



三菱電機技報

6

2024

Vol.98 No.6

電力システムの将来

No.6

特 集 電力システムの将来	The Future of Power Systems
巻頭言	
来るべき循環経済型未来社会にむけて 1-01 熊田亜紀子	Towards a Circular Economy Future Society Akiko Kumada
脱炭素社会実現に向けた エネルギーソリューションへの取組み 2-01 西都一浩・澤村亮太・山本和矢・富山敦司	Initiatives for Energy Solutions to Realize Decarbonized Society Kazuhiro Saito, Ryota Sawamura, Tomoya Yamamoto, Atsushi Tomiyama
需要家向け受変電設備の異常兆候検知 3-01 藤井和希・宮本靖也・佐子朋生	Abnormal Sign Detection of Power Distribution Facilities for Consumers Kazuki Fujii, Seiya Miyamoto, Tomo Sako
受配電設備向けスマート保安実現への取組み 4-01 小鶴 進	Smart Industrial Safety for Power Distribution Facilities Susumu Kozuru
直流配電システムの機能強化 5-01 竹内勇人・園江 洋・和泉晃浩・越智良輔	Functional Enhancement of Direct Current Distribution Network System Hayato Takeuchi, Hiroshi Sonoe, Akihiro Izumi, Ryosuke Ochi
72/84kV環境対応開閉装置 6-01 中内慎一朗・杉野一樹・宮下 信	72/84kV Eco-Friendly Switchgear Shinichiro Nakauchi, Kazuki Sugino, Makoto Miyashita
新型デジタルリレー MELPRO-CHARGE3/HB 7-01 田中靖之・山根定章・長岡 啓・角本悠輔・田中俊哉	Numerical Protection Relays MELPRO-CHARGE3 for Domestic Market and -HB for Overseas Market Developed Based on Common Platform Yasuyuki Tanaka, Sadaaki Yamane, Satoshi Nagaoka, Yusuke Kakumoto, Toshiya Tanaka

執筆者の所属は執筆時のものです。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネス・プラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集ではインフラ領域の“電力システムの将来”をご紹介します。

卷頭言

来るべき循環経済型未来社会にむけて

Towards a Circular Economy Future Society



熊田亜紀子

Akiko Kumada

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 教授

Professor, Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

この20年の電力システムの変化を呼び起こした駆動力は、カーボンニュートラル(CN)実現に向けた流れであることは誰もが否定しないだろう。政策的な後押しもあり、多くの再生可能電源が電力システムに取り込まれてきた。筆者の研究対象である電力システムのハードウエアにしても、電源の立地条件そして性質が変わることから、分散電源やVPP(Virtual Power Plant)を有した受配電システム、エネルギー貯蔵技術、そして自励式HVDC(High Voltage Direct Current)技術を用いた多端子直流送電技術と種々の要素技術に関してめざましい革新・開発が進んでいる。

細かい要素技術の開発に言及するのは別の機会に譲るとして、このような社会の変化にいつから“本気”になったのだろうかとふと感じることがある。思い起こせば気候変動がささやかれだした20世紀末においては、再生可能電源には理想論的にはその必要性を感じるもの、本音ではシニカルな意見を持つ人が、自分も含め(自分の先見の明の無さを露呈している)多かったように思う。しかし四半世紀の間に、欧州を皮切りにカーボンプライシングの制度設計が着々となされ、システムの変化に対する経済界の同意と後押し、さらにはCN実現に向けた世論の合意形成という確固たる流れができ、電力インフラという時定数の長い現場においてすら顕著にその変化が見られるようになった。

さて、CN実現と同様に、社会システム全体の改革を伴い、社会の在り方に大きな影響を与えるキーワードとして、近年、“サーキュラーエコノミー(CE)”への移行がにわかに脚光を浴びつつある。限られた資源を最大限に循環させることで環境負荷を低減しつつ経済的な成長も達成しようというものである。資源を大切にという理想だけでは進むわけもなく、CE社会への移行にあたっては、エコシステムを構成するステークホルダーの経済合理性を成立させることがカギとなる。一足早く、EUは2019年に発表した成長戦略“欧州グリーン・ディール”において、循環型社会への移行をその中核的な政策目標と位置付け、欧州発のルールメイキングが進められている。日本においても、経済産業省が2023年3月に“成長志向型の資源自律経済戦略”を策定し、12月には“サーキュラーエコノミーに関する産官学のパートナーシップ”が立ち上げられ、循環経済型社会形成を実行するため産官学の緊密な連携が図られている。

世の中は非常に早い速度で変化している。完璧を求めて時間をかけるより、粗削りでも日本型CE構築を急ぎ、走りながら修正していくことだろう。

そのような中、三菱電機と筆者の属する東京大学においても、CEを重要課題と位置づけ、2023年10月にその実現に向けた方策を検討する“持続可能な循環経済型未来社会デザイン講座”と称した社会連携講座を開設するに至っている。エコシステム全体をモデル化し、モデルを用いたシミュレーションによりステークホルダー間の関係性を整理したうえで、経済合理性を阻害する要因を探求し、その解決に向けた研究を進めようというもので、三菱電機が保有するさまざまな事業・製品をモデルケースとして検証を開始している。

社会システムの改革という点では、CN実現の合意形成というほんの少し前のお手本がある中、このCE社会への移行にむけて、ルールメイキングのスピードは極めて早い。政策的に少々の方向性やスピードの補正がなされる中で、新しい技術、製品の実用化・拡大、時代に適したビジネスモデルの構築と、大津波のような社会変革が来るのだろう。さて自分の専門分野に立ち返り、CE社会移行後の電力インフラはどのようにあるべきなのか、どのような技術課題があるのか、自問する日々である。

特集論文

脱炭素社会実現に向けた エネルギーソリューションへの取組み

Initiatives for Energy Solutions to Realize Decarbonized Society

西都一浩*

Kazuhiro Saito

富山敦司*

Atsushi Tomiyama

澤村亮太*

Ryota Sawamura

山本和矢*

Tomoya Yamamoto

*E&Fソリューション事業推進部

要 旨

三菱電機では、電力の利用を含めたシステム全体が抱える課題の解決に貢献するため、脱炭素社会実現に向けたエネルギーソリューションに取り組んでいる。再生可能エネルギー（以下“再エネ”という。）の創出と省エネルギー、熱源電化と熱エネルギー管理、受配電設備の遠隔監視、異常予兆検知を含めたスマート保安ソリューションなど、社会ニーズに即した技術の探索や新たな製品・サービスの社会実装に向けて社内実証を通じたE&F（Energy and Facility）ソリューションの創出を進めている。

1. まえがき

2050年脱炭素社会を実現するため、各分野で脱炭素社会の実現に向けた取組みが加速している。電力分野では電源の脱炭素化と電力の地産地消、産業・民生・輸送分野ではエネルギーの電化とグリーン電力の利用による脱炭素化が求められている。また、非化石価値の取引を始めとした経済的手法、脱炭素への取組みを投資判断の指標とする金融的手法が導入されるなど、様々な角度からのアプローチが試みられており、産業構造や社会経済の変革を伴う大きな潮流になりつつある。

電力分野だけでなく、製造企業等の電力の需要家サイドでも、温室効果ガス（Green House Gas : GHG）の排出削減に加えて、サプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まりつつある。製造企業が引き続き市場での価値を見いだしていくためには、効率的かつ経済的に企業活動の脱炭素社会化を進めることが必要になってくる。

本稿では、脱炭素社会の実現に向けた当社の取組み概要、一般産業やビル向けに当社が取り組んでいる電気と熱のトータルソリューション（E&Fソリューション）とこれらを支える技術の社内実証の取組み概要について述べる。

2. 脱炭素社会に向けた当社の取組み

脱炭素社会への取組みは世界的な趨勢（すうせい）になりつつあり、脱炭素化・脱炭素社会を表明する国や企業が続々と増えている。グローバルな取引では、サプライチェーン全体での脱炭素化達成の要請が高まっており、製品購入契約の条件に製造企業での脱炭素の取組みを課す事例も出てきている。また、政府主導で脱炭素社会にいち早く移行するための挑戦を行い、国際ビジネスで勝てる企業群を育成し、産・官・学が一体になって、経済社会システム全体の変革のための議論と取組みを行う場としてGX（グリーントランスフォーメーション）リーグへの参加を表明する企業も増加傾向である。

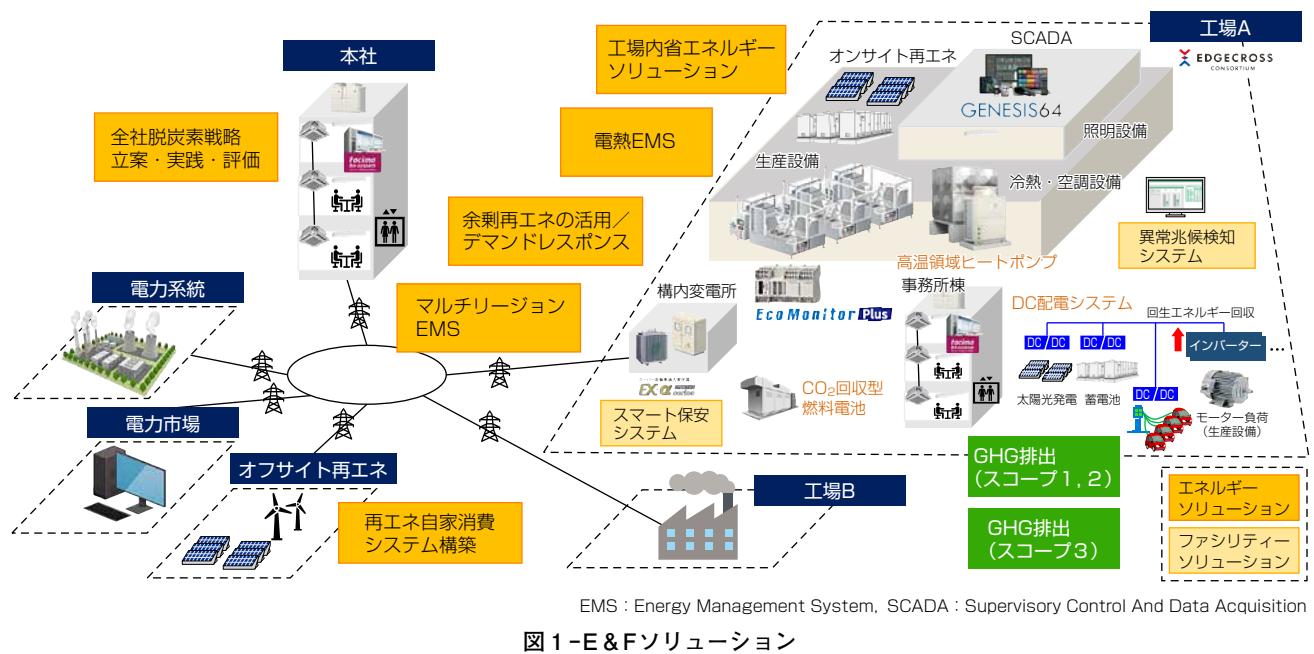
このような背景の中、当社としてはサステナビリティの実現を経営の根幹に位置付けており、その実現に向けて大きく動き出しているところである。特に、カーボンニュートラルについては当社の強みが発揮できる分野と考えており、その取組みを加速させつつ、自社の脱炭素化の実現を目指した取組みを実施している。

しかしながら、脱炭素社会に向けたGHG排出削減目標を定めても、具体的にどのような対策を打つべきか、より効果的なソリューションの選定や優先順位付けなどで悩んでいる事業者も多いと考えられる。当社も同様の悩みを抱えており、自社工場での実証設備の導入などを手始めに、脱炭素ソリューションの創出に取り組んでいる。

2.1 取組み概要

脱炭素社会の実現に向けた当社E&Fソリューションの概要を図1に示す。当社ではGHGプロトコルイニシアティブの定めるスコープ1及びスコープ2に該当する工場・オフィスからのGHG排出量の2030年実質ゼロを目指している。スコープ1は燃料の燃焼や、製品の製造などを通じて、企業等が直接排出することを指しており、スコープ2は他社から購

入した電気、熱や蒸気などを間接的に使う間接排出を指している。また2050年には当社としてバリューチェーン全体でのGHG排出量実質ゼロを目指している。製造業でのバリューチェーンは原材料／部材調達・製造・物流・販売・廃棄等一連の流れを指しており、スコープ3と呼んでいる。スコープ1、スコープ2及びスコープ3を含むGHG排出量を非財務情報として公開し、その削減を目指した取組みを推進している。当社では空調・照明などを含む、省エネルギーに関する製品を取り扱っており、各工場でも省エネルギー推進及び敷地内への太陽光発電等の導入を進めている。一方で、工場稼働時間の電力を敷地内に敷設した再エネで全て賄うことは困難であり、外部からの再エネを活用することも重要である。また非稼働日や中間期(春・秋)では太陽光発電量が余剰になる時間帯も発生するため、再エネを余すことなく有効活用することが重要と考えている。これは当社だけでなく社会全体で発生し得る課題であり、電力の需給バランスを乱さないために、太陽光発電等の出力制御が必要になっている。こうした中、当社は2021年に国連主導で創設された国際イニシアティブ“24/7 Carbon Free Energy Compact”に加盟した。このイニシアティブでは、24時間・365日で1時間単位の電力消費に合わせたカーボンフリー電力を100%供給する概念を掲げており、当社としても再エネを余すことなく使い、実態ある脱炭素化社会実現に向けた一歩を踏み出すための活動を推進している。



2.2 再エネの導入促進

脱炭素化社会を目指す電力需要家で再エネを導入する機運が高まっている。実現手法は、図2に示すとおり、大きく分けて、①電力会社の再エネメニューを購入、②ユーザー企業で環境証書の購入、③ユーザー企業で再エネ電源に関与、の三つがあり、これらの手法を組み合わせて実現することが求められる。なお、気候変動の抑止観点からは追加性を確保した③が電力需要家として望ましい。当社では省エネルギー施策だけではなく、様々な電源種や導入方法などを組み合わせて再エネ調達量を増やすことで、工場・オフィスからのGHG排出量の2030年実質ゼロの実現に向けた活動を推進中である。

2.3 電力需要家としてのデマンド調整

再エネの普及が進むと電力需給バランス調整のため、発電設備の出力制御が日本各地で必要になる可能性が高まってくる。電力会社では出力制御時の火力発電等の最低出力引下げや、系統増強などに取り組んでいる一方で、当社では電力需要家として電力を有効活用することで出力制御量の減少に寄与することを検討中である。蓄電池やヒートポンプ等を活用したデマンドシフト等の有効活用を検討しているが、一方で、現在は卸電力市場での約定価格は昼間が相対的に安く、朝夕・夜間は高くなる傾向がある。小売電気事業者が提供する電力料金メニューの活用や、市場連動型電気契約メニュー等、経済性DR(デマンドレスポンス)を組み合わせた経済合理性の確保も重要な要素である。

