



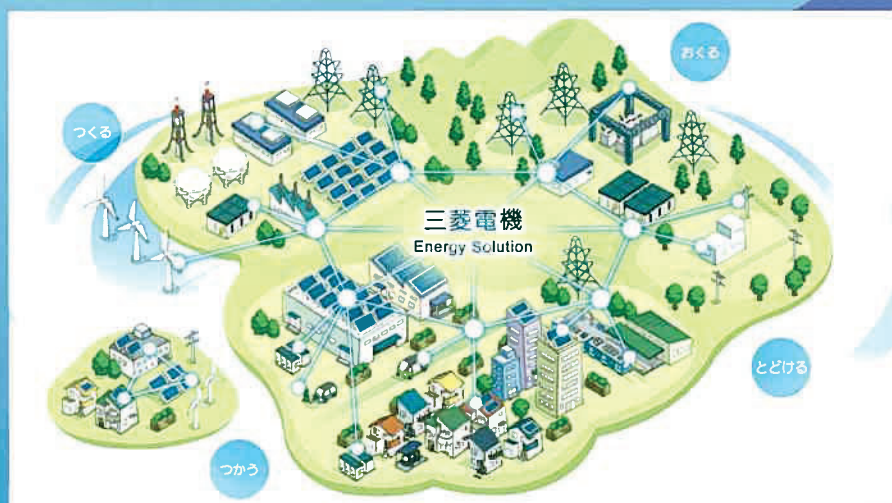
三菱電機技報

11

2021

Vol.95 No.11

最新のエネルギーシステム製品の開発動向

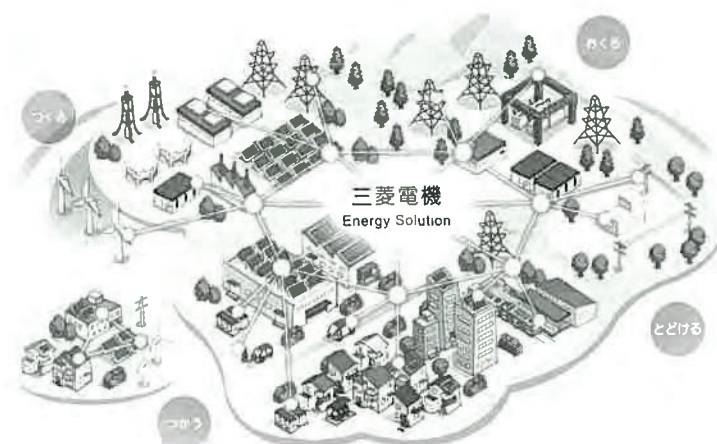


表紙：最新のエネルギーシステム製品の開発動向



温室効果ガスによる地球温暖化対策としてCO₂削減は世界的な課題である。カーボンニュートラル社会の実現に向けて、電気を“つくる、おくる、とどける、つかう”という全てのシーンで、これまで培ってきたパワーエレクトロニクス、制御、通信、デジタル技術を駆使したソリューションを提供して、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく。

本号では、発電から送変電、配電に至るエネルギーソリューションの最新動向について紹介する。



ライフ



インダストリー



インフラ



モビリティ

特集 最新のエネルギーシステム製品の開発動向

Development Trends of the Latest Energy System Products

巻頭言

- カーボンニュートラル社会の実現に貢献する
エネルギーソリューション 4
高澤 範一

- Energy Solutions Contributing to Realization of Carbon Neutral Society
Noriyuki Takazawa

第1部 電力システム

- 電力システムのデジタル化 6
濱本 総一
- 脱炭素社会の実現を支える分散電源向け
IoTプラットフォーム“BLEnDer DEP” 11
石崎 啓・相原祐太・西岡篤史
- VPPを考慮した電力需給管理システム 15
亀田 真奈人
- 次世代スマートメータシステムへの取組み 20
高瀬 英伸・小林 範行・市位 裕幸
- 次世代配電系統での配電高度化技術 24
石本 智之・小島 慎護・片山 匠
- 小型モジュール炉“SMR-160”向け計装制御システム 28
濱谷 陽一郎・奥田 奨・深見 健太・東 哲史・小西 遼
- タービン発電機の性能向上に貢献する
最新の技術開発動向 32
竹崎 慶太郎・奥田 龍弥・梶原 剛

- Power Systems Go Digital
Soichi Hamamoto
- IoT Platform “BLEnDer DEP” for Distributed Power Supply Supporting Realization of Carbon Free Society
Hiromu Ishizaki, Yuta Aihara, Atsushi Nishioka
- Power Supply-demand Management System with Virtual Power Plant
Manato Kameda
- Activities for Next-generation Smart Meter Systems
Hidenobu Takase, Noriyuki Kobayashi, Hiroyuki Ichii
- Advanced Power Distribution Technologies for Next-generation Power Distribution Grid Networks
Tomoyuki Ishimoto, Shingo Kojima, Takumi Katayama
- Instrumentation and Control System for Small Modular Reactor “SMR-160”
Yoichiro Hamaya, Susumu Okuda, Kenta Fukami, Tetsushi Azuma, Ryo Konishi
- Latest Technology Development Trends Contributing to Performance Improvement of Turbine Generator
Keitaro Takesaki, Tatsuya Okuda, Go Kajiwarra

第2部 系統変電システム

- カーボンニュートラル社会の実現に貢献する
次世代送変電機器の技術展望 36
入野 邦英
- カーボンニュートラルに向けた
スマートシティへの取組み 41
西都 一浩
- 配電用変電所向け新型デジタルリレー 46
宮城 嵩・内海康晴・森 浩紀・小澤辰哉・對馬 宏介

- Technical Trend of Transmission and Distribution Equipment Contributing to Realization of Carbon Neutrality
Kunihide Irino
- Efforts for Smart Cities toward Carbon Neutrality
Kazuhiro Saito
- New Digital Relay for Distribution Substation
Takashi Miyagi, Yasuharu Utsumi, Hironori Mori, Tatsuya Ozawa, Kosuke Tsushima

第3部 受配電システム

- 受配電システム機器の技術展望 50
橋本 孝治
- 直流配電システムの取組みと今後の展望 54
竹内 勇人・越智 良輔

- Technology Outlook of Power Distribution Systems Equipment
Koji Hashimoto
- Initiatives for DC Power Distribution System and Future Prospects
Hayato Takeuchi, Ryosuke Ochi

くらしのエコテクノロジー 58

Webサイト紹介(エネルギーシステム) 60

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを申し上げますとともに、罹患(りかん)された皆さまとご家族及び関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。

巻頭言

カーボンニュートラル社会の実現に貢献する エネルギーソリューション

Energy Solutions Contributing to Realization of Carbon Neutral Society



高澤 範行 *Noriyuki Takazawa*

常務執行役 電力・産業システム事業本部長

Executive Officer, Group President, Energy & Industrial Systems Group

1. カーボンニュートラル社会の実現

温室効果ガスによる地球温暖化対策としてCO₂削減は世界的な課題になっています。2020年10月の菅首相(当時)の所信表明演説で“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、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す”という宣言があり、これを踏まえて“2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”が策定されています。

カーボンニュートラル実現には、再生可能エネルギーや分散電源の大量導入が必要であり、あらゆる分野と連携したエコシステムを構築する社会作りが重要なポイントになります。

ここでは、三菱電機電力・産業システム事業本部の歴史をひも解きながら、将来のカーボンニュートラル社会実現に向け大きな変革が予想される新たな事業分野への取り組み内容について述べたいと思います。

2. 100周年を迎える当社の電力・産業システム事業の歴史

1921年の会社設立当時は欧米メーカーとの技術提携が必須で、当社は1923年に米国ウェスチングハウス社との技術提携を結びました。当時の提携内容は発電、変電など電力分野が中心であり、当社技術のベースになっています。その後、発電分野では大出力・高効率化技術開発を進めて、これまでに2,200台以上の発電機を納入し、1970年には関西電力(株)美浜発電所向けに日本初の原子力用発電機(40万kVA)を納入しました。

変電分野では高電圧・大電流遮断技術等の世界最高水準の技術を独自に開発し、1968年に国内初の84kVガス絶縁開閉装置(GIS)を関西電力(株)姫路変電所に納入しています。

1976年の香港電力へのGIS納入以降、海外輸出を始めとして、同年世界初の550kV GISを関西電力(株)大飯発電所に納入しました。現在、世界で13,000台以上の納入実績を誇ります。

また、配電分野では、1965年に6.6kVコンタクト用真空バルブを製品化して以来、接点材料や電極構造の開発、真空バルブ構造の最適化によってコンパクトで高性能かつ長寿命を実現し、累計450万本を生産してきました⁽¹⁾。

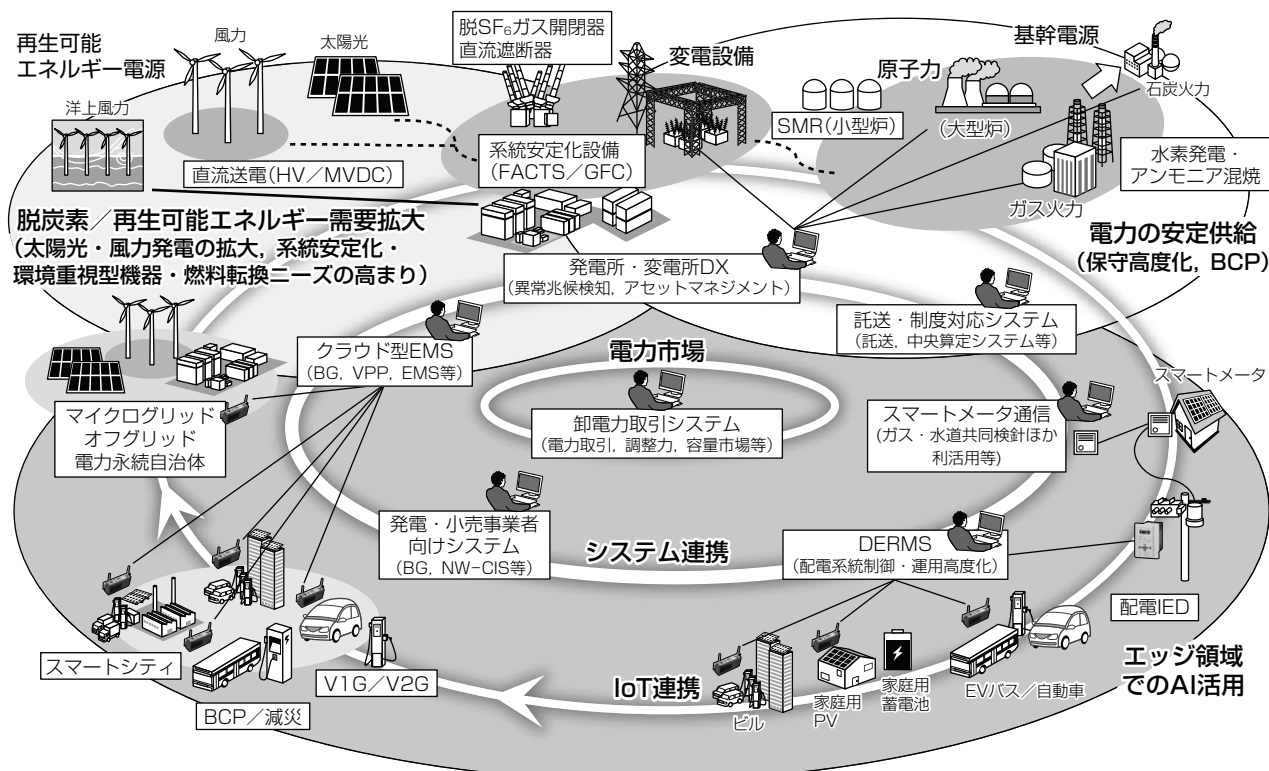
このように、社会での電気を“つくる、おくる、とどける、つかう”という全てのシーンで高品質で信頼性の高い製品・システムを提供し、高度経済成長期には国内外の電力の安定供給実現によって、社会の発展に大きく貢献してきたと考えます。

1990年のバブル崩壊以降はハードウェアだけでなく、制御、通信、パワーエレクトロニクス、デジタル技術を活用した電力システムの納入が増加しました。2002年には東北電力(株)向けに中央給電指令所システムを納入し、2005年には電力自由化対応として日本で唯一、一般社団法人日本卸電力取引所向けに電力取引システムを納入し、2016年には中部電力(株)を始めとする電力会社5社にスマートメータシステムを納入し、今後のカーボンニュートラルの実現に不可欠になる電力ICT(Information and Communication Technology)技術を確立してきました。

3. カーボンニュートラル社会実現への貢献

3.1 脱炭素・再生可能エネルギー需要拡大への取り組み

再生可能エネルギーの大量導入のためには、洋上風力発電や太陽光発電などの電気を直流で効率よく送ることや、季節や天候の変化に合わせて刻々と出力が変動する再生可能エネルギーに対して、無効電力による安定化や慣性力の



HV/MVDC: High Voltage/Medium Voltage Direct Current, FACTS: Flexible AC Transmission System, GFC: Grid Frequency Converter, SMR: Small Modular Reactor, DX: Digital Transformation, BCP: Business Continuity Plan, EMS: Energy Management System, BG: Balancing Group, VPP: Virtual Power Plant, NW-CIS: Network Customer Information System, DERMS: Distributed Energy Resource Management Systems, IED: Intelligent Electronic Device, V1G: Vehicle one Grid, V2G: Vehicle to Grid, IoT: Internet of Things, PV: PhotoVoltaic, EV: Electric Vehicle

図1. エネルギーの見える化による新たな価値創造

確保が必要になってきます。

これらにはこれまで培ってきたパワーエレクトロニクス、制御、通信、デジタル技術を駆使したソリューションを提供して、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していきます。

3.2 環境に配慮した電力安定供給の実現

再生可能エネルギー大量導入時のバックアップ電源になる火力発電では、アンモニアなどの新たな燃料製造にも挑戦し、クリーンなエネルギーへの転換に貢献していきます。また、地球温暖化係数が二酸化炭素の約24,000倍である六フッ化硫黄(SF₆)ガスを使用しない遮断器の開発や、植物油入変圧器の適用など環境に配慮した製品の開発を進めて、電力の安定供給に貢献していきます。

3.3 エネルギーの見える化による新たな価値創造

スマートメータに代表されるように、エネルギーを見える化するエネルギーのデジタル化が進んでいます(図1)。今後普及が予想される太陽光発電や蓄電池、EVなどの分散電源は、広い地域に大量に設置されるため、デジタル技術を使ってうまく制御することによって、新たな価値を創造することが期待されます。例えば配電線の安定化のためEVの電気を使って設備投資を抑制したり、経済性を考慮

したカーボンニュートラルを離島や特定地域で実現することなどが考えられ、クラウド型エネルギー管理システムやAIを搭載したエッジ端末などのソリューションを提供していきます。

4. これからの電力・産業システム事業

当社技術が社会に選ばれてきた理由は、様々な社会課題に向き合って、解決するソリューションを提供し続けてきたからです。これは、今後の100年に向けても変わらないと考えています。これまでの100年との違いは、社会課題の多様性と移り変わりの早さです。この変化に対応し、カーボンニュートラル社会を実現するためには、長期間での独自開発ではなく、得意技術を持ち合わせたオープンイノベーションや、あらゆる業界の垣根を越えたエコシステムの確立が必要です。

たゆまぬ技術革新と限らない創造力で、グリーンイノベーションでの中心プレーヤーになり、“もっと素晴らしい明日”を切り開いていきたいと考えています。

この特集号では、発電から送変電、配電に至るエネルギーソリューションの最新動向についてご紹介します。

参考文献

- (1) 越智 聡, ほか: 真空開閉器用真空バルブと新工場の生産革新, 三菱電機技報, 94, No.11, 639~643 (2020)

電力システムのデジタル化

Power Systems Go Digital



濱本総一*
Soichi Hamamoto

1. ま え が き⁽¹⁾

電力システム改革とともに進展する電力システムのデジタル化、デジタルトランスフォーメーション(DX)によるフィジカル空間からサイバー空間への価値創出の源泉の移行、コロナ禍による個人レベルにまで及んだ意識の転換、及び固定観念の大きな変化によって、電力システムを取り巻く事業環境は加速的に変化している。また、SDGs(Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標)への取り組みでは将来にわたる社会的課題解決への貢献が重視されるなど大きな変革期にある。

三菱電機電力システム製作所では、発電機、監視制御システム、情報通信システムなどの電力システムに関連する幅広い製品の開発を進めて、変革を支える製品を提供し続けてきた。近年では、電力システムインフラの高度情報化など長年培ってきた情報通信技術を基盤に変化に適応し、当社創立当時の事業である大容量発電機の生産現場でも様々なデジタル化を積極的に取り入れて進化し続けている。

本稿では、電力システムに活用されてきた情報通信技術の変遷から最新の取り組みを述べて、デジタル活用の将来を展望する。

2. 電力情報制御システム

2.1 計算機の導入と変遷

当社での計算機技術の電力関連情報制御システムへの応用の取り組みは1960年代に遡る。当初データロギング用途であった計算機は、1970年代に入るとマイクロプロセッサの技術革新に伴ってデジタル制御機能を備えた装置としても適用されるようになり、1980年代にはマイクロプロセッサの高性能化とともに、ソフトウェアの生産性向上、高速演算性能とリアルタイム性を実現した工業用計算機“MELCOM350-60”の開発に至る。ソフトウェア開発・保守支援システムを拡充しながら大規模システムへの適用を進めて、自動化による省力化や柔軟な設備運用の実現に貢献した。

1990年代に入ると電力システムでの情報システムの役割が必須になる中、計算機の応用範囲の拡大とともにリソースの有効活用や将来にわたる発展性・継続性が重視されるようになり、ベンダー独自のクローズドシステムからオープンな標準技術の採用と、集中型から汎用計算機採用による分散型への移行が始まった。一方、1995年の電気事業法改正によって、規制緩和、電力自由化への大きな方向転換が行われ、求められるシステムの複雑化が加速した。オープン化・分散システムの採用は拡大し、UNIX^(注1)システムへの移行、エネルギー・情報を統合したネットワーク構築による需要側と供給側の情報連携(自動検針、リアルタイム料金など)、電力設備の監視制御・自動化システムの高度化と業務効率化・業務支援を目的とする業務処理システムとの融合も始まる。

2000年代にはダウンサイジングとオープン化志向の高まりの中で産業用パソコンやLinux^(注2) OSの採用が進んで、エンジニアリング環境の高度化やIP(Internet Protocol)ネットワークの活用など広域分散システムの導入に至る。広域分散の実現では処理性能や信頼性を確保しながら計算機が提供するサービスを確保する大規模仮想化技術やセキュリティを考慮した上での柔軟なデータ連携・配信を可能にしている。さらには、経営情報管理系と制御系のシームレスな結合によってインフラ全体の維持・運用費用の削減に向けた技術開発を推進している。

(注1) UNIXは、X/Open Company, Ltd.の登録商標である。

(注2) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

2.2 オープン分散制御システム

発電プラントでの監視制御システムでは、リアルタイム機能、長期保守、システムの堅牢(けんろう)性、障害解析性を実現した基幹計算機の開発、及び電力系統制御システムではシステムの堅牢性、障害解析性を維持しつつ広域分散対応、監視制御対象の拡大に適応したシステム開発を進めている。

適用分野に応じた性能・機能を提供し、監視・制御の領域でオープン／標準技術の全面採用、既存システムを含む情報の一元管理、場所に依存しない情報取得やエンジニアリングを提供することによってシステム全体のライフサイクルコスト削減に貢献する。

2.2.1 小型モジュール炉“SMR-160”向け計装制御システム

脱炭素社会の実現に向けて、原子力も有力な選択肢の一つとして世界各国で技術開発が行われている。当社は加圧水型原子力発電プラント(PWR)計装制御システムで安全保護系を含めた計装制御設備をデジタル化し、信頼性・安全性を確保した中央監視操作とプラント制御保護を実現することによって大容量原子力の安定運転に貢献している。

一方、特に小型モジュール炉と呼ばれる原子炉は2020年代での商業化を目指して米国で多数のベンチャー企業によって開発が進められている。当社は、米国Holtec International社と小型モジュール炉“SMR (Small Modular Reactor) - 160”の共同開発を進めており、計装制御システムの設備設計を担当している。制御・保護システムでは、安全性の向上及び設備小型化の両立のためのデジタル技術の適用範囲最大化や、受動的安全システムでの運転に適した運転監視設備の開発を進めている(図1)。小型モジュール炉は従来の発電用原子炉の1/3~1/6程度の出力の原子炉であり、その特長として小型化による安全性向上と設備合理化、柔軟な負荷追従運転による再生可能エネルギーとの共存等がある。原子力対応の高信頼なデジタル計装制御技術を継承・発展させ、安定に稼働するシステムの提供によって持続可能なエネルギー供給に貢献していく。

2.2.2 電力系統制御システム⁽²⁾

電力系統制御システムは、需給バランスの指令などを行う中央給電指令所、高圧の送電網や変電所などの監視制御を行う基幹給電制御所、各地域にある給電所・制御所などのシステムで構成され、広域に拡大する監視制御対象を束ねて、合理的かつ効率的な系統運用を支えている。従来のシステム構成は、監視制御処理を実行するサーバ群と運転員が用いる監視制御端末が同一拠点内に設置される形態が主流であったが、2000年代に入ってサーバ拠点と運用拠点を分離して広域IP網を介して接続する広域分散型システムが採用されている。近年、電力システム改革に伴う運用業務の変化に合わせた管轄範囲の変更や機能高度化への柔軟な対応、拠点被災時にも運用継続を可能にする広域バックアップ(BCP：Business Continuity Plan)機能が必要になり、さらに、大量データを活用した高付加価値サービスを提供する情報基盤としてのニーズが高まっている(図2)。

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームでは、当社独自の大規模・高密度仮想化技術を適用して、仮想計算機の独立性を確保し、物理計算機のハードウェアを有効に活用した効率的な動作を可能にしている。計算機仮想化技術の適用によってリソースの有効活用による計算機台数の削減と更新時のハードウェア差異隠蔽によるソフト

ウェア資産(OS, ミドルウェア, アプリケーション)の継承などライフサイクルコストの低減を実現している。それに加えて、従来は個々の端末に実装されていたHMI(Human Machine Interface)機能を仮想計算機として実装し、サーバ計算機上に集約したシンクライアント方式を採用している。ソフトウェアの保守性向上とセキュリティ強化が実現され、クライアント装置としてタブレット端末や、スレートパソコンも使用可能にしており、BYOD(Bring Your Own Device)に対応することで業務効率化にも広く寄与することが期待される。また、広域IP網を使用することから、暗号化、侵入防止システムなどのセキュリティ対策に加えて、OS上であらかじめ許可されたプログラム以外の実行を禁止するOSホワイトリスト機構を開発し、従来のパターンマッチングによるウイルス対策ソフトウェアに比べて未知の脅威への対策も進めている。

