓄えたエネルギーによって、定電圧、定周波数の出力電圧で負荷設備に安定した電力を供給する装置である。

図1に、停電・復電時の電流と電圧の波形データを示す。停電が発生して入力電圧が途絶しても、連続して安定した電圧を供給している。また、停電・復電の際の出力電圧の変動は2%以下で、電圧変動による突入電流発生が抑制されるため、負荷設備に影響を与えず、安定したシステム運用が可能となる。

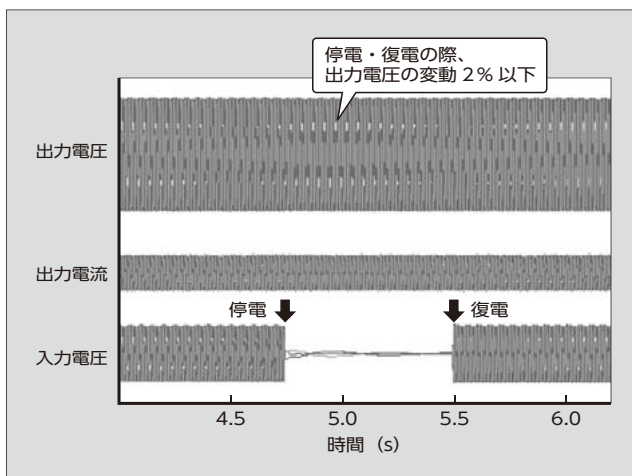


図1 停電・復電時の電流と電圧の波形データ

2.2 製品ラインアップ

富士電機の200 V系UPSの製品ラインアップ（従来製品）を表1に示す。多種多様な顧客仕様に対応するため、絶縁・非絶縁、三相・単相、容量10～100 kVAに対応した「UPS6000D-1」「UPS6100D-3」「UPS7100MX-3」の3シリーズで製品化していた。

2.3 従来機種の課題

(1) 小型化

設置面積が機種ごとに異なるため、リプレースへの柔軟な対応が難しかった。また、設置面積の制約がある顧客に対応するため、さらなる小型化も必要であった。

(2) バッテリー適用電圧範囲の拡大

中容量UPSはバッテリー盤を組み合わせる構成が主となっているが、従来製品のバッテリー電圧は、360 V（180

表1 富士電機の200V系UPSの製品ラインアップ(従来製品)

シリーズ	絶縁方式	相数	電圧(V)	容量(kVA)
UPS6000D-1	絶縁	単相	200/100	10~100
UPS6100D-3		三相	200	
UPS7100MX-3	非絶縁			

セル) または 384V (192セル) のみであった。このため、リプレースの際にバッテリー盤は更新せずに残し、UPSのみを更新したいという顧客ニーズに対応できない場合があった。

(3) 力率改善

従来の中容量UPSの定格負荷力率は0.8が主流であったが、最近は入力力率0.9を求める設備も増えてきた。こうしたより多くの電力を必要とする顧客ニーズに対し、従来製品では1ランク容量が大きいUPSを選定することが多かったが、コストやサイズの点で顧客要望を満たせない場合があった。

(4) 設置工期の短縮

従来製品では、UPS盤と入出力盤をそれぞれ搬送し、現地で配線接続作業を行っていたが、工期長期化の一因となっていた。

(5) 安全性向上

中容量UPSの保守に関しては、24時間対応の保守体制を取るなど、給電継続を確実にするための取組みがされている。こうしたきめ細やかな保守サービス体制に加え、異常兆候検知機能による部品故障診断などの安全性向上技術を新たに適用することで、UPSの安定稼働性のさらなる向上が必要であった。

③ 中容量UPS「FXシリーズ」

3.1 概要

従来製品の仕様範囲を維持した上で、新たに開発した中容量UPSのFXシリーズに集約した。FXシリーズの製品ラインアップを表2に示す。系列拡充を図る一方で、プラットフォーム設計を採用し、シリーズ全体の外形寸法は最終的に2種類にする予定である。また、部品の共通化により故障時の部品交換が容易となるなど、従来製品より保守性も向上している。

開発した「UPS6600FX」(絶縁、三相、200Vタイプ50kVA機)の外観を図2に、仕様を表3に示す。

表2 「FXシリーズ」の製品ラインアップ

シリーズ	絶縁方式	相数	電圧(V)	容量(kVA)
UPS6600FX	絶縁	単相	200/100	10~100
UPS7600FX		非絶縁	三相	



図2 「UPS6600FX」(絶縁、三相、200Vタイプ50kVA機)

表3 「UPS6600FX」(絶縁、三相、200Vタイプ50kVA機)の仕様

項目		性能・仕様
UPS方式		常時インバータ給電方式
定格出力容量		50kVA
交流入力	相数(線数)	三相3線
	電圧	200/210V±15% (220Vはオプション)
	周波数	50/60Hz±5%
	力率	0.98以上
	電流高調波ひずみ率	5%以下
交流出力	相数(線数)	三相3線
	電圧	200/210V±1% (220Vはオプション)
	負荷力率	0.9(遅れ)
	過渡電圧変動	5%以下(負荷0⇔100%)
	出力電圧ひずみ率	2%以下(線形負荷) 5%以下(整流器負荷)
	外部同期周波数範囲	±5%以下
	過負荷耐量	125% 10min 150% 1min

3.2 動作

図3にFXシリーズの主回路ブロック図を示す。交流を直流に変換する整流器と、直流を交流に変換するインバータからなる常時インバータ給電方式を採用している。さらに直流入力にはバッテリーの充放電制御を行うチョッパが接続される。

交流入力が正常範囲にある通常運転状態では、インバータによって定電圧定周波数の安定した電力を負荷に供給する。整流器はUPS交流入力電流の力率がほぼ1の正弦波となるように制御を行い、チョッパは蓄電池の充電を行う。交流入力に停電が発生すると、チョッパはバッテリーの電圧を適正な直流電圧に昇圧し、インバータは安定した交流に変換して供給する。

チョッパについては、前述の動作のほか、過負荷時、

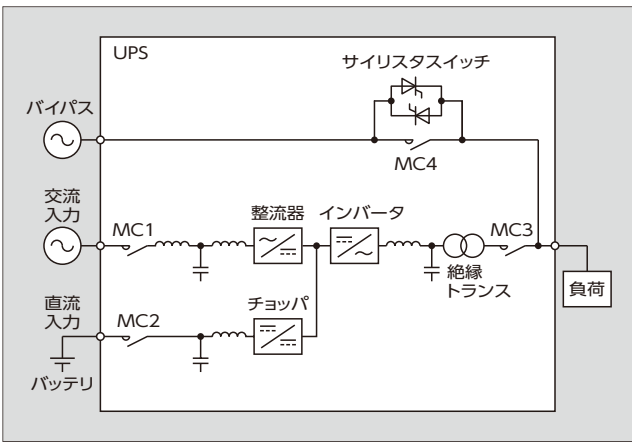


図3 「FXシリーズ」の主回路ブロック図

入力電圧低下時、ならびに復電時にバッテリーから系統に徐々に電力を切り換える復電パワーウォークイン時など、交流入力とバッテリーの両方から負荷に電力を供給する際のバッテリーの放電制御動作も行っている。

装置に障害が発生した場合など、インバータが電力を供給できない際は、電力の供給をインバータからバイパスに切り換える動作が行われる。

3.3 特徴

(1) 小型化

FXシリーズを構成する多様な製品群を考慮しつつ、部品選定・部品配置と冷却構造を最適化した。これにより、従来製品の中で設置面積が最大の機種に対し、幅を700mmから600mmに短縮し、設置面積を14%削減した。図4にUPS6600FX（絶縁、三相、200Vタイプ50kVA機）の外形を示す。