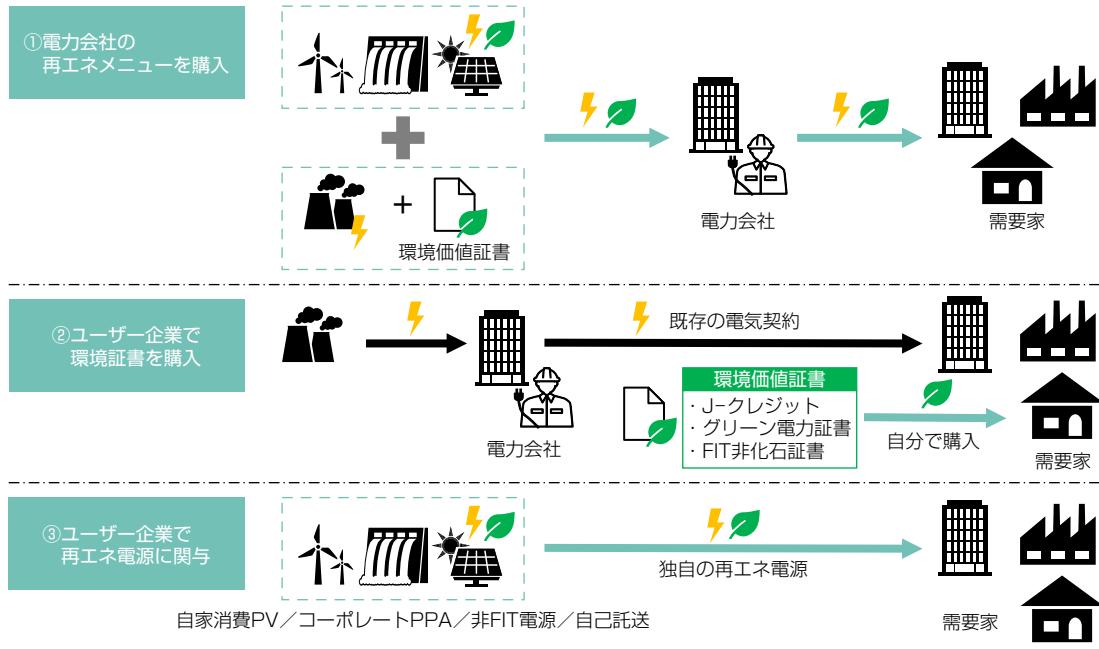


図2-再エネ調達スキーム

3. 電気と熱の一体的なエネルギー管理

一般家庭と異なり製造業分野やビル分野等の大規模需要家のエネルギー利用では、電力だけでなく熱(蒸気、温水、冷水等)も広く利用されている。大規模需要家での熱エネルギー利用用途は、ビル分野では空調・給湯用途が多く、製造業分野では空調・給湯用途に加えて生産工程での利用も多い。さらに製造業の生産工程は多種多様であり、生産工程に応じて求められる熱の温度、圧力、容量、性質が全く異なる。それらの熱エネルギーを生成するために、パッケージエアコンやビル用マルチエアコン等の冷媒を利用した空調設備のほかに、ボイラー、冷凍機、ヒートポンプチラー、エコキュート等の蒸気、温水、冷水を生成する熱源設備や、バーナーなどで直接加熱する工業炉が用いられている。さらに、電力と熱を同時に生成するコージェネレーションシステムや、電力や熱のエネルギーを蓄積する蓄電池、蓄熱槽等の設備も広く用いられている。また、熱源設備には化石燃料の燃焼によって熱を得る設備が多いが、脱炭素社会の実現には化石燃料からの転換が必要であり、既存の熱源設備を電化する取組みやカーボンフリー燃料の活用検討も活発になってきている。このように、先に述べた熱源設備では蒸気ボイラー等の化石燃料を用いる設備と、ヒートポンプチラーなど電力を用いる設備のそれぞれで対応可能な温度範囲や負荷変動への追従性等の設備特性が異なる。そのため製造業の工場や大規模ビルでは多種多様な機器を組み合わせて電力・熱エネルギーを作り出すエネルギー生成システムが構築されている場合が多く、製造業分野やビル分野の大規模需要家では電力と熱を一体的に捉えたエネルギー管理システムが必要である。エネルギー生成システム全体でGHG排出量を削減するにはエネルギー生成効率を最大化するとともにシステムへの供給電力と燃料バランスの最適化、さらに供給電力の非化石価値調達等、総合的なエネルギー管理システムが必要である。

3.1 当社のエネルギー管理システム

通常のエネルギー生成システムでは現在のエネルギー消費量に追従して自動で出力を制御する自動制御システムを構築している場合が多い。しかしながら自動制御システムによる出力制御には、①現在の状態値に応じたフィードバック制御が主であり将来の変動を見越した制御になっていないこと、②対象が機器単体だけでシステム全体の効率を考慮していない場合が多いこと、③設定値に応じた制御になっているため設定値を人手で検討する必要があること、の課題があった。

当社のエネルギー管理システムはこれらの課題を解決するシステムであり、以下の三つで構成している。

(1) 将来の需要を予測する需要予測機能

需要予測機能では、AIを用いた高精度な電力・熱のエネルギー需要予測を実現しており、当社の電力需給管理システムで培った需要予測手法に加えてOSS(オープンソースソフトウェア)の活用も可能にしているため、柔軟かつオープン

な予測機能の構築が可能になっている。

(2) システム全体の最高効率運用を計算する最適化機能

最適化機能では、システム全体の特性を数式化することで数学的に最適解を導出する数理最適化手法を用いている。数理最適化手法では数学的に最適解が保証されている安定的な解の導出が可能である一方、最適解が運転の実態に即していないため運転に用いることが難しいという課題が挙げられる場合がある。そこで、当社は独自の数式化ノウハウによって制約条件や運用条件を適切に数式化することで運転の実態に即した最適解の導出を可能にしている。

(3) 自動制御システムに適切に設定値を出力する自動制御機能

自動制御機能では、一般的にエネルギー生成システムの安定稼働は自動制御システムが担っている場合が多いため、自動制御システムで安全・安定な稼働を担保しつつ、最適な運用が実現できるような設定値変更方法の設計が必要である。当社は製造業分野、ビル分野で培った自動制御システム構築ノウハウを活用することで既存の自動制御システムと親和性の高いシステム構築が可能である。

3.2 導入メリット

当社のエネルギーマネージメントシステムの導入メリットの代表例を示す。

製造業分野での代表的な例として工場併設の大規模自家用発電設備での電力・熱エネルギー生成の最適化が実現できる。自家用発電設備は主にボイラー・タービン・発電機で構成されるが、発電用途だけの事業用火力発電所とは異なり、蒸気を生産工程へ送って活用するという特徴がある。蒸気はボイラーで生成するだけでなくタービンから蒸気を抽気して使用する場合もあり、蒸気系統も要求圧力に応じて複数必要になるため、システム全体の系統が複雑になる場合が多い。当社のエネルギーマネージメントシステムでは、それぞれのボイラー出力配分やタービンからの抽気量等を最適化することで蒸気生成コストやGHG排出量低減を可能にしている。一般的に自家用発電設備の制御には分散制御システム(Distributed Control System : DCS)が用いられており、主となる制御はDCSで実施して蒸気供給の安定性を担保しつつ、一部の流量調節弁の制御設定値をエネルギーマネージメントシステムから指示することで、間接的に設備全体の稼働バランスを調整して最適運転を行うことが可能である。大規模自家用発電設備以外にも生産工程で必要になる冷温水供給系統の稼働の最適化など、幅広く適用可能である。

ビル分野の代表例として地域熱供給事業者の保有する熱供給プラントでの蒸気・冷水・温水生成の最適化が期待できる。地域熱供給事業者は、熱供給プラントで蒸気・冷水・温水を生成し、周辺のビルに対してエネルギーを供給している。スケールメリットを活用して高効率なエネルギー生成が可能なほか、レジリエンス向上にも寄与している。熱供給プラントはボイラー、ターボ冷凍機、吸収式冷凍機、蓄熱槽、コーチェネレーションシステム等の熱源設備で構成される。従来は熱の使用先であるビル側の需要変動への追従と、需要量に応じた最適な熱源設備稼働の調整が課題であったが、当社のエネルギーマネージメントシステムで需要を予測し、需要に応じた各熱源設備の出力を最適化することで、更なる安定稼働への寄与とプラント稼働コストやGHG排出量の低減が可能になる。一般的に熱供給プラントの制御は中央監視システムで供給温度や供給差圧が規定内に収まるよう管理されている場合が多い。そこで、供給バイパス弁制御など安定供給に必要な制御は中央監視システムで実施して供給の安定性を担保しつつ、一部熱源設備の個別ポンプの流量設定をエネルギーマネージメントシステムから指示することで、間接的に設備全体の稼働バランスを調整して最適運転を行う。熱供給プラント以外にも大規模ビルのセントラル空調の最適化や空調設定値の最適化等、幅広く適用可能である。当社のエネルギーマネージメントシステムを図3に示す。

4. E&Fソリューション実現に向けた社内実証

製造事業者視点の脱炭素化に焦点を当てると、再エネの調達・省エネルギーを含むエネルギーの最適運用・設備運用の効率化が重要課題と考える。当社ではこれらの課題解決に向けてE&Fソリューションと名付けた価値を提供するため、導入効果の検証と当社自らの脱炭素化への取組みを兼ねて、受配電システム製作所(香川県丸亀市)で実証試験を開始した。社内実証の全体システム構成を図4に示す。社内実証は、再エネの導入拡大に向けた需給調整や電力供給エリアをまたいだ自己託送による余剰電力の有効活用を目的に広域的な環境価値管理を実現するマルチリージョンEMSを主体とした電力基幹ソリューションと、配電ロス削減に向けた直流配電網の導入、脱炭素社会を見据えた熱源の電化、及び経済産業省が推進するスマート保安技術等の構築を目的に工場内の機器制御を行う受配電ソリューションに分かれる。

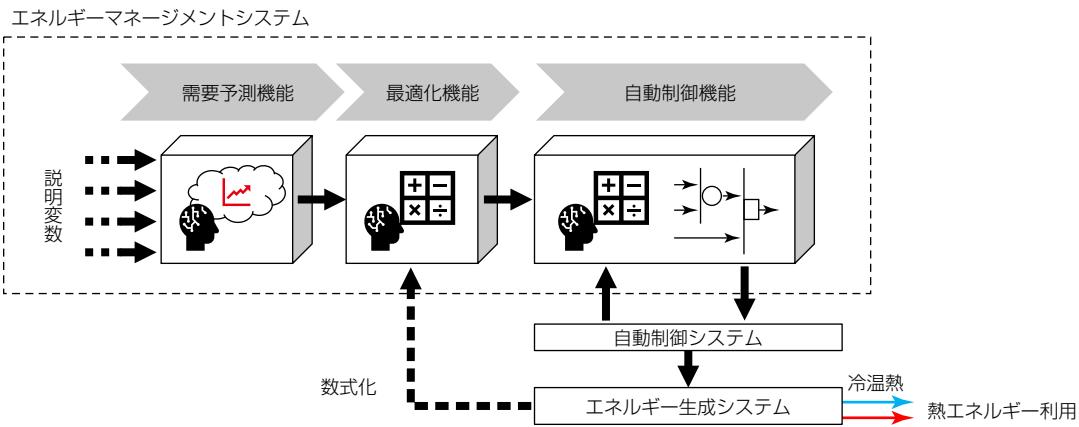


図3-エネルギー管理システムの機能構成

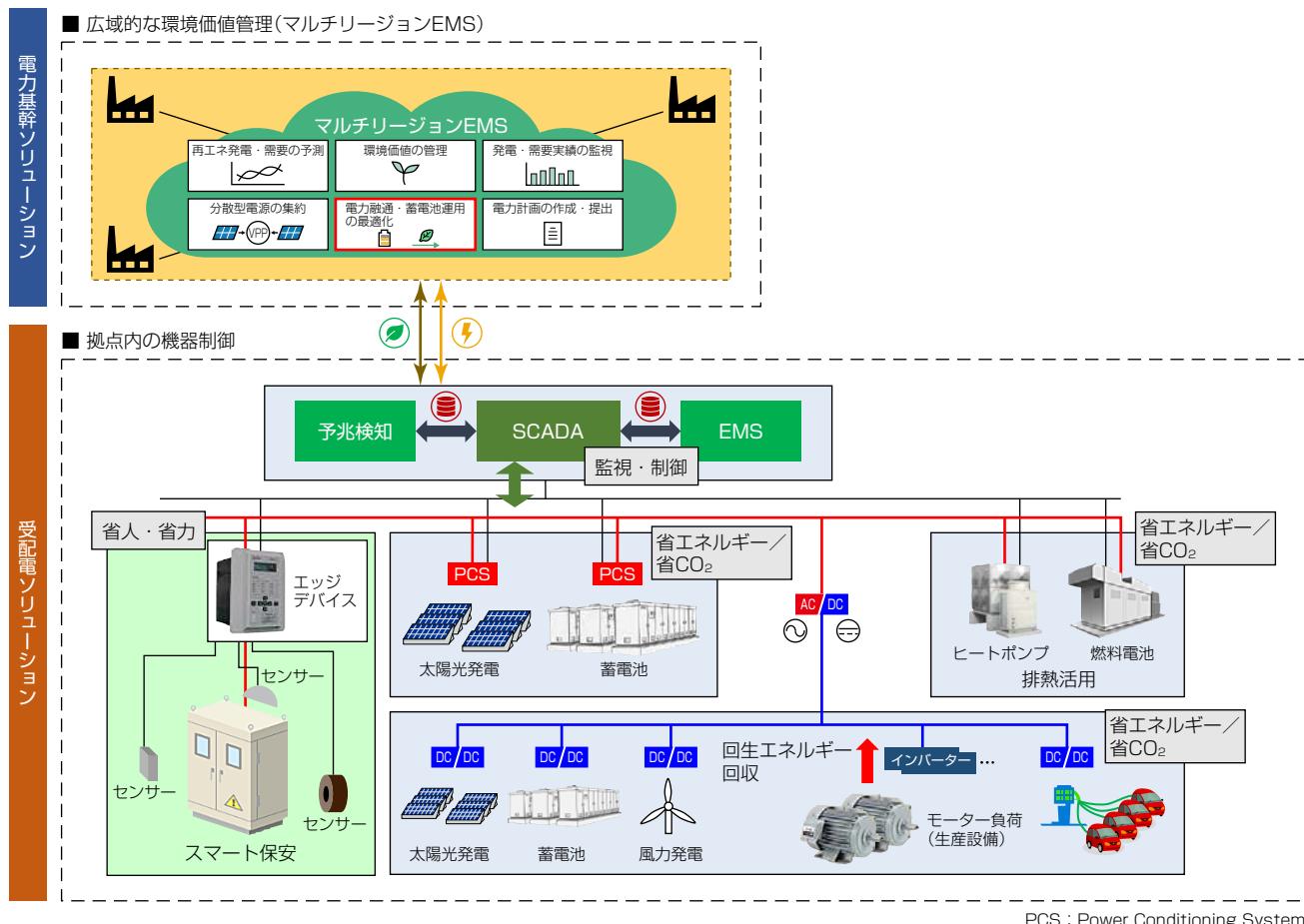


図4-社内実証全体システム構成

脱炭素化社会を実現する上で重要なことが、電力・熱の最適化と再エネ調達量のバランスを取ることである。この実現のため、自己託送制度を活用し自社内の複数の工場間で再エネを融通する実証試験を開始した。特に余剰再エネが発生している一般送配電事業者の電力供給エリアに属する工場から、再エネが不足している別の一般送配電事業者の電力供給エリアに属する工場に対して再エネを供給することで、再エネの出力制限を行わずに、発電電力を余すことなく利用できることを検証していく予定である。自己託送制度では厳格な需給管理が求められ、30分単位での太陽光発電の発電計画作成や、製作所の電力負荷を正確に予測する必要があるため、今まで培ってきた当社のエネルギー管理のノウハウを活用し、脱炭素化社会実現に向けた活動を推進している。