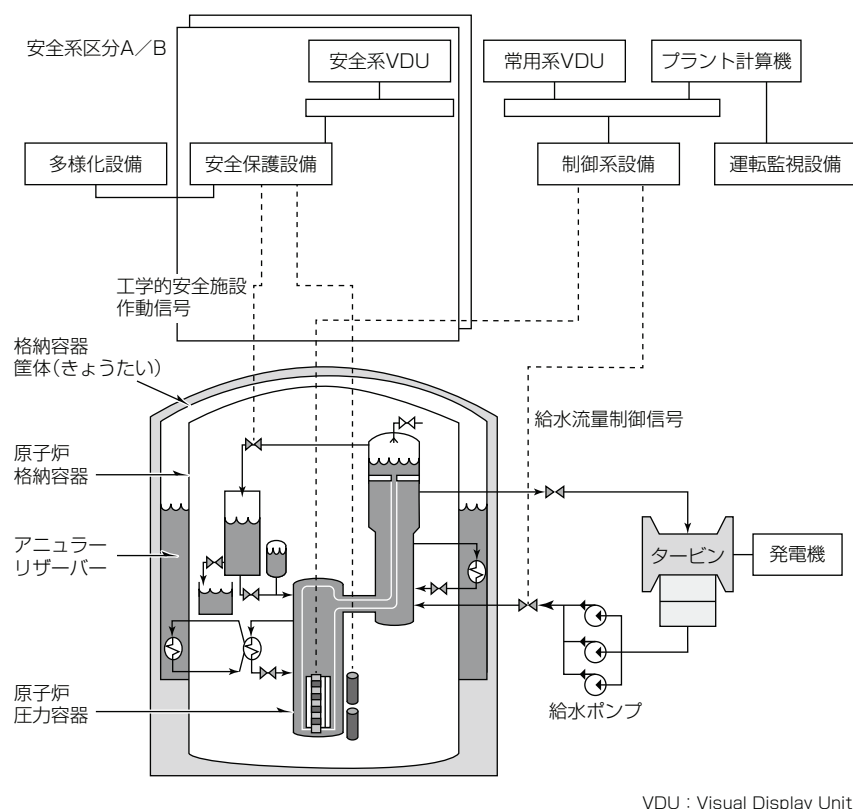


図1. SMR-160向け計装制御システム

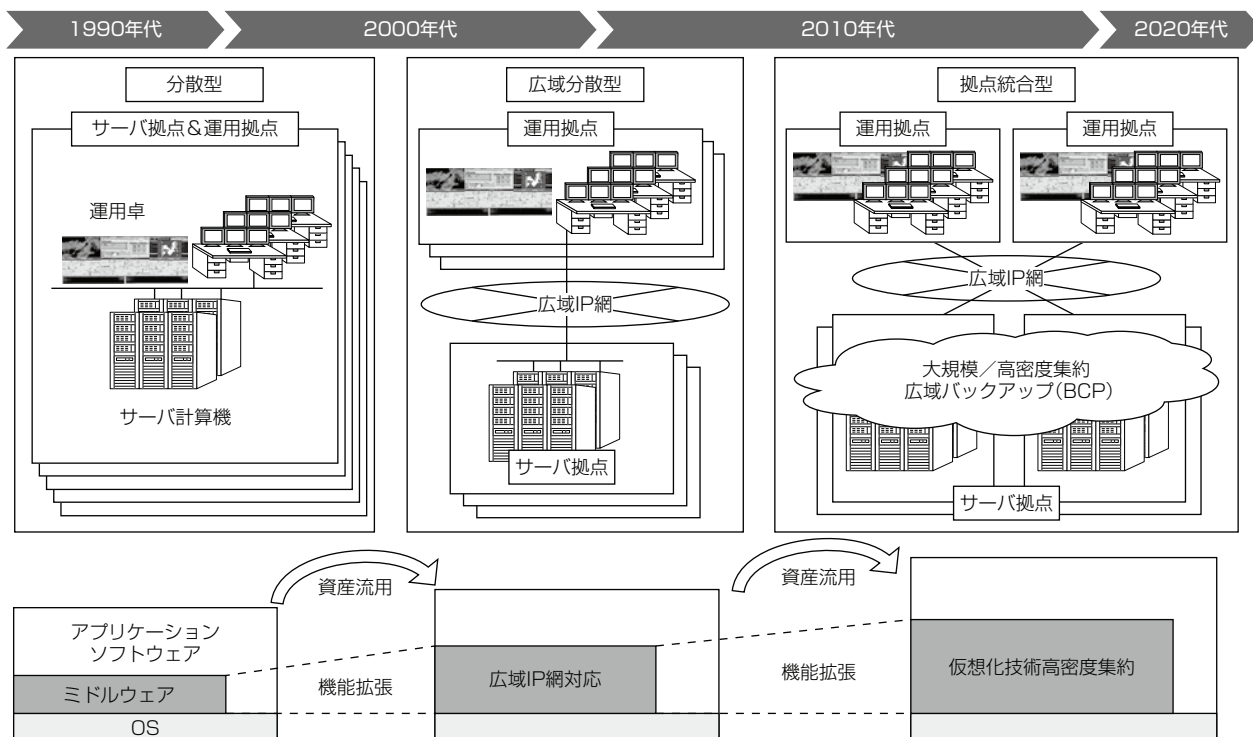


図2. 監視制御でのコンピュータシステム

2.2.3 次世代配電制御

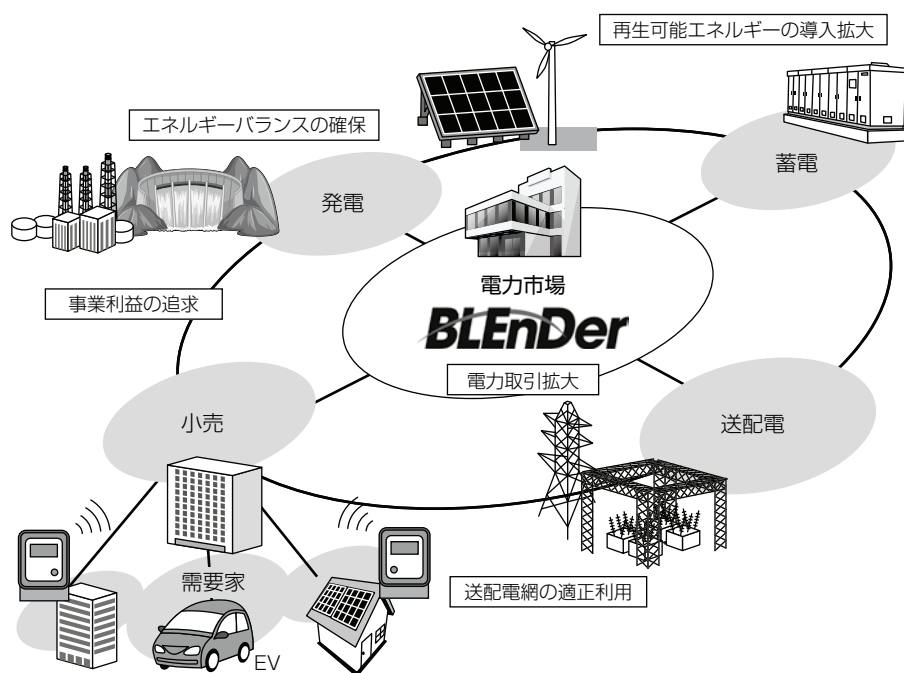
近年、自然災害や設備老朽化に伴う電力安定供給に関連した課題や配電系統での分散電源の導入拡大に伴う電力品質の向上が注目されている。当社ではこれら課題に対してエッジコンピューティング技術に着目し、これまで培った計装制御技術の応用として、拡張性が高く柔軟性のあるエッジ端末装置(Intelligent Electronic Device : IED)を活用したソリューションの技術開発に取り組んでいる。配電設備の大容量化や日常生活での電化の拡大に伴う電力供給信頼度の向上と設備運用の効率化に対応して1980年代から順次導入された配電自動化システム(Distribution Automation System : DAS)や複雑化する配電運用に対応した次世代配電系統管理システム(Advanced Distribution Management System : ADMS)など、配電系統の運用ニーズに関する知見に加えて、保護継電器や光通信／無線通信、人工知能(AI)などの関連技術を組み合わせることによって配電分野での新たな価値の創造を目指している。

配電事業での制度改正でも、レジリエンス性の向上や地域サービスの活性化などを目的にした議論が活発化しており、配電事業ライセンス制の導入によって、一般送配電事業者以外の事業者による配電系統の運用が可能になる。市場動向や社会情勢を鑑みて、次世代配電系統を見据えた配電技術の高度化を目指し、マイクログリッドやオフグリッドといった従来の電力系統とは独立して運用される分散型グリッドでの課題解決に向けた検討を進めている。

3. 電力需給管理システム

電力システム改革に伴う制度改正は継続しており、2021年4月には需給調整市場の運用が開始された。これまで各エリアの送配電事業者が個別に調達していた実需給断面で必要になる調整力を全国規模の市場で取引することになる。調整力制度が先行している欧米では各国の電力事情に応じた複数の調整力商品が展開されており、これを参考にしながら国内でも順次調整力商品の拡充が行われていく予定である。

当社は電力調整の基盤データを取得する電力メータ(スマートメータ)の国内導入から自動検針システムの構築、需給計画や取引情報を統合する需給管理アプリケーションの拡充開発を推進してきた。需給管理システムは同時同量監視を中核にしながら電力小売管理システムとして制度変更への対応、中央給電指令システム、広域機関システムなど外部システムとの関係を拡充し、制度改正を逐次反映しながら多様化する市場対応の複雑な計算や業務を支援する電力事業向け業務支援パッケージアプリケーションを“BLEnDerシリーズ”として提供している(図3)。これらのアプリケーションは大規模電源に加えて分散電源も活用した調整力市場の拡大、再生可能エネルギー適用拡大など新たな電力システムの構築に対応した統合監視・制御、需給調整の高度化に貢献する。

図3. BLEnDerシリーズ⁽³⁾

3.1 次世代スマートメータへの取組み

国内の各電力会社では2014年から通信機能を搭載したスマートメータを順次導入しており、2024年度末頃に全国展開が完了する見込みである。スマートメータによって電力会社管内をカバーする広域・大規模ネットワークが形成・運用されており、近年では再生可能エネルギーの普及等の社会環境変化を背景に、新たな配電事業の創出と配電事業以外でのスマートメータネットワークの高度利用の議論が活発化している。当社はこれら市場動向及び社会的ニーズを見据えて、次世代に向けたスマートメータシステムの高度化開発を進めている。次世代スマートメータシステムの開発では、高度な配電システムの運用に対応した検針の高頻度化・高粒度化や災害に対するレジリエンス性の強化に取り組んでいる。また既存スマートメータ網に接続可能なIoT(Internet of Things)無線端末の開発、エッジコンピューティング技術等の適用によって、ネットワークの利便性・拡張性強化、スマートメータ網を活用した電力事業以外によるサービス提供の実現に向けた開発も進める。電力システムだけではなく社会インフラとして幅広く活用できる次世代スマートメータネットワークの提供を目指している。

3.2 需給調整の拡大

需給調整市場は、分散電源など需要家側に配置されているリソースの有効活用、太陽光や風力などの変動する再生可能エネルギーの導入拡大に見合った調整力の確保に向け

て、電力会社の管轄エリアを越えて広域的な調達・運用を行い、新規事業者の市場参加拡大によって効率的で柔軟な需給運用の実現を目指している。また、発電事業者は従来の“kWh価値”での電力需給管理に加えて、調整力として提供される“ΔkW価値”も同時に評価しながら、入札市場の選択、及び最経済発電計画の策定を進めるなど運用の選択肢が拡大している。

需給調整の高度化の一つに、需要家側に分散配置される小規模な分散電源(太陽光発電や蓄電池、EV(Electric Vehicle)など)を統合制御し、“仮想発電所(VPP: Virtual Power Plant)”としてあたかも一つの発電所として運用する概念がある。当社は分散電源の統合監視・

制御に対応したプラットフォーム“BLEnDer DEP(Digital Energy Platform)”を開発しており、BLEnDerシリーズとも連携し、分散電源を活用した需給制御、電力取引サービスの提供推進、そして再生可能エネルギーの導入加速に貢献する。BLEnDer DEPは、分散電源からデータを収集・蓄積し、データ活用基盤の提供機能と分散電源の制御機能を持っている。DEP標準のゲートウェイとして提供するDEP端末は、産業用及び家庭用機器との標準プロトコルに対応しており、また接続機器とのセキュアなネットワーク構築を実現している。さらに、他社のゲートウェイやプラットフォームとの連携を想定した開発も進めており、既存の設備とシステムを有効活用した分散電源向けプラットフォームの構築を目指している。

4. 発電機生産現場のデジタル化

火力発電プラントでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴う調整力の向上や稼働率向上による低コスト化の取組みが活発になっており、タービン発電機では、単機大容量化・高出力密度化、既設機の増出力化・稼働率向上の要求が高まっている。また、継続的に取り組む品質向上、総合L/T(Lead Time)短縮、製品価値向上施策として、工程・リソース計画の高精度化、調達安定化、市場対応生産方式、保守・サービス力強化及びこれらを統合したSCM(Supply Chain Management)強化を基軸に、標準化、新工法開発、生産設計などのECM(Engineering Chain Management)基軸の活動を融合させたモノづくり力の強化を推進して

いる。大容量発電機の生産現場でも、デジタル化を促進し、工場ICT(Information and Communication Technology)化活動として次世代のモノづくり現場の実現と顧客接点のデジタル化の両面からの取組みを進めている。

4.1 発電機生産現場のデジタル化

タービン発電機の大容量化と出力密度増大は、発電機を構成する機械構造物の振動モードの複雑化と電磁加振力の増加につながるため、発電機の長期運用信頼性確保には、負荷運転時の各部品での固有振動数や振動応答・振動モードなどの挙動を正確に把握し、機械的信頼性を高めることが重要になる。当社では大規模構造解析技術によって(図4)、発電機固定子全体をモデル化して各部の連成を考慮した振動モード解析を可能にするなどの高精度な評価技術開発に加えて、3D CAD導入による開発期間の短縮と設計効率向上を目的とする生産技術のデジタル化を積極的に取り入れている。設計から製造までのシームレス化、ヒューマンエラー防止、安全確保や技術継承への適用を目指して、3Dモデル利用環境の構築、加工プログラムの自動作成、3Dモデルを利用した現地組立て・分解作業の遠隔支援、VR(Virtual Reality)技術による作業性確認などの取組みを推進する。また、生産性向上施策の一環として、作業進捗実績をデジタルデータとして収集し、部材の入着状況、工程の遅れや停滞の把握、生産性指標分析、生産ロス発生状況といった情報を集約したBI(Business Intelligence)ツールを用いて工場管理情報を一元化し、各種改善活動へ展開している。

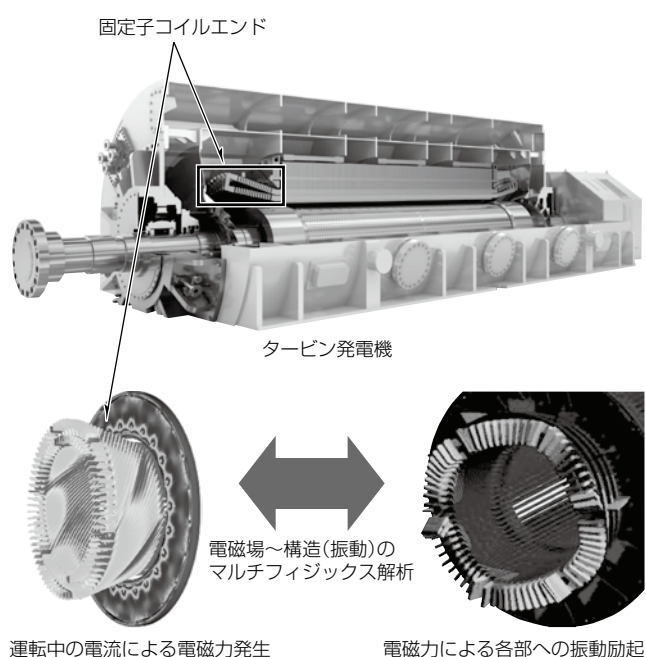


図4. 発電機の大規模構造解析

4.2 顧客接点のデジタル化

コロナ禍の影響を受けて、顧客とのコミュニケーションのあり方も大きく加速的に変化している。これまで対面で補完していた製品の訴求や理解の醸成についても情報共有のためのオンラインを活用した顧客接点の充実化を図り、ソリューション提供による顧客満足から当社製品採用への安心感につながるような取組みを進めている。顧客とWeb上で、定期点検の計画に必要な図面や部品リスト、生産中止品、不具合情報の横展開等の保全情報全般を共有するだけでなく、安定運用に寄与する予防保全改善メニューの概要、履歴、納期(工期)、未履行でのリスクレベル等を長期メンテナンス計画表に集約した“発電所カルテ”を導入して対面でなくとも顧客の理解度を高める情報を質・量共に充実させている。デジタル技術を最大限に活用し、より具体的かつ継続的な情報の共有を図り、設備の長期安定運用に貢献する。

5. む す び

当社電力システム製作所(神戸)は、大容量発電機を始め監視制御システムなど電力インフラ向け基幹製品の生産を通じて、電力の安定供給に貢献してきた。タービン発電機は全世界に向けて2,200台以上を供給しており、長年にわたってユーザーとの信頼関係を構築し、時々の要請に応じた適切なアフターサービスの提供によって安定運転を支え続けている。電力自由化市場の拡大と同期して2016年に電力ICTセンター(横浜)を開設するなど、生産設備も長い歴史の中で様々な技術革新と市場変化に適応し続けてきた。特に、近年加速的に拡大するデジタル化対応では、サイバー、フィジカルのセキュリティ技術、当社AI技術“Maisart”などのソリューション基盤としてIoT基盤“INFOPRISM”の適用を進めており、最先端の情報通信技術を導入し、オープンなシステムで多様性を吸収しながら製品へのフィードバック、質の高いエンジニアリングを組み合わせた新たな価値提供とサービス創出を推進する。今後も電力システムを支える製品・サービスの提供を通じて、社会課題の解決に貢献していく。

参考文献

- (1) 経済産業省：デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation_kasoku/index.html
- (2) 菅井尚人、ほか：次世代電力系統制御システム向けプラットフォーム技術、三菱電機技報、89、No.11、600～604(2015)
- (3) 三菱電機：電力ICTソリューションパッケージBLEnDer(ブレンダー)シリーズ
<https://www.MitsubishiElectric.co.jp/ictpowersystem/business/solution1.html>

脱炭素社会の実現を支える分散電源向けIoTプラットフォーム“BLEnDer DEP”

石崎 啓*
Hiromu Ishizaki
相原祐太*
Yuta Aihara
西岡篤史*
Atsushi Nishioka

IoT Platform "BLEnDer DEP" for Distributed Power Supply Supporting Realization of Carbon Free Society

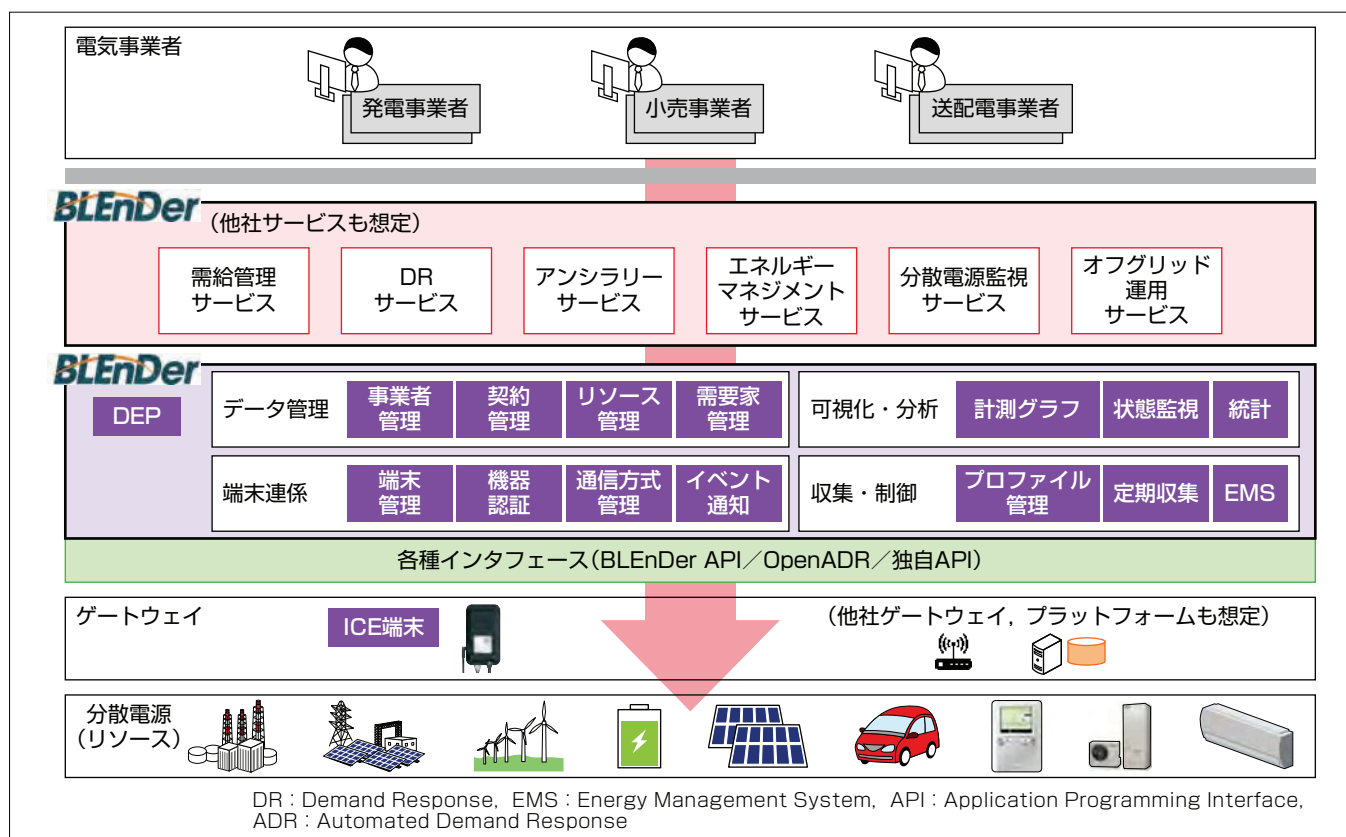
要 旨

温室効果ガスの排出量が実質ゼロになる“脱炭素社会”の実現を目指して、世界的に再生可能エネルギーの導入が加速している。その流れに合わせる形で、太陽光発電や蓄電池、電気自動車など、小規模な分散電源の普及も進んでいる。従来の大規模電源に加えて、これらの分散電源も活用した新たな電力供給を実現するため、電気事業者は多数の分散電源を統合監視・制御し、電力の需給調整に役立てることが求められている。

小規模であるが無数に導入される分散電源を有効活用するために三菱電機が開発中のIoT(Internet of Things)プラットフォームが“BLEnDer DEP(Digital Energy Platform)”(以下“DEP”という。)である。分散電源からデータを収集・蓄積し、それを活用するための機能を提供するとともに、

電気事業者からの要求に従って分散電源を制御する機能を持つ。ゲートウェイには“BLEnDer ICE(Intelligent Communication Edge)”(以下“ICE端末”という。)を利用しており、産業用及び家庭用機器(リソース)の標準プロトコルに対応し、多種多様なリソースとの接続が可能である。さらに、他社製のゲートウェイやプラットフォームとの関係も想定しており、それらと接続するリソースも対象とした統合監視・制御機能の実現を目指している。

また、DEPは当社が提供する電気事業者向けサービス“BLEnDer BG(需給管理機能)”, “BLEnDer AC(VPP(Virtual Power Plant)機能)”とも連係し、分散電源を活用した需給調整の実現推進、そして世界的な再生可能エネルギーの導入加速に貢献する。



“BLEnDer DEP”(DEP)の利用イメージ

電気事業者は需給調整などの業務を行っており、業務の中で地域に点在する分散電源を活用したいときにDEPを利用する。DEPは分散電源に関するデータを管理するとともに、ICE端末や他社ゲートウェイ、プラットフォームを介して分散電源と接続し、データ収集・制御を行う機能を提供する。DEPが持つデータや機能を利用することで、電気事業者は業務内での分散電源の監視・制御を容易に実現できる。

1. ま え が き

脱炭素社会の実現を目指し、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が世界的に加速している。再生可能エネルギーはエネルギー供給の大部分を占める火力発電に代わって主力電源化が期待されているが、天候など自然環境によって発電量が左右されるため、電力の需給調整や周波数、電圧などの品質の確保が課題になっている。これらの課題を解決するための手段の一つとして、近年普及が進んでいる太陽光発電や蓄電池、電気自動車など、地域に点在する分散電源を活用することが求められている。分散電源一つ一つは小規模なものであるが、複数束ねて統合監視・制御することで、電力の需給調整への活用を目指している。

当社はこれまで、多種多様な機器を監視・制御するシステムの開発に携わってきた。これらの開発で培った経験と知識を生かし、多種多様な分散電源を監視・制御する分散電源向けIoTプラットフォームBLENder DEPの開発を進めている。本稿では、その取組みについて述べる。

2. 分散電源の活用⁽¹⁾

従来の電力供給は火力発電や原子力発電など大規模電源によって発電して需要家に届けるという一方通行の供給であった。しかし、これからの電力供給は大規模電源だけではなく需要家側にある分散電源も活用し、電気を融通するような双方向のやり取りが期待されている。分散電源とは小規模で各地に分散している電源の総称であり、電気を作る発電設備、電気をためる蓄電設備、電気の使い方を調整する負荷設備がある。分散電源一つ一つは小規模であるが、中でも電気自動車や太陽光発電などは普及が確実に進んでおり、電力供給のあり方を大きく変貌させるポテンシャルを持つため、それらを有効活用することが求められる。分散電源をその特徴によって分類したものを図1に示す。調整・制御機能を持つ分散電源は需給ひっ迫時の供給力としての活用が検討され、その中でも常時活用可能なものはBG(Balancing Group)のバランシング機能やFIT(Feed-In Tariff)特例に伴う予測誤差対応などへの活用が期待されている。さらに、分散電源を束ねて遠隔制御することであたかも一つの発電所のように電力創出・調整機能を提供する仮想発電所(VPP)という概念がある。VPPを活用して様々な電力サービスを提供する事業者をアグリゲータと呼び、提供するサービスは調整力提供、電力品質維持、供給力提供、インバランス回避、出力抑制回避、電気料金削減、卒FIT電源活用など多岐にわたる。

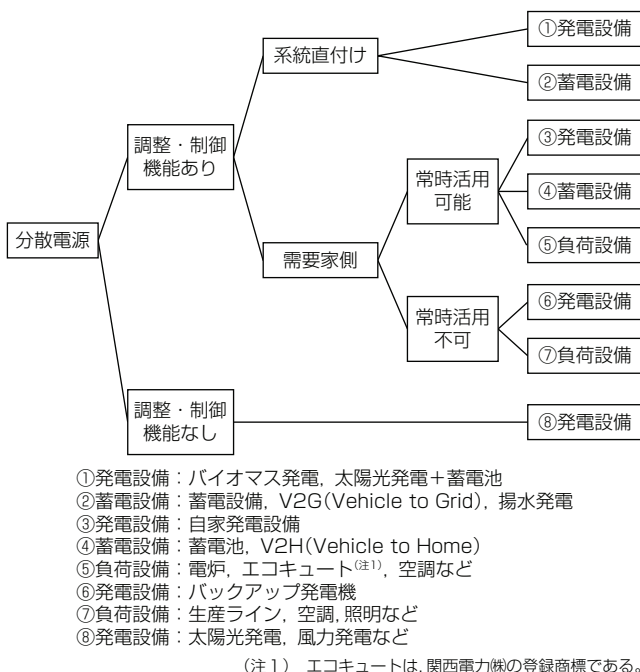


図1. 分散電源の分類⁽¹⁾

3. BLENder DEP(DEP)

3.1 特 徴

多種多様な分散電源を監視・制御する分散電源向けIoTプラットフォームがDEPである。分散電源でも機器ごとに仕様は様々であるが、DEPでは家庭用機器の通信プロトコルであるECHONET Lite^(注2)、産業用機器の通信プロトコルであるModbus^(注3)をサポートし、それらの機器の監視・制御が可能である。機器との接続には4章で述べるICE端末を利用するが、他社製ゲートウェイへの対応も検討している。また、分散電源のデータ収集・制御など、分散電源活用のための機能を上位の電力サービスに対して提供するインタフェースを順次開発しており、当社が提供する電気事業者向けサービスBLENder BG(需給管理機能)、BLENder AC(VPP機能)との関係や他社サービスとの関係を可能にする。