(2) バッテリー適用電圧範囲の拡大

FXシリーズはチョッパを搭載し、直流電圧を制御することで、バッテリー電圧を288～384V（144～192セル）

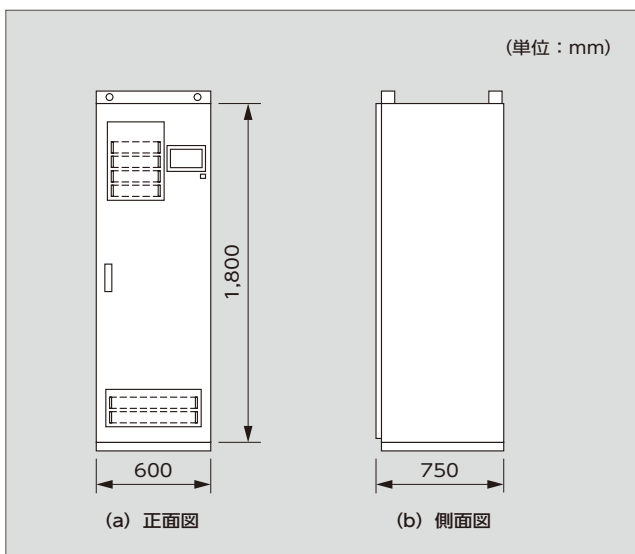


図4 「UPS6600FX」（絶縁、三相、200Vタイプ50kVA機）の外形

に対応できるようにした。

これによりUPSと組み合わせるバッテリー盤の適用範囲は、富士電機の従来製品だけでなく、他社製品にも対応できるようになった。また、UPS出力容量に対して最適なバッテリー電圧の選択が可能になった。

(3) 定格負荷力率0.9への対応

力率向上のためにUPSの出力性能を向上させると、装置発熱量が増加するため、冷却構造が大型化する。そこでFXシリーズは、冷却構造の効率化により冷却性を向上させることで、装置の外形寸法を大型化することなく、中容量UPSにおいて定格負荷力率0.9を他社に先駆けて実現した。

(4) 設置工期の短縮

UPS6600FXの50kVA以下の製品ではUPS盤と入出力盤をあらかじめ組み合わせて、盤間で配線作業ができる構造にすることで、盤を一体化し搬送するようにした。これにより、現地での盤間配線作業を不要にし、設置工期短縮を実現した。

(5) 保全性向上技術

(a) 異常兆候検知機能による部品故障診断

FXシリーズでは、故障停止時の故障箇所の特定期間や部品の性能劣化に関して、数値解析に基づいた推定を行う、富士電機独自の異常兆候検知機能による部品故障診断（特許出願中）⁽¹⁾を搭載した。

これは、UPSの電流波形、電圧波形の振幅および微分値（時間変化）を多変量解析技術で解析して、劣化の度合いを表す指標である劣化推定値を算出し、しきい値との乖離（かいり）から、部品の劣化診断や交換時期予測を行うものである。

一例として、出力フィルタのカットオフ周波数を模擬的に上げることで、フィルタ性能が劣化した状態を再現し、この時の出力電圧・電流の波形と、これらのデータを多変量解析して得られた劣化推定値を示す（図5）。出力フィルタが性能劣化すると、出力電力や出力電流にUPSのスイッチングリップルが漏れるため、出力波形のひずみが増加するが、図5の出力電圧や出力電流の波形

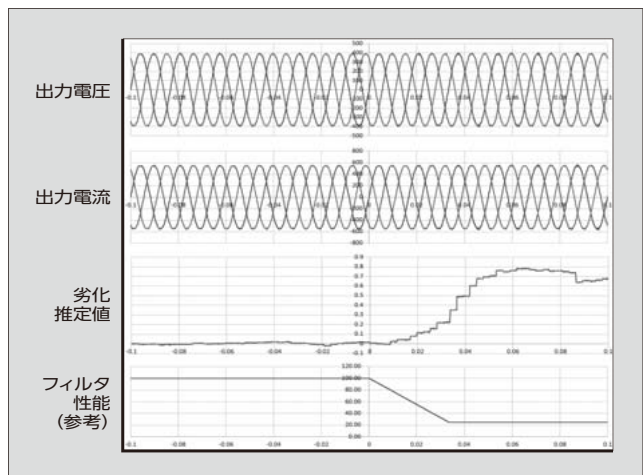


図5 出力フィルタ劣化時の動作波形と劣化推定値

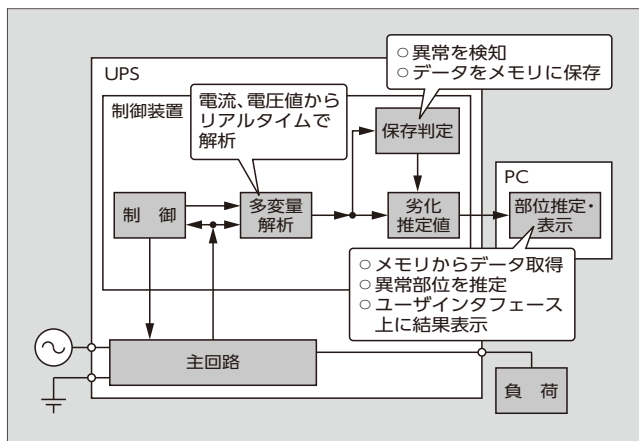


図6 数値解析の概要

には見かけ上、顕著な変化が見られない。しかし劣化推定値は出力フィルタの性能劣化を反映して変化する。

数値解析の概要を図6に示す。制御装置内で検出した電圧波形や電流波形をリアルタイムで解析し、算出した劣化推定値を基に異常を検知する。また、制御装置内のメモリにこれらのデータを保存する。

保守サービス員は定期的な保守の際に、保存された劣化推定値を取得し、これが納入時の値とどの程度乖離しているか比較することで、現状の部品の劣化状況を把握し、交換時期を予測する。図7に劣化推定値を使用した交換時期予測イメージを示す。劣化が進んだ部品を故障前に発見し、交換することで、障害発生を未然に防止できる。

また、万一UPSに故障などの障害が発生した際、保守サービス員が現地で対象機種からデータを取り出し、交換が必要な部位を短時間で推定する。この推定結果に基づいて、部品交換を実施することで、復旧までの時間を短縮できる(図8)。

(b) ワイドカラー液晶タッチパネルの採用

FXシリーズは、盤面に従来製品より大きな7インチワイドカラー液晶タッチパネルを採用し、シンプルで洗練されたデザインの操作画面に、運転状態、故障履歴や操作ガイダンスを表示させることで、保守性を向上させている。

(c) ネットワーク接続、運転状態監視対応

FXシリーズは産業機器の接続方式として広く採用されているModbus仕様の通信カードを標準で装備している。Modbusを用いた顧客設備のネットワークに接続することで、ネットワーク上でのFXシリーズの常時監視(運転状態監視、故障情報通知)が可能になる。

また、Web/SNMP通信カードを搭載してネットワークに接続することにより、標準ブラウザ上でUPSの運

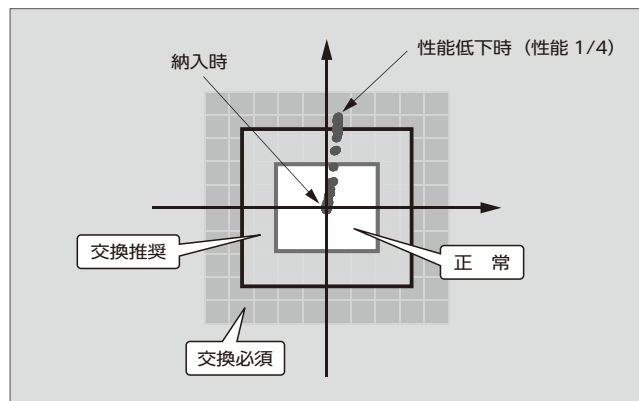


図7 劣化推定値を使用した交換時期予測イメージ

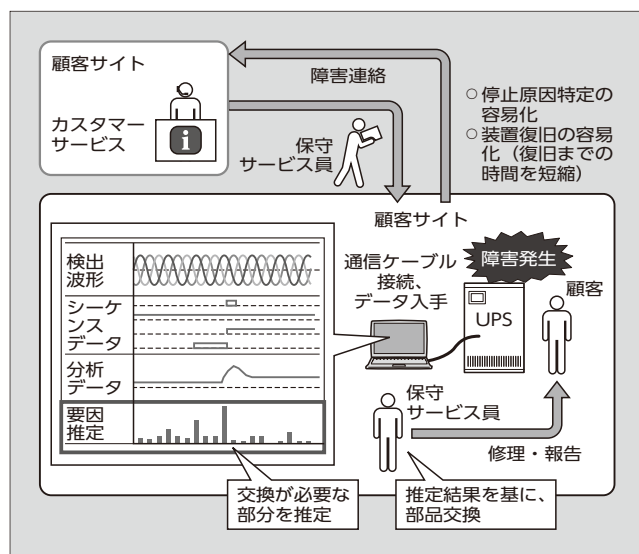


図8 障害発生時の対応

転状態を監視でき、故障情報をメールで通知する機能も備えている。

運転状態監視については、専用監視ソフトウェアにより、出力電力トレンド、UPS動作履歴、故障履歴などを監視することもできる。

3.4 開発設計における品質向上に向けた取組み

FXシリーズの開発段階では、シミュレータ(HILS: Hardware-in-the-Loop Simulator)を適用したソフトウェアの検証を実施した。図9に検証システムの概略図を示す。これによりバグやエラーを発見して修正し、製品の安定稼働を実現している。