他方で、製造事業者の付帯設備では設備の高経年化、保守人材の高齢化と人材不足、保守技術・技能伝承の課題だけでなく、再エネを含む分散電源の増加に伴い、設備の保守・運用が困難になることが予想されている。このため、需要地の受配電設備に対するスマート保安と呼ばれる、各種センサーや監視カメラ・IoT(Internet of Things)技術を利用した遠隔監視や状態監視の推進、ドローン等を用いたアクセス困難設備への映像等による保守保安の推進、AI等によるデータ解析を用いた予兆診断・予防保全の推進等の電気保安の先進化等、将来に向けた取組みが求められている。当社受配電システム製作所では工場内の受配電設備の遠隔監視・異常検知を実証するとともに、この実証で得られるデータを活用し余寿命診断に向けた技術開発等を行っている。

5. む す び

脱炭素社会実現に向けた世界的な趨勢と、実現に向けた当社の取組みについてE&Fソリューションを中心に述べた。受配電システム製作所でのスマート保安に関する社内実証内容については、以下の論文で詳細を述べている。(本号“受配電設備向けスマート保安実現への取組み”<https://www.giho.MitsubishiElectric.co.jp/giho/pdf/2024/2406104.pdf> 参照)

各社の置かれている状況や方針は様々であるが、今回述べた当社の取組みが各社の検討の一助になれば幸いである。



特集論文

需要家向け受変電設備の異常兆候検知

Abnormal Sign Detection of Power Distribution Facilities for Consumers

藤井和希*
Kazuki Fujii
宮本靖也†
Seiya Miyamoto
佐子朋生*
Tomo Sako

*電力システム製作所
†系統変電システム製作所

要旨

三菱電機では、電力・社会インフラ分野向けIoT(Internet of Things)プラットフォーム“INFOPRISM”⁽¹⁾を中心に、その構成要素の一つとして、人工知能(AI)によるデータ分析機能を持つ“INFOPRISM-AIS”を開発している。INFOPRISM-AISは電力設備の保守点検に適用することで保守運用の高度化に貢献可能である。今回、顧客の(株)シーテックと共同で、受変電設備である遮断器の正常波形と異常兆候模擬波形を自動で判別する手法⁽²⁾について検証を行った。今後の取組みとして、異常データの収集手法を開発し、判別精度の向上を目指す。

1. まえがき

近年、電力事業者を取り巻く設備保守の人材不足や高経年化などの環境変化を背景にIoTを活用した点検省力化・高度化(スマート化)のニーズが高まっている。当社では、これら社会・電力インフラシステムに対する課題や働き方の更なる効率化のニーズに対して、運用・保全業務の効率向上に貢献するIoTとAI技術を採用したIoTプラットフォームINFOPRISMを開発している。INFOPRISMは、ゲートウェイ、データダイオード、エッジデバイスなどを含むデータ収集機器層、運用監視・構成管理、データベース・ファイルサーバー、マスターデータ管理・データ連携インターフェース、システム間連携インターフェースなどを含むデータ蓄積・連携層、遠隔監視・制御、AI・異常兆候検知、高度カメラ監視、セキュリティ対策製品・標準設計などを含むデータ分析・可視化層で構成している。INFOPRISMでのAIによるデータ分析機能の構成要素をINFOPRISM-AISと呼ぶ。本稿では、INFOPRISM-AISの開発内容と、顧客の(株)シーテックと共同で検証した受変電設備である遮断器の正常波形と異常兆候模擬波形を自動で判別する手法⁽²⁾について、それぞれ述べる。

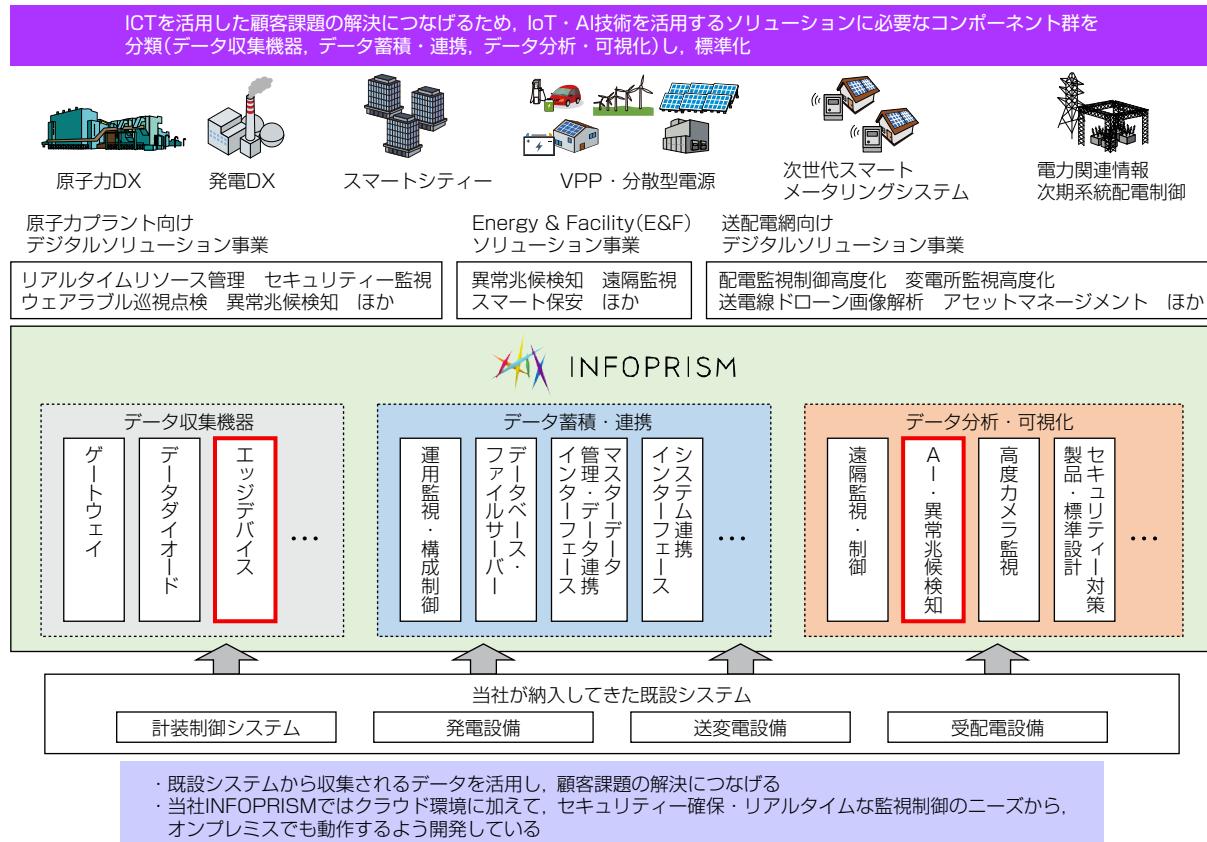
2. INFOPRISM-AISを活用した異常兆候検知

2.1 INFOPRISM-AISの概要

INFOPRISM-AISに採用している当社AI技術である“Maisart”のAI解析エンジン群(波形解析、交流波形解析、多変量解析、画像解析)を活用して、設備診断や異常兆候検知を行うことで、点検業務効率化、設備運用・保全計画の改善に貢献可能である(図1)。さらに、AI解析は現場に近いエッジデバイスで実行できるようにすることで、リアルタイム性やレスポンスの向上、ネットワークの負荷軽減などの効果が期待でき、適用可能な事業領域を拡大できる。そのため、AI解析エンジン群はエッジデバイス上でも動作するように開発した。エッジデバイスには当社製のIED(Intelligent Electronic Device)である“MELPRO-i”⁽³⁾を採用した。

2.2 INFOPRISM-AISの開発の特徴

INFOPRISM-AISの波形解析は、効率良く運用するためにサーバーとエッジで構成しており、サーバーもエッジも学習、検知機能を持ち、状況に応じて使い分けをしている(図2)。それぞれの動作環境の特徴を表1に示す。



ICT : Information and Communication Technology, DX : Digital Transformation, VPP : Virtual Power Plant
図 1 - INFOPRISMの全体像とINFOPRISM-AISの構成要素

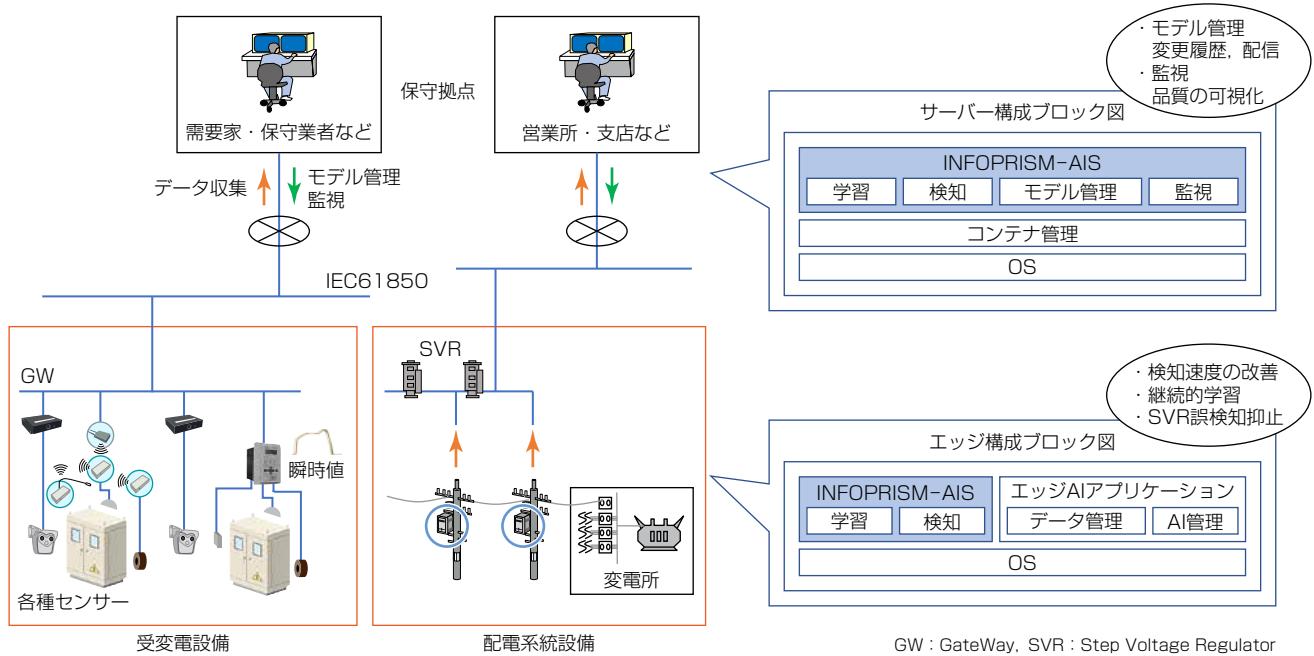


図 2 - INFOPRISM-AISの運用構成

表1-サーバーとエッジの動作環境の特徴

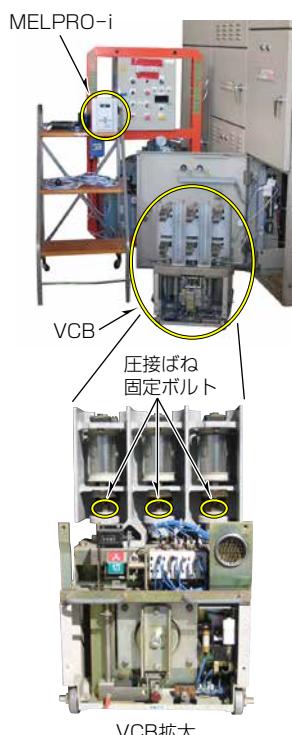
項目	サーバー	エッジ
リソース	十分なCPU、メモリーのリソースを確保できる。GPUがある場合、波形解析エンジンは高速計算に活用できる。	CPUやメモリーがサーバーと比較して低スペック。GPUはなし。波形解析エンジンはエッジ用に検知速度を改善した。 ⇒特徴①
学習	保守拠点で学習モデルの作成、モデル管理(変更履歴、配信)、監視(品質の可視化)を担当。 ⇒特徴②、③	サーバーと接続できないときに新規データの継続的学習を担当。 ⇒特徴④
検知	保守拠点で高機能な検知をしたいときに検知を担当。	設備側でデータ収集、検知を担当。瞬時値解析、SVR誤検知抑止ができる。 ⇒特徴⑤
特徴		
① エッジ用の検知速度の改善対応	エッジは低スペックであるため、エッジ専用として全般的に処理を最適化する対策(アルゴリズム内で繰り返し発生する処理の削除、エッジ特化の処理化、時系列データのメモリー渡し、行列計算の高速化、関数呼び出し回数削減等)を行った。従来比、99.7%の処理時間の削減を実現した。サンプリング周期が非常に高い波形である瞬時値も異常兆候検知できる。	
② 学習モデルの配信	サーバーで学習モデルを作成し、多くのエッジに配信して運用する。サーバーで管理している学習モデルをIEC 61850経由でエッジに配信できる機能を実現した。	
③ 学習モデルの変更履歴・検知品質の可視化	サーバーで学習モデルの変更履歴や検知品質の可視化を実現した。この機能を活用して、学習モデルに含めるデータの取捨選択や異常データを判別するしきい値を調節して検知精度を向上させることができる。	
④ 継続的学習	基本的に学習モデルの生成はサーバーで行うが、サーバーと接続ができない環境を想定し、エッジで定期的に学習モデルを更新できる機能を実現した。異常を検知すれば更新をスキップし、検知がなければその期間分のデータを学習モデルに取り込むことで最新のデータを含めて更新するよう工夫をしている。	
⑤ SVR誤検知抑止	エッジが事故予兆検知をする際に、配電系統設備上のSVRによる瞬間的な電圧の変動(昇降圧)が原因で誤検知することがある。この現象を抑止するため、解析しようとしている業界や事業についての専門的な知識や意見、トレンドを指すドメイン知識を活用して末端側のSVR動作の影響をフィルタリングする機能を実現した。	