(注2) ECHONET Liteは、一般社団法人 エコネットコンソーシアムの登録商標である。

(注3) Modbusは、Schneider Electric USA, Inc.の登録商標である。

3.2 機 能

DEPが持つ機能構成を図2に示す。機能の大分類はデータ管理、収集・制御、可視化・分析、ICE端末連係、サービス連係になり、次のとおりである。

(1) データ管理

分散電源、端末、事業者などのマスタデータ、分散電源の収集データなど、分散電源に関連するデータを管理する。



図2. DEPの機能構成

また、事業者と分散電源の契約情報も管理しており、事業者は契約内容に従った分散電源の活用が可能である。

(2) 収集・制御

分散電源のデータ収集や制御を行う。これらはスケジュール実行や即時実行が可能である。また、分散電源から通知されるイベントも取得する。通信プロトコルはECHONET LiteとModbusに対応している。

(3) 可視化・分析

持っているデータを必要に応じて種々の方式で集計・分析し、グラフや地図で可視化する。装置状態、通信状態、イベントなどを監視して可視化する機能も持っている。

(4) ICE端末連係

ICE端末をDEPに接続し、端末内のアプリケーションを動作させるためのパラメータを連係する。これらの連係は機器認証や通信暗号化によってセキュリティを確保している。また、端末内のファームウェアやアプリケーションを遠隔で更新する機能も持っている。

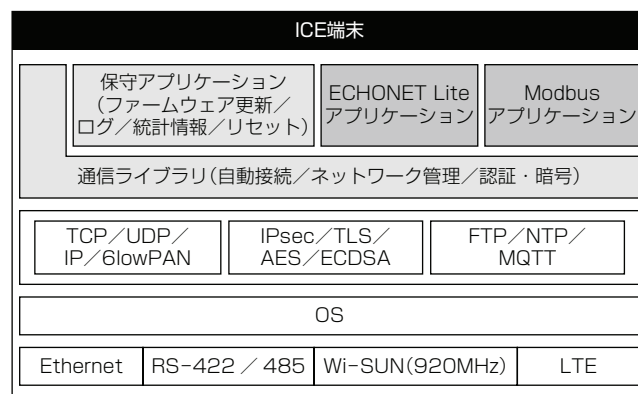
(5) サービス連係

外部の電力サービスとの間で分散電源の収集データや制御指令を連係する。その他のデータについても外部と連係するためのインタフェースを提供する。

4. BLEnDer ICE(ICE端末)

4.1 特徴

分散電源(リソース)との通信機能を持っているゲートウェイがICE端末である(図3)。接続する上位システムは3章で述べたDEPを想定し、DEPからの要求に応じてリソースのデータ収集、制御を行う。DEPとの接続にはWAN(Wide Area Network)回線(LTE(Long Term Evolution))をサ



TCP: Transmission Control Protocol, UDP: User Datagram Protocol, IP: Internet Protocol, 6lowPAN: IPv6 over low-power wireless Personal Area Networks, IPsec: Security Architecture for Internet Protocol, TLS: Transport Layer Security, AES: Advanced Encryption Standard, ECDSA: Elliptic Curve Digital Signature Algorithm, FTP: File Transfer Protocol, NTP: Network Time Protocol, MQTT: Message Queuing Telemetry Transport

図3. ICE端末のシステム構成

ポートし、通信暗号化などによってセキュリティを確保している。リソースとの接続にはEthernet^(注4)、RS-485、Wi-SUN^(注5)といったインタフェースを備えており、DEPから連係されるパラメータを基に端末内のアプリケーションを動作させて、リソースとの通信を行う。

(注4) Ethernetは、富士フィルムビジネスイノベーション(株)の登録商標である。

(注5) Wi-SUNは、Wi-SUN Allianceの登録商標である。

4.2 機能

ICE端末の機能は次のとおりである。

(1) ネットワーク管理

出荷時設定を基にDEPへ自動的に接続する。

(2) 収集・制御

DEPから連係された収集・制御指令を基に、接続されたリソースのデータ収集・制御を行う。

(3) 装置情報通知

端末情報(通信IDなど)や端末状態イベント(温度異常など)をDEPへ定周期で通知する。

(4) 時刻同期

DEPとの間で時刻同期を行う。

(5) ファームウェアやアプリケーションの更新

機能改良などのため、DEPからの要求に従って搭載されているファームウェアやアプリケーションを遠隔更新する。

(6) 保守

保守機能として、LED表示、ログ・統計情報収集、リセット処理、装置初期化、装置障害監視、自己復旧の機能を持つ。

(7) セキュリティ

機器認証、データ暗号化、鍵更新、通信メッセージ検証、装置内データ改ざん検出などのセキュリティ機能を持つ。

5. VPP社内実証

分散電源を束ねて遠隔制御することで発電所と同等の機能を提供するVPPについて、2020年度に実施したVPP社内実証を述べる。VPPに必要な設備を自社内に構築し、DEP及びICE端末を接続してデータ収集・制御を実施した。VPP社内実証での設備構成を図4に示す。社員宅を含む複数拠点にICE端末を配置し、Wi-SUN(Bルート)で30件程度の低圧スマートメータと接続したほか、ECHONET Lite対応の蓄電池・エコキュート、Modbus対応の外部EMS経由で蓄電池・太陽光発電・負荷と接続した。これらの機器はデータを収集するとともに、特に蓄電池は充放電指令や受電点指令による制御を実施した。さらに、外部のIoTプラットフォームと連携し、エコキュートのデータ収集やエネルギーシフト制御を実施した。データを収集する際に利用するDEPの画面例を図5に示す。上は収集項目を選択する画面であり、下は収集データをグラフに表示する画面である。また、需要家側に配置される分散電源を束ねて遠隔制御する様子を地図上で可視化することも試みており、一例を図6に示す。四角いアイコンが需要家を示しており、アイコンの色は外から見た消費電力量を表している。アイコンが濃い色の需要家は消費電力を全て外部の発電所から調達している。一方、アイコンが薄い色の需要家は太陽光発電や電気自動車、蓄電池などの分散電源を持っており、それらから消費電力を賄っているため、外から見た消費電力量は少ない状態である。



図5. DEPの画面例

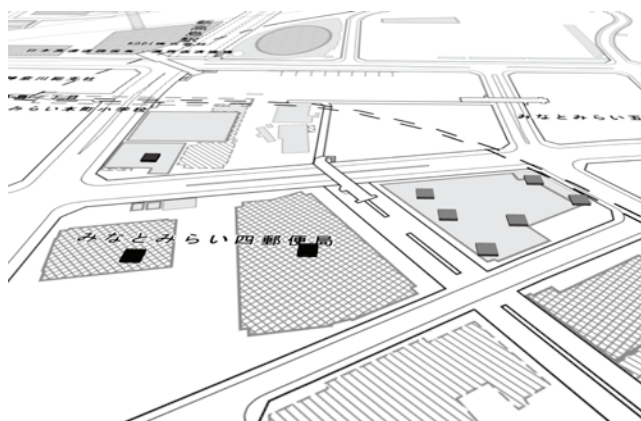


図6. 地図による可視化例

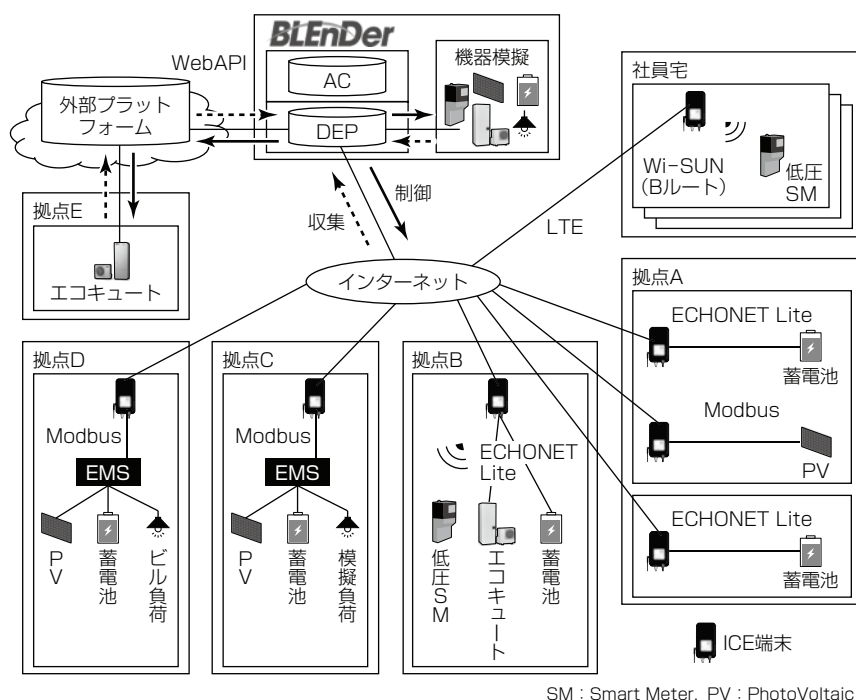


図4. VPP社内実証での設備構成

6. むすび

DEPは分散電源向けIoTプラットフォームであり、地域に点在する分散電源と接続し、データ収集・制御を行う。電力業務を担うサービスはDEPと連携することで、業務での分散電源の活用を容易に実現できる。DEPは電気事業での分散電源の活用を加速させ、世界的な再生可能エネルギーの導入拡大に貢献する。

参考文献

- (1) 経済産業省：分散型エネルギーリソースを活用したエネルギーシステムの構築に向けた取組 (2019)
<https://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20191121/20191121-01.pdf>

VPPを考慮した電力需給管理システム

Power Supply - demand Management System with Virtual Power Plant

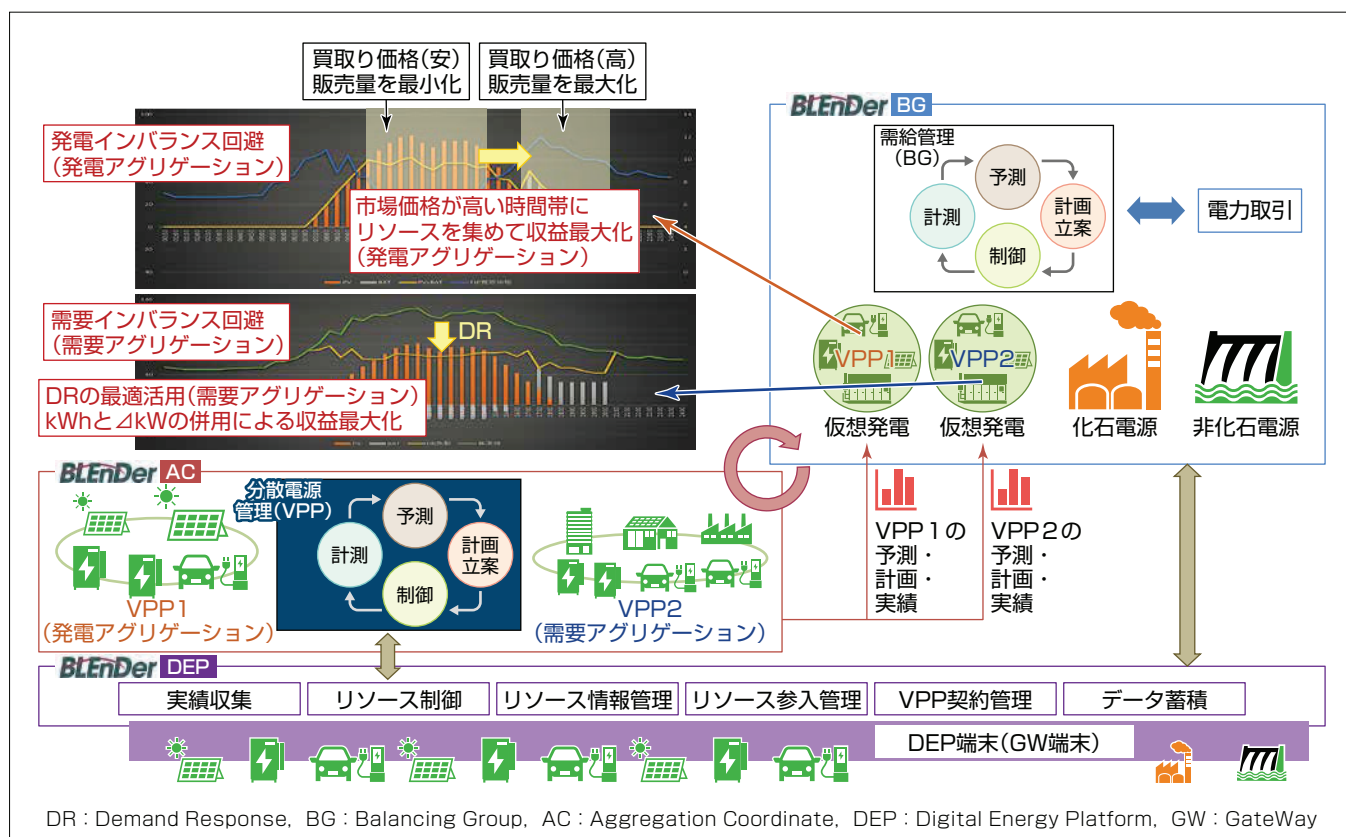
要 旨

2021年4月、需給調整市場の運用が開始された。これまで各エリアの送配電事業者が個別に調達していた実需給断面で必要になる“調整力”を全国規模の市場で取引することになる。日本でも海外事例を参考にしながら順次調整力商品が拡充される予定である。

このような背景の下、火力発電所等を持っている発電事業者は、従来の“kWh価値”での電力需給管理に加えて、調整力として提供する“ΔkW価値”も同時に評価しながら、入札市場を選択、最終経済発電計画を策定する必要がある。一方、太陽光発電(PV: Photo Voltaic)などの再生可能エネルギーの急速な普及拡大によって主要な調整電源である火力発電所の稼働率が減少しており、それに伴う電力品質の低下が懸念されている。そのような状況下で期待されて

いるのが、“仮想発電所(VPP: Virtual Power Plant)”である。需要家側に設置されるPVや蓄電池などの分散電源を一つの仮想発電所として統合し、火力発電所と同等の電源として扱って調整力を提供する。この技術を活用することによって、調整電源が不足する断面でも電力系統の品質維持が可能になる。

三菱電機では、2000年の電力自由化以降、電力事業者向けの需給管理業務支援パッケージアプリケーション“BLEnDer”シリーズを提供している。BLEnDerシリーズの“BLEnDer BG(電力需給管理システム)”と“BLEnDer AC(アグリゲーションコーディネーター)”を連携させてVPPを考慮した電力需給管理システムを実現した。また、そのシステム向けの電力需給バランス策定手法を開発中である。



VPPを考慮した電力需給管理システムでの“BLEnDer BG”と“BLEnDer AC”の連携イメージ

BLEnDerシリーズの発電小売事業者向けBLEnDer BGとアグリゲータ事業者向けBLEnDer ACを連携させてVPPを考慮した電力需給管理システムを実現した。BLEnDer ACでは、需要家側に設置されたPVや蓄電池等を個別管理し、発電予測・計画策定・制御指令計算によってVPPとして集約する。BLEnDer BGでは、BLEnDer ACで集約したVPPを、化石電源、非化石電源と同様に扱い、最終経済運転計画の立案を支援する。

1. ま え が き

脱炭素化社会の実現を目指してPVや風力発電のような再生可能エネルギーの導入が進む中、一般送配電事業者が調整力を効率的に確保していくことが重要な課題になっており、その解決策として需給調整市場が創設されることになった。諸外国では既に需給調整市場を活用した調整力の調達、需給調整の広域化が進んでいる。日本でも基幹システムの改修スケジュールを踏まえて段階的に拡張していくことが決定している。

現在、日本で調整力を提供するリソースとしては、化石燃料を消費して発電する火力発電機が主流である。数十分～数秒で変動する電力負荷に対して燃料特性、設備制約を考慮しながら発電機の出力制御を行い、電力品質を維持している。一方、再生可能エネルギーの普及拡大によって主要な調整電源である火力発電機の稼働率が減少しており、それに伴う電力品質の低下が懸念されている。また、発電小売事業者からすると、自社保有電源のうち出力調整が困難なPVの割合が増えることでインバランスリスクにさらされることや、卸電力市場価格の下落によって想定した収益を確保できなくなるなど、電力事業を継続していく上での様々な課題を解決する必要がある。そのような状況下で期待されているのが、VPPである。近年導入量が増加している定置型蓄電池や電気自動車(EV: Electric Vehicle)のような蓄エネルギー設備や、需要を制御するDRなどをVPPとして統合制御することで“調整力”“インバランス回避”“市場値差取引”といった様々な用途で活用できる。

本稿では、VPPを考慮した電力需給管理システム及び電力需給バランス策定手法とその検証結果について述べる。

2. 需給調整市場

国内では2021年4月から表1の三次調整力②の広域調達が開始され、今後も継続して調整力商品の拡充、広域調

表1. 需給調整市場の開設スケジュール⁽¹⁾

	2020年度	2021年度	2022・2023年度	2024年度以降
予約電源の調達 (kW又はΔkW コストが発生 する電源)	電源I-a	電源I-a	電源I-a	一次調整力
				二次調整力①
	電源I-b	電源I-b	電源I-b	二次調整力②
			三次調整力①	三次調整力①
		三次調整力②	三次調整力②	三次調整力②
余力電力の活用	電源II	電源II	電源II	余力活用電源

□ エリア内調達

■ 市場での広域調達

達が予定されている。三次調整力②は調整力商品の中でも最も応動時間が長く、VPPリソースが参入しやすい市場になっている。

2021年6月現在、市場への応札量のうち、既存事業者を主とした大手発電事業者によるものが大半を占めている。新規事業者が参入しやすいよう市場ルールの改善が継続議論されているところであり、今後はVPPによる調整力供出者が増えていくことが期待されている。

3. VPPを考慮した電力需給管理システム

VPPを考慮した電力需給管理システムは、当社が提供している電力事業者向けの業務支援パッケージアプリケーションBLENderシリーズのBLENder BG(電力需給管理システム)とBLENder AC(アグリゲーションコーディネーター)を連携させて実現した。BLENder BGとBLENder ACの役割構成を図1に示す。

電力の安定供給には、発電と需要のバランスを取る必要がある。そのため、発電事業者は30分単位の発電・需要それぞれの実績値を計画値と一致させること(同時同量)が求められている。日々行われる需要予測から需給計画の立案、電力広域的運営推進機関への計画提出や、一般社団法人日本卸電力取引所(JEPX)との取引業務で、万が一、同時同量未達成(インバランス)があった場合には、発電事業者はペナルティ(インバランス料金)を負担しなければならない。BLENder BGは発電小売事業者の安定した需給オペレーションを実現するために開発されたソフトウェアパッケージ製品群である。

VPPを活用してエネルギーサービスを提供する事業者のことをアグリゲータ事業者と呼ぶ。一例として、アグリゲータ事業者は需要家へ需要調整を依頼して対価を支払い、発電小売事業者や送配電事業者へ供給力や調整力を提供する。ただし、アグリゲータ事業者には電力事業者や需要家との契約・精算業務やシステム運用業務などが必要になるため、VPP事業の成立に向けては複数サービスの組合せや、効率的な運営が必要になる。BLENder ACは需要家側に設置されたPVや蓄電池等を個別管理し、発電予測・計画策定・制御指令計算を実現するために開発されたソフトウェアパッケージである。

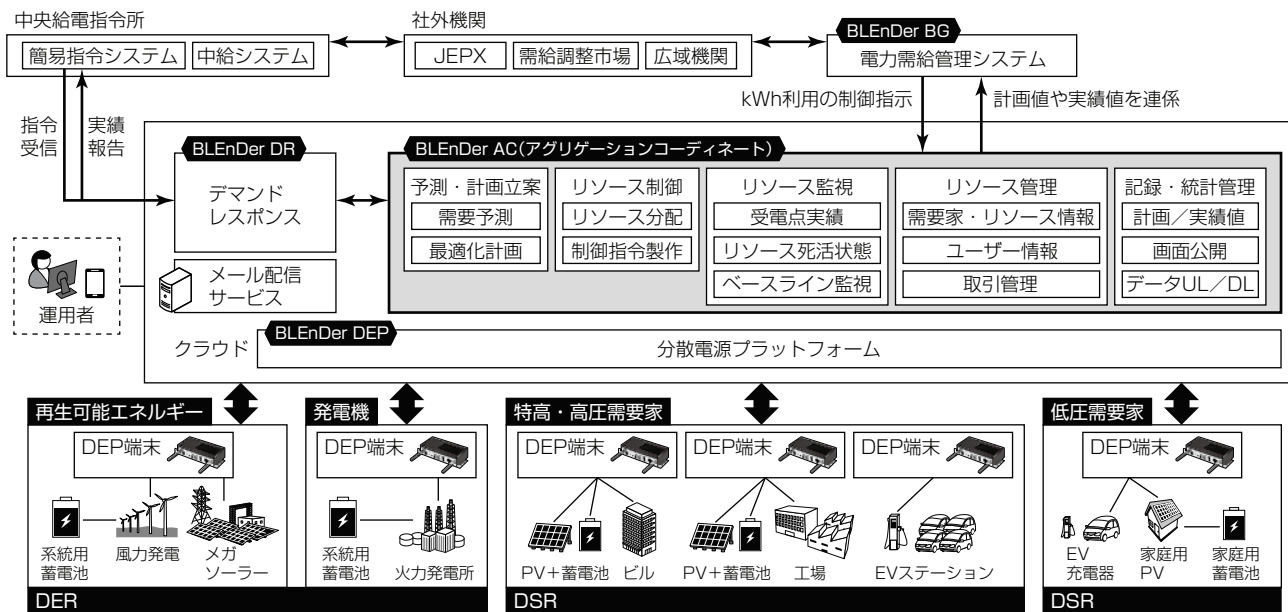
3.1 BLENder BG

現在当社は発電小売事業者向け業務支援パッケージアプリケーションとしてBLENder BGを提供している。BLENder BGのシステム構成とサブパッケージ一覧を図2と表2に示す。BLENder BGの特長を次に述べる。



図2. BLEnDer BGのシステム構成

	パッケージ名	名称	内容
①	BLEnDer CM	マスタ管理	需要家、発電所、BG／事業者、広域機関／送配電事業者のマスタデータを管理する。
②	BLEnDer LF	各種予測	気象情報及び需要家毎実績を管理し、需要予測を作成する。需要予測の確認補正も行う。
③	BLEnDer PM	需給計画	発電計画を計算し、広域機関に提出して運用する計画を作成する。
④	BLEnDer BP	計画提出	ビジネスプロトコルに従ってJX手順で広域機関に計画を提出する。
⑤	BLEnDer Trader	電力取引支援	JEPXとの取引を実施し、取引関連データを蓄積する。
⑥	BLEnDer BM	需給監視(同時同量支援含む)	需要実績、発電実績の収集、及び小売・発電BGの同時同量監視を行う。
⑦	BLEnDer DM	記録・統計	各種実績データ、計画データから各種記録統計処理を行う。



UL : UpLoad, DL : DownLoad, DER : Distributed Energy Resources, DSR : Demand Side Resources

図3. BLENder ACのシステム構成

(1) 要件に合わせた最適ソリューションの提供

BLENder BGは発電小売事業者の実運用業務を踏まえて大別された複数のサブパッケージで構成される。これらのパッケージ製品群から顧客の業務要件に合わせて必要なパッケージ製品だけを導入することも可能である。これによって、自社で開発済みのシステムとBLENderサブパッケージを組み合わせた柔軟でかつ安定したシステムを実現できる。

(2) 自動化による業務効率化

自動化技術による需給計画・電力取引・計画提出を自動化して業務効率化を実現している。業務要件に応じて自動化範囲をカスタマイズすることも可能である。

(3) 社外機関との標準連携

サブパッケージ間でのデータ連携は当然のことながら、JEPXや広域運用推進機関といった社外機関とのデータ連携も標準で具備している。

(4) 需給計画策定技術

需給計画サブパッケージである“BLENder PM”には当社独自開発の最適化技術を用いた需給バランス策定機能を具備している。必要とされる需要量に対して発電機の設備制約・運用制約を考慮しながら自社保有の火力発電機等の調整電源の最経済運転計画を高速に求解する（4章）。

3.2 BLENder AC

現在当社はアグリゲータ事業者向け業務支援パッケージアプリケーションとしてBLENder ACを提供している。BLENder ACのシステム構成と基本機能一覧を図3と表3に示す。BLENder ACは、VPPリソースを構成する機器、需要家の計画を管理し、当日断面ではそれら制御機器に対する監視制御する機能を持っている。

表3. BLENder ACの基本機能一覧

大項目	小項目	概要
予測	需要予測	実績値や運転パターンに基づく個別需要予測
	発電予測 (PV)	気象ポイントごとの日射量に基づく個別PV発電予測
	受電点予測	負荷やPVの予測値を基に受電点を予測
計画立案	制御可能量計算	需要家の運転計画や契約に基づく制御可能量の計算・集約
	最適化計画	目的に合わせてリソースを最適運用する計画の立案
	小売BG連係	BGへ予測値と制御可能量を連係
リソース制御	指令計算	制御量確定後のベースライン計算や個別需要家に対する配分計算
	指令送信	ローカルEMSに制御指令を連係
	差分補正制御	計画値に対する監視と差分補正制御
リソース監視	計測収集	各リソースの実績値を計測収集
	実績値監視	収集した実績値を監視。異常時はアラーム
バックオフィス	収支情報	VPP運用による収支を管理
	見える化	運用状況や経済効果、CO ₂ 削減効果等に見える化
	記録・統計管理	リソースの実績データや各種計算データを管理
需給調整市場関連	需給調整入札／約定	連係された入札量を所定の様式で市場へ登録／約定結果を取得
	基準値ファイル作成	基準値ファイルを作成
	基準値計画提出	連係された基準値を所定の様式で市場へ提出
	入札案作成	単価情報と可能量を基に入札案を作成
	アセスメント監視	約定結果に対してアセスメントに違反していないか監視