また、実機検証では実現困難な入力条件、負荷条件における設備の挙動を模擬し、これまで発見が難しかった不具合をあらかじめ発見して修正するとともに、万一不具合が発生した場合の早期復旧、停止時間の最小化につながる知見を蓄積した。

〈注〉 Modbus : Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

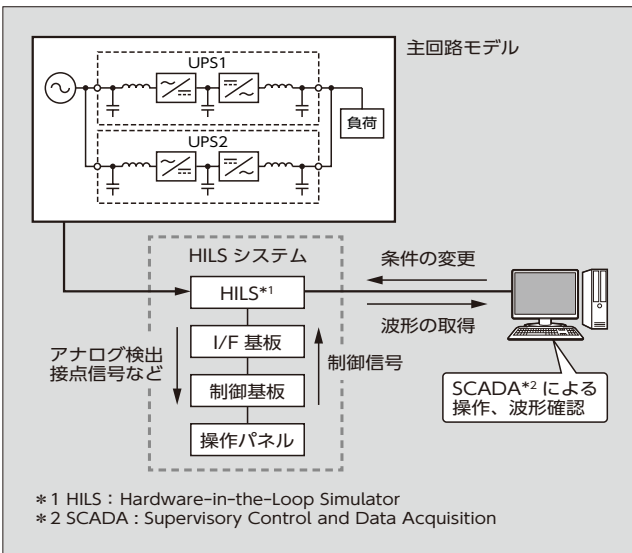


図9 検証システムの概略図

4 あとがき

リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した中容量無停電電源装置について述べた。定格負荷力率を0.9とする出力性能向上を図る一方で、装置設置面積を削減してリプレース対応を強化し、加えて富士電機独自の予知保全に関する機能である、異常兆候検知機能を搭載して安定稼働性を向上させたことで、これまで以上に電源設備への幅広い適用が期待される。

今後は、本製品のラインアップの拡充を進めていき、

2023年度までに全機種の製品リリースを完了する予定である。また、異常兆候検知機能による部品故障診断を充実させていき、さらなる信頼性の向上を図り、お客さまの期待に応じていく所存である。

参考文献

- (1) 梅沢一喜ほか. 異常要因特定方法、異常要因特定装置、電力変換装置及び電力変換システム. 特開2020-137145. 2020-08-31.



川崎 大介

中大容量UPSの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部開発統括部変換装置開発部主任。



附田 原大

中大容量UPSの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部開発統括部変換装置開発部主任。



筒井 重男

M&A 戦略立案・実行業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部電源システム技術第一部課長。



環境負荷低減に貢献する パームヤシ脂肪酸エステル変圧器

Palm Fatty Acid Ester Filled Transformer That Contributes to Reducing Environmental Load

彦坂 知行 HIKOSAKA, Tomoyuki

千葉 公一郎 CHIBA, Koichiro

油入変圧器の絶縁油に用いられてきた鉱油は、廃棄時の CO₂ 排出、漏油時の環境汚染といった問題がある。また、植物系の絶縁油は冷却効果や酸化安定性などに課題があった。富士電機はライオン株式会社と共同で、パームヤシ油をエステル化・蒸留・精製処理を行うことで、低動粘度・高酸化安定性を持つパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）を開発した。さらに、PFAE を用いたパームヤシ脂肪酸エステル変圧器を開発し、優れた絶縁・冷却・長期安定性を確認した。PFAE は、廃棄処理時も特別な処理が不要で再利用でき、土壌に漏油した場合も微生物による生分解により環境への影響を小さくできる。

Mineral oil, which has been used as the insulating oil in oil-filled transformers, has problems such as CO₂ emission at the time of disposal and environmental pollution at the time of leakage. On the other hands, vegetable-based insulating oils suffer from a poor cooling effect and low oxidation stability. It is against this backdrop that Fuji Electric, in collaboration with Lion Corporation, developed a palm fatty acid ester (PFAE) with low kinematic viscosity and high oxidation stability through esterification, distillation and purification process of palm oil. Furthermore, Fuji Electric also developed a palm fatty acid ester filled transformer using the PFAE and confirmed that it possesses excellent insulating, cooling, and long-term stability properties. PFAE can be reused as diesel fuel without specific treatment when being disposed, and even if it leaks into the soil, the biodegradation reaction by microorganisms can reduce the impact on the environment.

1 まえがき

カーボンニュートラルの実現に向け、近年、各産業界で石油代替資源を使用した製品が求められている。油入変圧器の絶縁油としては、一般的に鉱油が用いられているが、廃棄処理時の燃焼による CO₂ 排出、漏油時の環境汚染といった問題から対応が必要とされている。

富士電機はライオン株式会社との共同開発により、パームヤシ油を原料に、他の植物油より、低動粘度、高酸化安定性を持つパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE：Palm Fatty Acid Ester）を開発した。

本稿では、この PFAE を、油入変圧器の絶縁油に採用した、環境負荷低減に貢献するパームヤシ脂肪酸エステル変圧器について述べる。

2 油入変圧器

2.1 概要

変圧器は鉄心に巻いた複数の巻線間の電磁誘導現象を利用して、交流電圧の大きさを変換する機器であり、産業利用されてから既に 100 年以上の歴史がある。

変圧器は、その構造上、鉄心のヒステリシス損失、巻線のジュール損失が発生する。通常、変換効率は 99% 以上であるが、容量が大きくなるほど損失分による発熱が問題となるため、数十 kVA 以上の容量の変圧器は絶縁・冷却媒体として絶縁油を用いた油入変圧器となる。富士電機では発電所や変電所で使われる電圧 765 kV、容量 1,100 MVA までの油入変圧器を製作している。

2.2 課題

(1) 絶縁油の廃棄処理と漏油時の環境への影響

油入変圧器は定格負荷での使用条件で 30 年の寿命が期待されている。このため、絶縁・冷却媒体として用いられる絶縁油には、必須機能として次に示す 3 点が要求される。

(a) 絶縁性

絶縁油は、変圧器内部の鉄心・巻線・リードなどの絶縁を目的として利用されるものである。特に、電力系統への直撃雷、誘導雷などで変圧器にサージ高電圧がかかった場合の巻線絶縁を確保する。

(b) 冷却性

変圧器内で発生する損失による温度上昇を抑制するための冷却性を確保する。

(c) 長期安定性

長期利用に対して酸化劣化せず、絶縁性と冷却性を維持する。

原油を蒸留し、精製処理して作られる鉱油は、これら 3 点の必須機能を満たすことから、油入変圧器の絶縁油としてこれまで広く用いられてきた。

その一方で、鉱油変圧器を更新、廃棄する場合、タンク内の鉱油を抜いて燃焼廃棄するため、CO₂ の排出を伴うという問題があった。また、油配管パッキンなどの劣化や内部故障により、万が一鉱油が漏油した場合、鉱油は生物分解性が低いため、土壌や地下水中に拡散し、長期間滞留することから、深刻な環境汚染を引き起こす可能性がある。これらへの対策が、近年の地球温暖化対策や環境保全面から必要となっている。

(2) 小型化

新規、あるいは更新による油入変圧器の導入において、設備の小型化は恒久的な課題である。小型化することで、顧客は土地の有効活用が図れ、また、現地への輸送や据付けが容易となるため、早期の設備稼働が可能となる。

③ パームヤシ脂肪酸エステル変圧器

2.2節で述べた鉱油変圧器の課題解決のため、PFAEを絶縁・冷却媒体に用いたパームヤシ脂肪酸エステル変圧器を開発した。現在、自冷式の電圧66/77kV、容量30MVAまで製作している。

3.1 絶縁油 (PFAE)