GPU : Graphics Processing Unit

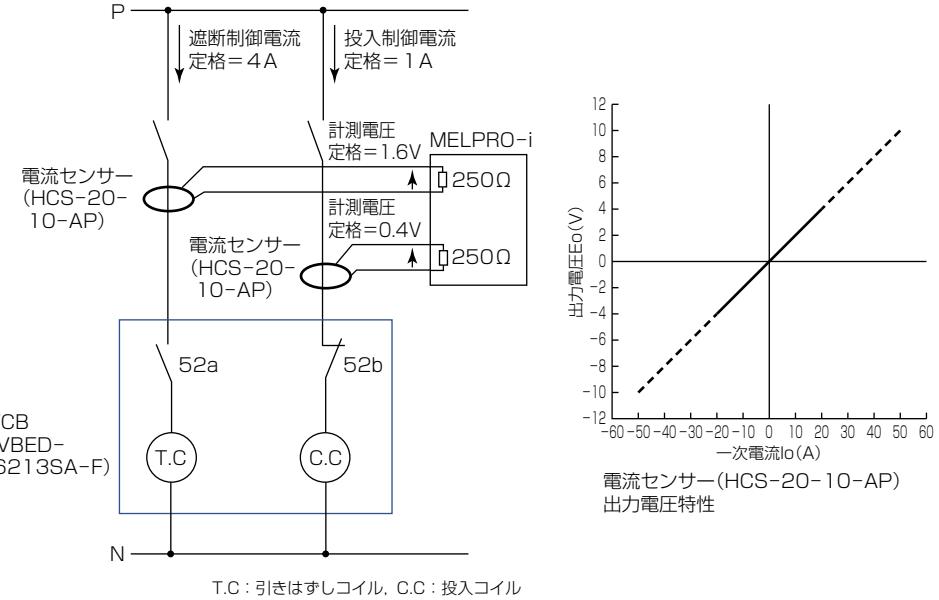
3. 受変電設備の異常兆候検知検証

3.1 検証内容

2章で述べたINFOPRISM-AISのエッジAI機能を活用した真空遮断器(VCB: Vacuum Circuit Breaker)の制御電流波形を用いた異常兆候検知検証を実施した。検証ではVCB遮断／投入時に流れる制御電流波形を計測した。測定の様子と測定回路を示す(図3)。



(a) VCB制御電流測定



(b) VCB制御電流測定回路

図3-VCB制御電流測定環境⁽³⁾

VCBは(株)シーテックが持つ(株)明電舎製の3サイクル遮断器(型式:VBED-6213SA-F:1997年製)を用いた(図3(a))。この検証では(株)シーテックの経験・知見を参考にVCBの圧接ばね固定ボルトを緩ませることで遮断動作の異常兆候を模擬した。計測方法はVCBの制御回路に(株)URD製の汎用直流電流センサーを設置し、センサー信号(直流4~20mA)をMELPRO-iで計測・記録した(図3(b))。

正常・異常兆候模擬時の遮断／投入それぞれのVCBの制御電流波形のグラフを図4に示す。

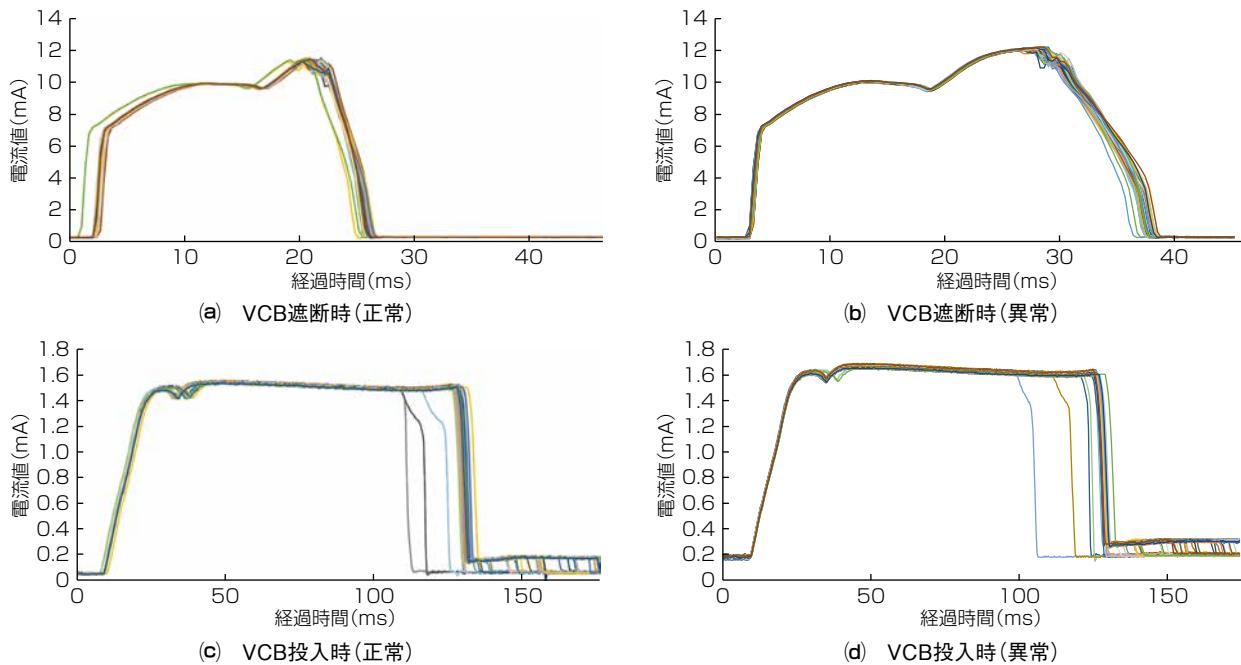


図4-VCBの制御電流の正常波形と異常兆候模擬波形(サンプリング周波数:2,880Hz)⁽³⁾

3.2 単变量解析エンジンによる正常／異常の判別可能性と精度検証

MELPRO-iのエッジAI機能には、“類似波形認識”技術⁽⁴⁾を応用した単变量解析エンジンが実装されている。単变量解析エンジンとは、単变量の時系列データを解析するAIエンジンであり、パターンマッチングをベースとしたアルゴリズムとフィルターを組み合わせたアルゴリズムである。事前に学習させた波形=時系列データ(学習モデル)と検知データとの類似度を数値化する(スコアを算出する)機能を持つ。この機能を用いて次の(1)~(3)の処理順でVCBの制御電流波形を処理・解析し、正常／異常の判別可能性と精度を検証した。

(1) 学習モデル生成

学習モデルは、VCB正常動作時の制御電流波形群からばらつきの大きい波形を除いて、残った波形群で“平均”を取る。モデルはVCBの遮断時と投入時で各一つずつ作成する。VCB遮断／投入時の学習モデル波形を図5に示す。

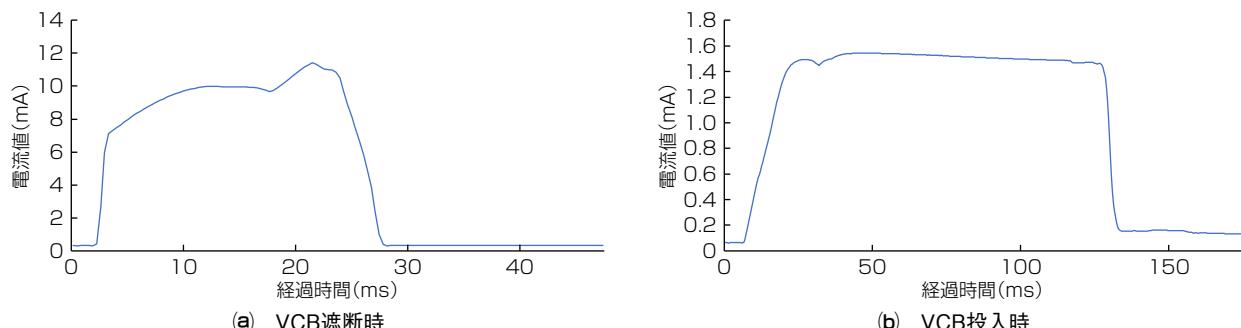


図5-学習モデル(VCB遮断／投入時)⁽³⁾

(2) 検知

検知では、先に述べた単变量解析エンジンで作成した二つの学習モデルを用いる。VCB遮断／投入時の異常兆候模擬波形は、単变量解析エンジンでスコアを計算する。スコアとは、学習モデルと検知データの類似度を定量的に表したものであり、スコアが小さければ類似度が高く、スコアが大きければ類似度が低いことを指す。

検知結果を図6に示す。VCB遮断時には、立ち上がり部(経過時間3～7ms付近)で2.0以上のスコア、立ち下がり部(経過時間36～39ms付近)で5.0以上のスコアが算出された。同様にVCB投入時には、立ち上がり部(経過時間42～58ms付近)で約0.5までのスコアの上昇が見られ、立ち下がり部(経過時間125～133ms付近)でスコアが最大値を示して、約0.75のスコアが算出された。

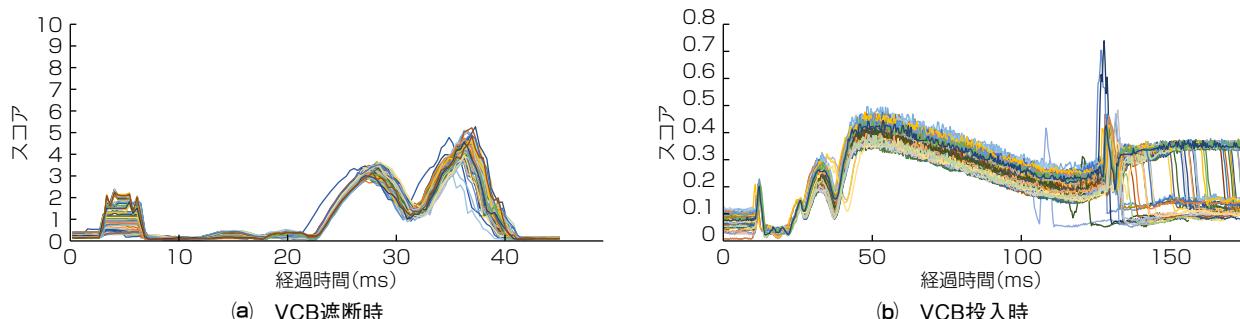


図6-異常波形スコア(VCB遮断／投入時)⁽³⁾

(3) 誤判定防止

VCB遮断時は、立ち上がり部で約2.0、立ち下がり部で約5.0のスコア最大値であった。正常・異常兆候模擬波形のスコア波形で、スコア最大値での正常・異常兆候模擬の判別が可能であることが分かった。VCB投入時は、立ち上がり部で約0.5、立ち下がり部でも約0.75のスコア最大値であった。VCB遮断とは異なりVCB投入では、スコア最大値での判別は不可であり、スコアの積算値(全スコアの総和)で正常・異常兆候模擬の判別が可能であることが分かった。

4. 今後の取組み

3章では、正常波形と異常兆候模擬波形を特定の条件下で自動判別できることを検証した。一方で、判別精度を向上させるためには多くの故障のケースを網羅した異常データの収集が必要であるが、受変電設備では、そもそも異常の発生頻度は低く、仮に発生したとしても様々な条件で起こりうる故障のケースが網羅されているとは限らないため、異常データをいかにして収集するかが課題である。ドメイン知識(解析しようとしている事象についての知識や知見、トレンドなどの情報)に基づいて機械的に異常を発生させたり、シミュレーションを活用して異常を模擬したりすることで、これらの課題に対応していく予定である。

5. む　す　び

INFOPRISM-AISに搭載しているエッジAIを活用した検証試験を通じて正常波形か異常兆候模擬波形かを自動判別できることを述べた。引き続き、エッジAIの異常兆候検知の高精度化に向けて改善していく。

参考文献

- (1) 廣岡俊彦：社会・電力インフラIoTプラットフォーム“INFOPRISM”，三菱電機技報，93, No.7, 397～400 (2019)
- (2) 宮本靖也, ほか：需要家向け受変電設備の異常兆候検知, 令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.46, 9-3-5～9-3-10 (2023)
- (3) 匠田猛雄, ほか：エッジデバイスMELPRO-iシリーズの開発, 電気学会 保護リレーシステム研究会, PPR-22-011 (2022)
- (4) 平井規郎, ほか：設備維持管理向けデータ分析技術, 三菱電機技報, 90, No.7, 416～420 (2016)

受配電設備向けスマート保安実現への取組み

Smart Industrial Safety for Power Distribution Facilities

*受配電システム製作所

要旨

電気保安人材の高齢化や人材不足、電気設備の高経年化などの影響を受けて、電気保安分野ではIoT(Internet of Things)／AIなどの新たな技術を導入することで、保安レベルの維持・向上と生産性の両立を図る“スマート保安”的な取組みが進められている。スマート保安は、異常兆候を検知し、かつ、SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)^(注1)によって設備を常時監視、余寿命診断を行うものである。

(注1) センサー等から得られたデータを収集し、設備を監視・制御するための技術

1. まえがき

電気設備の現場では、保安従事者の高齢化の問題に加えて、再生可能エネルギー設備の増加が重なり、2030年には第二種電気主任技術者が約1,000人不足すると予想されている⁽¹⁾。また、1980年代から1990年代の経済成長期に設置された電気設備の多くは更新推奨時期を超過して長年使用されているのが現状である。これらの電気設備では突発的な故障が起こるリスクがあり、一度故障が発生すると他の設備を含む長期的な操業停止や予期せぬ費用が発生することが懸念される。このような状況下で、経済産業省はIoT／AIなどを活用して、設備を自動・遠隔監視し、異常兆候を検出して事故を未然に防ぐ“スマート保安”を推進しており、三菱電機としても受配電設備向けスマート保安に関わるサービス提供の準備を進めている。

本稿では、受配電分野でのEnergy and Facility(E&F)ソリューション事業展開の一部として検討している受配電設備向けスマート保安の概要と、その実現方法について述べる。図1に現在計画しているスマート保安の概要を示す。

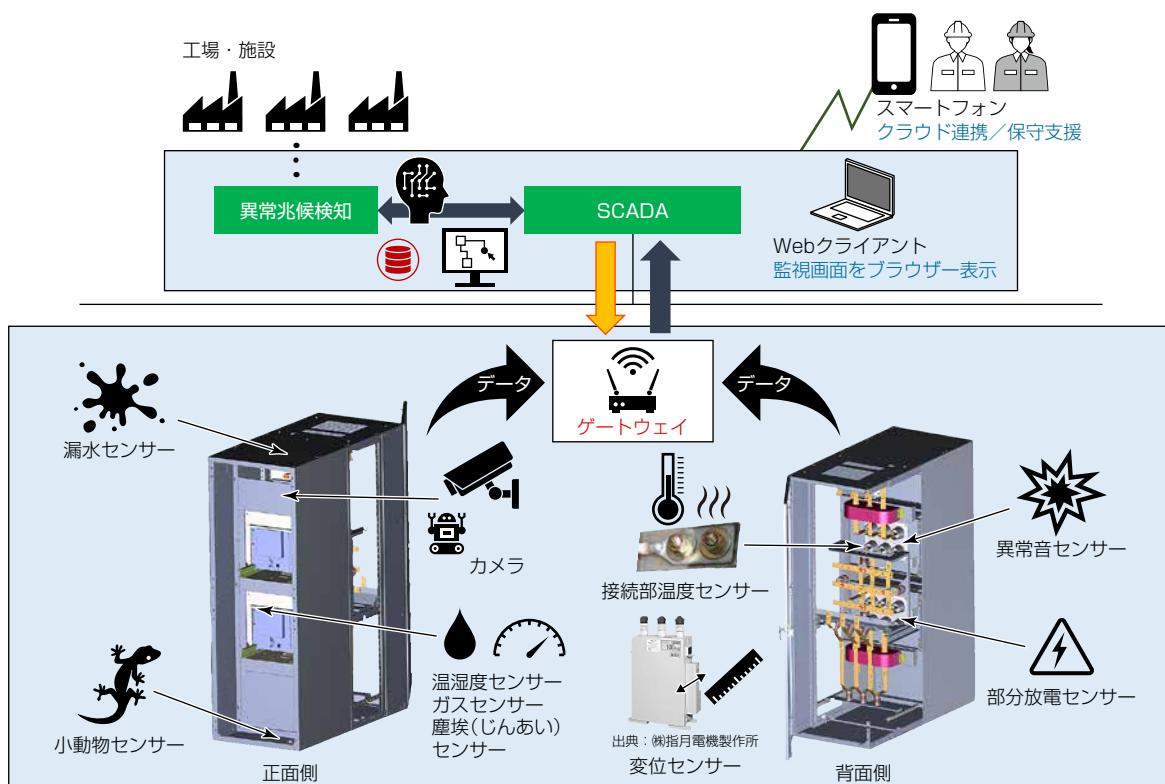


図1-当社の考える受配電設備向けスマート保安の概要

2. 受配電設備向けスマート保安

当社が考える受配電設備向けスマート保安の概要について次に述べる。

2.1 受配電設備向けスマート保安の基本的な考え方

製品評価技術基盤機構(NITE)の報告⁽²⁾によると、電気設備の事故原因の63%は“保守不備”によるものと言われている。

また、日本電機工業会(JEMA)が公表している高低圧電気機器での事故の障害現象別の統計⁽³⁾では、“絶縁低下”“地絡”“焼損”“過熱”“短絡”といった障害が多いことが明らかになっている。