4. 電力需給バランス策定手法と検証結果

3章冒頭で述べたとおり、発電事業者は30分単位の電力需給を一致させることを前提として、自社の利益を最大化するように発電機の運転計画を決定する必要がある。自社で火力機等の調整可能な発電機を複数持っている場合、それぞれの設備の運転制約を考慮しながら運転状態（起動停止）と出力値を30分単位（1日48点）で求めることになる。

制約条件は設備上の制約もあれば、運用上の制約(調整力等)、時間軸の制約(最小運転・停止時間等)が存在するため、人間系でこれらの制約を考慮しながら最経済になる運転計画を決定することは困難である。

BLEnDer BGには、様々な電力事業者とのやり取りの中で培ってきた実績・ノウハウを基に開発した電力需給バランス策定手法が適用されている。満たすべき電力需要に対して先に述べた制約を考慮しながら燃料コストが最小になるように自社保有発電機の運転計画を高速に求解する。これまでに、需給調整市場で約定した三次調整力②の ΔkW に対してアセスメントを考慮しながら最経済運転計画を立案する手法を開発した。現在は、2022年度4月から追加される三次調整力①商品に対応した手法を開発中である。

次に、並行して開発中のVPPリソースを考慮した電力需給バランス策定手法の考え方について述べる。BLEnDer BGからするとVPPリソース一つ一つは蓄電機能を持つVPPと捉えることができる。したがって、そのVPPの調整能力情報(最大充電/放電電力、最大SOC(State Of Charge)容量、SOC制約など)を電力需給バランス策定手法の制約条件として組み込むことでVPPリソースも含めた最経済運転計画を立案することが可能になる。

VPPリソースを考慮した電力需給バランス策定手法の妥当性を検証するため、仮想のシミュレーションデータを用いて年間需給シミュレーションを実施した。表4に示すようにケースI(従来法)では調整可能な発電機は火力機だけとし、ケースII(提案法)ではVPPリソースを模擬した仮想発電機を追加している。また、火力機は燃料ごとに複数の発電機が運転可能とする(表5)。

結果例として低負荷期3日間の需給バランス結果例を図4に示す。ケースIでは、ベース電源とマージナル電源で需給バランスを取っているが、負荷の変動が激しいため、燃料単価が安いベース電源の出力を抑制する動きとなって

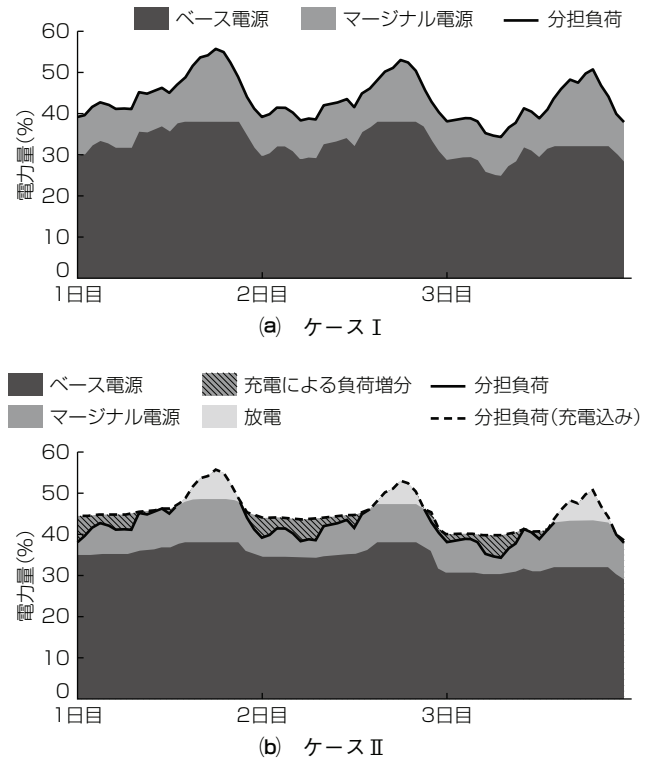


図4. 需給バランス結果のシミュレーション結果(低負荷期)

いる(図4(a))。一方、ケースIIでは低負荷時間帯の充電によってベース電源の出力が安定し、高負荷時間帯の放電によって燃料単価が比較的高いマージナル電源の出力を抑制することが確認できた(図4(b))。年間の燃料コストを比較すると、VPPリソースを活用することで約1.0%の改善効果があることが分かった。

5. む す び

当社が供給している電力事業者向けパッケージアプリケーションBLEnDerシリーズによって実現したVPPを考慮した電力需給管理システムについて述べた。また、現在開発中のVPPリソースを考慮した電力需給バランス策定手法についてシミュレーションを実施し、その妥当性を確認した。当社としては、VPP事業へ参入する電力事業者の拡大に向けてシステム面からサポート・貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：需給調整市場(三次調整力②)の運用状況について、第62回 制度設計専門会合 事務局提出資料 (2021)
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/062_08_01.pdf
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁：バーチャルパワープラント・ダイヤモンドリスボンスについて (2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/

表4. シミュレーションケース

ケース	最大充放電(%) ^(注1)	SOC容量	SOC制約(%) ^(注2)
I (VPPなし)	—	—	—
II	10	最大充電で5時間満充電	20~100

(注1) 最大分担負荷に対する割合

(注2) SOC容量に対する割合

表5. 最大分担負荷と火力機の割合

最大分担負荷(%)	火力機合計(%) ^(注3)	ベース電源(%) ^(注3)	ベース電源以外(%) ^(注3)
100	120	50	70

(注3) 最大分担負荷に対する割合

次世代スマートメータシステムへの取組み

Activities for Next-generation Smart Meter Systems

高瀬英伸*
Hidenobu Takase
小林範行*
Noriyuki Kobayashi
市位裕幸*
Hiroyuki Ichii

要 旨

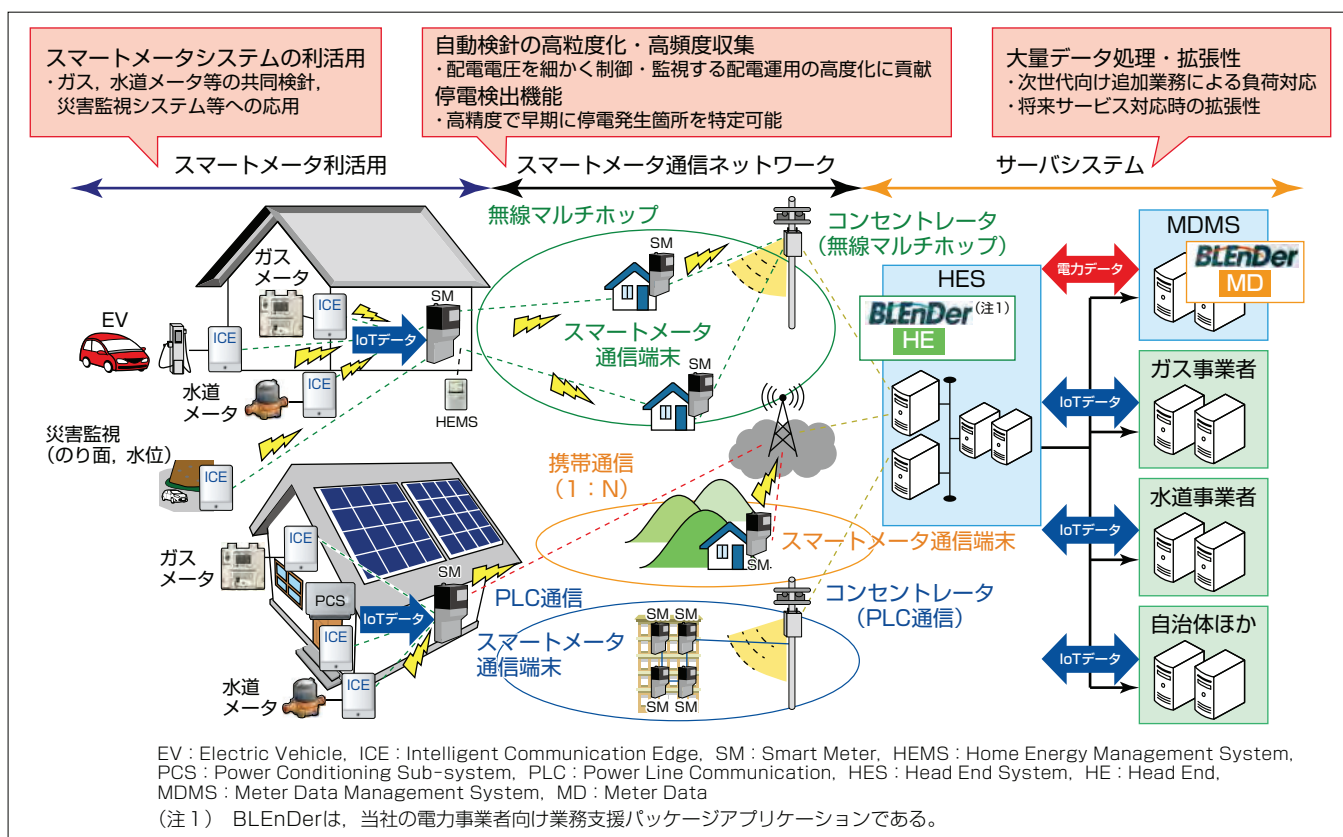
スマートメータシステムは、各家庭・工場などに設置したスマートメータから電力使用量を自動的に収集(自動検針)し、運用・管理するシステムである。三菱電機は電力会社向けにスマートメータシステムを開発・納入しており、自動検針による業務高度化を実現している。

近年、再生可能エネルギーの普及・拡大によって配電運用高度化の必要性が高まっており、スマートメータシステムによる、より高粒度かつ高頻度な電力データの収集・活用が期待されている。また、災害等で発生した停電の早期検出や、システムを活用した新たな事業・サービスへの応用展開など、スマートメータシステムを取り巻く新たな

ニーズが生じている。

当社はこれらのニーズを見据えた次世代スマートメータシステムの開発を進めている。この開発では、自動検針の高粒度・高頻度収集機能、停電発生箇所を高精度で早期に特定可能にする停電検出機能、利活用に向けたIoT(Internet of Things)データの収集・外部システムとの連携機能の開発に取り組んでいる。また、これらの要件の実現に必要な大量データの処理性能や、将来のサービス追加等に容易に対応可能な拡張性向上に関する開発も進めている。

これらの開発によって社会インフラとして幅広く活用できる次世代スマートメータシステムを提供する。



社会インフラとして幅広く活用できる次世代スマートメータシステム

自動検針データの高粒度化・高頻度収集による細かい精度での電力データ収集、停電発生箇所を高精度で早期に特定可能にする停電検出機能、様々なIoTデータを収集し、外部システムと連携するスマートメータシステムの利活用機能を備える。さらにこれら機能実現を支える大量データ処理性能や新たなサービス追加に対応する拡張性も持っており、社会インフラとして幅広く活用できる次世代スマートメータシステムである。

1. ま え が き

スマートメータシステム(図1)は、各家庭・工場などに設置したスマートメータから電力使用量を、メータ群及びコンセントレータ(データを集約する通信装置)によって構築されるスマートメータ通信ネットワークを経由してヘッドエンドシステム(HES)へ自動的に収集(自動検針)し、運用・管理するシステムである。当社は電力会社向けにスマートメータシステムを開発・納入しており、自動検針による業務高度化を実現している。

近年、再生可能エネルギーの普及・拡大による配電運用高度化への活用の必要性、災害等によって発生した停電の早期検出、ガス・水道メータの共同検針やIoTデータ収集などの利活用実現など、スマートメータシステムを取り巻く新たなニーズが生じている⁽¹⁾。当社はこれらニーズを見据えて、スマートメータシステムの高度化開発を進めている。

本稿では次世代スマートメータシステムに求められる要件を述べた上で、実現に向けた当社開発活動について述べる。

2. 次世代スマートメータシステムの要件

次世代スマートメータシステムに求められる要件を次に述べる。

(1) 検針データの高粒度化及び高頻度収集

国際的な脱炭素化の流れを受けて、再生可能エネルギーが普及・拡大している。再生可能エネルギーは発電量が気

象条件等によって変動するため、配電系統の電気の流れは従来に比べて複雑化する傾向にある。時々刻々と変化する配電電圧をより細かい精度で監視するため、次世代スマートメータシステムでは、現行より細かい時間幅(高粒度)で測定した検針データを、現行より短い周期(高頻度)で収集し、提供することが求められている。

(2) 停電検出機能

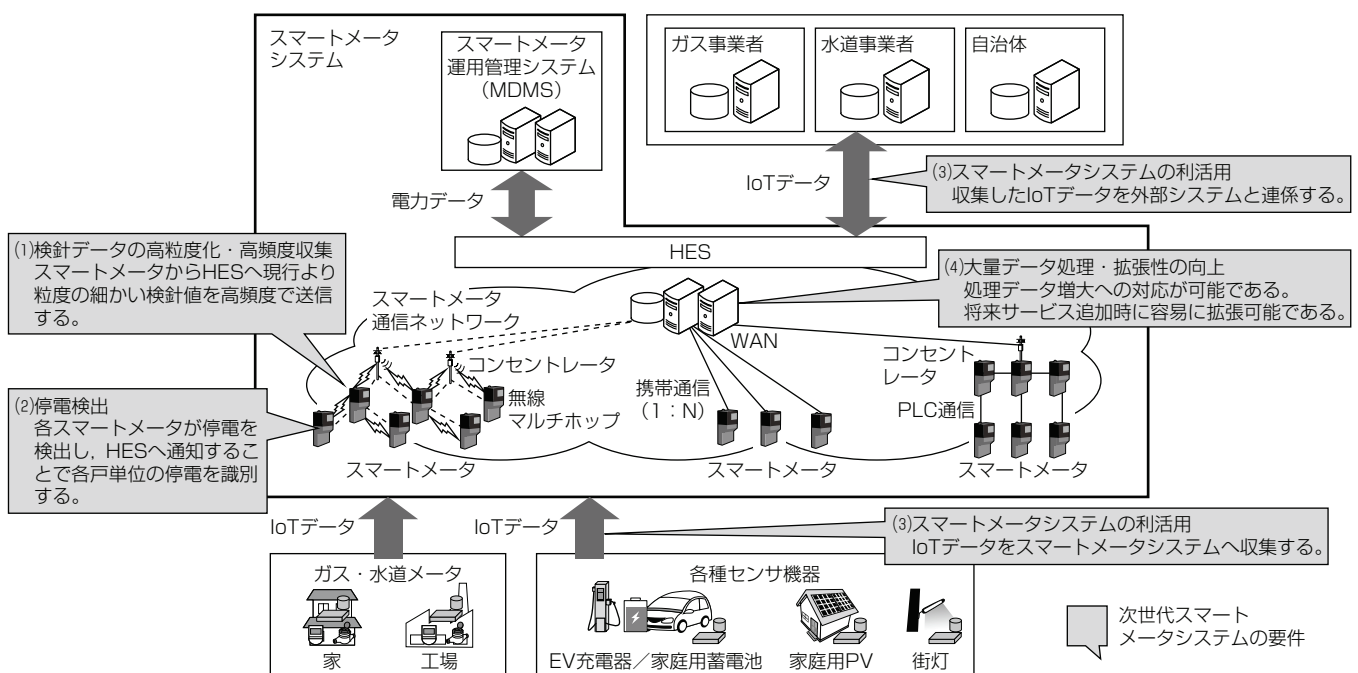
現状の配電監視システムでは、高圧配電線の断線を検出することは可能であるが、支線部分又は低圧配電線の断線を検出できない。このため、停電から復旧までの時間が長期化する懸念がある。次世代スマートメータシステムでは、地域規模の停電から、各家庭の停電・引込線の断線のような小規模停電まで、停電発生箇所を高い精度で早期に特定する機能が求められている。

(3) スマートメータシステムの利活用

スマートメータ通信ネットワークのエリア拡大が進むにつれて、ガス・水道メータの共同検針へ活用するニーズが高まっている。これに加えて、スマートメータ通信ネットワークで汎用的なIoTデータを収集し、様々なサービス事業者の外部システムと連係することが求められている。

(4) 大量データ処理性能、拡張性の向上

先に述べた(1)~(3)の対応によって処理対象データ量が増大するため、次世代スマートメータシステムは処理性能向上が必要になる。また、次世代スマートメータシステムは、これら以外にも様々な用途での利用拡大が見込まれるため、将来のサービス追加時に容易に機能拡充が可能になる高い拡張性が求められている。



WAN : Wide Area Network, PV : PhotoVoltaic

図1. スマートメータシステムの全体構成

3. 次世代スマートメータシステムに向けた技術開発

この章では2章で述べた次世代スマートメータシステムへの要件に対する当社開発活動について述べる。

3.1 スマートメータ通信大容量化による自動検針の高精度化及び高頻度収集の実現

自動検針に関する要求条件について、表1に現行及び次世代スマートメータとの比較を示す。次世代スマートメータでは現行スマートメータに比べて、頻度・粒度・データ種別がどれも増加する。また、上位システムへの通知時間も短くなる。これによって1台のスマートメータから上位システムへの通信トラフィックが増加することになる。スマートメータシステムは数百万台以上のスマートメータで構成されるため、通信トラフィック増加によって輻輳（ふくそう）が頻発することで、自動検針データ欠測の大量発生につながるおそれがある。

当社はこの課題に対して、スマートメータ通信帯域の大容量化を図ることで対応する。通信帯域の大容量化実現に向けて、スマートメータの無線変調方式変更等によって、通信スループットを向上させる。さらに、各種通信の時間配置を最適化し、通信トラフィックを平準化することで通信帯域を効率的に利用する。これらの方策を適用したシミュレーション及び実証検証を重ねて、スマートメータ通信帯域の大容量化に向けた開発を進めている。

3.2 キャパシタを搭載したスマートメータによる停電検出機能の開発

スマートメータが自身への入力電圧が断たれた場合に停電発生と判断し、即座にHESへ通知する停電検出機能を実現する。スマートメータには、停電発生時にHESへの停電通知を完了するまでの動作時間を保障する容量を持つキャパシタを実装する。

しかし、無線マルチホップ通信のようにメータ同士が中継してデータを伝達する方式の場合、全メータがHESへ通知完了するには時間がかかるため、キャパシタ容量が大きくなり、メータの製造コスト増加や筐体（きょうたい）サイズ肥大化につながるおそれがあった。

表1. 自動検針に関する要求条件比較

	現行	次世代(想定)
検針頻度	30分ごと	最短で数分ごと
検針粒度	30分値	5分値、15分値、30分値など
データ種別	有効電力量 だけ	有効電力量、無効電力量、 電圧など
上位システムへの通知時間	60分以内	最短で数分以内

当社はキャパシタ容量の抑制に向けて、メータの部品等の見直しを行い、低消費電力化を図った。さらに、メータごとに停電通知時間の割当て等を行って無線輻輳を抑制することで、データ中継時間を最小限に抑えた。これらによって、必要なキャパシタ容量を抑制し、停電検出機能を実現した。

3.3 IoTデータの収集・外部システム連係によるスマートメータシステム利活用の実現

様々な事業者によるスマートメータシステムの利活用の実現に向けて、当社は各種メータやセンサ機器をスマートメータ通信ネットワークに容易に接続する電池駆動無線端末“BLEnDer ICE”（以下“ICE端末”という。）を開発した。図2に示すとおり、ICE端末はスマートメータと無線通信を可能にする無線部、電源供給の電池を搭載し、外部接続インタフェースとして、国内で既に導入されているガスメータ及び水道メータとの接続を可能にするNライン（5 bit）、Aライン（8 bit）、U-Busの物理インタフェースを1本（どれかを排他使用）具備している。また、汎用センサ用途の接点入力（汎用目的）のインタフェースを2本具備しており、各種センサの監視・IoTデータ収集が可能である。

さらに、収集したIoTデータを外部システムへ連係するIoT通信機能を開発した（図3）。この機能はHES上に搭

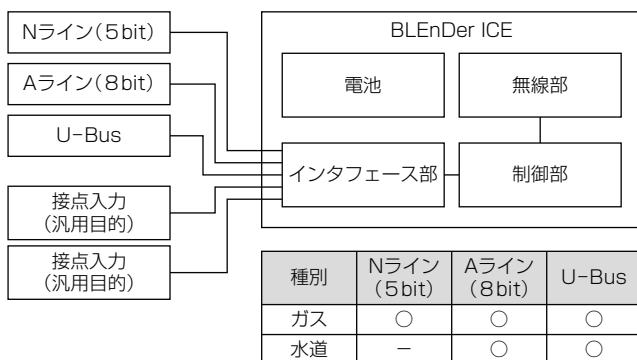


図2. ICE端末ハードウェア概略図

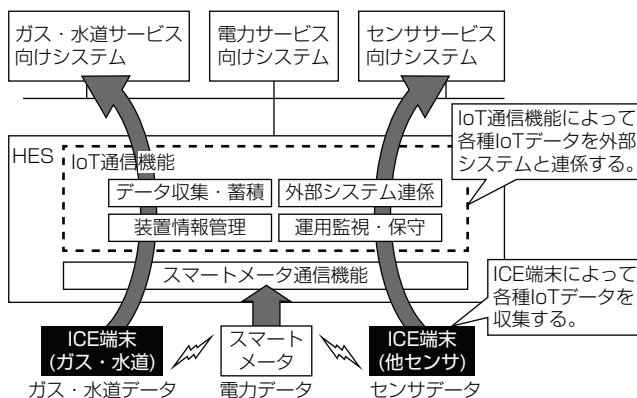


図3. IoT通信機能による外部システム連係

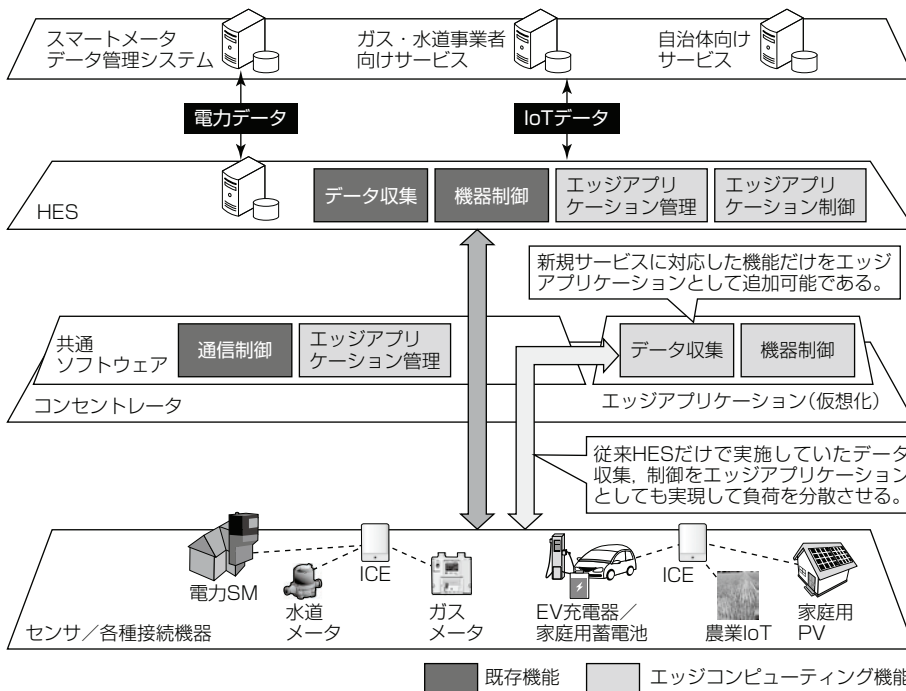


図4. エッジコンピューティング機能の構成

表2. エッジコンピューティングの機能

機能	内容
エッジアプリケーション管理	コンセントレータに配信するエッジアプリケーション情報を一元管理する次の機能を備える。 <ul style="list-style-type: none"> エッジアプリケーション配信 エッジアプリケーション状態確認 エッジアプリケーション削除
エッジアプリケーション制御	コンセントレータ上で動作するエッジアプリケーションを制御する次の機能を備える。 <ul style="list-style-type: none"> エッジアプリケーション起動/停止 エッジアプリケーション一時停止/一時停止解除
上り/下り通信	エッジアプリケーションとの上りデータ、下りデータ通信機能を提供する。



図5. エッジアプリケーション管理の配信状況画面

載され、既存スマートメータ通信ネットワークを活用して、IoTデータの収集・蓄積、特定データの外部システム連係、ICE端末自身の装置情報管理等を実現する。

3.4 データ処理性能・拡張性向上への取組み

データ処理性能及び拡張性の向上を目指して、エッジコンピューティング機能の開発を進めている（図4）。

コンセントレータのハードウェア性能を增強し、従来HESで実施していたデータ収集や接続機器制御処理をコンセントレータ上のエッジアプリケーションで代替することで負荷を分散し、システム全体での処理効率を向上させた。

エッジアプリケーションは、通信制御といった共通機能と分離した上で、仮想化技術を適用して実現した。これによってシステムの全体動作を止めずに新規サービスを追加することが可能になった。