(1) 特徴

変圧器の絶縁油用に植物油を原料とした鉱油代替油を開発した。ベース油には植物油のうちで生産量が最大で、安定供給が可能なパームヤシ油を選定した。パームヤシ油は生分解性が高く、魚毒性（水に溶けた化学物質が魚類に及ぼす毒性）がないことから、漏油した際の環境負荷は鉱油に比べてはるかに小さい。ただし、そのままでは動粘度が高く、冷却性の確保の面で油入変圧器の絶縁油として不適切なため、エステル化（酸とアルコールからエステルを生成する）・蒸留・精製処理による低動粘度化を行うことで、飽和脂肪酸分子構造を持ち、化学的に安定で酸化しにくいPFAEを開発した。

表1にPFAEの主な特性を各種絶縁油と比較して示す。⁽¹⁾
PFAEの絶縁油としての特徴を次に示す。

(a) 絶縁性

表1に示すとおり、他の植物油と同様に、比誘電率が鉱油よりも高く、絶縁紙の比誘電率に近いことから、PFAEを絶縁油に利用することで、絶縁破壊特性が向上する。

(b) 冷却性

菜種油、大豆油に対して極めて動粘度が低く、さらに鉱油よりも低い値を示すことから、冷却性に優れる。このため、PFAEは大容量の導油風冷式変圧器にも適用できる。

(c) 長期安定性

鉱油を酸化劣化処理（JIS C 2101に準拠）すると、図1に示すように、変色や黒色のスラッジ発生（底部に沈降、または油面に浮上）、^(注1)酸価の上昇といった変質の兆候が見られ、絶縁破壊電圧も低下する。

表1 PFAEの主な特性

特性	単位	鉱油	PFAE	菜種油	大豆油
密度 (15℃)	kg/L	0.87	0.86	0.92	0.92
動粘度 (40℃)	mm ² /s	7.7	5.1	35	32.2
引火点 (開放式)	℃	150	188	326	326
流動点	℃	-30	-38	-30	-20
比誘電率 (80℃)	-	2.2	2.9	2.9	2.9
誘電正接 (80℃)	%	0.003	0.51	0.05	0.54
体積抵抗率 (80℃)	TΩ・m	30	0.13	0.96	0.08
絶縁破壊電圧 (球2.5mm)	kV	>80	94	84	82

一方PFAEは、酸化劣化処理後も透明で、酸価の上昇はわずかであり、絶縁破壊電圧低下も少ない。このように長期間の使用でも酸化安定性が非常に高く、劣化しにくい。

(2) 廃棄処理

前述のとおり、鉱油変圧器更新の際に、鉱油は燃焼廃棄され、CO₂が発生する。これに対して、PFAEは、不純物を含まずエステル化処理された動粘度が低い油のため、特別な処理が不要で、そのままディーゼル燃料として再利用できる。⁽²⁾

ディーゼル燃料として使用された際にCO₂の発生を伴うが、パームヤシ生育過程で光合成による大気中のCO₂固定を行うため、カーボンニュートラルにも寄与する。

(3) 漏油時の環境負荷

PFAEの生分解性（OECDテストガイドライン301Fに準拠）を図2に示す。PFAEは28日後に77%が分解され、最終的には土中に存在する微生物により水とCO₂に分解

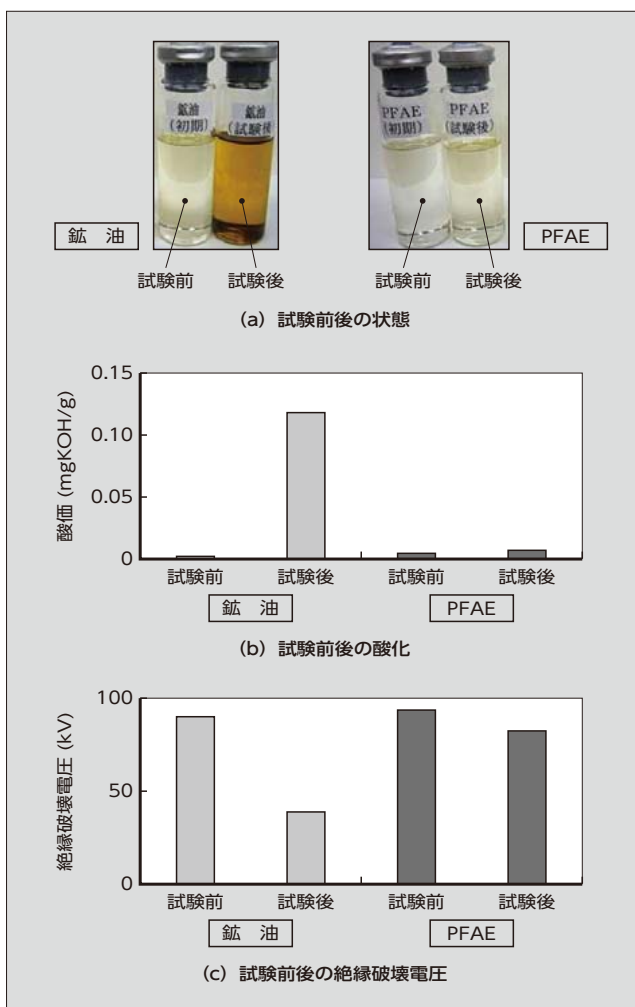


図1 酸化安定性試験結果

〈注1〉酸価：油脂の変質の指標であり、酸化や加水分解により値が大きくなる。変質が進むと、茶褐色への変色やスラッジの発生を伴う。

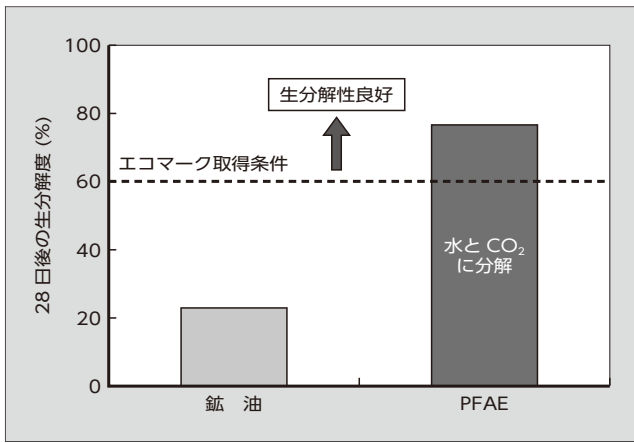


図2 生分解性

される。

魚毒性 (JIS K0102 に準拠) については、ヒメダカ 10 匹を 100 mg/L 濃度の PFAE 中に入れた場合の 96 時間の致死率が 0% で、毒性は極めて低い。

こうした特徴から、仮に PFAE が漏油しても、環境に与える影響は極めて小さいと言える。なお PFAE は生分解性、魚毒性のエコマーク取得条件を満たすことから、“生分解性潤滑油 Version 2.3”としてエコマーク認定 (第 07110003 号) を受けている。

また万が一、PFAE が漏油した場合の処理方法については、油汚染対策ガイドライン (鉱油類が対象) に基づいて検証した。土壤に漏油した場合は好気性微生物による生分解が進むが、浄化処理が必要になった場合でも、一般的な掘削除去の他、漏油現場にて図 3 に示す安価なバイオスパーキング法が適用可能である。

3.2 小型化

パームヤシ脂肪酸エステル変圧器は鉱油変圧器に対して寸法低減が可能である。一例として、6 MVA の整流器用変圧器を通常の鉱油 (耐熱クラス A 種) と PFAE (耐熱クラス E 種) で設計した場合、パームヤシ脂肪酸エステル変圧器では鉱油変圧器に対し、据付面積を約 72%、絶縁油量を 60% 程度に低減できる。次にその理由について説明する。