したがって当社では、これらの障害発生防止の課題解決に向けて、次の二つを基本的な考え方としたスマート保安の事業化開発に取り組んでいる。

- (1) 電気保安従事者が五感を使って行っていた点検業務を、センサーを用いて代行
- (2) 発生確率の高い障害の予防

2.2 受配電設備向けスマート保安で実現を目指す三つの技術項目

当社が考える受配電設備向けスマート保安では、2.1節で示した課題解決に向けた二つの基本的な考え方に基づいて、次の三つの技術項目の実現を目指している。

- (1) 遠隔監視：人手で実施している“法定・自主点検”をオンラインで見える化し、業務を効率化
- (2) 異常検知：デジタル化によって電気設備の状態をリアルタイムに診断し、内在化している異常兆候を抽出・早期除去することで、電気設備を安定的に運転
- (3) 余寿命診断：当社が持つ劣化診断技術、及びセンサーから取得したデータを活用することで、対象機器の劣化速度を分析して計画的かつ適切なタイミングでメンテナンス・更新を実施

2.3 当社受配電システム製作所が持つスマート保安に寄与する技術

当社受配電システム製作所では、次の三つに代表されるスマート保安に寄与する技術を持っており、これらの技術を応用することで2.2節で述べた受配電設備向けスマート保安の三つの技術項目の実現を目指している。

- (1) モーター診断技術⁽⁴⁾：モーター運転中の振動、及び電気信号を解析し、機械系異常や電気系異常、トルク異常を診断する技術で、遠隔監視や異常検知技術への応用が期待できる。
- (2) MP形マルチリレー^(注2)の自動点検機能⁽⁵⁾：保護リレーとして必要な試験、及び開閉器の動作時間計測による開閉器、及びその周辺機器の劣化状態を自動で点検できる劣化診断技術で、遠隔監視や異常検知技術への応用が期待できる。
- (3) MT(Mahalanobis Taguchi)法による劣化診断技術⁽⁶⁾：電気設備の有機絶縁物に付着しているイオン量、及び湿度等を測定して、品質工学手法であるMT法を用いて有機絶縁物の放電開始時期を定量的に推定する技術で、余寿命診断技術への応用が期待できる。

(注2) 保護、計測、制御機能を一体化したデジタル式の保護継電器

3. 受配電設備向けスマート保安の実現方法

2章で述べた当社が考える受配電設備向けスマート保安を実現するため、スマート保安に寄与する技術を持っている受配電システム製作所で実施中又は実施予定である社内実証の内容について述べる。

3.1 遠隔監視の実現例

遠隔監視の実現例として、図2に遠隔監視したデータをSCADAで画面表示している例を示す。動力センターに設置した監視カメラで電気設備内外の状態を撮影するとともに、設備内に設置した複合センサーで設備内の温度、湿度及び汚損量を常時監視し、それらの情報をSCADAの画面に表示可能である。



3.2 異常検知の実現例

センサーで得られたデータから異常検知を実現する例について述べる。図3で示すように、電気設備内で結露が発生し、設備内の絶縁物に付着すると、絶縁物の絶縁抵抗が低下し、地絡、又は短絡の事故に至るおそれがある。電気設備内で結露が発生する可能性がある場合には、事前に異常と診断する必要がある。一般的に外部からの水の浸入がなければ、電気設備内外の絶対湿度は等しくなり、結露は発生しない。しかし、何らかの理由によって、電気設備内に水が浸入し、電気設備外部の絶対湿度よりも電気設備内部の絶対湿度が高くなると、特に、雨天時や冬季のような電気設備の外部の相対湿度が100%に近い場合、電気設備内で結露が発生する可能性が高くなる。そのため、温度・湿度センサーで電気設備内外の温湿度を測定し、絶対湿度を常時監視して、図4で示すように、“設備外の絶対湿度<設備内の絶対湿度”になった場合に、結露が発生する可能性が高い状態、すなわち異常と判断して、通知する。さらに、この通知を受けて、電気設備内のヒーターを動作させる、又は除湿器を動作させるなどの対策を施せば、結露の発生を未然に防止することが可能になる⁽⁷⁾。

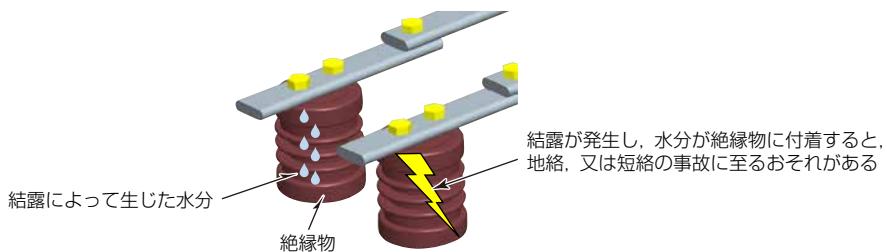
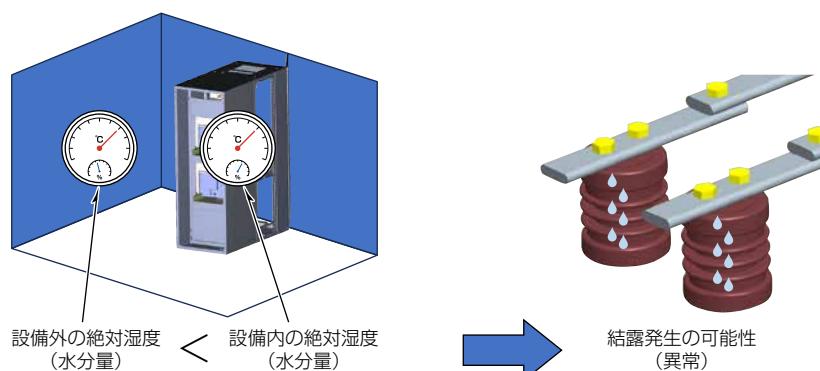


図3-結露発生時



3.3 余寿命診断に向けた技術開発

当社が考えるスマート保安では、3.2節に述べた温度・湿度センサーのほかにも図1に示すようなガス、塵埃、音、変異などの様々なセンサーから得られたデータに当社が持つ“MT法による劣化診断技術”⁽⁶⁾を応用することで、電気設備の余寿命診断を実現する技術を開発中である。

3.4 異常検知データの応用例

結露発生の異常検知の診断に用いた温度・湿度センサーから得られる温度、湿度について、ある一定の期間のデータを蓄積し、これらのデータを解析することで、省エネルギーにも応用可能になる。

例えば、ヒーターや除湿器を常時稼働させるのではなく、設備外の温度が低下する時間帯、又は電気設備が停止して設備内の温度が低下する時間帯に合わせてヒーターや除湿器を動作させることで消費電力を抑制する手法などが考えられる。

また、温度、音、変異などの複数のセンサーからのデータを組み合わせることで、開閉器や遮断器の接点部分で発生確率の高い焼損、過熱、短絡などの障害の異常兆候である“部分放電”及び“局所過熱”を検知する精度を向上させる技術も併せて開発中である。

4. む　す　び

当社の考える受配電設備向けスマート保安の概要、及びその実現方法について述べた。

当社は、本稿で述べた受配電設備向けスマート保安に取り組み、電気保安人材の高齢化や人材不足、及び電気設備の高経年化などの社会問題に対するE&Fソリューションを提供していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気主任技術者制度について（2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/014_01_00.pdf
- (2) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構：電気保安の現状について(令和3年度電気保安統計の概要)（2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/028_02_02.pdf
- (3) 一般社団法人 日本電機工業会：高低圧電気機器保守点検のおすすめ（2019）
[https://www.jema-net.or.jp/jema/data/s5223\(20190329\).pdf](https://www.jema-net.or.jp/jema/data/s5223(20190329).pdf)
- (4) 金丸 誠、ほか：電流電圧信号を用いた低圧三相モータの診断、電気学会論文誌D, 142, No.8, 技術開発レポート（2022）
- (5) 平田陽介：停電時間を大幅に削減する保護リレー自動点検システム、三菱電機技報, 91, No.11, 619~623 (2017)
- (6) 岡澤 周、ほか：MT法による特別高圧の劣化診断・余寿命推定技術、三菱電機技報, 85, No.10, 609~612 (2011)
- (7) 特許第6846982号(登録日：2021年3月4日)

直流配電システムの機能強化

Functional Enhancement of Direct Current Distribution Network System

竹内勇人*

Hayato Takeuchi

越智良輔*

Ryosuke Ochi

園江 洋*

Hiroshi Sonoe

和泉晃浩*

Akihiro Izumi

*受配電システム製作所

要旨

三菱電機は、2023年9月に清水建設株の“温故創新の森 NOVARE(ノヴァーレ)”向けに、平時の省CO₂と災害時のBCP(Business Continuity Plan)への寄与を目的とする直流配電ネットワークシステム“D-SMiree Standard(単機100kW)”を納入し、水素製造装置と燃料電池から成る水素エネルギー系統を連系した直流配電システムを構築するプロジェクトに取り組んだ。

1. まえがき

近年、温室効果ガス排出を実質ゼロにするカーボンニュートラル(CN: Carbon Neutral)の実現に向けた取組みが世界的に加速している。政府の2050年CN実現に向けたグリーン成長戦略に直流配電システムが取り上げられており、次世代の電力供給システムとして注目されている。また、地震や台風などの自然災害への備えとして防災拠点や避難所などでのエネルギーの自給自足の要求が高まってきている。

当社は、2020年に直流系統内の太陽光発電(PV: Photovoltaic)電力などの再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)の余剰電力を逆変換して交流系統に融通可能とする双方向型中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree Standard(100kW)”を開発し⁽¹⁾、2023年9月に清水建設株の温故創新の森 NOVARE向けに納入した⁽²⁾。このシステムは再エネとリチウムイオン蓄電池(LIB: Lithium Ion Battery)を直流連系することによる平時の省CO₂と災害時のBCPへの寄与を目的として導入された。このプロジェクトでは水素製造装置と燃料電池から成る水素エネルギー系統を連系した直流配電システムを構築した(図1)。

本稿では、CNに貢献する水素エネルギー系統を連系した直流配電システムと、プロジェクトへの当社の取組み内容について述べる。

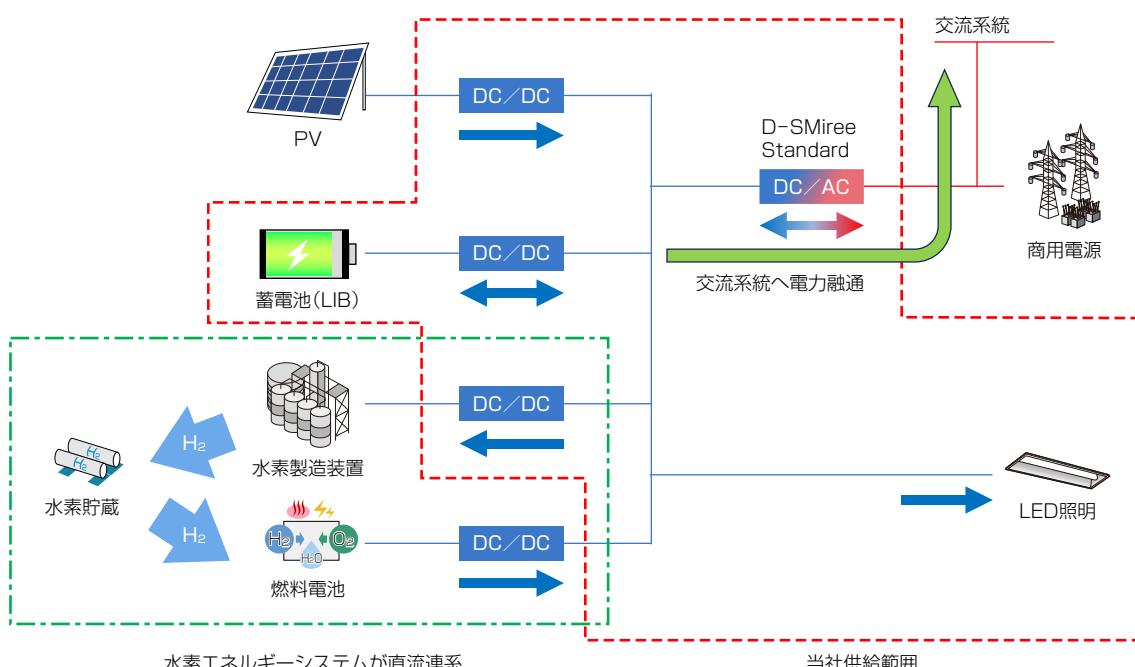


図1-直流配電システム

2. 水素製造装置と燃料電池から成る水素エネルギー・システムを連系した直流配電システム

当社は2023年9月、清水建設(株)の温故創新の森 NOVAREにD-SMiree Standardを中心とする直流配電システムを納入した。このプロジェクトの概要及び当社の取組み内容を述べる。

2.1 温故創新の森 NOVAREの概要

温故創新の森 NOVAREでは、イノベーションの創出と人財育成を目的として、様々な研究、実証が行われている。実証の中のエネルギーに関して、直流電力の建物間融通及び水素製造装置と燃料電池から成る水素エネルギー・システムを連系した直流配電システムの構築に取り組んだ。

図2に示すとおり、直流配電部はNOVARE Hub(A棟)、NOVARE Lab(B棟)にまたがって構成される。B棟には交流系統につながるAC(交流)/DC(直流)変換器、PV、LIB等の電源設備及び負荷としてLED照明が設置される。A棟には水素製造装置、LED照明、USB電源等の負荷設備に加えて、純水素を燃料として発電する燃料電池が設置され、A棟、B棟間で相互に直流で電力融通が実施される。