エッジコンピューティングの機能を表2に示す。基本機能として、エッジアプリケーションの管理、制御、通信機能を実現している。図5にエッジアプリケーション管理機能の一例として、配信状況画面を示す。利用者は、任意のエッジアプリケーションを複数のコンセントレータに対して一括で配信又は実行状況を確認することが可能である。現在、製品化に向けた機能拡充開発を進めている。

4. む す び

当社は次世代スマートメータシステム向け開発として、自動検針の高粒度・高頻度収集機能、停電検出機能、IoTデータの収集・外部システム連係によるスマートメータシステムの利活用機能の開発に取り組んでいる。また、これらに必要な大量データ処理性能・拡張性向上に対する開発も進めている。これらの開発によって社会インフラとして幅広く活用できる次世代スマートメータシステムを提供する。

参考文献

- (1) 経済産業省：次世代スマートメーター制度検討会（2021）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_smart_meter/

次世代配電系統での配電高度化技術

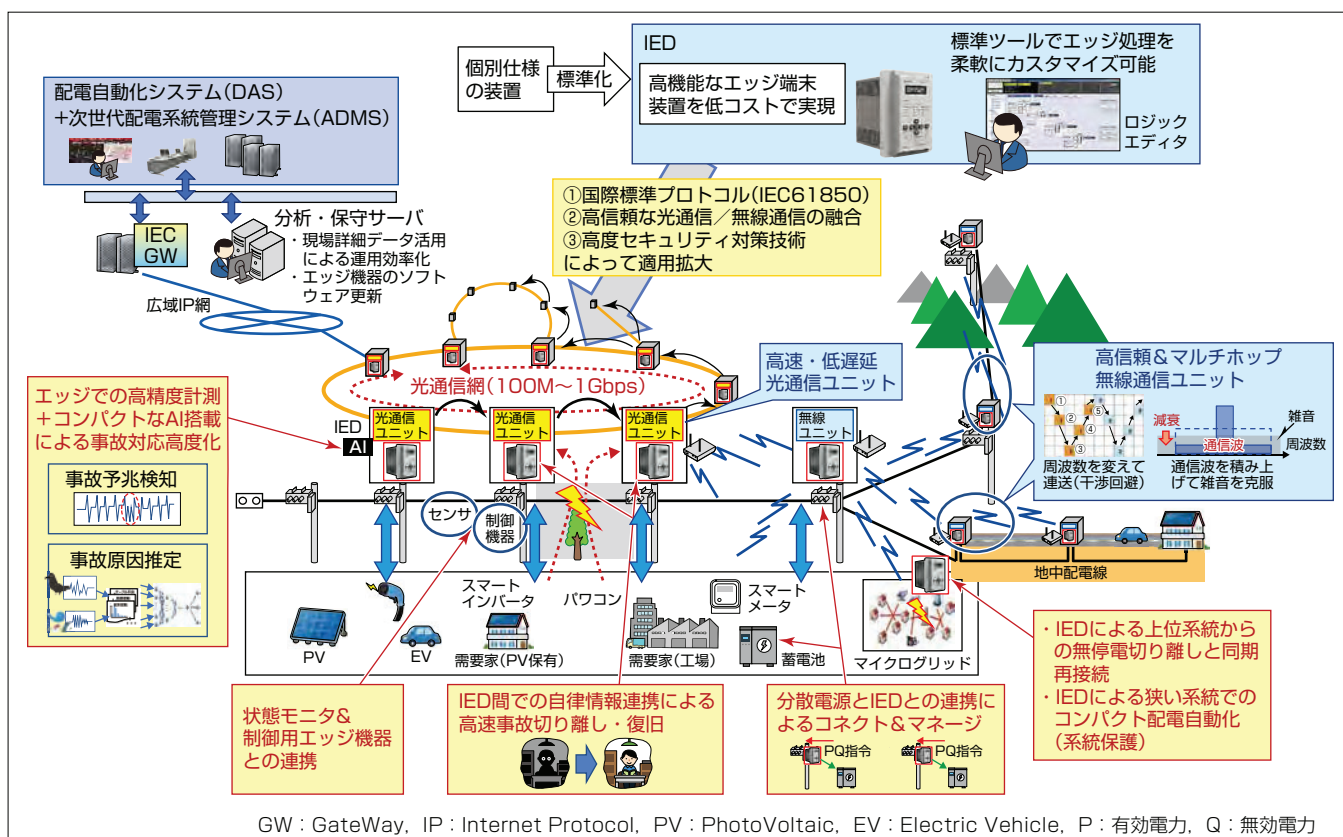
Advanced Power Distribution Technologies for Next-generation Power Distribution Grid Networks

石本智之*
Tomoyuki Ishimoto
小島慎護*
Shingo Kojima
片山 匠*
Takumi Katayama

要 旨

三菱電機では、配電系統での分散電源の導入拡大に伴う電力品質に関する問題、自然災害や設備老朽化に伴う電力安定供給に関する問題に対して、エッジコンピューティング技術に着目し、拡張性が高く、柔軟性のあるエッジ端末装置 (IED : Intelligent Electronic Device) を活用したソリューションの技術開発に取り組んでいる。また、社会情勢として、レジリエンスの向上や地域サービスの活性化などを目的に、配電事業での制度改正に向けた議論が活発化しており、配電事業ライセンスの活用によって、一般送配電事業者以外の事業者による配電系統の運用が可能になる見込みである。市場動向や社会情勢を鑑みて、次世代

配電系統を見据えた配電技術の高度化を目的に、マイクログリッドやオフグリッドといった、従来の電力系統とは独立して運用される分散型グリッドでの課題解決に向けた検討を進めている。当社では、1980年代から培ってきた配電自動化システム (DAS : Distribution Automation System) や次世代配電系統管理システム (ADMS : Advanced Distribution Management System) など、配電系統の運用ニーズに関する知見に加えて、保護継電器や光通信／無線通信、人工知能 (AI) などの関連技術を組み合わせることによって、配電市場での新たな価値を創造し、社会に貢献していく。



当社の配電制御エッジソリューション

当社では、エッジでの高精度計測及びコンパクトなAI搭載による事故予兆検知・事故原因推定、IED間での自律情報連携による高速事故切離し・復旧、分散電源とIEDとの連携によるコネクト＆マネージ、IEDによる各種マイクログリッド対応、国際標準プロトコル (IEC (International Electrotechnical Commission) 61850) への対応、高信頼な光通信／無線通信の融合、高度セキュリティ対策技術など、次世代配電系統を見据えた配電制御エッジソリューションを開発推進中である。

1. ま え が き

近年、配電領域では、分散電源の導入拡大、設備老朽化、配電事業ライセンスなどといったキーワードを中心に、一般送配電事業者を始めとして、大手研究所や当社を含むシステムメーカーなどで幅広く検討が進められている。配電領域では、太陽光発電、蓄電池、電気自動車(EV)などの分散電源に加えて、VPP(Virtual Power Plant)やアグリゲータなど、数多くの新たなプレーヤーが配電系統に接続され、又は接続される見込みであり、配電系統を取り巻く環境は目まぐるしく変化し、大きな転換期を迎えている。

本稿では、次世代配電系統を見据えながら、解決すべき課題に対する当社の取組みとエッジコンピューティングに着目した配電制御エッジソリューション及び期待される効果について述べる。

2. エッジコンピューティング技術の適用

2.1 マイクログリッド向け対応技術

配電系統のレジリエンスを高めるため、マイクログリッド実現に向けた検討が進められている。マイクログリッドでは、事故時での電流量の違いなどから、上位系統連系時とマイクログリッド単独運用時で系統保護を切り替える必要がある。また、状況に応じて、単独運転しているマイクログリッド系統を上位系統へ再連系することが求められる。さらに別の課題として、マイクログリッドで扱う分散電源導入量の拡大によって、従来の電力系統では上位系統から需要家側へ一方であった電力供給に逆潮流が発生し、配電系統内の電圧や電流が適正範囲を逸脱する可能性がある。当社では、これらマイクログリッドが抱える課題を解決するため、IEDや分散電源を統合管理するシステムとしてDERMS(Distributed Energy Resource Management System)の開発を進めている(図1)。

IEDはIEC61850規格による通信を標準サポートしており、従来の配電自動化システムとの通信に加えて、IED間の通信が可能である。IED間の相互通信が可能になったことで、自律的にマイクログリッドと上位系統との接続状態を認識し、状況に応じて、系統保護を切り替えることが可能になる。また、マイクログリッド系統を上位系統に再接続する場合、マイクログリッド内の電圧や位相を上位系統と一致させる必要があるが、IEDの導入によって、マイクログリッド内の分散電源を制御し、電圧や位相を上位系統と同期させることで、マイクログリッドを停電させることなく、上位系統へ再接続することが可能である。

上位システム(配電自動化システムなど)

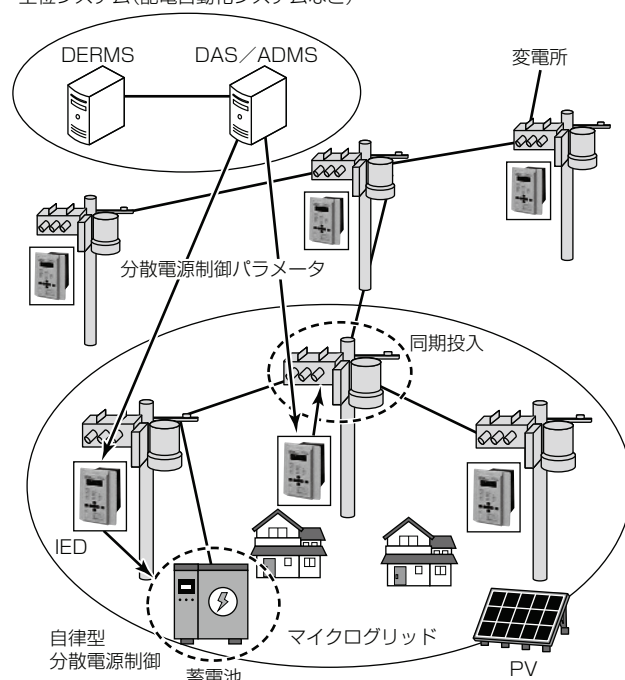


図1. マイクログリッド向け対応技術

DERMSはVPPやアグリゲータと連携し、蓄電池やEVなどの分散電源を活用し、配電系統での電圧や潮流を管理する。今後はEVが更に普及することで、予測できない急峻(きゅうしゅん)な電圧変動や潮流変動が発生する可能性があり、特にマイクログリッドなどの小規模なエリアで顕在化しやすい。マイクログリッド向けに急峻な電圧変動や潮流変動にも対応する仕組みとして、分散電源を高速に制御する機能を搭載したIEDを開発した。上位システムとの連携なしに、IEDは自律的に分散電源を制御し、マイクログリッド内の配電系統を安定化させることが可能になる。

さらに、当社では、分散電源を大規模に制御可能なセンター集中型システムDERMSと分散電源を小規模に制御可能なエッジ分散型端末IEDを協調動作させることで、システム全体としての最適化にも取り組んでいる。

2.2 配電線の事故予兆検知と事故原因推定

配電線や配電設備などの交換は、経過年数による管理や目視による劣化診断などが一般的であることから、最適な交換時期を見極めることは困難であった。また、設置環境によっては、計画時期よりも早く劣化し、配電線事故や設備故障につながることもあるため、人による定期的な巡視点検が必要であることも課題である。

そのため、近年、効率的な設備投資が求められ、かつ少子高齢化による人手不足に対する取組みとして、配電線情報を活用した事故予兆検知及び事故原因推定に関する検討が進められている。

配電線の電圧・電流値で、事故発生時と平常時では様相

が異なることに加えて、事故発生前でも特徴的な様相が現れる可能性がある。従来のセンター集中型システムでは、上位システムで平常時と異なる様相を抽出し、事故発生の予兆を検知するため、計測情報を上位システムへ連携することに伴う回線圧迫が課題であった。当社では、事故予兆を検出する機能を独自アルゴリズムによって、エッジ端末に搭載可能なAI技術⁽¹⁾で実現した。図2に示すように、このAI技術をIEDに搭載することで、エッジ側でリアルタイムなデータ解析が可能になり、解析用の膨大なデータを上位システムにリアルタイムに連携することなく、事故発生を未然に検知することが可能になる。学習モデルは、リソースが豊富な上位システムで定期的に生成し、エッジ側に配信する。学習に必要なデータは、回線圧迫をしないようにして上位システムに収集される。当該機能によって、事故未然防止による設備投資削減、現場の巡視コストの削減及び電力供給の信頼性向上に寄与する。

一方で、事故が発生した場合、事故原因を判別し、事故原因に適した停電復旧に対処する必要がある。配電線事故は、雷・樹木接触や鳥の営巣など、様々な要因によって引き起こされる。事故の原因によって、事故時の電圧・電流の波形は異なることから、熟練運用者の判断によって事故原因を判別している。当社ではAI技術を適用し、事故時の波形データや付加情報(時間や天候など)を学習することによって、事故原因を推定する機能を開発した。この機能は上位システムとIEDを連携させることで実現する。この機能によって、熟練運用者の判断によらず、事故原因推定が可能になり、現地作業の効率化、事故復旧の高速化に寄与する。

2.3 配電自動化システムでの無線通信技術の適用

配電自動化システムでの通信方式は、従来の配電線搬送方式やメタル方式の老朽化が進むとともに、事故点標定や

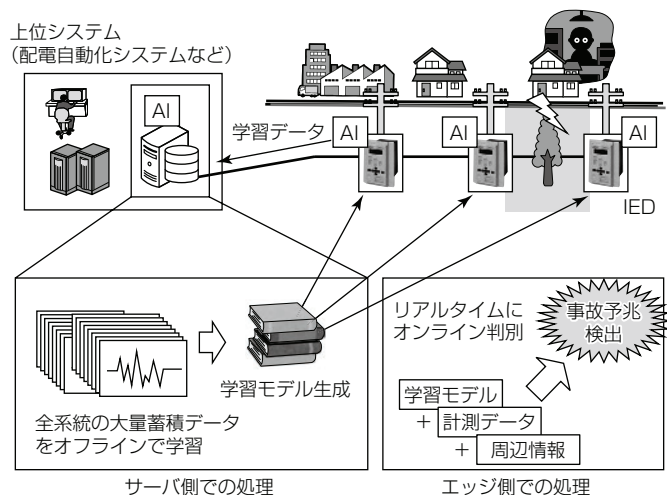


図2. 配電線の事故予兆検知

事故予兆検知などのシステム高機能化に伴い、光通信などに置き換えが進むと想定される。一方で、配電線が地中化された都市部や光通信網が整備されていない郡部や島嶼（とうしょ）部では、低コストで通信網の構築が可能な通信方式として無線技術への期待が高まっている。また、通信網のレジリエンスを高めるため、有線網のバックアップとしても無線技術が期待されている。当社では、図3に示すように、スマートメータ通信技術を応用したマルチホップ無線通信を始めとする配電自動化システムに適用可能な無線通信技術の開発を進めている。

スマートメータのマルチホップ無線通信⁽²⁾が使用する920MHz帯は障害物に対する回折性が高く、郡部に多い山間部など樹木が多いエリアにも適用しやすい。当該無線通信での伝送速度は数百kbpsであるため、大容量通信には向かないものの、配電自動化システムで使用する秒周期の電圧値や電流値、機器情報などを収集するには十分に活用できる。マルチホップ無線通信の特性を生かして、図4に示すように、冗長化した複数経路を構築し、第1経路で障害が発生しても、第2経路での通信を維持することによって、配電自動化システムに求められる通信路のレジリエンスを高めて、高い信頼性を実現した。さらに、干渉回避技術や誤り訂正を統合活用した当社独自の無線伝送方式を活用することで、配電自動化システムの通信方式として、更なる高信頼化が可能である。

今後は配電自動化システム向けに無線通信の各種パラメータを最適化し、山間部などでフィールド実証を進めていく予定である。さらに、別の無線技術として、複数のLTE(Long Term Evolution)無線通信を通信品質に応じ

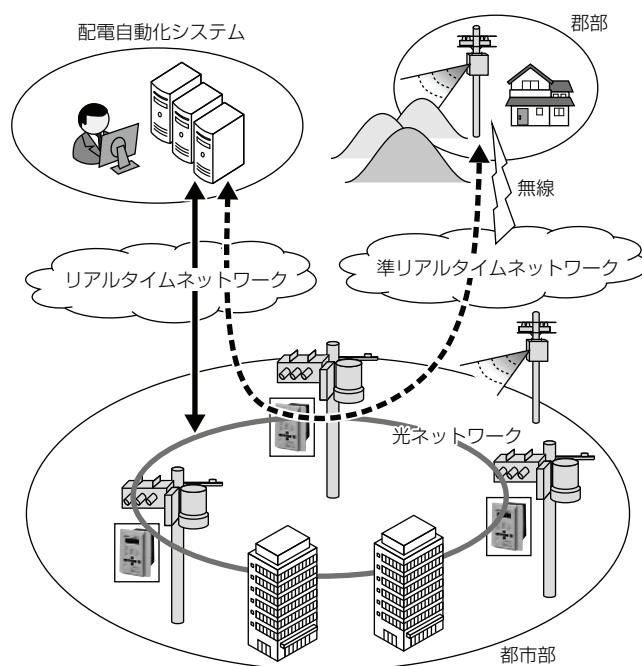


図3. 配電自動化システムへの無線適用

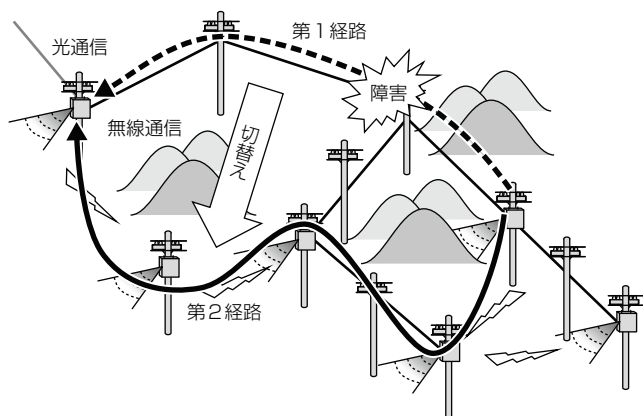


図4. 経路冗長化による高信頼通信

て自動的に切り替えるLTEキャリアダイバーシチ通信の適用も検討している。今後、並行して配電自動化システムへの有効性を評価する計画である。

2.4 エッジでの高速事故遮断と高速事故復旧

当社は、IEDによる配電線の高速事故遮断機能及び高速事故復旧機能(FLISR: Fault Location, Isolation and Service Restoration)を開発した。

従来であれば、配電系統で事故が発生した場合、変電所に設置してある保護継電器が動作し、FCB(Feeder Circuit Breaker)を遮断後、再開路という処理を経て、開閉器が持つ時限順送機能などによって、事故が発生している区間を特定するため、事故発生から事故区間以外の停電復旧までに数分程度の時間を要する。当社が開発したFLISR機能では、図5に示すようにIED間で事故情報を相互に通信することによって、変電所の保護継電器が動作する数百ms以内に事故区間を特定する。開閉器の遮断能力内であれば、IEDが判断して高速に事故区間を遮断することが可能である。従来方式に比べて高速に事故区間の特定・遮断が可能であるため、停電区間を局所化でき、事故復旧時間を大幅に短縮できる。子局間の通信は、GOOSE(Generic Object Oriented Substation Events)と呼ばれるIEC61850通信規格を使用することで、高速通信を実現している。

また、当社が開発したFLISR機能は、海外で主流のリング状配電系統だけでなく、国内の配電系統の大多数を占める放射状配電系統に対応している。放射状配電系統では系統状態に応じて、遮断すべき開閉器が動的に変化する。当社の独自アルゴリズムによって、系統状態に応じた事故区間特定／遮断処理を可能にしている。

さらに、事故区間遮断後の事故復旧は、配電自動化システムと連携することで実現している。事故区間以外の停電区間を救済するには、区間負荷や融通元配電線の予備力など、配電系統全体を考慮した制御が必要になる。エッジコ

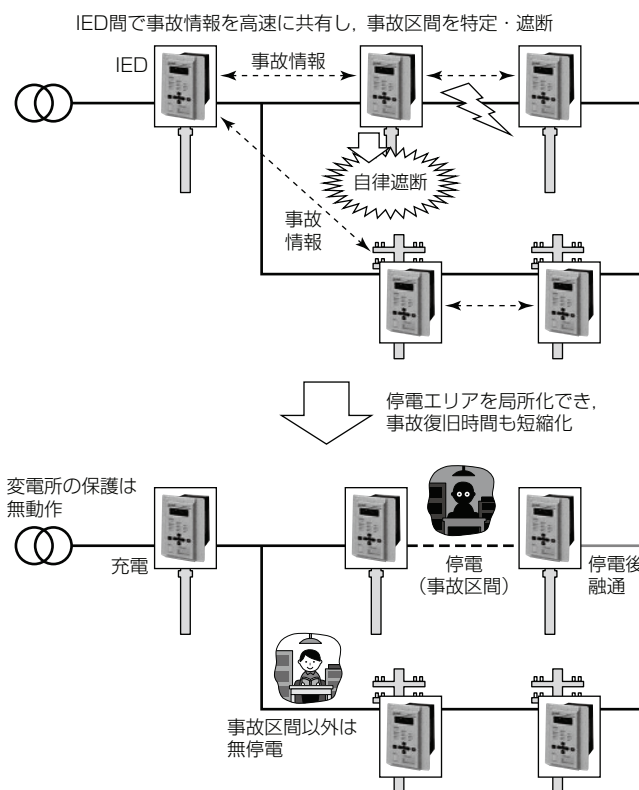


図5. 高速事故遮断と高速事故復旧

ンピューティングは高速な自律制御を得意とする一方で、全体最適化は不得意である。当社では、エッジから上位システムまでのトータルソリューションによって、エッジコンピューティングでは困難な処理を、配電自動化システムなどの上位システムと協調させることで、システム全体として最適化することが可能である。

3. む す び

当社では、従来の配電自動化システムなどの技術に加えて、保護継電器技術、光通信／無線通信技術、AI技術などの関連技術を総合的に組み合わせて、エッジコンピューティング技術と掛け合わせることで、目まぐるしく変化している配電系統に対して、柔軟に対応していくことができると考える。今後、実証実験やフィールド検証などを通じて、当該技術を適用し、有効性を評価することによって、より多くの知見を獲得し、実際の運用に即したものと洗練していく。

本稿で述べた次世代配電系統での配電高度化技術を活用することで、配電市場でのソリューションを提供し、社会に貢献していく。

参考文献

- (1) 三嶋英俊：三菱電機でのAI技術の現状と今後の展望、三菱電機技報、94, No.6, 318～323 (2020)
- (2) 高橋浩一、ほか：IoT・ICT技術を応用した電気事業向けソリューション、三菱電機技報、90, No.11, 609～612 (2016)

小型モジュール炉“SMR-160”向け計装制御システム

濱谷陽一郎*
Yoichiro Hamaya
奥田 奨*
Susumu Okuda
深見健太*
Kenta Fukami

東 哲史*
Tetsushi Azuma
小西 遼*
Ryo Konishi

Instrumentation and Control System for Small Modular Reactor
"SMR-160"

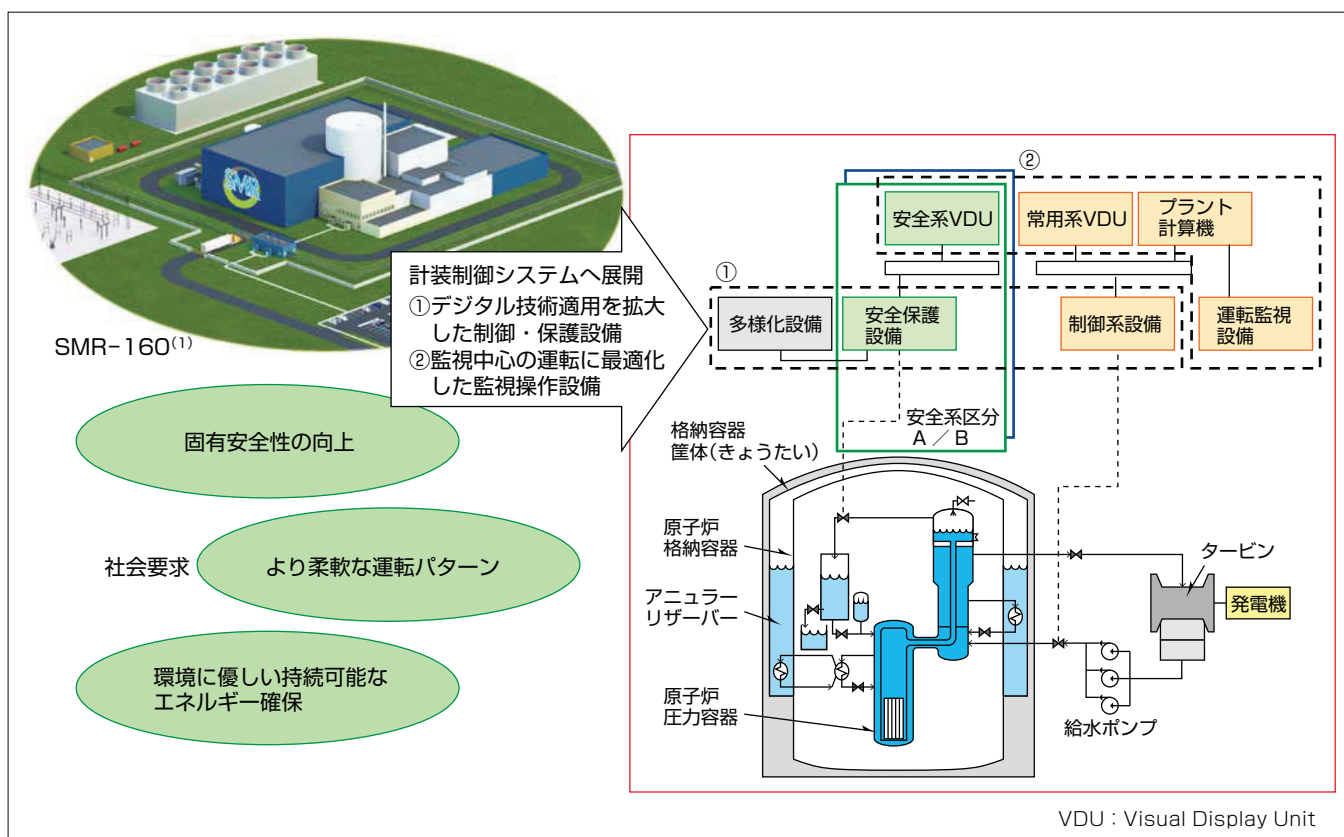
要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、原子力発電プラントは理想的な選択肢として各国で技術開発が行われ、特に小型モジュール炉と呼ばれる原子炉は2020～2030年代での商業化を目指して米国ほか多数の企業・機関で開発が進められている。一般的に小型モジュール炉は、300MWe以下の出力の核分裂炉で、その特長として①小型(低出力)化による簡素な構造の受動的安全システムの適用、②柔軟な負荷追従運転による太陽光等の再生可能エネルギーとの共存、③分散電源と水素製造のための熱源利用等の応用性、④モジュール工法による工期短縮とコスト低減等がある。