(1) 絶縁特性

図 4 に変圧器の巻線構造を模式的に示す。導体には銅が一般的に使われ、これにクラフト紙絶縁を施した巻線が鉄心の回りに同心円状に巻かれる。径方向に隣り合った巻線

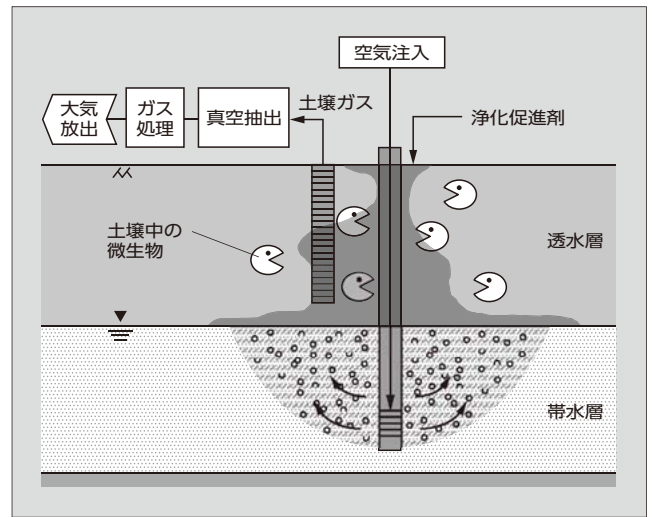


図3 バイオスパーキング法

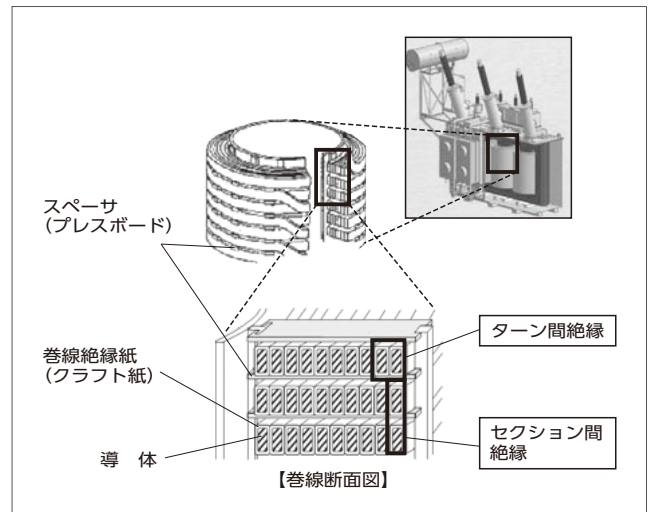


図4 変圧器の巻線構造

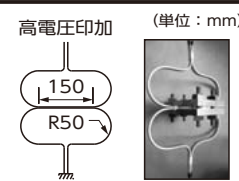
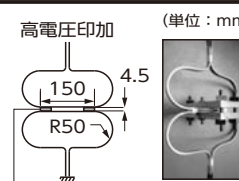
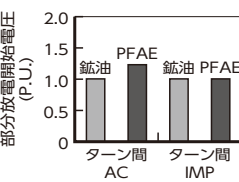
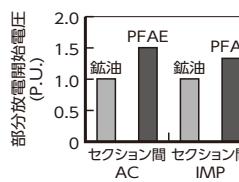
間の絶縁はターン間絶縁、上下方向にスペーサ (プレスボード) を介した部分の絶縁はセクション間絶縁と呼ばれる。これらの構造をモデル化し、変圧器の絶縁試験 (JEC-2200-2014) で要求される交流電圧と雷インパルス電圧を印加した際の部分放電開始電圧の測定結果を表 2 に示す。PFAE 中セクション間モデルでは、鉱油中と比べて交流および雷インパルス部分放電開始電圧が約 1.4 倍高い。このように絶縁破壊が起こりにくいことから、同電圧、同電容量で設計した場合は、パームヤシ脂肪酸エステル変圧器の方が絶縁距離を短くできる。このため、絶縁油量を削減し、タンクの小型化が可能となる。

なお、特にセクション間でパームヤシ脂肪酸エステル変圧器の絶縁性が高い理由については、誘電率整合効果を用いて説明できる。

巻線部での絶縁破壊は、最弱点となる絶縁油、巻線絶縁紙、スペーサ (プレスボード) が接する箇所 (くさびギャップ部) への電界集中が起因となる。しかし、これらの比誘電率が近い場合は、誘電率整合効果により、くさびギャップ部への電界集中が緩和される。PFAE の比誘電率

〈注 2〉バイオスパーキング法：漏油現場において帯水層に達するパイプを敷設し、ここから空気注入を行うことで、土壤中の好気性微生物を活性化し、油の生分解を促進させる方法である。生分解性の高い油に適用できる。漏油の種類や濃度によっては、浄化促進剤を散布して、好気性微生物の活性を高める。また、必要に応じて、土壤ガスを土壤中から真空抽出し、ガス処理後、大気放出する場合もある。

表 2 巻線モデル絶縁試験での部分放電開始電圧の測定結果

	ターン間モデル	セクション間モデル
試験条件	高電圧印加 (単位: mm) 	高電圧印加 (単位: mm) 
	素線: クラフト紙片側 0.3 mm 厚で巻回した絶縁平角銅線 (3×13 mm) を使用	
試験状態	鉱油または PFAE に浸漬	
印加電圧	AC (交流 50 Hz) …実効値 5 kV ステップの 1 分間昇圧法 IMP (雷インパルス) …波高値 10 kV ステップ昇圧法	
評価結果		
	セクション間モデル: PFAE 中での部分放電開始電圧は 1.4 ~ 1.5 倍 (鉱油比)	

は、鉱油よりも大きく、巻線絶縁紙やプレスボードにより近い値であることから、この誘電率整合効果により、くさびギャップ部への電界集中が緩和され、絶縁破壊は起こりにくい。

巻線セクション間モデルにおける等電位線図を図 5 に示す。くさびギャップ部に着目すると、PFAE 中の方が等電位線の本数が少なく、間隔も広いことから、鉱油中に比べて電界集中が緩和されている。

(2) 冷却特性

PFAE の動粘度は、鉱油の約 0.6 倍であることから、これを利用したパームヤシ脂肪酸エステル変圧器は、鉱油変

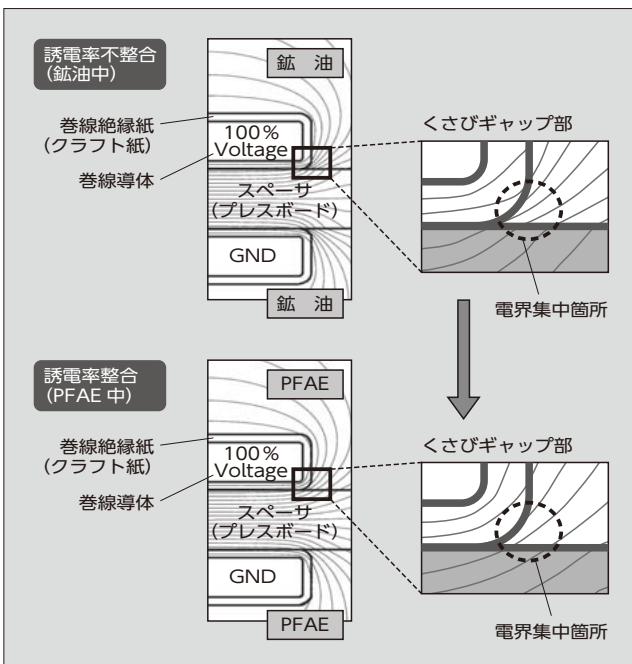


図 5 巻線セクション間モデルにおける等電位線図

圧器よりも冷却特性は高い。この特性を利用し、絶縁油量を削減した高温設計とすることで、タンクの小型化が可能である。また、冷却器の台数を削減した運用も可能となる。次に詳しく述べる。

図 6 に冷却特性の比較を示す。き電用のルーフデルタ変圧器 (定格容量 2,000 kVA、定格電圧 66 kV) の絶縁油として、PFAE と鉱油を使った場合の二次巻線温度 (実測値) であるが、負荷率が低い場合は、PFAE が鉱油より約 1 K 低く、負荷率の上昇に伴い PFAE が鉱油より約 2 K 低くなった。巻線から油への熱伝達率は、PFAE の方が良好で鉱油の約 1.1 倍である⁽⁴⁾。

また、表 1 に示したように、PFAE は体積抵抗率が鉱油より 2 桁低く、流動帯電の原因物質である硫黄分を含まないことから、鉱油に比べて流動帯電の懸念は少ない。流動帯電が起こらなければ、変圧器内の絶縁油の循環流速を速くして冷却性を高めることが可能である。

図 7 にプレスボード油道モデルにおける帯電特性を示す。図 7(a)は、電荷が蓄積しやすい変圧器内のプレスボード油道をモデル化し、PFAE または鉱油を満たして、電圧印加直後から 8 か所で電界値を測定し、その平均値を時間に対してプロットしたものである。また図 7(b)には、プレスボード油道モデルの電極形状と、8 か所の測定点を示している。