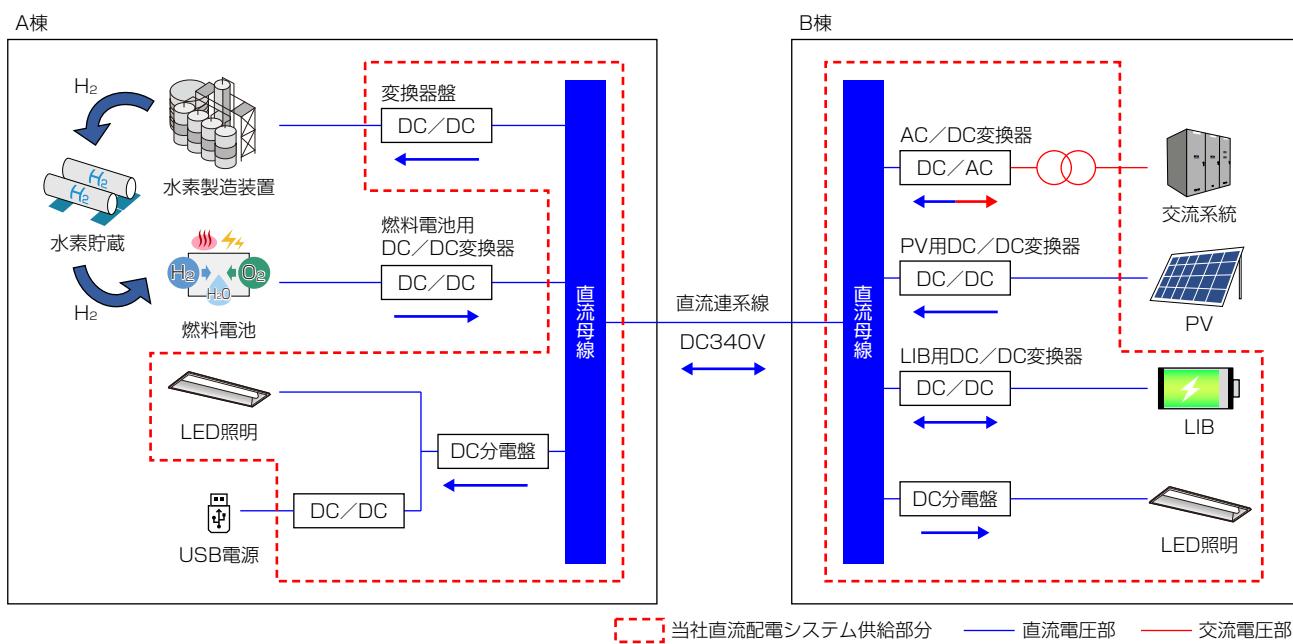


図2-温故創新の森 NOVARE 直流配電部構成

この構成によって、B棟のPV余剰電力分をA棟に直流連系線で電力融通するなど、各棟に設置された各種電源を再エネ自給率向上のための最適制御を行うことで省CO₂に貢献する。また、災害時には直流電力を高効率で棟間電力融通することができるため、BCP対策の強化につながっている。この構成、機能は環境省の“平時の省CO₂と災害時避難施設を両立する直流による建物間融通支援事業”的要件を満たしており、2021年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金対象事業として実施している。

また、PVの余剰電力を使用して水素製造装置でグリーン水素(再エネなどを活用しCO₂を排出することなく製造された水素)を製造する。グリーン水素を使用し燃料電池で発電することによってCNに寄与する。それらを直流で連系、動作させることによって変換ロスを削減でき、エネルギーの効率的な利用が可能になる。

2.2 当社の取組み内容

このプロジェクトにおいて、当社は、直流配電の中核設備になるAC/DC変換器、LIB用DC/DC変換器、PV用DC/DC変換器、直流負荷用の直流分電盤、直流LED照明に加えて、水素製造装置に電力を供給する変換器盤を納入した(図2赤点線部)。次に、当社が取り組んだ部分について述べる。

(1) 水素製造装置への直流電力供給

当社で変換器盤を開発し、水素製造装置への直流電力の供給を可能にした(図3)。変換器盤内にはDC/DC変換器、変換器盤PLC(Programmable Logic Controller)、タッチパネル式表示器を内蔵している。水素製造には6kW以上の出力が必要であることから、DC/DC変換器は単機2.5kW出力仕様の製品を3台並列使用することにした。DC/DC変換器はCVCC(Constant Voltage, Constant Current: 定電圧・定電流)特性の出力を持つ。CV設定電圧以下ではCC設定電流での定電流動作を行い、CC設定電流以下の電流でCV設定電圧に達すると、CV設定電圧での定電圧動作を行う。CV目標電圧を、水素製造装置の最大電圧(水素製造最大電圧)以上として、CC設定電流を上位からの指示電流としていることで、常に上位からの指示電流でのCC動作になり、水素を製造できる。



図3-水素製造装置用変換器盤

今回の水素製造装置は、所定の入力電圧(水素製造開始電圧)を超えると水素製造動作を開始し、入力電流に応じて水素製造量及び電圧値が決まる負荷特性であった(図4)。そのため起動時にDC/DC変換器の出力を0Vから上昇させていくとCV目標電圧に達することなくCC設定電流での定電流動作に移行することから、DC/DC変換器が異常を検知し停止する問題が発生した。この対策として、起動時のCV目標電圧を水素製造開始電圧未満に設定し一旦CV目標電圧に到達させ、その後通常の運転時CV目標電圧に再設定してCC動作に移行させるという2段階の起動にすることで問題を解決した。

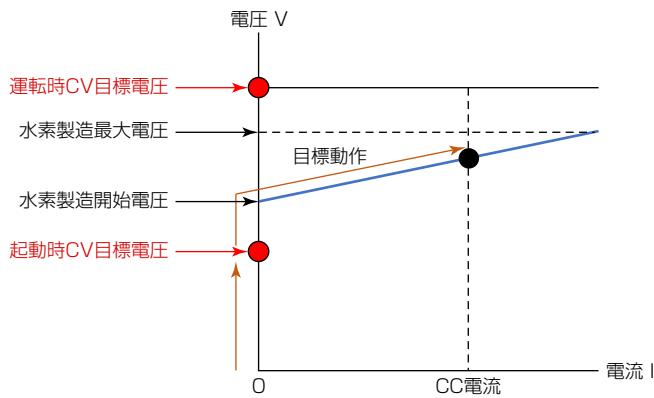


図4-水素製造装置の電流電圧特性とDC/DC変換器動作

(2) 燃料電池の直流連系

D-SMireeの負荷端子に、直流負荷に加えて発電装置である燃料電池を接続した。燃料電池出力が直流負荷電力よりも大きい場合、余剰分は直流のままLIBに充電されるが、LIBが満充電に近く余剰を吸収できない場合は交流系統へと逆変

換を行う。もし燃料電池出力を交流系統へ逆変換中に停電が発生した場合、行き場をなくした電力によって直流母線電圧が過電圧しきい値以上になりD-SMireeが停止しシステムがダウンすることが懸念された。この問題解決には燃料電池用DC/DC変換器をD-SMireeよりも先に確実に停止させる必要があるため、燃料電池用DC/DC変換器の直流母線側過電圧しきい値をD-SMireeより低く設定することで保護協調を確保した。

(3) 停電時のLIBPCSの自立運転への連系

商用電源の停電時、図5に示すとおり、D-SMireeはまず交流系統側に設置されている非常用発電機への連系運転を行う。停電が長引いて同発電機の燃料が枯済した場合、同様に交流系統側に設置されているLIBPCS(Lithium Ion Battery Power Conditioning System)の自立運転出力への連系運転に切り替わる。交流系統側に設置されているこのLIBは、同発電機の停止後のメイン電源として使用される。D-SMireeが自立運転出力に連系することによって、直流側のPV及び燃料電池による発電電力を交流側の負荷にも供給することが可能になる。また、再エネ余剰電力を交流側のLIBへも充電することによって、停電時でも再エネを最大限に活用できる。懸念点として、AC/DC変換器の一次側にある交流トランクへの励磁突入電流によって、LIBPCSが過電流停止又は破壊につながるリスクが想定されたが、LIBPCSの自立運転ソフトスタート時間を最適に調整することによって、励磁突入電流を防止し、LIBPCS、AC/DC変換器の安全な起動を実現した。また、交流側のLIBの満充電時にさらにPVの余剰分が発生すると過充電防止のためLIBPCSが停止してしまう。それを回避するために、交流側のLIBが満充電付近になると、中央監視からの指示によってPV用DC/DC変換器を停止させることにした。また、交流側のLIBの充電率がしきい値以下になると再びPV用DC/DC変換器を起動させることによって、停電時のPV電力を有効活用可能にした。

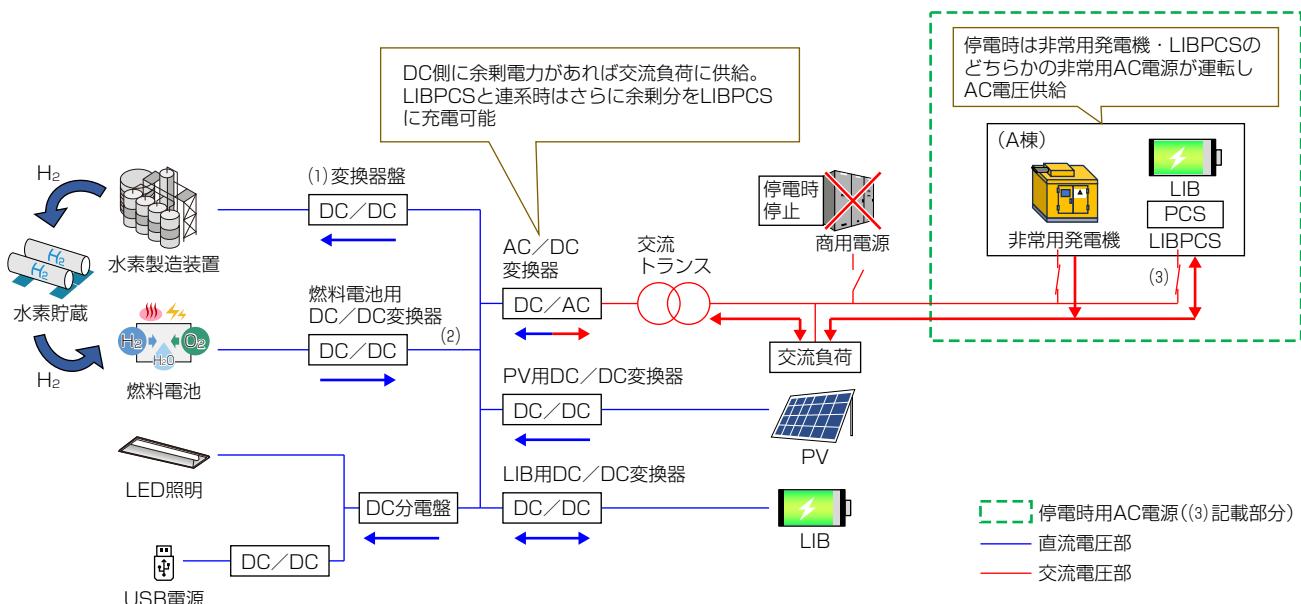


図5-停電時に非常用AC電源に連系する直流配電システム

3. むすび

CNの実現に向けて直流配電システムで燃料電池及び水素製造装置から成る水素システムの直流連系を実現した。

今後、直流配電の普及のため、空調機器やファン、搬送機器などの直流負荷のラインアップ拡大に向けた活動を他メーカーと共に実施し、2050年CNの実現に貢献する製品化・事業化に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 竹内勇人, ほか: 直流配電システムの取組みと今後の展望, 三菱電機技報, 95, No.11, 712~715 (2021)
- (2) 清水建設株式会社: 「温故創新の森 NOVARE」で直流配電システムの実証を開始
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2024/2024013.html>

72／84kV環境対応開閉装置

72/84kV Eco-Friendly Switchgear

中内慎一郎*
Shinichiro Nakauchi
杉野一樹*
Kazuki Sugino
宮下 信*
Makoto Miyashita

*系統変電システム製作所

要旨

環境対応開閉装置は、従来形のガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear : GIS)に対して、環境負荷低減に貢献し、さらに保守省力化及び機器更新性向上を図った最新形の開閉装置である。これまで半世紀にわたり培ってきたGIS技術を基に、真空バルブ及びドライエアーを適用することで環境負荷の高いSF₆(六フッ化硫黄)ガスを不使用にして、さらに小型化・構造簡素化、保守点検の省力化などを実現した最新形の72／84kV環境対応開閉装置を開発した。

1. まえがき

GISは、その優れた性能と特長から電力用開閉装置として広く国内外に適用されている。当社でもこれまで半世紀にわたってGIS及びガス遮断器(Gas Circuit Breaker : GCB)の製造を行ってきた。しかし、GISの絶縁、遮断性能を実現しているSF₆ガスの地球温暖化係数(Global Warming Potential : GWP)がCO₂の24,300倍であることから、欧州でのフッ素ガス規制法(EU573/2024)などによってSF₆フェーズアウトを基本にした規制が進んでいく。今回、SF₆ガスの代替として遮断器(Circuit Breaker : CB)の遮断部に真空バルブ、機器の絶縁媒体としてドライエアー(GWP=0)を適用し、環境負荷低減及び保守点検性向上、既設GISとの機器更新性を確保した最新機種である72／84kV環境対応開閉装置を開発した。図1にその主な特長を示す。

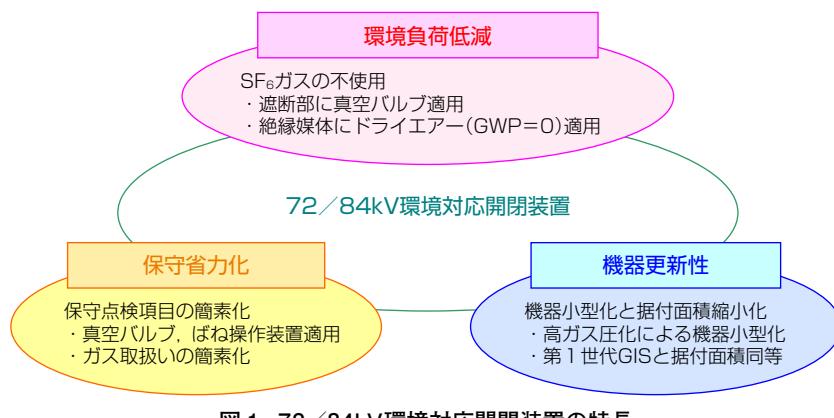


図1-72／84kV環境対応開閉装置の特長

この環境対応開閉装置は温暖化係数の高いSF₆ガスを必要としない。遮断部に真空バルブ、絶縁媒体にドライエアーを適用することで、環境負荷低減を図った。また、負荷電流10,000回まで交換不要である真空バルブの適用によって保守省力化を図るとともに、断路器(Disconnect Switch : DS)及び点検接地開閉器(Earthing Switch : ES)操作装置へフレキシブル連結を適用することで保守面を通路面にして作業性の改善を図った。また、高ガス圧化によって機器を小型化し、第1世代GISと据付面積の同等性を実現した。