三菱電機は、米国Holtec International社が進める小型

モジュール炉“SMR(Small Modular Reactor)-160”の開発に参画し⁽¹⁾、計装制御システムの設備設計を担当している。SMR-160は米国エネルギー省の開発支援プログラムに選定されるなど、2029年ごろの実証炉運転開始を目標に開発を進めている。

SMR-160は、加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の小型モジュール炉で、受動的安全システムと自動化によって高い安全性を持つ設計にしている。当社は自動化を担う計装制御システム(制御・保護設備、監視操作設備等)の開発に取り組んでいる。



“SMR-160”向け計装制御システム開発のコンセプトと取組み

小型モジュール炉SMR-160向け計装制御システムは、制御・保護設備、監視操作設備等で構成される。SMR-160固有の安全性を考慮した設備、運転体制の合理化のため、制御・保護設備でのデジタル技術の適用範囲拡大や監視操作設備の開発を行っている。

1. ま え が き

小型モジュール炉は、一般的に①炉心の冷却に重力、浮力等の物理現象を利用する受動的安全システムの適用とそれに伴う設備簡素化、②負荷追従運転による再生可能エネルギーとの共存、③熱源利用等の多目的利用、④モジュール工法に短工期といった特長を持つとされており、次世代の原子力発電の理想的な選択肢として期待されている。

原子炉は、事故時には停止後も崩壊熱を発生させ続けるため、一定期間崩壊熱を除去する必要があるが、小型モジュール炉は、従来の中・大型の原子炉と比較して、原子炉出力が小さいことから、外部からの冷却水や電源の供給なしに冷却を継続できる受動的安全システムに適している。

当社は、米国Holtec International社が進める小型モジュール炉“SMR-160”の開発に参画しており、計装制御システムを担当している。

本稿では、SMR-160の特長とその特長を踏まえた当社担当の計装制御システムの開発について述べる。

2. 小型モジュール炉SMR-160

2.1 SMR-160の特長

Holtec International社が開発を主導しているSMR-160は、加圧水型軽水炉の小型モジュール炉で、その出力は熱出力525MWt、電気出力160MWeである。この出力サイズは分散電源としての需要、老朽火力発電所の更新、プラントの経済性等の観点で設定されている。

SMR-160の設計コンセプトは“walk-away safe”であり、設計基準事故に対してプラントを安全な状態に導くこと、また崩壊熱を安全に除去するための機能は、自動化されており、運転員の操作を必要としていない。

SMR-160は、受動的安全システムの採用や1次系冷却材の自然循環によって、設備構成を簡素化することで、バルブ、ポンプ、熱交換器、計器及び制御ループといったコンポーネントが削減され、プラントの初期コスト低減を図っている。また、コンポーネントの削減は、関連する検査、試験、及びメンテナンスも削減できるため、運用コスト低減にも寄与する。

SMR-160の建設には、モジュール工法の考え方が取り入れられ、輸送可能な最大のコンポーネントまで工場で製造する。量産段階の建設ユニットでは、24か月の建設期間が想定されている。

SMR-160の主な用途は発電であるが、オプションとしてコジェネレーション(水素生成、地域暖房、海水淡水化

等)も想定している。SMR-160は、Holtec International社の空冷復水器を適用することで、冷却水がない地域に設置することが可能である。さらに、SMR-160は、“Black Start”(外部電源なしにプラントを起動)及び所内単独運転が可能であり、不安定な電力グリッドの地域や遠隔地等の分散電源としての利用に適したプラントである。

2.2 SMR-160の主要諸元と主要機器

SMR-160の主要諸元を表1に示す。SMR-160の1次冷却系統は、原子炉圧力容器とオフセット配置の蒸気発生器で構成され、加圧器は蒸気発生器と一体化されている(図1)。原子炉圧力容器と蒸気発生器は、ホットレグとコールドレグを含む短い2重管によって接続されている(図2)。これによって、接続部は大型配管の破断脆弱(ぜいじゃく)性が排除されている。オフセット構成を採用することによって、燃料交換時に原子炉圧力容器又は蒸気発生器を移動することなく原子炉燃料に簡単にアクセスが可能になっており、運用性が優れている。

1次冷却系統は1次冷却材の密度差及び原子炉圧力容器と蒸気発生器の高低差によって、自然循環するように設計

表1. SMR-160の主要諸元⁽²⁾

パラメータ	値
炉型	PWR
冷却材/減速材	軽水/軽水
熱出力(MWt)/電気出力(MWe)	525/160
1次冷却材循環	自然循環
1次冷却材圧力(MPa)	15.5
炉心入口/出口温度(℃)	241/321
燃料タイプ/アセンブル配列	UO ₂ (二酸化ウラン)ペレット/正方形
燃料アセンブリ数	57
燃料サイクル(月)	24(通常)
反応度制御	制御棒操作 ケミカルシム
工学的安全施設	受動的安全システム
設計寿命(年)	80
プラント面積(m ²)	20,500
原子炉圧力容器の高さ/直径(m)	15/3

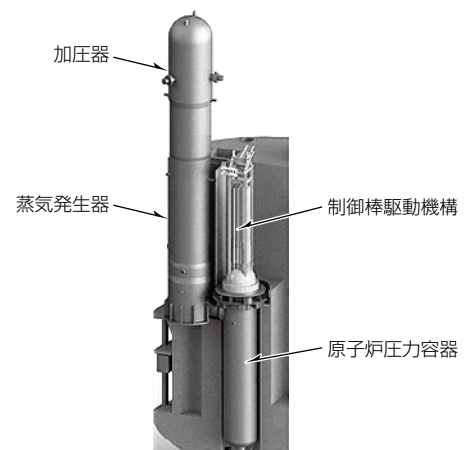


図1. SMR-160 1次冷却系統

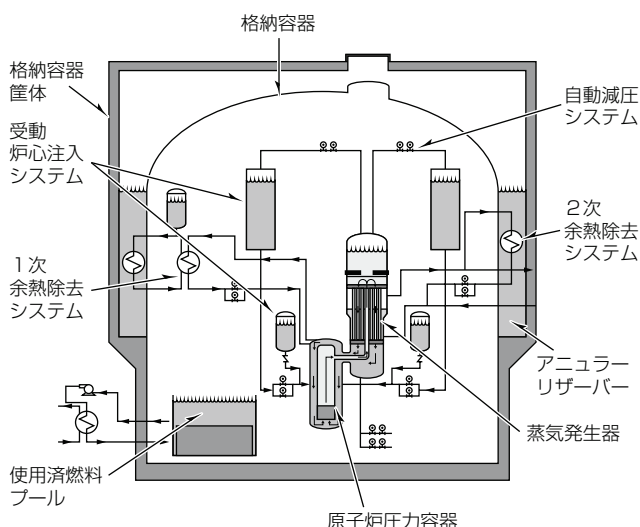


図2. SMR-160受動的な安全システムの構成

されている。この自然循環は、炉心内の燃料集合体が熱を発生する限り行われる。そのため、SMR-160の1次冷却系統にポンプなど強制循環させるための機器は不要になっている。

2.3 SMR-160の受動的な安全システム

2.3.1 受動的な安全システムのコンセプト

深層防護の観点から、SMR-160には崩壊熱を除去するため、多種多様な方法を用いたシステムが組み込まれている。炉心冷却に必要な全ての受動的な安全システムは堅牢(けんろう)な格納容器筐体(CES: Containment Enclosure Structure)内に配置されており、外部脅威から保護されている。冷却材喪失事故(LOCA: Loss of Coolant Accident)への対応に必要な全ての原子炉補給水は格納容器(CS: Containment Structure)内にあり、LOCA中にCSを隔離することで、公衆への線量や環境への影響を低減可能である。CESとCSの間(アンヌラーリザーバー)に蓄えられた大量の保有水が最終ヒートシンクになり、事故後の長期的な対処が可能である。これらの安全システムは、電源、補給水、運転員の操作を必要とせずに、自動的に作動するように設計されている。

2.3.2 受動的な安全システムの構成

(1) 受動炉心冷却システム(PCCS)

PCCS(Passive Core Cooling System)は、想定事故の際に1次冷却系統に対して、非常用炉心冷却と安全注入を実施するシステムである。このシステムは、ポンプ等の設備を使用せず、炉心の冷却には自然循環、炉心への注水には蓄圧や重力等の受動的な手段を使用する。PCCSは、次の四つの主要なサブシステムで構成されている。

① 1次余熱除去システム(PDHR)

PDHR(Primary Decay Heat Removal System)は、二つのループによって構成された余熱除去システムである。一つ目のループは、1次冷却材を直接冷却するもので、1次冷却材から二つ目のループに熱を放出する。二つ目のループは、アンヌラーリザーバーに熱を放出する。

② 2次余熱除去システム(SDHR)

SDHR(Secondary Decay Heat Removal System)は、余熱除去のための代替手段である。SDHRは、浮力を利用して蒸気を蒸気発生器からアンヌラーリザーバー内の熱交換器に送り、そこで蒸気を凝縮させて除熱するシステムである。その後、凝縮した水は蒸気発生器の2次冷却水側に戻る。

③ 自動減圧システム(ADS)

ADS(Automatic Depressurization System)は、密閉されたCS内で1次冷却系統の圧力を安全に下げるように設計された自動減圧システムである。

④ 受動炉心注入システム(PCMWS)

PCMWS(Passive Core Makeup Water System)は、ADS作動による1次冷却系統の圧力低下に伴い、蓄圧タンクと原子炉補給水タンクから、段階的に安全注入を行うシステムである。

(2) 受動格納容器除熱システム(PCHR)

PCHR(Passive Containment Heat Removal system)は、鉄筋コンクリート製のCESと、CESで囲まれた鋼鉄製のCSで構成されている。CESは、外部事象からCSを保護する。CESの壁は、大型の民間航空機やその他の危険からの衝撃に耐えるように設計され、非常に頑丈な鉄筋コンクリートで構成されている。CSは放射性物質の環境への放出を防ぐことに加えて、大型の受動熱交換器としても機能する。CSは全高の約半分が地面に埋められており、外部の危険に対する保護を最大化するとともに、重要な設備に対する地震による影響も抑制する。

PCHRは、CS内を受動的に冷却する。CS内に蒸気が噴出したとき、蒸気はCSの内壁を通じてアンヌラーリザーバーへ熱を逃がして凝縮する。大きな熱伝達領域によって、ほぼ瞬時にアンヌラーリザーバーへの除熱が実現する。その後、アンヌラーリザーバー内の保有水の蒸発によって外部環境へ熱を放出する。アンヌラーリザーバー内の大量の保有水は、補充なしで3か月以上にわたってCSから除熱するのに十分であり、PCHRを空冷に移行させた後は、安全な余熱除去を無期限に保証する。

CSには、原子炉に加えて使用済燃料プールが収容されている。使用済燃料プールは開放型のプールであり、ポンプによる動的な冷却が失われた場合にも、プール表面から

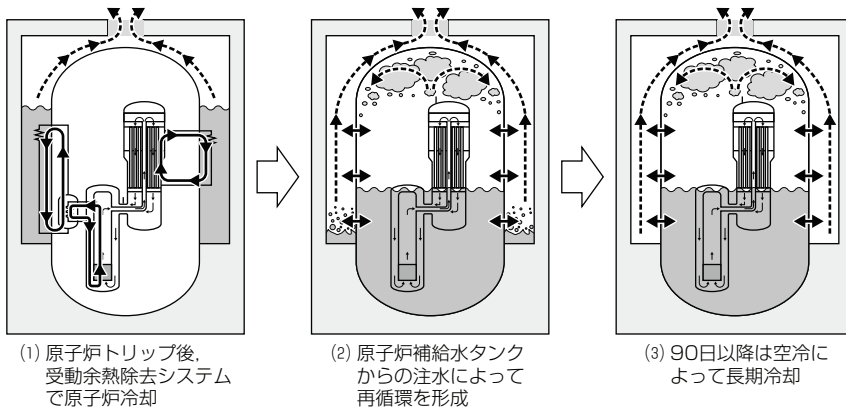


図3. 受動的安全システムの挙動例

の蒸発とCSによる受動的冷却によって崩壊熱を除去できるように設計されている。これによって、原子炉内の燃料と同じように使用済燃料を安全かつ無期限に冷却できる。

2.3.3 受動的安全システムの挙動例

次に、先に述べた受動的安全システムによる仮想的な事故(LOCA)に対するプラントの挙動例を述べる(図3)。

- (1) 原子炉トリップ後、受動余熱除去システム(PDHR及びSDHR)によって原子炉を冷却する。
- (2) ADSによって1次冷却系統の圧力を安全に下げて、蓄圧タンクと原子炉補給水タンクから段階的な安全注入を実施する。安全注入された補給水とPCHRによる受動冷却によって、CS内での長期の再循環を形成する。
- (3) アニュラーリザーバーの保有水によって数か月にわたってCSから余熱除去を行う。保有水がなくなる段階では崩壊熱が低下しており、プラントは無期限の空冷に移行する。

2.4 規制対応

SMR-160は、カナダ原子力安全委員会(CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission)による許認可前設計審査第1段階(Vendor Design Review Phase 1)を受審した。2020年に審査を完了し、SMR-160の設計がCNSCの規制要件を全般的に満たしているとの評価を得た。

3. 米国エネルギー省支援プログラムに選定

SMR-160は、米国エネルギー省(DOE: Department of Energy)原子力局の先進的原子炉実証プログラム(ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program)に選定された。ARDPは、米国企業が先進型炉を実証するのを支援するもので、支援上限は40億ドルである。

ARDPには三つのプロジェクトがあり、SMR-160は表2の(2)で選定され、DOEは設計、エンジニアリング、許認

表2. ARDPの三つのプロジェクト

(1)	Advanced reactor demonstrations : 今後5～7年での稼働を目指す2炉型を選定
(2)	Risk reduction for future demonstrations : 先進的原子炉実証プロジェクトよりも約5年先の実用化を目指して、多様な新型炉概念を対象に、技術的なリスク課題への対応を支援することを目標に5炉型を選定
(3)	Advanced reactor concepts 2020 : 将来実証リスク低減プロジェクトよりも約5年先の実用化を目指す可能性のある新型炉を対象に、安全性、経済性、運転性の技術開発を支援することを目標とする3炉型を選定

可等へ7年間で総額1億1,600万ドルの支援を発表した。

Holtec International社はニュージャージー州のオイスタークリークサイトに実証炉の建設を計画しており、2029年ごろの運転開始を目標に、米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)の許認可と設計・開発を加速させる予定である。

4. 当社の取組み

当社は2016年にHoltec International社と共同開発契約を締結し、初期段階からSMR-160の開発に参画している。当社は、SMR-160開発のうち、Holtec International社が設計するプラントシステムの制御・保護機能を実現する計装制御システムの設備構成等の設計を担当している。

計装制御システムの開発に当たっては、(1)デジタル技術の適用範囲最大化による小型・高信頼を実現した制御・保護設備、(2)自動化によって操作が少なく監視主体になる運転に最適化した監視操作設備等の設計を進めている。

今後は設備設計の詳細化を進めるとともに、先に述べた米国での初号機(実証炉)建設を目指して、計装制御システムプラットフォームのNRCの審査受審を計画している。

5. むすび

SMR-160の特長、特にその安全を実現する受動的安全システムの設計について述べた。また、当社のSMR-160での計装制御システム開発の取組みについて述べた。

当社は、小型モジュール炉の実現、さらにはそれら技術を活用した国内プラントの安全性向上に貢献していくため、計装制御システムの開発に引き続き取り組んでいく。

参考文献

- (1) Holtec International: Holtec's Small Modular Reactor <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/>
- (2) IAEA Advanced Reactors Information System: Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2020 Edition (2020) https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

特集論文

タービン発電機の性能向上に貢献する
最新の技術開発動向竹崎慶太郎*
Keitaro Takesaki
奥田龍弥*
Tatsuya Okuda
梶原 剛*
Go KajiwaraLatest Technology Development Trends Contributing to Performance
Improvement of Turbine Generator

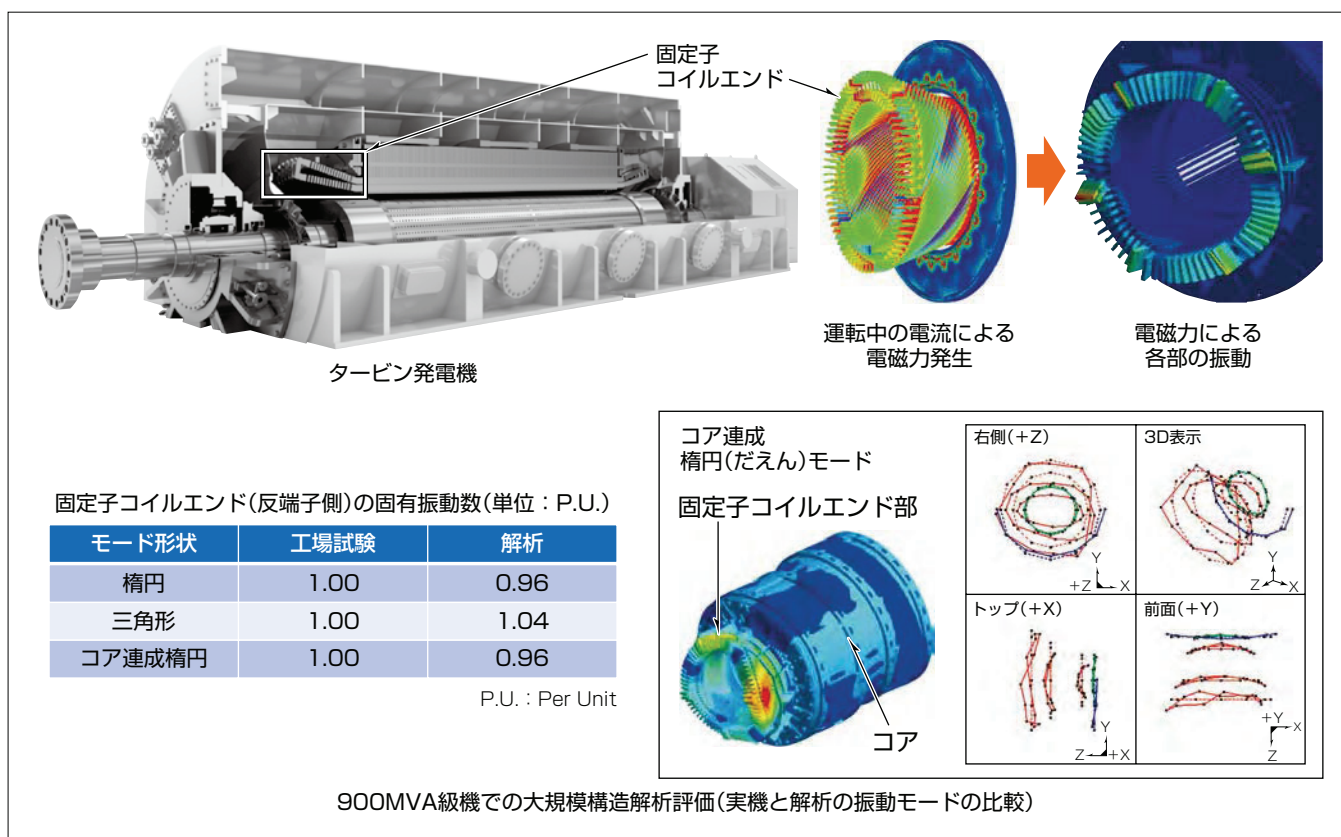
要 旨

近年、火力発電プラントでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴う調整力の向上や稼働率向上による低コスト化の取組みが活発であり、タービン発電機の新設市場では、単機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場では、増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求が高まっている。発電機の大容量化や既設機改造は、電磁加振力の増加、発電機を構成する機械構造物の運転時振動モードの複雑化を招くことが多く、固定子各部の振動抑制策の事前検討が重要になる。また発電機の長期運用信頼性確保には、負荷運転時の各部品の固有振動数や振動応答・振動モードなどの挙動を正確に把握し、機械的信頼性を高めることが重要になる⁽¹⁾。

三菱電機では大規模構造解析(発電機丸ごと解析)を用い

て、固定子コイルエンド周り支持構造の細部までを適切にモデル化することで、各部の連成を考慮した振動モード解析が可能になる高精度な評価技術を開発した⁽²⁾。この技術を900MVA級水素間接冷却発電機設計に適用し、工場試験結果と比較した結果、この技術は信頼性の高いコイルエンド設計の実現とこれまで設計評価が困難であった振動モードとその固有振動数について実機挙動を忠実に再現可能であることを確認した。

この技術の活用によって、新設機の性能向上だけでなく既設機改造時の付加価値向上を含めて、タービン発電機の運用効率最適化及び信頼性向上の要望に対応して、今後の電力安定供給に引き続き貢献していく。



タービン発電機への大規模構造解析評価の導入

大規模構造解析を用いたタービン発電機固定子コイルエンド周り支持構造の振動評価技術を開発した。この技術を900MVA級水素間接冷却発電機の構造設計に適用し、設計想定値と工場試験結果を比較した結果、これまで設計評価が困難であった複雑な連成振動モードが再現でき、その固有振動数も正確に予測できることを確認した。

1. ま え が き

近年、火力発電プラントでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴う電力系統調整力の向上や稼働率向上による低コスト化の取組みが活発になっており、タービン発電機では、新設市場は単機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場でも増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求が高まっている。タービン発電機の大容量化や既設機のアップグレード改造は、電磁加振力の増加、発電機を構成する機械構造物の運転時振動モードの複雑化を招くケースがほとんどであり、固定子各部での振動抑制策の事前検討が重要になる。また、発電機の長期運用信頼性を確保するためには、負荷運転時の発電機各部品での固有振動数や振動応答・振動モードなどの挙動を正確に把握し、機械的信頼性を高めることが重要になる。

このため、大規模構造解析(発電機丸ごと解析)を用いて、固定子全体の細部までを適切にモデル化することで各部の連成を考慮した振動モード解析を可能にする、固定子コイルエンド周り支持構造の高精度な評価技術を開発した。

本稿では、タービン発電機の性能・信頼性向上に貢献する最新技術動向の一例として、固定コイルエンド部を対象とした評価技術について述べる。

2. 固定子コイルエンド部の振動評価最新技術

図1に示すように、タービン発電機は回転子と固定子で構成しており、固定子はコア(鉄心)とコイル(巻線)に分けられる。コイルの直線部はコアに設けた溝に挿入し、端部のコイルエンド部は外径側に広がった円錐(えんすい)形構造をしている。さらに、コイルエンド部の励磁側には発電

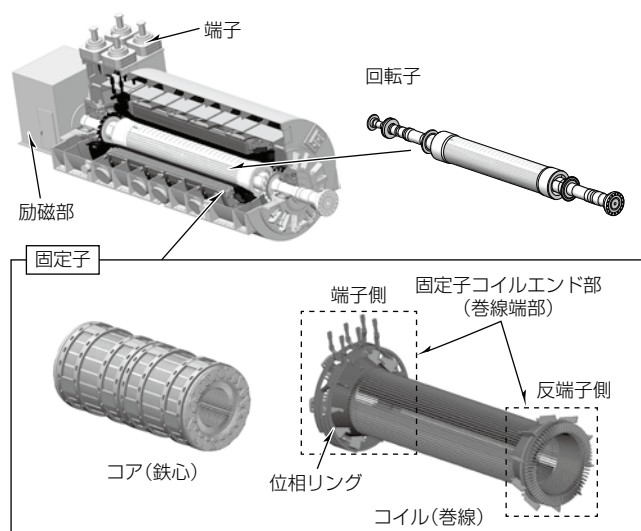


図1. タービン発電機の基本構造

機端子とコイルエンド部を接続するための位相リングを取り付けた構造になっている。

2.1 固定子コイルエンド振動評価の重要性

発電機負荷運転中の固定子コア・コイルには電磁力が発生しており、この電磁力によって固定子コア・コイルは常に振動している。固定子コイルエンド部が共振等によって過大に振動すると、コイル損傷やそれに付随する短絡事故に発展することがある。このような事例では図2に示すような支持部材の劣化や損傷に伴う振動増加が経時的に確認されることが一般的に知られており、短絡事故に発展した場合は発電プラントの運用に支障をきたす可能性があることから昨今では予防保全の観点から振動計設置によるコイルエンド部振動の常時監視の需要も高まってきている。そのため、昨今の高機能の発電機の設計段階では、長期運用信頼性を確保するために固定子コイルエンド部の固有振動数・振動モード等について入念な評価を実施することが極めて重要である。