PFAE では、電圧印加直後の電界値は 1.1 P.U. で、電荷緩和の時定数 (電圧印加直後の電界値が、1/e になるまでの時間) は約 10 s と短時間で減衰した。一方、鉱油では、電圧印加直後の電界値は 1.6 P.U. で PFAE に比べて高い。また、電荷緩和の時定数は約 3,000 s で、PFAE の 300 倍であった。

こうした結果から、パームヤシ脂肪酸エステル変圧器内

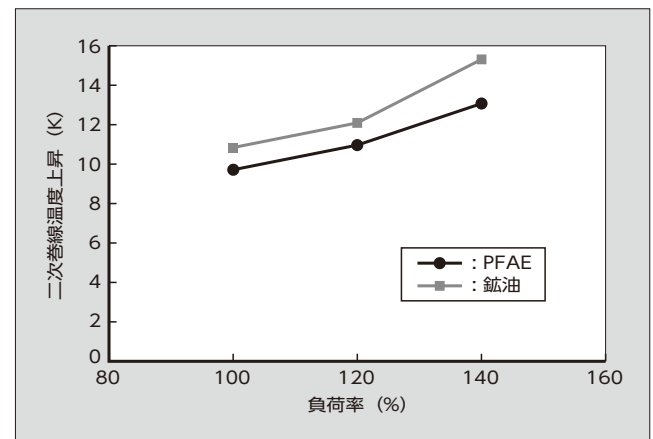


図 6 冷却特性の比較

〈注 3〉 流動帯電: 液体が固体表面を流動した際に、液体と固体表面に電荷分離が生じる静電気現象である。大容量変圧器では、内部を循環させる絶縁油の流速を上げた際に、固体絶縁物への電荷蓄積が油中沿面放電レベルを超えると変圧器内部で放電し、巻線の全路破壊につながる恐れがある。

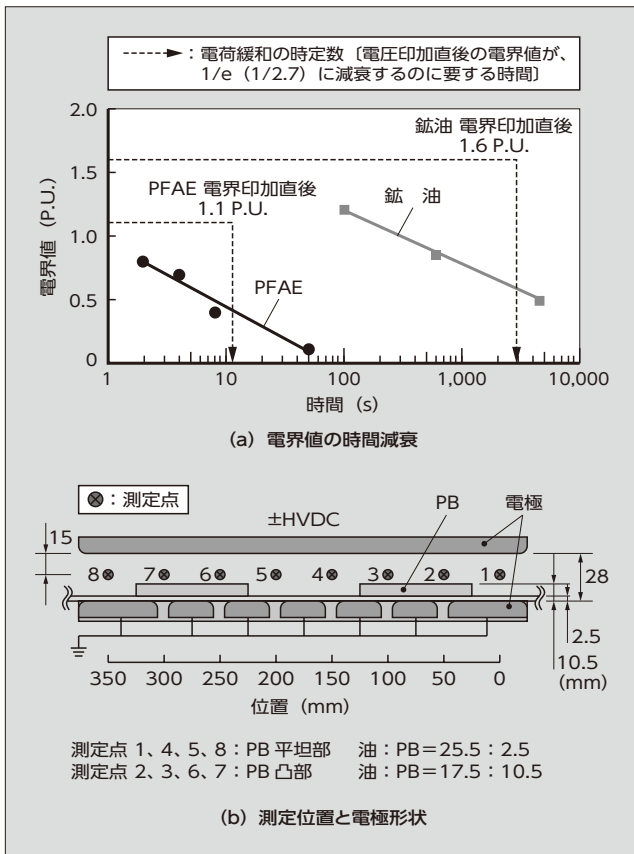


図7 プレスボード油道モデルにおける帯電特性

では流動帯電は起こりにくいと言える。したがって、絶縁油量を減らす、あるいは冷却器の台数を減らして小型化する一方で、絶縁油の循環流速を上げて冷却性を維持することが可能である。

(3) 寿命の最適化

油入変圧器内部で使用される絶縁紙は、構成分子のセルロースが熱分解と加水分解により劣化し、平均重合度（ポリマーを構成するモノマーの数）が低下する。初期状態に対して平均重合度が45%まで低下すると、電力系統への落雷などによる短絡機械力発生時に巻線絶縁紙が破れて巻線の層間短絡や地絡が発生する恐れがあり、変圧器の寿命に達したと判断される。

PFSAEは、他の植物油やシリコン油と同様、油中の飽和水分量が鉱油より1~2桁高いという特徴がある。この特徴により、油浸絶縁した場合には絶縁紙と油の水分平衡から絶縁紙側の水分が油側に抜けやすくなり、絶縁紙の加水分解反応が抑制されるため、絶縁紙の寿命は鉱油中に比べて長い。さらにPFSAEは、他の植物油に比べて飽和脂肪酸の割合が高く酸化安定性が非常に高いため、油中水分が増えても油自体の特性劣化が少ない。

表3にPFSAEと鉱油における耐熱アミン紙の寿命比較を示す。クラフト紙よりも10K高い温度で使用可能な耐熱アミン紙（巻線絶縁紙）を窒素雰囲気におけるPFSAEと鉱油中で熱劣化させ、平均重合度が45%まで低下した時間を示す⁽⁵⁾。同じ温度であれば、PFSAE中と鉱油中での耐熱アミン紙の寿命比率は1.6~2.3であり、パームヤシ

表3 PFSAEと鉱油における耐熱アミン紙の寿命比較

劣化温度 (°C)	151.0	160.0	168.5
①PFSAE中の耐熱アミン紙寿命 (h)	1,758	655	265
②鉱油中の耐熱アミン紙寿命 (h)	758	355	164
①と②の比率 (=①/②)	2.3	1.8	1.6

脂肪酸エステル変圧器の寿命は、鉱油変圧器の2倍程度となる。

そこで、絶縁油使用量を抑えるなどコンパクトかつ高温設計とすることで、十分な余寿命期間を確保しつつ、パームヤシ脂肪酸エステル変圧器の小型化が可能となる。

3.3 異常診断技術

鉱油変圧器においては、変圧器内部の局部加熱や部分放電が発生すると、鉱油の分解が進み、油中に分解生成物であるガスが溶解する。この溶解したガスの種類やパターンを分析することで、変圧器の異常診断が可能である。

PFSAEの主な構成分子は鉱油と同様炭素と水素であり、局部過熱や部分放電に伴い発生する油中溶存ガスパターンも鉱油とほぼ同様であることを確認している。したがって、鉱油変圧器の異常診断用に蓄積した情報を活用してパームヤシ脂肪酸エステル変圧器においても異常診断ができる。

3.4 納入実績

2008年の初号器納入以来、現在までに鉄道向けや公共向けを主として合計175台、総容量328MVAの豊富な納入実績があり、いずれも順調に稼働している。また近年は、従来のA種(105°C)からE種(120°C)に耐熱クラスを引き上げて小型化を進め、さまざまな用途や要求仕様に対応している。

4 あとがき

環境負荷低減に貢献するパームヤシ脂肪酸エステル変圧器について述べた。パームヤシ脂肪酸エステル変圧器の運転実績も増えて、実験室レベルの油中ガス分析データだけではなく、実フィールドでの油中ガストレンドについても明確になりつつある⁽⁷⁾。地球温暖化対策は全世界的な喫緊の課題であり、高度成長期に大量に導入された鉱油変圧器をパームヤシ脂肪酸エステル変圧器に更新することで、CO₂排出の抑制と変圧器設置スペースの低減が期待できる。

また、環境負荷低減に貢献する変圧器として、富士電機では非危険物として取り扱うニーズに対応するため、高引火点絶縁油である天然エステル^(注4)(FR3)を適用した変圧器もそろえている。