本稿では、最新形である72／84kV環境対応開閉装置の特長及び適用技術、開発、製品化について概要を述べる。

2. 定格事項と基本構造

72/84kV環境対応開閉装置の定格事項、基本仕様を表1に示す。定格電流は2,000A、定格短時間耐電流は31.5kAまで対応している。基準ガス圧力は機器サイズの小型化を図るため、0.8MPa(第1世代GISは0.4MPa)としている。なお、本稿に述べる圧力値は全てゲージ圧力を示す。DS、ESは電流遮断方式に磁気アーケ駆動方式を採用することで遮断性能の向上を図っている。また、DS及び点検ESの操作装置にフレキシブル連結を適用し、操作装置の配置自由度を向上させている。

表1-72/84kV環境対応開閉装置の定格事項と基本仕様

	定格事項	仕様
共通	定格電圧(kV)	72/84
	定格電流(A)	800/1,200/2,000
	短時間耐電流(kA)	20/25/31.5
	雷インパルス耐電圧(kV)	350/400
	基準ガス圧力(MPa)	0.8
CB(ばね操作)	定格遮断電流(kA)	20/25/31.5
DS(電動操作)	ループ電流開閉(A)	1,600
線路ES(ばね操作)	誘導電流開閉(A)	200

図2(a)に新形器の72/84kV環境対応開閉装置、図2(b)に従来器の第1世代72/84kV GISの構造図を示す。72/84kV環境対応開閉装置は全ての機器で3相の高圧部を一つのタンク内に収納する全3相一括構成にして、真空遮断器(Vacuum Circuit Breaker: VCB)を縦形配置、主母線を積層配置にしている。この構成によって、主母線以外の3相分離構成及び主母線の下面配置で構成していた第1世代72/84kV GISに対して同等以下になる据付面積を実現した。また制御盤を含めたユニット一体輸送を実現しており、現地の機器据付工期短縮を図っている。機器の幅(図2のA方向)が最小になるように機器寸法を極小化し、DS、ESの操作装置を通路面に配置して保守点検作業性の向上を図った。

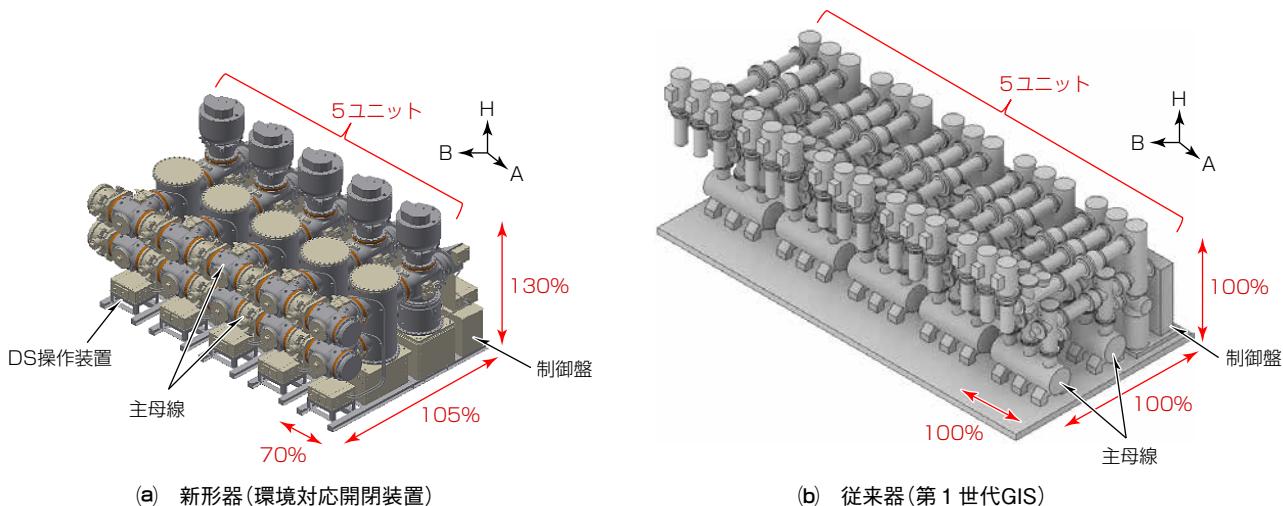


図2-72/84kV開閉装置構造図

次に、遮断器とブッシングで構成する単体遮断器について、図3(a)に新形器の72/84kV VCB、図3(b)に従来器の72/84kV GCBの外観を示す。単体遮断器は、環境対応開閉装置と同様に真空バルブを収納したタンク内をドライエアーによる絶縁にして、架空線と取り合うブッシング部を気中絶縁とした構成である。新形器は上部のブッシング引き出し部の構造を最適化することによって、従来器とほぼ同等の据付面積を実現した。

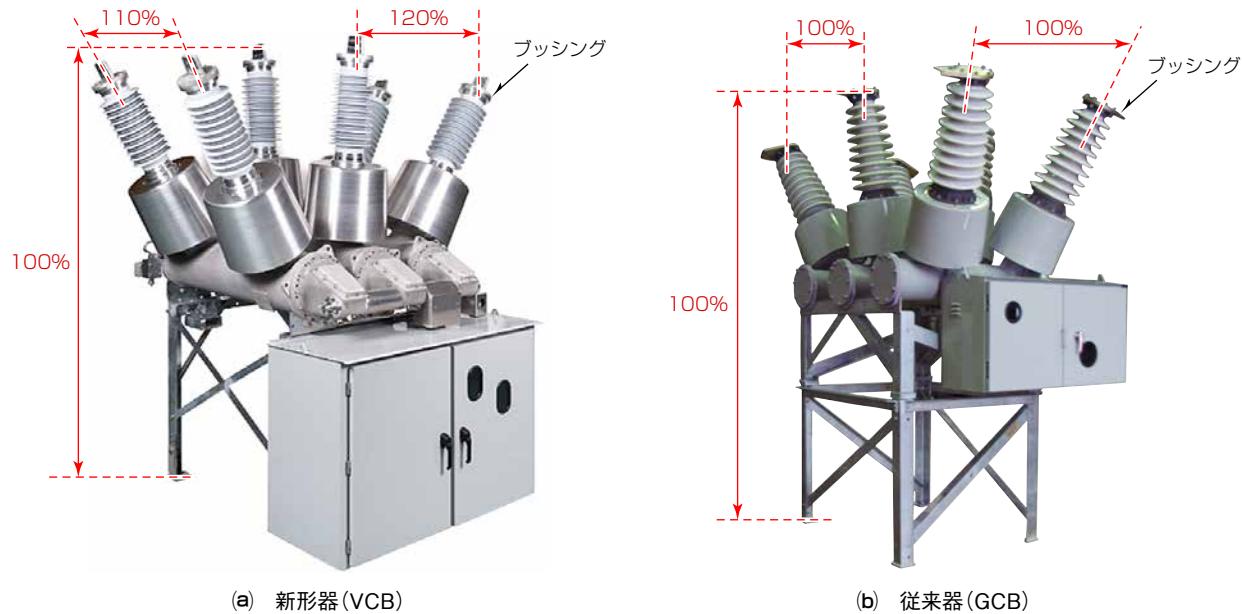


図3-72/84kV単体遮断器

3. 環境対応開閉装置の適用技術

環境対応開閉装置の開発で、ドライエアーを絶縁媒体として適用するための要素技術開発を実施してきた。機器運用の観点から、環境対応開閉装置と従来器GISの主な点検項目の比較を表2に示す。3章では表2に示す、③分解生成物と材料適合性、④部分放電測定、⑤ガスシール材料、⑦CB内部点検周期について特長を述べる。

表2-環境対応開閉装置とGISの主な点検項目比較

	環境対応開閉装置	GIS
① ガス圧力(MPa)	0.8	0.4~0.5
② ガス水分量(ppm)	150	150
③ 分解生成物と材料適合性	NO, NO ₂ , O ₃	SF ₆ , SO ₂ , SOF ₂ , HF
④ 部分放電測定	UHF法(IEC60270法)	UHF法(IEC60270法)
⑤ ガスシール材料	EPDM	CR, NBR, EPDM
⑥ ガス漏れ測定の適用ガス	He	SF ₆
⑦ CB内部点検周期	負荷電流開閉 10,000回	負荷電流開閉 5,000回

NO:一酸化窒素, NO₂:二酸化窒素, O₃:オゾン, SF₆:四フッ化硫黄,
SO₂:二酸化硫黄, SOF₂:フッ化チオニル, HF:フッ化水素.
UHF:Ultra High Frequency, EPDM:エチレンプロピレンゴム,
CR:クロロブレンゴム, NBR:ニトリルゴム, He:ヘリウム

3.1 分解生成物と材料適合性

環境対応開閉装置で、DSとESの小電流開閉はドライエアー雰囲気中で行われる。小電流開閉によって発生する分解ガスについて分析／測定した。DSによる電流3,200Aの100回開閉後の測定結果を表3に示す。生成された分解ガスは窒素酸化物NO, NO₂、及びO₃であり、生成濃度は数百ppmv程度と小さかった。機器内部を構成する材料に対する材料適合性試験の評価は、どれも顕著な特性低下がなく、機器への分解生成物の影響はほぼないことを確認した⁽¹⁾。

表3-DSによる電流3,200A 100回開閉後の分解ガス測定結果

	NO	NO ₂	O ₃
発生濃度(ppmv)	51	293	<1

3.2 部分放電測定

以前からドライエアー圧力が0.5MPaなどの場合はUHF帯より低い周波数帯が部分放電測定に適していることが報告されている。一方、今回開発の環境対応開閉装置は、絶縁性能向上を目的に、基準ガス圧力を0.8MPaまで増加させているため、0.8MPaでの部分放電の発生周波数について検証した⁽²⁾。図4に針電極に設置した検出抵抗を介して測定した部分放電電流とUHFセンサー信号の測定結果を示す。交流電圧印加によって発生した部分放電をUHFセンサーで検出している。環境対応開閉装置は従来器と同様にUHFセンサーが適用可能であるとの結果を得た。

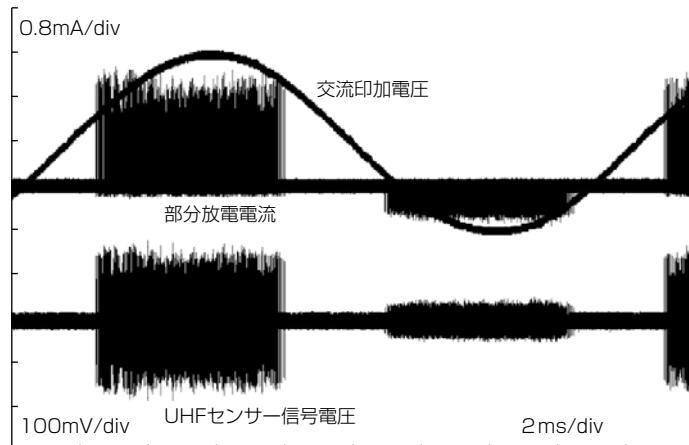


図4-部分放電電流とUHFセンサー信号の測定結果

3.3 ガスシール材料と寿命

ガス気密部品であるシール材料の寿命評価のため、高圧ドライエアー中での劣化特性を検証した⁽³⁾。シール材料の主な劣化要因はシール材料に接している酸素による劣化である。SF₆機器ではシール材料に接する酸素は外気0.1MPaだけであるが、環境対応開閉装置は内部にドライエアー0.8MPaを封入しており、SF₆機器に比べて酸化劣化が促進されるため、耐酸化性の高い材料を適用する必要がある。そのため、耐酸化性が高くSF₆機器にも適用しているEPDMを適用する。寿命評価試験では、装置内にドライエアー0.8MPaを封入し、槽内を一定温度に保持しシール材料の圧縮永久歪(ひずみ)を測定した。図5に各温度での圧縮永久歪み80%到達時間を示す。日本の代表地域(大阪府)での等価温度66°Cで圧縮永久歪み80%到達時間は100年であることから、本体機器寿命に対してシール材料寿命は十分な裕度を持つ。

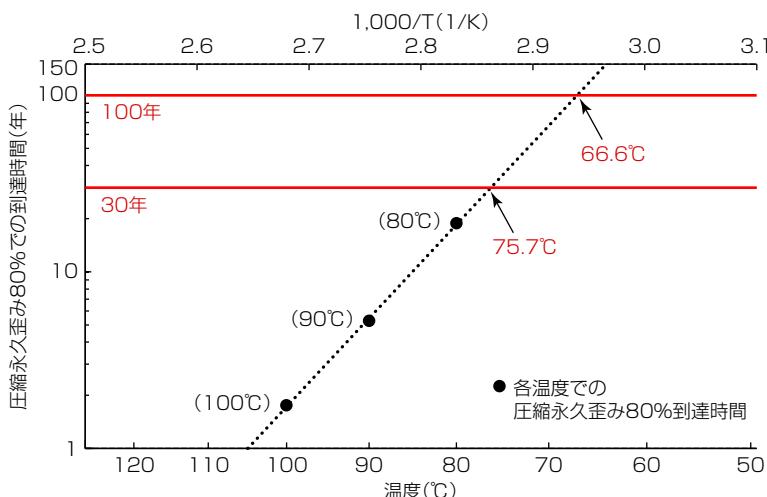


図5- EPDM O-リングの圧縮永久歪み80%到達時間のアレニウスプロット

3.4 CBの内部点検周期

CBのコンタクト点検・交換周期は、電流遮断部の接点寿命が影響する。環境対応開閉装置は、CBに真空バルブを適用しており、電流遮断部を真空の遮断接点で構成している。真空中の接点間で発生したアーカーは、真空中で発生することに加えて、接点間に発生する磁界の影響を受けることで接点表面に広く拡散する。そのため、電流遮断時でアーカーの電流密度を低減でき、接点表面の温度上昇を抑制できるためSF₆機器に比べて電極の損耗量を抑制できる。この効果によって、従来器のCBの内部点検周期が負荷電流開閉5,000回に対して、コンタクト交換周期を10,000回まで延伸可能である。

4. 形式試験及び現地据付状況

72/84kV環境対応開閉装置及び72/84kV単体VCBについて、耐電圧、遮断などJEC(電気規格調査会)規格に定める形式試験を実施し十分な性能を確認した。また、輸送試験、連続開閉試験などの参考試験を実施し十分な性能を持つことを確認した。一例として、環境対応開閉装置の耐電圧試験状況を図6に、輸送試験状況を図7に示す。耐電圧試験では規格値に対して120%と十分な裕度を確保していることを確認した。また、輸送試験では悪路模擬走行でも各部応力が十分低く裕度を持つことを確認した。



図6-耐電圧試験状況



図7-輸送試験状況

次に、2023年5月から運転開始した72/84kV単体VCBの現地運転状況を図8に示す。工場での出荷試験形態と同じブッシング一体輸送として現地据付工程の短縮を実現した。また、SF₆ガスを用いない代替ガス機器についての内容が追加されたJEC-2390:2023を参照して現地耐電圧試験として、系統試充電によって健全性を確認した。JEC-2390:2023規定のSF₆機器と同様な現地作業管理項目、品質管理基準が適用されていること、SF₆絶縁と比べてドライエアー絶縁に及ぼす金属異物の影響が同等以下⁽⁴⁾であることを考慮した。据付面積は2章述べたとおり従来器と同等であり、変電所の既設基礎の流用が可能であり、変電所の敷地面積を増やすずに環境対応開閉装置の導入が可能である。