2.2 固定子コイルエンド部の振動モード評価

発電機運転中のコイルエンド部は、回転子の磁気吸引力によるコアの楕円振動とコイルエンド部に発生する電磁力によって加振されるため、発電機基本周波数の2倍の周波数を持つコアの楕円振動モードと、それに同期するコイルエンド部楕円振動モードの固有振動数が一致した場合に振動が大きくなることが知られており、この一致を回避することが必要である。また昨今の発電機大型化に伴って、固定子コイルエンド部とコア端部、位相リングが連成する複雑な振動モードが現れてきており、それらの振動応答が無視できないケースもまれに経験することがある。

実際に過去の発電機工場試験時で、コイルエンド部振動の制御を目的とした支持剛性の調整の際に、ほとんど期待効果が得られなかったこともあり、これは振動計測部だけの局所的な振動ではなく、かつこれまで評価対象としていなかった複雑なモードの連成による新しい知見であることが最近になって分かってきた。

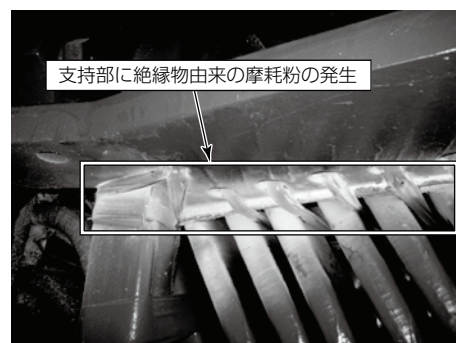
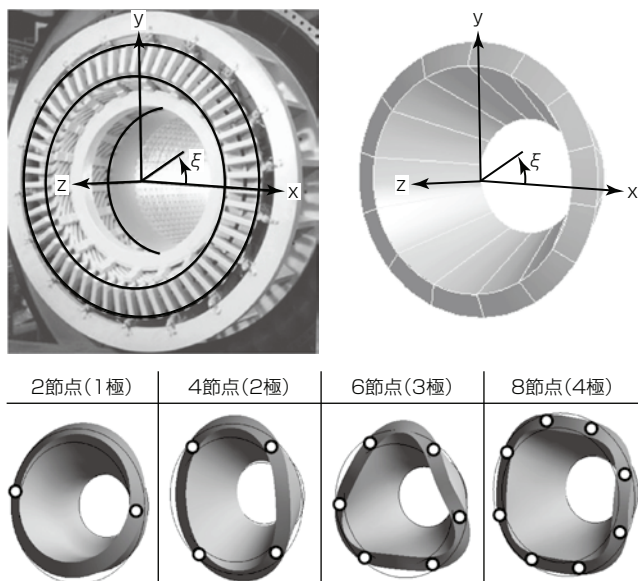


図2. 固定子コイルエンド支持部材劣化の事例

このようなコイルエンド振動モードは、新たに制定されたIEC(International Electrotechnical Commission)60034-32(2016)での“グローバルモード”(図3)に相当し、ここに規定されたガイドラインに沿う形で評価を進めることが妥当である。具体的には、グローバルモードの場合にはある振動モードの固有振動数が発電機基本周波数の2倍と一致したとしても必ずしも振動応答が現れるものではなく、その許容可否は当該振動モードの剛性・加振力・減衰にも左右され、結果の解釈については製造メーカーへ照会することを推奨するとの方針が示されている。これは、各製造メーカー共通の判定基準が存在しないことと同意であるため、当社はコイルエンド部の信頼性向上に向けて過去の実測データ分析による有害になり得る振動モードの抽出・評価を行い、その結果、コア連成楕円及び位相リング連成楕円の2点の振動モードの固有振動数を追加評価対象と定めた。

2.3 大規模構造解析技術の開発

発電機負荷運転中の固定子コイルには電流が流れており、固定子コイルの温度上昇が生じる。温度が上昇すると材料の物性値が変化して固定子コイルエンドの剛性・固有振動数が増減するため振動モードが変化する。そのため電磁気・熱・振動の3種類の物理場を考慮しなければ正確な固有振動数・振動応答を予測できないが、従来の解析手法では計算機性能の制約から実物コイルエンドを簡素化したモデルを使用する必要があったため、電磁気・熱・振動の連携解析はもとより、コイルエンドがコア端、位相リングと連成するモード自体の導出も不可能であり、設計段階で実機での振動挙動の様相を正確に把握することが難しいという課題があった。



出典：IEC60034-32(2016)

図3. 固定子コイルエンド部振動のグローバルモード

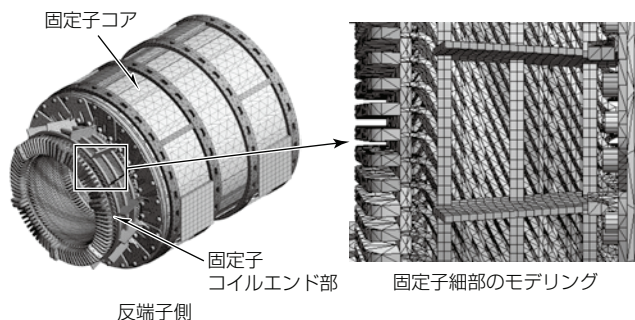


図4. 大規模構造解析モデル

近年、計算機の性能向上によって複雑な構造で要素数の多いモデルの計算時間が大幅に短縮された。そのため、当社ではコイルエンド部の支持構造の高精度な評価を目的にして電磁気・熱・振動の大規模化構造解析(発電機丸ごと解析)を用いた評価技術を開発した。従来の解析では簡略化してモデル化していた部位も図4に示すように固定子全体の細部まで適切にモデル化することで、電磁界解析で求めた電磁力分布や電磁損失分布を入力としてモデルへマッピングし、振動応答とともに複雑に連成した振動モードが表現できる大規模解析を構築した。特長は次のとおりである。

- (1) メッシュ分割数・要素積分方法・固有値解法を適切に設定することで、不安定モード(アワーグラスモード)の発生を抑制して解析結果取得までの時間を最短化する。
- (2) 電磁気・熱・振動の連携解析による振動応答評価、コア連成楕円モードと位相リング連成楕円モードの導出及び設計段階での評価が可能である。

3. 900MVA級水素間接冷却発電機設計への適用

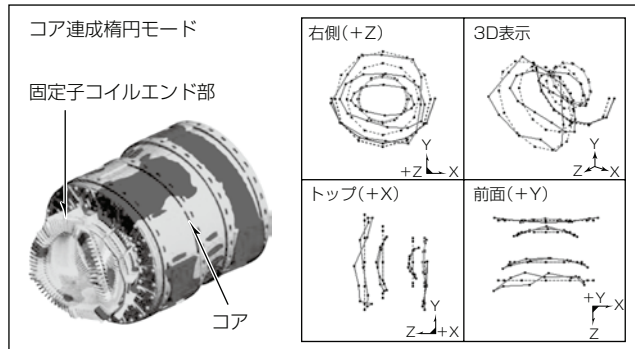
大規模解析技術構築・過去実測データの詳細分析によって設計段階で固有振動数とその振動の応答を評価することで、支持構造変更や剛性強化などの適切な対策による固有振動数の調整や振動応答の低減を発電機の製作着手前に実現することが可能になった。

その成果を2019年に製作・出荷した一軸ガスタービン・コンバインドサイクル向け900MVA級水素間接冷却発電機の固定子コイルエンド設計に適用した。その結果、機械的信頼性の高いコイルエンド構造を実現し、製作過程での固有振動数計測・評価、工場試験による振動計測・評価を経て出荷を完了した。主な成果は次のとおりである。

- (1) コイルエンド部の各振動モードについて、設計想定値と工場試験結果を比較した結果、モード形状は一致し、固有振動数も最大10%程度の誤差と解析精度が十分高いことを確認した(図5)。
- (2) 以前から評価対象であったコアの楕円振動モードと同期する典型的なコイルエンド部楕円モードに加えて、こ

反端子側の固有振動数(単位:P.U.)

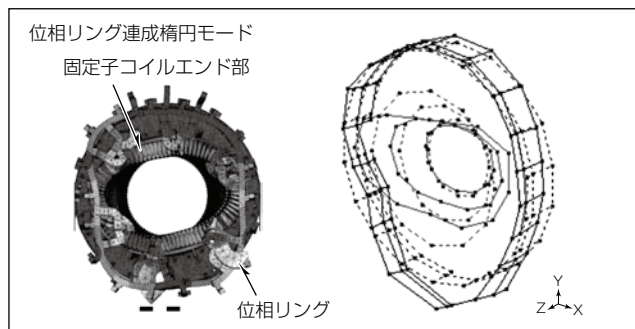
モード形状	工場試験	解析
楕円	1.00	0.96
三角形	1.00	1.04
コア連成楕円	1.00	0.96



(a) 反端子側

端子側の固有振動数(単位:P.U.)

モード形状	工場試験	解析
楕円	1.00	0.94
三角形	1.00	1.11
位相リング連成楕円	1.00	1.00



(b) 端子側

図5. 実機と解析の振動モード比較

れまで把握が困難であったコア連成楕円モードと位相リング連成楕円モードの固有振動数についても実機挙動を正確に再現可能であり、またこれらの連成モードの固有振動数は設計想定どおり発電機基本周波数の2倍の周波数近傍を回避できていることを確認した。

- (3) 工場試験で負荷運転想定時のコイルエンド部の振動値は設計想定値と10%程度の誤差でおおむね一致し、当社判定基準を十分満足することを確認した。

4. 既設機の付加価値向上に向けた取組み

既設機運用効率の最適化に際して、現在、延命化や増出力化といった、既設機に対する各種アップグレード改造の試みがユーザー・メーカー一体になって進められている。仮にアップグレード改造として増出力化を実施した場合、構造的な差異に加えて運転中の固定子コイルエンド温度や

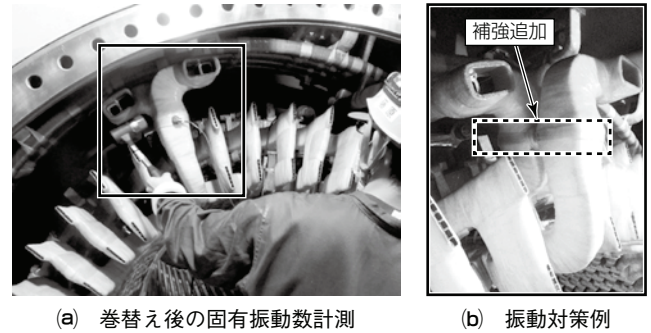


図6. 既設機でのコイルエンド振動対策

電磁加振力が増出力前から変化することになるため、振動モードや固有振動数が変化して図6に示すように現地で追加のコイルエンドの振動対策が必要になることがある。今回開発した大規模構造解析技術は、既設機のアップグレード改造での固定子コイルエンド剛性や固有振動数評価に対しても有効であり、この解析技術の投入によって事前に改造工事の影響をより正確に評価して効果的な対策構造を決定しておくことで発電機信頼性を確実に高めることが可能になる。固定子コイルの巻替え(既設固定子コイルを除去し、新しい固定子コイルに更新する工事)時では、発電機の増出力や効率向上といった機能向上も見込めることから、早期に巻替え工事を行うことで既設発電機の付加価値向上に加えて、その後の運用での長期信頼性確保及び発電機稼働率向上を同時に実現することが可能である。

5. む す び

近年の火力発電プラントでの新設市場の発電機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場の増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求を受けて、大規模構造解析(発電機丸ごと解析)技術を開発した。この技術の世界最大級になる900MVA級発電機の設計に適用し、機械的信頼性の高いコイルエンド構造を設計想定値との差も少なく十分高い精度で実現した。また、この技術は既設機のアップグレード改造工事を実施する際の事前評価にも有効であり、適切な構造設計を施すことで、既設発電機の付加価値向上と同時に、長期信頼性確保・発電機稼働率向上への寄与も実現することが可能になる。

この技術の活用によって、タービン発電機新設機の性能向上と既設機改造時の付加価値向上及び信頼性向上を実現し、今後の電力安定供給に引き続き貢献していく。

参考文献

- (1) 奥田龍弥：大規模解析によるタービン発電機固定子コイルエンドの信頼性向上，火力原子力発電技術協会 創立70周年記念火力原子力発電大会 (2020)
- (2) 柳館直成，ほか：製品開発を支える振動・音響解析技術，三菱電機技報，93，No.6，379～382 (2019)

第2部 系統変電システム

カーボンニュートラルの実現に貢献する 次世代送変電機器の技術展望

Technical Trend of Transmission and Distribution Equipment Contributing to
Realization of Carbon Neutrality



入野邦英*
Kunihide Irino

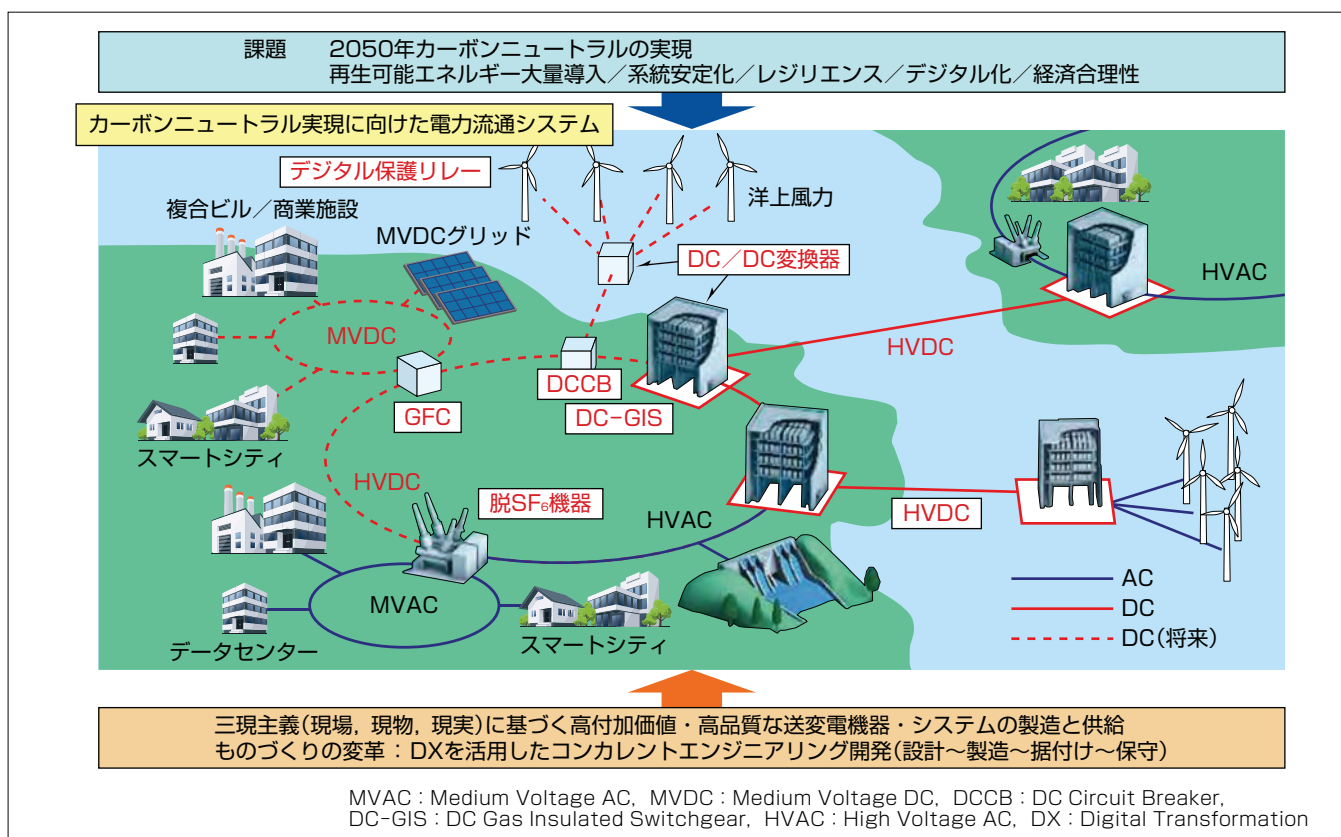
要 旨

地球温暖化の原因になるCO₂の排出削減のため、世界各国で、再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる。日本でも2050年にCO₂排出量が実質ゼロになるカーボンニュートラルを実現するとの政府目標が示された。再生可能エネルギーの主力電源化に向けた戦略的議論が活発に行われており、既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大とともに、洋上風力発電の導入拡大が課題になっている。

一方、太陽光・風力発電などは、天候によって出力が大きく変化するため、再生可能エネルギー電源が大きく増加する中でも、安定して電力供給を継続できる電力流通システムの構築が不可欠であり、その実現のために必要になる技術開発も、喫緊の課題として顕在化している。

三菱電機では、これらの課題の解決に貢献するため、洋上風力発電、グリッドフォーミング、マイクログリッド等による効率的な電力送電の開発に取り組むとともに、電力流通システムのレジリエンス強化のために求められる次世代の送変電機器の開発を推進している。

次世代の送変電機器として、環境負荷低減開閉機器、電力変換システム(HVDC(High Voltage DC), FACTS(Flexible AC Transmission System), GFC(Grid Forming Control)), デジタル保護リレー等が挙げられる。また、信頼性の高い次世代送変電機器を安定的に供給していくためのものづくりの変革も必要である。



カーボンニュートラル実現に向けたレジリエントな電力流通システム

カーボンニュートラルの実現に向けて、洋上風力発電、太陽光発電など、再生可能エネルギー電源の大量導入が進んだ将来の電力流通システムを示している。従来の高圧及び中圧の交流系統(HVAC, MVAC)に、高圧及び中圧の直流系統(HVDC, MVDC)が接続・連系しており、電力変換システム、脱SF₆(脱六フッ化硫黄)機器、デジタル保護リレー等の次世代送変電機器を適用することによって、レジリエントな電力流通システムの構築が実現される。

1. ま え が き

日本を始めとする多くの国・地域で、電力流通システムは、火力、水力、原子力を中心とする大規模発電で発電された電力を、交流で需要地まで送配電する構成で発展を遂げてきた。しかしながら、世界的にカーボンニュートラルの実現が強く求められる中、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が急速に拡大しており、その影響による系統不安定化などの課題に対応するため、直流送電及び関連する新技術を適用して、レジリエントな電力流通システムの構築が必要になっている。

これらの課題に対応するため、当社ではこれまでに蓄積した従来の送変電機器に関する技術を基盤にして、環境負荷低減開閉機器、電力変換システム、デジタル保護リレーなど、電力流通システムのレジリエンス強化に必要とされる次世代の送変電機器の開発に取り組んでいる。

本稿では、カーボンニュートラルの実現に向けて変化する電力流通システムと、その中で求められる次世代の送変電機器の技術展望について述べる。

2. 新たな電力流通システムと直流送電技術

日本政府が目標とする2050年にCO₂排出量を実質ゼロにする“2050年カーボンニュートラル”の実現に向けて、再生可能エネルギーへの移行を加速するには、既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大とともに、風力発電の大規模導入が必要になる。

電力システムの安定化と設備効率化の視点では、電力消費地と発電所は近接している方が有効であるが、風力発電所や太陽光発電所の適地と電力消費地は離れていることが多いため、電力流通システムとしての効率的運営のため、従来にない概念のシステム構成や技術が提案されている。

例えば都市部では再開発による大規模な電力消費地としてスマートシティの構築が進む一方、地方では面的に分散されていたサービスや生活基盤が集約されたマイクログリッド化が進展しつつある。加えて地方では、デジタル化の進展に伴って大量の電力を消費する大規模データセンターの設置が進むことと並行して、これらの電力消費とのカーボンオフセット実現のため、洋上風力発電所や太陽光発電所の建設が推進されていくものと考えられる。

大量導入された再生可能エネルギーを安定かつ効率的に電力消費地に送電するためには、周波数や電圧の変換でのロスや送電ロスをできる限り低減することが求められるが、これらの問題を解決する有効な手段の一つとして、今日、直流による送配電技術の適用が注目されている。

通常、大容量の電力を長距離送電するには、高い電圧で送電し、需要地に合わせて適切に電圧を下げる必要がある。これまで日本を含む多くの国・地域では、電圧変換の容易さや安全性、それに起因する経済性の観点から、交流での送配電が普及しているが、近年の直流スイッチング・整流技術の革新によって、一定以上の長距離送電では直流の方が交流よりも経済面でも有利になりつつある。

このような情勢を踏まえて、カーボンニュートラル実現に向けた今後の直流技術の活用領域を図1に示し、それぞれについて次に述べる。

(1) 洋上風力発電

洋上風力発電では海底ケーブルによって送電を行うが、ケーブルはキャパシタンス成分が非常に大きいため、交流による長距離送電が困難になり、直流の選択が有効になる。

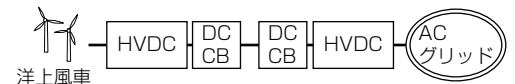
(2) グリッドフォーミング制御(GFC)

脱CO₂の観点から化石燃料を主とした火力発電設備は減少し、代わって太陽光発電等のインバータ電源が増加すると想定される。このような電力系統では、これまで火力発電所の同期発電機が担っていた慣性力による調整力が低下することになり、負荷変動や発電量の変動によって需給バランスが変動すると、系統周波数の安定化が困難になる。その代替手段として、変換器と蓄電池によって同期発電機と同様な慣性力を模擬するグリッドフォーミング制御が注目されている。蓄電池、変換器とも直流で動作するため、直流技術の適用によって、効率的なシステム構築が可能になる。

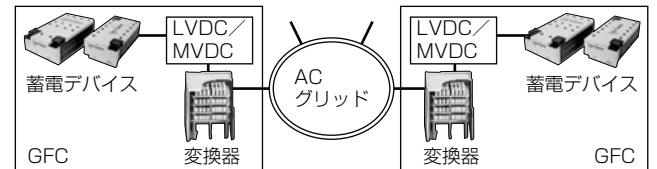
(3) グリーン水素

今日、燃料についても脱炭素化が着目されている。その中でも、燃焼時にCO₂を排出せず、さらには再生可能エネ

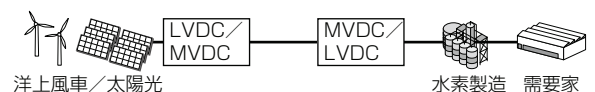
(1) 洋上風力の直流送電(HVDC)と将来のDC集電



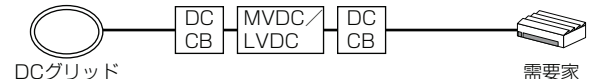
(2) グリッドフォーミング制御(GFC)



(3) グリーン水素



(4) マイクロDCグリッド



LVDC : Low Voltage DC

図1. 直流技術の活用領域・システム概念図

ルギーを使用することで製造時にもCO₂を排出しない水素の水電解合成が注目されており、この電気分解に直流技術が適用される。

(4) マイクログリッド

CO₂排出量の削減にはエネルギー消費量そのものを低減することも有効であり、消費電力削減手段として家庭内電気機器やビル内設備の直流化とインバータ化が進展する。その結果として、直流／交流の変換ロスを削減するため、低圧の配電網の直流化も進むものと想定する。また、ビル間やマイクログリッド内の太陽光発電設備、蓄電池等、インバータ電源の増加に伴って、マイクログリッド内の配電網の直流化が進展していくことが想定される。

さらには、マイクログリッド間を連系し、相互に電力融通する場合でも、再生可能エネルギーの導入拡大に合わせて、直流化が進んでいくことが想定される。

これらを踏まえて、直流送配電網の適用範囲を表1に示す。

CO₂排出削減に向けた取組みのうち、送配電システムの直流化によるメリットをまとめると、次に述べる2点が主要なポイントになる。

- (1) 送電時のエネルギーロス削減によるエネルギー利用率改善を通じたCO₂排出量の削減
- (2) 太陽光発電、蓄電池、グリーン水素製造など、CO₂を

排出しないエネルギーの送電時での変換ロスの低減によるエネルギー利用率の改善

発電した電力を需要地まで運ぶ送電システムの効率化は、カーボンニュートラルの実現を支えるインフラとして、これまで以上に重要な役割を果たすことになるため、直流送電を始めとする関連技術の更なる開発加速が求められている。

3. 新たな課題に応える次世代送変電機器開発

電力流通システムは、大規模電源開発と長距離送電及び電力系統の安定運用を通じて、重要な社会インフラとして発展してきた。日本では1950年代後半から275kV、1973年から500kV送電の運用を開始し、さらに1990年代には1,000kV送電のための実証試験が実施された。当社では、これまで電力流通システムの発展を実現するため、各種の送変電機器を世界に先駆けて開発してきた(表2)。

現在は、2章で述べた直流送電技術を含めて、カーボンニュートラル実現に向けた新たな電力流通システムに適用できる次世代送変電機器の開発を進めている。

3.1 環境負荷低減開閉機器とSF₆ガス代替技術の開発

気候変動防止が重要な社会課題になる中、開閉機器についても環境負荷低減に向けた開発に関心が集まっている。特に開閉機器の絶縁・消弧媒体として広く用いられているSF₆ガスは地球温暖化係数がCO₂の23,500倍(気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書の値)と高いため、欧米を中心に使用規制の検討が行われており、英国National Grid社では、2026年までにSF₆使用機器の購入終了、2050年までにSF₆使用機器の保有終了の方針を打ち

表1. 直流送配電網の適用範囲

HVDC(高压)	高電圧化、広域ネットワーク化
MVDC(中压)	洋上風力の集電直流化による効率改善 HVDCとLVDCの普及に伴う直流連系
LVDC(低压)	スマートシティ等での配電分野の直流化
	ビル間等の電力融通の直流化
	データセンター、EVチャージャ等の直流化 ビル内設備、家庭内機器での直流化