富士電機は、今後も顧客満足度の高い環境に配慮した製品を提供していく所存である。

〈注4〉FR3: Cargill, Incorporated. の商標または登録商標

最後に、図7に示したプレスボード油道の帯電特性評価に当たり、名古屋大学大久保研究室殿のご協力をいただいた。また、PFAEの土壌への漏油時の処理方法検討に当たり、ライオン株式会社殿、西日本旅客鉄道株式会社殿、栗田工業株式会社殿のご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 鈴木貴志ほか. 新規植物系変圧器用電気絶縁油パームヤシ脂肪酸エステル (PFAE) の特性. 電気学会論文誌. 2009, vol.129, no.8, p.975-979.
- (2) 河崎澄ほか. “パーム・ヤシ脂肪酸エステルのでーゼル燃焼特性”. 第32回絶縁油分科会研究発表会. 公益社団法人石油学会. 2012.
- (3) 金谷昭範ほか. “パーム・ヤシ脂肪酸エステル絶縁油の土壌中の分解性について”. 第33回絶縁油分科会研究発表会. 公益社団法人石油学会. 2013.
- (4) 鄭宏杰ほか. “パームヤシ脂肪酸エステル油の変圧器モデルによる冷却特性検証”. 平成20年電気学会電力・エネルギー部門大会292. 2008.
- (5) Tokunaga, J. et al. “Lifetime estimation of cellulosic insulation material in palm fatty acid ester for power transformers,” IEEE Trans. DEI. 2017, vol.24, no.2, p.1010-1017.
- (6) Tokunaga, J. et al. “Palm fatty acid ester as biodegradable dielectric fluid in transformers : a review”, IEEE Electrical Insulation Magazine. 2019, vol.35, no.2, p.34-46.
- (7) 鈴木貴志ほか. “パームヤシ脂肪酸エステル (PFAE) 入り変圧器の油中ガストレンド”. 平成28年電気学会全国大会 5-082. 2016.



彦坂 知行

高電圧機器の開発、新事業開発、変圧器の開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部変電システム事業部変電技術部主査。電気学会会員、CIGRE 会員、IEEE 会員。



千葉 公一郎

新事業開発、変圧器の開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部開発統括部変電機器開発部主査。



小型汎用自動販売機「マルチ君」

Compact Multi-Purpose Vending Machine

大坪 智憲* OTSUBO, Tomonori

中西 寿一* NAKANISHI, Toshikazu

新型コロナウイルスの感染を防ぎたいという社会的な要望が高まる中、非対面で商品を購入できる自動販売機のニーズが高まっている。また、都市部の小売店などでは、店頭などの限られたスペースで、店舗の営業時間外でも販売機会を増やしたいという要望が増えている。こうした中で富士電機は、省スペースで屋外設置可能な小型汎用自動販売機「マルチ君」を開発し、発売した。

1 「マルチ君」の特徴

小型汎用自動販売機マルチ君は、小売店の店内や店頭、商業施設、ホテル、オフィス、公共交通機関など、さまざまな場所で販売機会を拡大する。マルチ君の外観を図1に、仕様を表1に示す。

1.1 省スペース化

従来の汎用物品自動販売機では、商品搬出ユニットにスパイラル方式(図2)を採用していた。この方式は、スパイラル状の搬送部に商品を挟み込むように入れ、搬送部が回転することで水平方向に商品を押し出す。簡単な機構である反面、背が高すぎて不安定な商品が搬送中に倒れないようにするためや、商品の中身に比べて極端に大きすぎて包装袋がスパイラルに巻き込まれないようにするために、販売できる商品の形状に制約を設けていた。



図1 「マルチ君」

表1 「マルチ君」の仕様

項目	仕様
形名	FRM10D5CZ1NM
外形寸法 (mm)	W745×D756×H1,830
販売種類	10セクション 10選択ボタン
収容可能な商品重量	25 ~ 350 g
製品質量	248 kg
照明	LED
設置環境	屋内および屋外設置が可能
商品保管温度*	冷蔵 (0 ~ 10 °C) 常温 (18 °C ± 5 °C)

* 庫内構成は左右2室となっており、庫内温度は3パターン(冷蔵のみ、常温のみ、冷蔵と常温)から設定可能

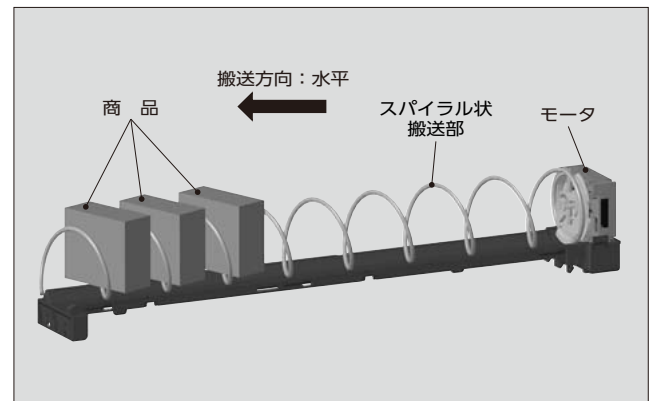


図2 従来の商品搬出ユニット (スパイラル方式)

マルチ君では、商品搬出ユニットには、チェーン方式(図3)を採用している。搬送方向を垂直にすることで、商品の自重による摩擦抵抗を低減して、安定した姿勢で搬送する。工具を使用することなく商品に合わせて商品棚の間隔を自由かつ簡単に変更できる。この機構により、販売可能な商品の種類が増えた。

このように、商品搬出方式をチェーン方式に変えて奥行き方向の寸法を縮小したことにより、富士電機の従来製品に比べて設置面積を2割削減した。設置面積が小さく省スペース化を図ることができるので、建物の出入り口や店頭、オフィスなど屋内外、通行量の多い場所に設置可能である。

1.2 売切れ検知機能

従来の物品自動販売機の売切れ検知は、カウントダウン方式であった。この方式は、商品補充時に販売可能な

* 富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場製品開発設計部

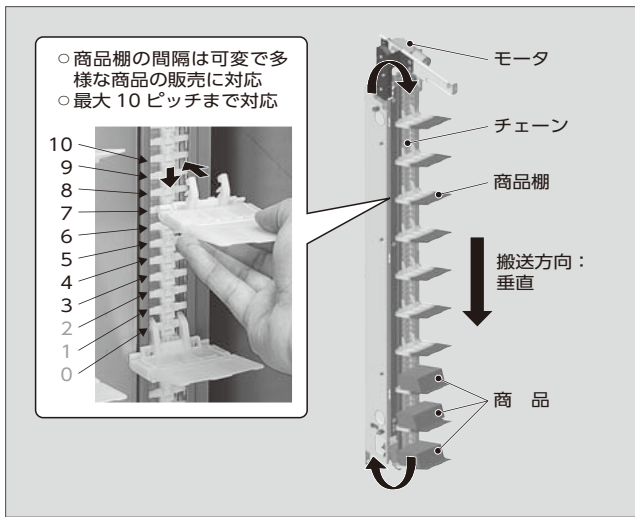


図3 商品搬出ユニット（チェーン方式）

回数を設定し、販売ごとにカウントダウンをしていき、売切れを検知する方式だった。この方式は、売切れ検知機構が不要である反面、人が販売可能な回数を設定するため、商品の補充不足や設定ミスが販売機会の減少につながり、改善が求められていた。

そこで、マルチ君では、商品棚上の商品の有無を検知する売切れ検知機構を設けた。売切れ検知機構は、商品棚と接する売切れレバー、売切れレバーを持ち上げるばねおよび売切れレバーの姿勢を検知するスイッチで構成される。商品棚が上方から下がってくると商品棚停止位置検知レバーが回転し検知スイッチが押され、商品棚を売切れ判定位置に停止させる〔図4(a)〕。商品の有無によって生じたトルク差を検知して、売切れを判定する〔図4(b)〕。トルク差が小さい軽量商品でも確実に売切れを検知するためには、商品棚の停止位置のばらつきを抑える必要がある。売切れレバーと商品棚停止位置検知レバーの回転支点を同軸に配置し、レバー間のばらつきを抑制することにより商品棚停止位置ばらつきを抑え、25gというわずかな質量の商品の有無を検知できるようにした。

1.3 屋外設置仕様

従来の汎用物品自動販売機はガラス扉を採用し、商品を見えるようにしている。ガラス扉は、防盜性や防水性に乏しいだけでなく、内部が日光の影響を受け商品温度の上昇を招く懸念もあり、設置場所は屋内に限定されていた。

マルチ君では、飲料自動販売機の扉構造を応用し、防盜性・防水性を向上させている。断熱気密性にも優れているため、温度管理が難しいチルド食品類を販売する自動販売機として、初めて屋外設置できるようになった。