図8-72/84kV単体VCBの現地運転状況

5. む す び

電力業界を取り巻く様々な情勢変化の一つとして近年SF₆規制があり、環境負荷低減、経年機器の更新が要求される中、当社が長年にわたり培ってきたGIS技術に加えて真空バルブによる遮断、ドライエアー中による絶縁など新たな研究・開発の成果を反映し72/84kV環境対応開閉装置の開発、製品化を行った。特長として、環境負荷低減、保守省力化及び機器更新性向上を図ったことが挙げられる。

今後、更なる高定格化、機器の小型化及びデジタル化対応を図った環境対応開閉装置の開発、製品化を実施予定である。

参 考 文 献

- (1) Miyashita, M., et al.: Gaseous by-products generated by bus-transfer current switching in dry air and their impacts, International Symposium on High Voltage Engineering 2023, 336 (2023)
- (2) 宮下 信, ほか: 高ガス圧ドライエア中の部分放電検出, 令和5年電気学会全国大会論文集, 6-034, 44~46 (2023)
- (3) 佐藤光馬, ほか: ドライエア適用機器のガス気密特性, 令和4年電気学会全国大会論文集, 6-006, 6~8 (2022)
- (4) Inami, K., et al.: Partial Discharge and Breakdown Properties in Dry Air, N, and CO, Under Nonuniform Electric Field, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 30, No.6, 2583~2591 (2023)

特集論文

新型デジタルリレー MELPRO-CHARGE3/HB

Numerical Protection Relays MELPRO-CHARGE3 for Domestic Market
and -HB for Overseas Market Developed Based on Common Platform

田中靖之*

Yasuyuki Tanaka

山根定章*

Sadaaki Yamane

長岡 啓*

Satoshi Nagaoka

角本悠輔*

Yusuke Kakumoto

田中俊哉*

Toshiya Tanaka

*系統変電システム製作所

要旨

データの利活用、国際規格IEC 61850への対応など、国内及び海外で多様化しながらも共通項を持ったユーザーニーズへの対応や、ヒューマンインターフェース(以下“HI”という。)機能向上によるユーザー業務効率化への寄与を目的として、国内向け新型デジタルリレー“MELPRO^(注1)-CHARGE3”(以下“MELPRO-C3”という。)、海外向け新型デジタルリレー“MELPRO-HB”を共通プラットフォームで開発した。

(注1) Mitsubishi EElectric PROtection : 三菱電機の保護リレー(継電器)の総称

1. まえがき

保護リレーMELPROシリーズは現在、国内電力向けは“MELPRO-CHARGE2”(以下“MELPRO-C2”という。)、海外電力向けは“MELPRO-HA”を主力製品としている。どちらも実用化から約10年が経過し、その間に保護リレー装置を取り巻く環境は大きく変化している。電力系統の特性・構成変化に伴う保護機能へのニーズだけでなく、保護リレーに係る業務の負担や装置コスト削減などを目的とした高度化、統合化が求められるようになってきた。それに加えて、近年は海外だけでなく国内でも国際規格IEC 61850を適用したデジタル変電所へのニーズが高まりつつある。これらのニーズに対応するため、MELPRO-C2の後継機種としてMELPRO-CHARGE3、MELPRO-HAの後継機種としてMELPRO-HBを共通のプラットフォームで開発した。それぞれの外観を図1に示す。

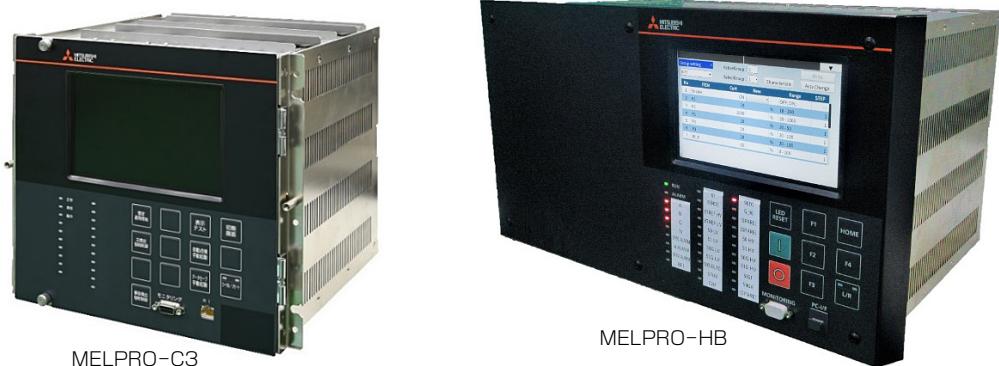


図1 - MELPRO-C3及びMELPRO-HB

2. コンセプト

新型デジタルリレーMELPRO-C3/HBは、“多様化するユーザーニーズへの対応”“ユーザーフレンドリー”をコンセプトとして開発した(図2)。多様化するユーザーニーズへの対応として、“保護リレー装置のデータの利活用”“国際規格IEC 61850への対応”“ユーザーによるカスタマイズ”の三つの要素を取り入れた。また、ユーザーフレンドリーとして、“HI機能向上”“ハードウェアの統合・集約”の二つの要素を取り入れた。MELPRO-C3とMELPRO-HBのプラットフォームを同一にすることによって、IEC 61850やセキュリティー関連の規格改定、セキュリティーアップデートへのシームレスな対応ができるようになり、迅速な追隨が可能になる。

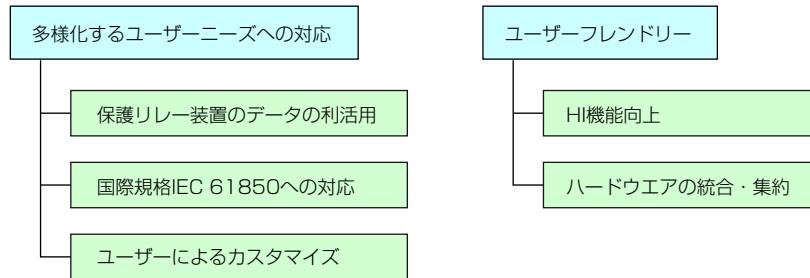


図2-MELPRO-C3及びMELPRO-HBの開発コンセプト

2.1 多様化するユーザーニーズへの対応

2.1.1 保護リレー装置のデータ利活用

近年はあらゆるデータの利活用が盛んに検討されており、電力業界でも2023年10月から、スマートメーターから取得した電力データを電気事業者以外の事業者が有償で利用できるようになるなどデータの利活用が広がりを見せている。

保護リレーは系統の電流、電圧や遮断器、変圧器の接点の開閉状態などの情報を常時取り込んでいるが、これらの情報はリレー演算だけに利用され、リレー動作時の故障解析用途以外には活用されていない。一方で、保護リレー装置は電力系統のあらゆる場所に設置されているという特性からデータの利活用との相性は大変良いと考えられる。そこで、将来的にこれらのデータが有効に活用できるようMELPRO-C3/HBでは、従来の10倍以上である57,600Hzの高速度サンプリングと容量約1.5GBの事故記録を実現した。従来の10倍以上の周波数でのサンプリングによって更に高次の高調波が取得可能になるため、事故波形解析の高度化や事故波形データから故障原因を推定するAI技術の開発などが期待できる。図3に原因別の故障波形の例を示す。故障原因によって、電圧や周波数といった波形が変わるために、故障原因の推定が可能になる。また、サンプリング周波数の57,600Hzは変電所デジタル化の際に導入が進められるプロセスバス規格IEC 61869に準拠したサンプリング(保護4,800Hz、電力品質計測14,400Hz)への対応を考慮したものもある。そのため、系統用センサーや系統用オシロ装置としての活用、拡張も可能と考えている。

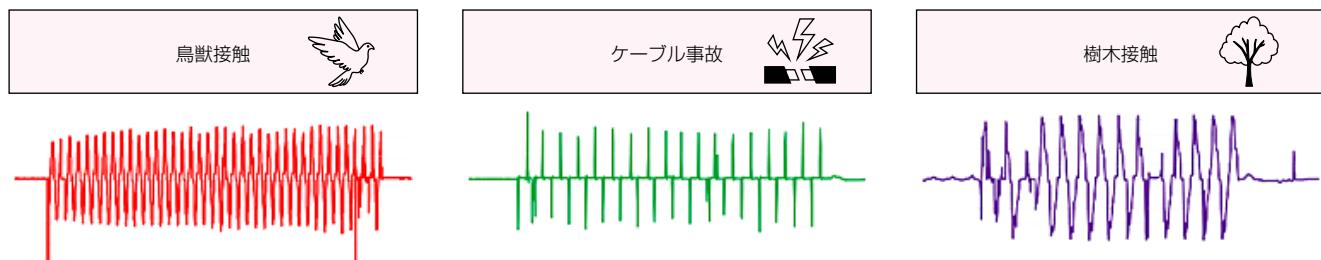


図3-原因別の故障波形(例)

2.1.2 国際規格IEC 61850への対応

近年、変電所の運用・保守性向上や主機と保護リレー装置間のケーブル削減などを目的として、変電所のデジタル化が積極的に検討されている。デジタル変電所では、仕様の共通化や異なるメーカー間の相互運用性確保の観点から国際規格IEC 61850に準拠することを前提として検討及び導入が進められている。MELPRO-C3/HB共にIEC 61850対応可能にするため共通プラットフォーム化している。国内外各市場への導入度合いを考慮し、海外電力向けMELPRO-HBでは標準実装、国内電力向けMELPRO-C3ではオプション機能として通信拡張基板を実装することでIEC 61850に対応可能にした。

また、デジタル化や通信の導入に際してサイバーセキュリティ確保の要求も高まっており、国内では“電力制御システムセキュリティガイドライン”が発行され、海外ではIECなどによる規格化が進んでいる。MELPRO-C3/HBでもホワイトリスト、ログ管理、IEC 62351への対応などセキュリティ対策機能の実装及び対応を予定している。

2.1.3 ユーザーによるカスタマイズ

本体の開発に合わせて、ユーザーによるカスタマイズを可能にするエンジニアリングツール“MELPRO-Works”を開発した。図4にMELPRO-Worksの設定画面の表示例を示す。特に海外では盤メーカー・システムインテグレーターがツールを用いてエンドユーザー向けのカスタマイズを行うため、図4(a)のシーケンスエディター画面のように、ロジック変更機能をユーザーに提供する仕組みも付加した。また、IEC 61850の適用が増加するにつれシステムインテグレーターでカスタマイズするケースが増加すると予想されるため、図4(b)に示すようなIEC 61850設定ツールを提供することでこれらのケースにも対応可能になる。

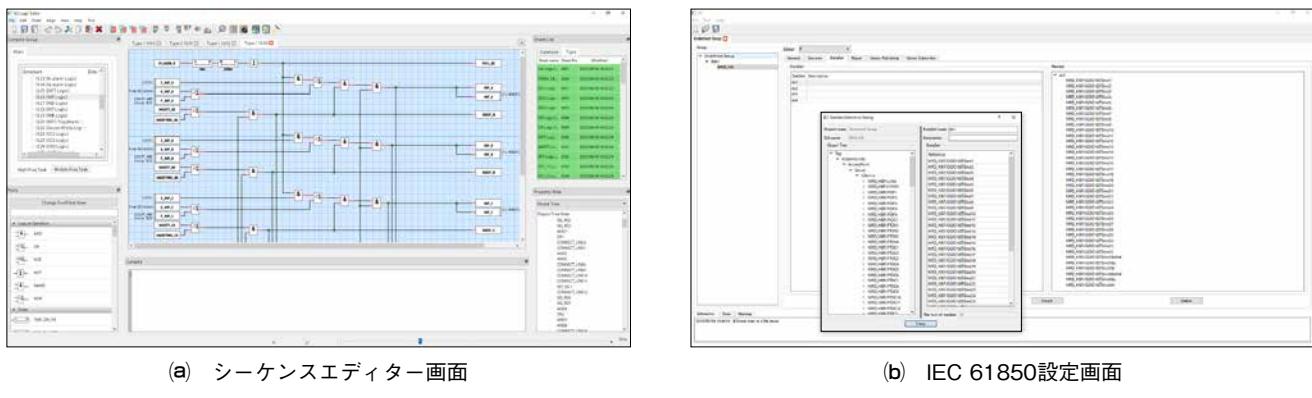


図4 - MELPRO-Worksの設定画面の表示(例)

2.2 ユーザーフレンドリー

2.2.1 HI機能向上

従来、整定^(注2)変更などの操作は保守用パソコンをリレーユニットに接続して、HI画面上で実施する必要があった。そのため、リレー装置の試験、設定変更の際には保守用パソコンが必須になるが、必要時に保守用パソコンがなく作業がスムーズに行えない場合があった。MELPRO-C3/HBではリレーユニット正面に静電容量方式のタッチパネルを採用したカラーグラフィックLCD(Liquid Crystal Display, 以下“GLCD”という。)(7インチワイド、広視野角)を実装し、ここにHI画面を表示することで保守用パソコンを接続しなくてもHIの操作を可能にした(図5)。これによって保守や運用の効率化が期待できる。なお、従来どおり保守用パソコンを接続する方法でもHI画面の閲覧、操作が可能である。これによってリモート接続による保守にも対応可能にしている。

また、GLCDはユーザーによって用途や利用の頻度が異なることが想定されるため、搭載有無を選択できるようにした。
(注2) リレー装置の事故検出感度や装置間の協調などの調整



図5-GLCD画面(例)

2.2.2 ハードウェアの統合・集約

従来は複数のCPU基板で実現していた機能を1基板に集約するなど部品点数削減によって信頼度の向上、コスト低減を図った。エンジニアリングツール活用を前提にした設計標準化、試験の効率化なども並行して進めている。また、GLCD化によって従来は盤に実装していたスイッチをリレーの設定にするなど盤部材の削減も期待される。

3. むすび

国内、海外で多様化するユーザーニーズへの対応やHI機能を向上した新型デジタルリレーMELPRO-C3/HBを開発した。従来機種では用途によって保護リレー、制御ユニットを別機器にしていたが、MELPRO-C3/HBでは機能集約も可能にした。そのため保護制御一体ユニットも実現可能であり、系統安定化装置への適用も可能である。

今後はデジタル変電所対応のMU(Merging Unit)、IED(Intelligent Electronic Device)、AI基板を組み込んでハイエンドIED、高速サンプリングを活用し直流保護制御に適用するなど、応用面でも多様化するユーザーニーズに対応していく。

参考文献

- (1) 角本悠輔、ほか：新型デジタルリレーMELPRO-CHARGE3の開発、令和5年電気学会 保護リレーシステム研究会、PPR-23-018 (2023)
- (2) 一般社団法人 電気協同研究会：新しい通信技術による保護リレーシステムの設計合理化、電気協同研究、71, No.1 (2015)
- (3) 一般社団法人 電気協同研究会：保護リレーの新しい機能・性能、電気協同研究、65, No.2 (2009)



三菱電機株式会社