1.4 商品ディスプレイ

従来の自動販売機の商品展示は一つの商品選択ボタンに対して、展示台に一つの商品を展示する構造になっている。そのため、展示する商品の数や大きさに制限があり、

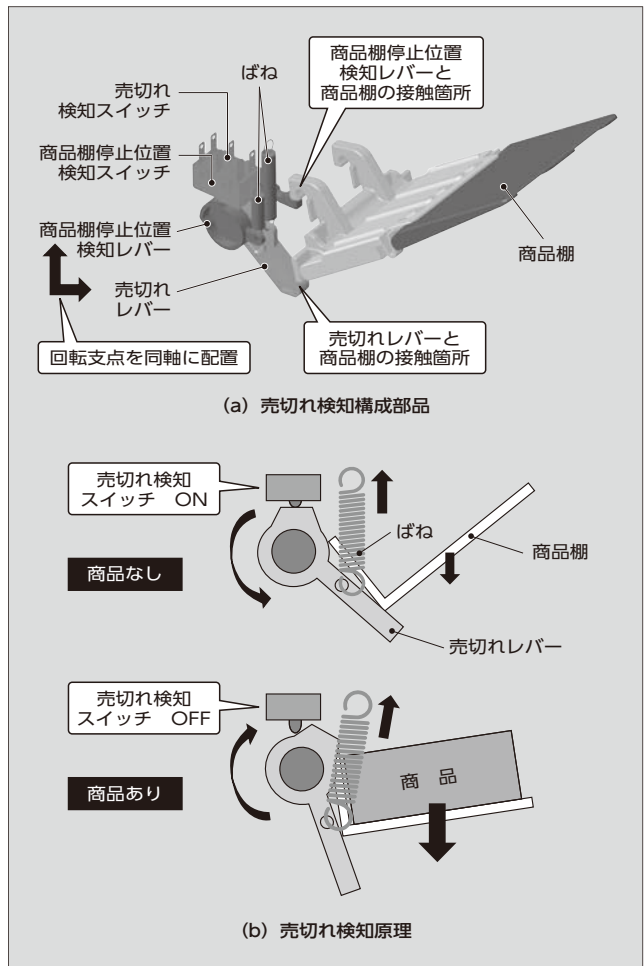


図4 売切れ検知機構

展示する場所も固定されていた。

マルチ君では、さまざまな形状、大きさの商品を販売し商品展示もそれに対応させるため、図5に示すように商品選択ボタンを1か所にまとめて配置した。選択ボタンの位置に影響を受けない自由な商品展示を可能にした。展示台の爪を背面の板に引っ掛けることでディスプレイ内に自由にレイアウトできる構造“フリーディスプレイ”とし、さらに、透明なクリア展示台と高輝度LED照明により商品を明るく照らし出し、販売商品をアピールする

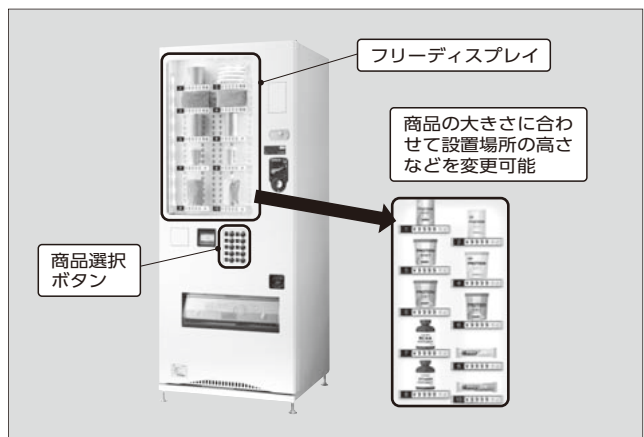


図5 フリーディスプレイの例

ことができる。

発売時期

2021年3月

お問い合わせ先

富士電機株式会社

食品流通事業本部営業統括部営業第四部

電話 (03) 5435-7077



略語（本号で使った主な略語）

5G	5th Generation	第5世代移動通信システム
AE	Anode Effect	陽極効果
AT-NPC	Advanced T-type Neutral-Point-Clamped	
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画
CEMS	Community Energy Management System	
DC	Data Center	データセンター
EJB	Enterprise JavaBeans	
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
EMTP-RV	Electro Magnetic Transient Program-Restructured Version	電力系統の瞬時値解析プログラム
ESG	Environment・Social・Governance	
GIS	Gas-Insulated Switchgear	ガス絶縁開閉装置
HDLC	High-Level Data Link Control	ハイレベルデータリンク制御手順
HE モード	High Efficiency Mode	高効率運転モード
HILS	Hardware-in-the-Loop Simulator	
HVCB	High-Voltage Circuit-Breaker	高圧遮断器
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IoT	Internet of Things	
IP	Internet Protocol	
JDBC	Java Database Connectivity	
JSP	JavaServer Page	
OLTC	On-Load Tap Changer	負荷時タップ切換器
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PDU	Power Distribution Unit	
PFAE	Palm Fatty Acid Ester	パームヤシ脂肪酸エステル
PMCN	Protocol for Mission Critical industrial Network use	
PP	Program Product	
PPA	Power Purchase Agreement	電力販売契約
RB-IGBT	Reverse-Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
TCM	Telemeter Control Master	遠方監視制御装置親局
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
VCR	Voltage Control Reactor	電圧調整用リアクトル
VFD	Voltage and Frequency Dependent	
VFI	Voltage and Frequency Independent	
VPP	Virtual Power Plant	

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

Ansys	ANSYS Inc. の商標または登録商標
EMTP	EMTP Alliance の商標または登録商標
Excel	Microsoft Corporation の商標または登録商標
FR3	Cargill, Incorporated. の商標または登録商標
Java	Oracle Corporation およびその子会社、関連会社の米国およびその他の国における商標または登録商標
Linux	Linus Torvalds 氏の日本およびその他の国における商標または登録商標
Modbus	Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
NAS	東京電力ホールディングス株式会社および日本硝子株式会社の商標または登録商標
NAS 電池	東京電力ホールディングス株式会社の商標または登録商標
Windows	Microsoft Corporation の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報. vol.94, no.4, 表紙の裏、表紙写真

(正)

① xEV 向け RC-IGBT モジュール

(誤)

① xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」



主要事業内容

パワエレ エネルギー

エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

- エネルギーマネジメント
エネルギーマネジメントシステム
- 変電システム
変電設備、産業電源
- 施設・電源システム
無停電電源装置 (UPS)、配電盤
- 器具
受配電・制御機器

パワエレ インダストリー

あらゆる産業分野の自動化と省エネに貢献します。

- オートメーション
インバータ、モータ、サーボシステム、コントローラ、
プログラマブル表示器、計測機器、センサ、FA システム、
駆動制御システム、計測制御システム
- 社会ソリューション
鉄道車両用駆動システム、ドアシステム、
船舶用排ガス浄化システム、放射線機器・システム
- 設備工事
電気工事、空調設備工事
- IT ソリューション
ICT に関わる機器・ソフトウェア

半導体

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

- パワー半導体
産業分野、自動車分野

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・
試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

- 再生可能エネルギー・新エネルギー
地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池
- 火力発電
原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

- 自販機
飲料自販機、食品・物品自販機
- 店舗流通
店舗設備機器、金銭機器

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。

富士電機技報 (和文)

https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW (英文)

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊 (中文)

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



次号予定

富士電機技報 第95巻 第2号

特集 2021 年度の技術成果と展望

富士電機技報企画会議

幹事	安川 和行			
企画メンバー	齋藤 哲哉	前田政一郎	粕谷 敏	渡部 雅教
	熊谷 明恭	片桐 源一	出野 裕	岡本 泰道
特集委員	渡部 雅教	富永 保隆	須藤 晴彦	中野 雅仁
事務局	堀口 道子	中田 栄寿		
編集室	藤木 徹	木村 基	小野寺拓也	小野 直樹
	高橋 徹			

富士電機技報 第95巻 第1号

令和4年7月20日印刷 令和4年7月30日発行

編集兼発行人 中山 和哉

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話 (042) 585-6965
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話 (03) 3233-0641
振替口座 東京 6-20018

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

© 2022 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

エネルギー・環境事業で、
持続可能な社会の実現に貢献します。



Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



Courtesy of PT. SEMI

耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
パワー半導体



パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

F 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および
植物油インキを使用しています。また、ユニ
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた
見やすいデザインの文字を採用しています。