EV : Electric Vehicle

表2. 日本での電力流通システムと当社送変電機器開発の変遷

	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	高度成長期		安定成長期		低成長期		第4次産業革命			カーボンニュートラル
電力システム改革							☆広域的運営推進機関設立 ☆小売全面自由化 ☆発電電分離		大規模洋上風力発電 多端子直流送電系統 海底直流送電	
送電安定化				☆STATCOM		☆450MVA STATCOM	☆HVDC検証棟		SiC適用HVDC GFC	マイクロDCグリッド
電力系統保護	アナログ静止形リレー 位相比較リレー 分散形事故波及防止		デジタルリレー FM/PCM電流差動リレー 中央集中形事故波及防止						IED フルデジタルリレー AI搭載リレー	
開閉機器 遮断器 GIS		☆550kVフルGIS 高電圧・大容量化		☆1,000kV実証器			☆420kVばね操作1点切 アセットマネジメントシステム		脱SF ₆ 開閉機器 デジタル変電所	
変圧器		高電圧化 ☆500kV器 大容量化		☆1,000kV実証器 ☆分解輸送器(CGPA) ☆77kVガス絶縁変圧器	☆1,000kV実証器 ☆三相器1,510MVA ☆275kVガス絶縁変圧器		☆植物油入変圧器 アセットマネジメントシステム		DC-DC変圧器	

STATCOM : STATic synchronous COMPensator, SiC : シリコンカーバイド, FM : Frequency Modulation, PCM : Pulse Code Modulation, IED : Intelligent Electronic Device, CGPA : Coil Group Packed Assembly, MVA : Mega Volt Ampere

出している。また米国カリフォルニア州では、SF₆ガス機器の段階的廃止が同州大気資源局(CARB: California Air Resources Board)から提示されている。

このような動きへの対応策になるSF₆ガス代替技術としては、CO₂ガスや人工のフッ素系ガス等の混合ガス又は乾燥空気を用いた絶縁・遮断技術、及び真空遮断技術などがある⁽¹⁾。これらの中でも、特に地球温暖化係数が0の真空遮断と乾燥空気絶縁を融合させた真空遮断器及び開閉機器は、最有力な代替手段の一つと考えられている。

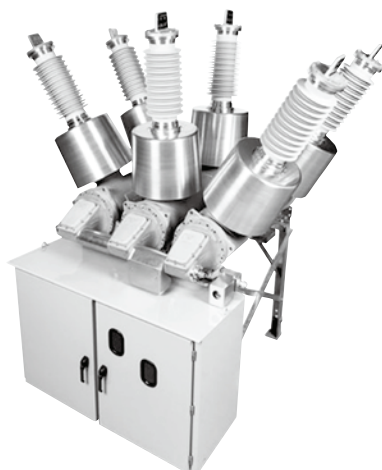
当社でも、真空遮断と乾燥空気絶縁の組合せを採用した国内電力システム向けの72kV/84kV真空遮断器を製品化済みであり、今後SF₆ガス規制が国内より先行している北米市場に向けて550kVまでの真空遮断器を順次投入していく計画である。まず2021年には乾燥空気絶縁技術の高度化によって、国内向けに製品化済みの84kV真空遮断器を小形化した72.5kV真空遮断器(図2)を市場投入予定であり⁽²⁾、また将来の550kV級までの開発に向けた第1ステップとして、Siemens Energy Global GmbH&Co. KG社と定格電圧245kVのタンク形遮断器の共同開発に向けて両社で検討を開始している⁽³⁾。今後、現有の550kVまでのSF₆ガス絶縁機器ラインアップを真空遮断及び乾燥空気絶縁機器へ段階的に転換していく計画である。

3.2 電力変換システム

新たな電力流通システムでは、大容量電力の長距離安定送電や、再生可能エネルギーの大量導入に起因する系統不安定化への対策が課題になる。これら課題への対策として、パワーエレクトロニクスを活用したHVDCやFACTS、GFC等の電力変換システムの適用が有効であり、近年世界的に注目が高まっている。

3.2.1 HVDC

HVDCシステムは、特に送電線コストが小さいなどの理由から長距離送電で優位であり、洋上風力発電用の長距離の海底ケーブル系では、ケーブルキャパシタンスの影響から更に直流が優位になることから、適用が活発化している。また国内ではHVDCを適用して50Hzと60Hzを連系



出典: <https://www.meppi.com/products/mv-vacuum-circuit-breakers>

図2. 北米向け72.5kV真空遮断器⁽²⁾

させる周波数変換所の設備強化が進められている。当社は、2000年に四国と本州の連系強化を目的に設置された紀伊水道直流連系設備で、他励式変換器を含む機器を納入し、さらに自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムの開発を行い、当社工場敷地内に、容量50MWの送電線を持たない直流送電システム(Back To Back: BTB)検証設備を建設し(図3)、2018年から各種の検証試験を完了し、実規模の直流送電システムの検証を完了した。

また現在は、交流系統同士を1対1で接続する2端子構成が世界でも大部分であるが、将来必要になる多端子HVDCシステムのための技術開発も進めている。多端子HVDCで新たに必要になる技術の一つに、直流遮断器(DCCB)がある。交流電流の遮断と異なって、直流電流の遮断では、自然電流零点が存在しないことから、電流零点を形成するための手段が必要になる。当社では外部共振回路によって強制的に電流零点を形成し、真空バルブを適用した遮断部で直流電流の遮断を行う方法を開発した。これまでに160/200kVクラスのプロトタイプの遮断試験を、オランダの認定試験所KEMA Labsで実施し、16kAの直流電流を高速に遮断可能であることを実証した。さらに現在は、引き続いて525kVクラスまでのHVDC実系統に適用可能なDCCBの開発を進めている(図4)。

3.2.2 FACTS

FACTS機器であるSVC(Static Var Compensator)やSTATCOMは、半導体スイッチング素子を用いることで、連続的かつ高速な無効電力制御が可能である。このFACTS機器には、整流器、インバータ等の電力変換器の



(a) HVDCバルブホールの全景 (b) HVDCの検証状況

図3. HVDC検証設備

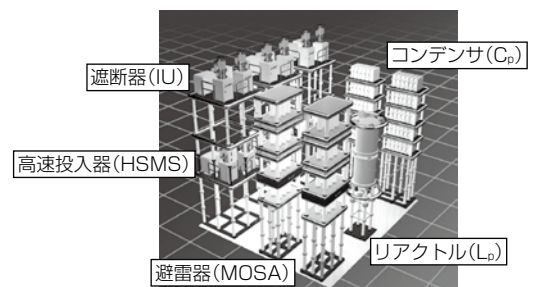


図4. 525kV DCCB概念図

増加に伴う低次高調波を削減するアクティブフィルタ機能、系統事故等によって固有の周期で発生する系統動揺を低減する系統動揺抑制制御、及び短絡容量が大きく変化してもFACTS機器の性能が悪化しないよう、制御パラメータを自動で変更する最適ゲイン制御等、系統に適した機能を付加している。当社は1991年に定態安定度向上を目的にした80MVA STATCOMを納入し、2012年には定態安定度向上及び過電圧抑制を目的にした世界最大級容量の450MVA STATCOMを納入した。さらに、自社製のIGBTを用いた設計自由度が高く低損失なMMC方式のSTATCOMを開発し、2017年から納入を開始した。

3.2.3 GFC

近年、再生可能エネルギー導入の拡大によって、インバータ電源の大量導入や同期発電機の減少が各地域で進んでいる。これに伴って系統の短絡容量や慣性力の増強など、新たな系統安定化対策の需要が生まれており、これら系統の慣性力を補完する変換器と蓄電デバイスの組合せで有効電力・無効電力を発生させるGFCシステムの開発を進めている(図5)。

3.3 デジタル保護リレー

系統保護リレーは、電力系統の安定運用に重要な役割を果たしているが、コンピュータや通信伝送系の性能向上を活用してデジタル保護リレーが開発され、アナログ静止形リレーから置き換わっていった。また近年では、災害に対するレジリエンス強化が求められるとともに、DXによる業務革新へのニーズの高まりを受けて、遠隔整定や障害の即時復旧などに対応可能な配電変電所向け保護リレーユニットが求められている。

この要求を満たすため、電力系統用保護リレー“MELPRO-CHARGE2シリーズ”の最終ラインアップとして、配電変電所向け保護リレーユニット“Type-S”を開発した(図6)。この系統保護リレーは、盤メーカーで製作する配電用保護リレー装置に実装されることも想定し、EMC(Electro-Magnetic Compatibility)性能を含んで、電力用規格(B-402)を保護リレーユニット単体で満足させている。

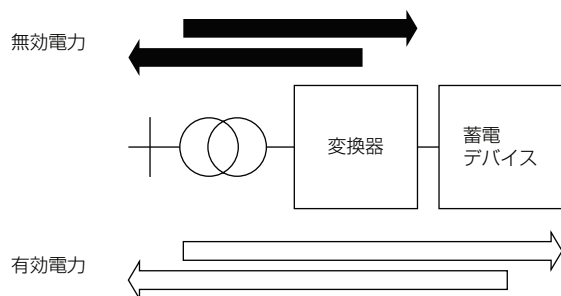


図5. GFCシステム



図6. MELPRO-CHARGE2 Type-S

今後は、保護リレーと通信技術やAI機能を組み合わせて、高性能エッジ端末による高速かつ最適制御を可能にするシステムの開発を進めていく計画である。

4. 次世代送変電機器の生産を支えるものづくり変革

再生可能エネルギーの導入が進む新たな電力流通システムでは、3章で述べたような次世代の送変電機器が必要とされる。これらの製品を高品質かつ合理的なコストで安定的、継続的に供給するため、当社ではものづくりの変革も継続的に推進している。三現主義(現場、現物、現実)を基本原則とし、これまで培った生産技術に一層磨きをかけるとともに、機器及びシステムのライフサイクルを通じたサプライチェーン全体(設計、製造、試験、輸送、据付け、保守)の最適化を目指して、コンカレントエンジニアリング開発や、DXを活用した業務革新に取り組んでいる。

これらの取組みを通じてものづくりの進化を続けることで、レジリエントなサプライチェーンと生産体制を構築し、将来にわたって信頼性の高い次世代送変電機器を安定的に供給していく。

5. む す び

脱炭素社会実現に向けて、再生可能エネルギーの大量導入に対応した電力の安定供給に加えて、電力ネットワーク全体でのエネルギー効率を最大化する新たな電力流通システムの重要性が高まっており、その構築のために、今後も様々な技術課題が生じると想定される。

当社は、これまでに培った基盤技術を更に発展させて、環境負荷低減開閉機器や電力変換システム、デジタル保護リレーなどの次世代送変電機器の開発を推進し、カーボンニュートラルの実現に貢献する次世代送変電機器を提供していく。

参考文献

- (1) M. Nakai, et al. : Low loss DC circuit breakers and DC GIS equipment, CIGRE 2021 Centennial Session, A3-105R (2021)
- (2) Mitsubishi Electric Power Products, Inc. : 72kV Vacuum circuit breaker
https://0aab1c21-cdn.agilitycms.cloud/AttachmentLists/File/SA0030109001_72V%20VCB%20Solutions%20Sales%20Aid.pdf
- (3) 三菱電機(株), Siemens Energy Global GmbH&Co.KG : 真空バルブによる電流遮断およびドライエア絶縁方式を採用した245kVタンク型遮断器の共同開発に向けた実現性検討を開始
<https://www.MitsubishiElectric.co.jp/news/2021/0608.pdf>

カーボンニュートラルに向けたスマートシティへの取り組み

西都一浩*
Kazuhiro Saito

Efforts for Smart Cities toward Carbon Neutrality

要 旨

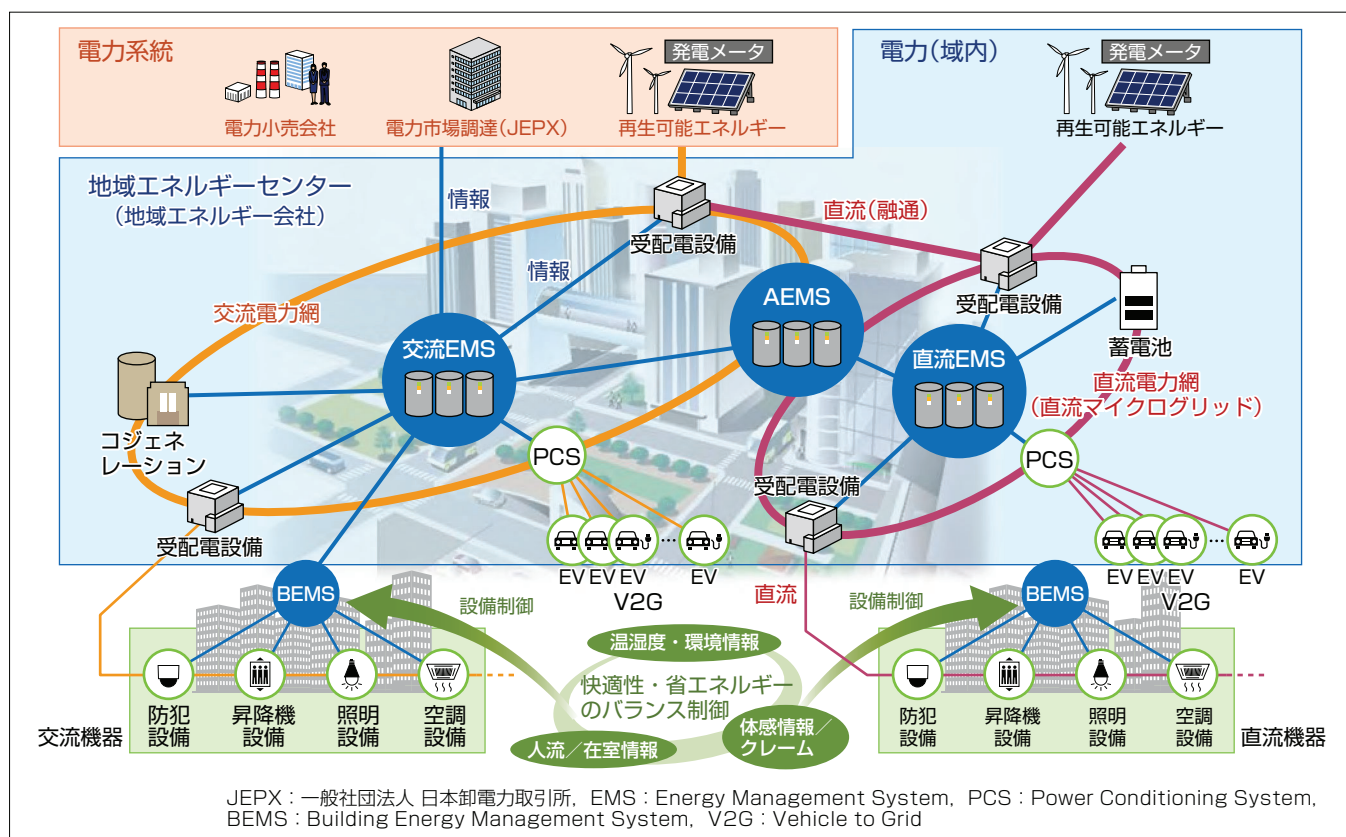
三菱電機は、都市開発でのソリューションで、政府目標である2050年カーボンニュートラルを見据えたスマートシティに向けた再生可能エネルギーの活用や、BCP(Business Continuity Plan)対応などに取り組んでいる。

スマートシティでは、地域エネルギーセンターでエリア全体のエネルギー(電力・熱)の需要と供給を最適化し、最も経済的に、又はCO₂排出量が最小になるようなエネルギー供給計画をエリアエネルギーマネジメントシステム(AEMS: Area Energy Management System)で作成・運用し、同時同量制御を行う。また、ビル内設備の稼働実績に加えて、入退室情報、人流、温湿度や気象データなどを組み合わせることで、電力・熱の需要を予測し、より適切なエネルギー供給計画を立案可能にする。

ビルの屋上設置等、街区内の再生可能エネルギーだけでなく、オフサイトの再生可能エネルギーの自己託送による活用やグリーン証書、非化石価値取引などを組み合わせて、消費電力に対するCO₂排出量を最小にする電源調達最適化を行う。さらに自家保有の蓄電池とEV(Electric Vehicle)を活用した充放電制御で需給を調整し、インバランスを回避して街区内の配電網の安定化を制御する。

さらには、系統事故時に、当社が持つコジェネレーション設備、蓄電池、太陽光発電設備などを活用し、あらかじめ設定された設備優先度に応じた電力供給と発電制御を行うことで、避難誘導とレジリエンスを適切に確保する。

交流網と直流網を適切に組み合わせることで、送配電ロスを最小化し、エネルギーの効率的な利用を促進する。



AEMSの全体構成

AEMSは、街全体の電力と熱供給を一括して需給調整するシステムである。電力システムシステムとの連携に加えて、ビルごとのBEMSと連携し快適性と省エネルギー(CO₂排出量削減)を適切なバランスに保ちつつ、エリア全体のエネルギー総コストを抑える。交流網と直流網を適切に組み合わせることで送配電時の電力ロスを低減する。また、域外の再生可能エネルギーやEVとの連携によって、再生可能エネルギーを最大限に活用することを可能にしている。

1. ま え が き

2050年までに温室効果ガスの排出を全体として実質ゼロにするとの政府目標が発表されるなど、脱炭素への取組みは世界的な趨勢(すうせい)になりつつある。また、2030年ごろの実現を目指し、スーパーシティ型国家戦略特別区の選定が始まるなど、利便性と経済性に加えて環境性に配慮した先進的な都市開発が志向されている。

図1にスマートシティ実現に向けて当社が取り組んでいる4大テーマを示す。

(1) エネルギー

都市全体のエネルギー(電力・熱)を一体的に管理し、状況に応じた需要予測と経済性、環境性(再生可能エネルギーの有効活用等によるCO₂排出量削減)とレジリエンスを考慮した最適な需給制御

(2) ファシリティ

人流、温湿度等に応じた設備運用によって、快適性と省エネルギーを両立させた設備の運用管理と入退室管理等と組み合わせた設備の需要予測と最適運用

(3) モビリティ

自動運転、回遊促進、パーソナルモビリティ等を支える管制システム等、先進的なソリューションの提供に加えて、EVの充放電、オンデマンド運転などエネルギー効率とモビリティの利便性を考慮した最適制御

(4) セキュリティ

入退室管理、カメラ映像と連動した防犯システム、災害時の避難誘導など、安心安全な都市空間の提供

これら(1)~(4)はそれぞれが独立して局所最適化を狙うだけではなく、相互に連携しつつ全体最適を実現することを目標にしている。

本稿では、当社電力・産業システム事業本部が中心になって取り組んでいる、カーボンニュートラルを見据えたEMSについて述べる。

2. EMS

2.1 カーボンニュートラルへのアプローチ

カーボンニュートラルの実現には次の四つのアプローチがある。

(1) 電力使用量そのものを削減

電力使用量削減によって、発電でのCO₂排出を削減する。

(2) CO₂排出量の少ない電源を活用

よりCO₂を排出しない電源で電力を調達する。典型例として太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入や水素・アンモニア発電などが挙げられる。

(3) CO₂排出権取引

非化石価値やグリーン証書の取引によって、環境負荷計算上で自社のCO₂排出をネッティングする。ただし、直接CO₂排出を削減しているわけではなく、本質的なCO₂排出量削減にはつながらない。

(4) 排出したCO₂を回収

発電時に発生するCO₂を直接回収、又は使用電力に応じたCO₂を空気中から吸収する。典型例としては植樹、カーボンキャプチャーなどが挙げられる。ただし、CO₂回収にかかるエネルギー創出によって発生するCO₂排出量と実際に回収できるCO₂回収量とでネットネガティブが成立することが必要である。

次節以降では本質的にCO₂排出量を削減する手段である、(1)と(2)のアプローチについて述べる。

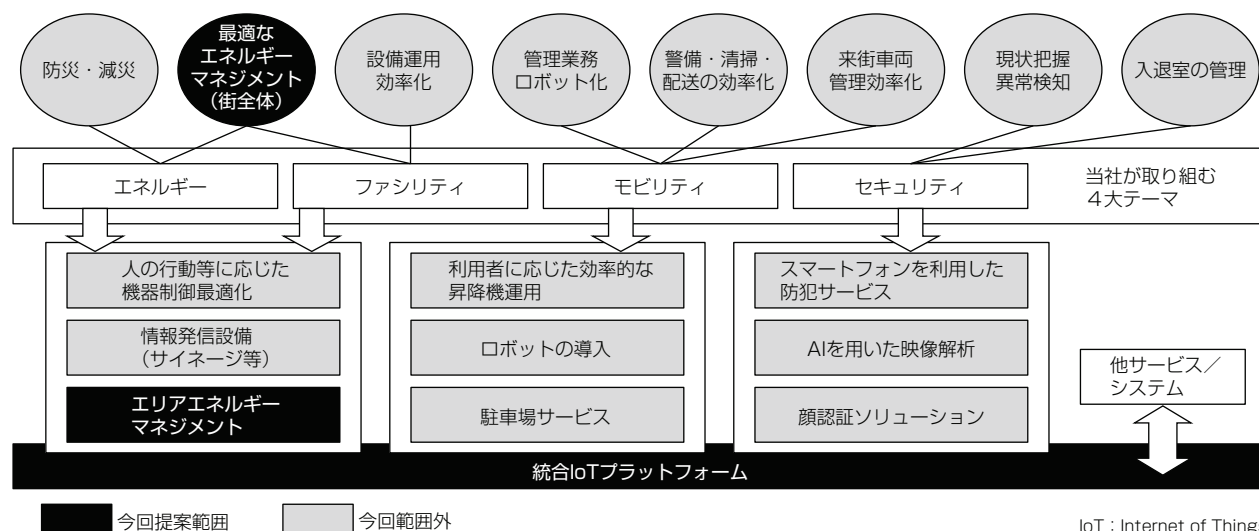


図1. スマートシティ実現に向けた当社の取組み⁽¹⁾

2.2 エネルギーとファシリティの連携

エネルギー供給でのCO₂排出量を削減するには、
 (1) 発電設備はなるべく効率の良いポイントで運転
 (2) 過不足がないように需要と供給力の最適化
 を両立させることが必要である。そのためには、正確に需要を予測して最適な供給計画を事前に作成し、実績に合わせて適宜修正する必要がある。このため当社では図2に示すようにエネルギーとファシリティの連携を推進している。

ビル内需要の多くは空調や照明が占めているが、空調や照明のニーズはそこに滞在する人の快適性や人数に関連していることが想定される。そのため、ビル内の温湿度、入退場情報や人流等を基にビル内の需要変動を予測し、その予測データに基づいて、電源や熱源の効率と経済性を考慮した供給計画を作成するAEMSに取り組んでいる。

2.3 AEMS

AEMSは次に掲げる目標に対して、顧客ニーズに合わせた最適化を行うものである。

(1) 経済性の確保

- ①自家発電+自家消費/自己託送による電力料金の抑制
- ②系統アクセス・受電設備設置費用の抑制
- ③CGS(Co-Generation System)による地域内の電力と熱の併給

(2) 環境性の向上

- ①自己託送を活用した域内外での再生可能エネルギーの大規模導入によるCO₂排出量の削減
- ②EV向けチャージャーとの連携による流通・利便性の向上
- ③直流配電による変換ロスの削減

(3) レジリエンスの向上

- ①系統事故時の自立運転による地域内電力需給の維持
- ②蓄電池充放電による再生可能エネルギー急変時の電力品質の維持

2.3.1 経済性の確保

AEMSでは、系統からの受電だけに頼ることなく、街区内の自家発電設備(CGS、太陽光発電等)を活用したエネルギーの需給最適化を行う。また、BEMSとの連携によって、ビル設備の需要予測と供給力を適切に需給調整することで、無駄のない電力供給によって、エネルギー総コストの低減を実現している。AEMSの全体構成を要旨の図に示す。

ビル内の各種設備(昇降機、空調、照明等)の稼働状況と入退出ゲート、居室の入退出情報や温湿度等をBEMS経由でデータ連携し、複数のビルと街区全体でのエネルギー消費を予測し、電源と熱源の運転計画を最適化する。

図3に街区内の電力需給調整のイメージを示す。

AEMSでは街区全体の需要を満たすために、電力取引市場又は電力小売事業者から調達した系統受電電力と自家保有のCGSや建屋屋上の太陽光発電設備などを組み合わせて適切な電源構成を計画する。域外に発電設備を持っている場合は自己託送を活用することも発電計画作成時には考慮する。また、計画策定時から需要又は電源調達(再生可能エネルギーの出力変動含む)が実績と乖離(かいり)した場合は、CGSの出力変更指示や系統受電電力の変更、

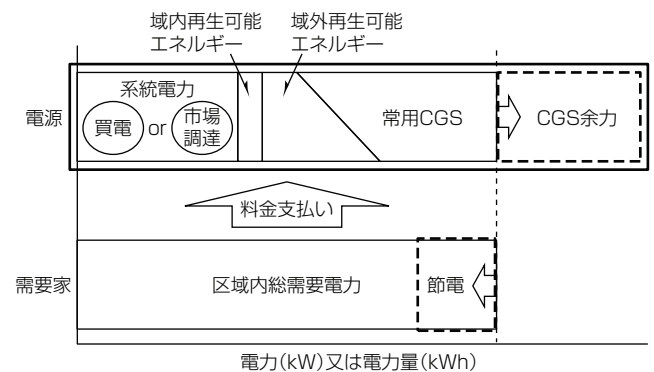


図3. 電力需給調整のイメージ

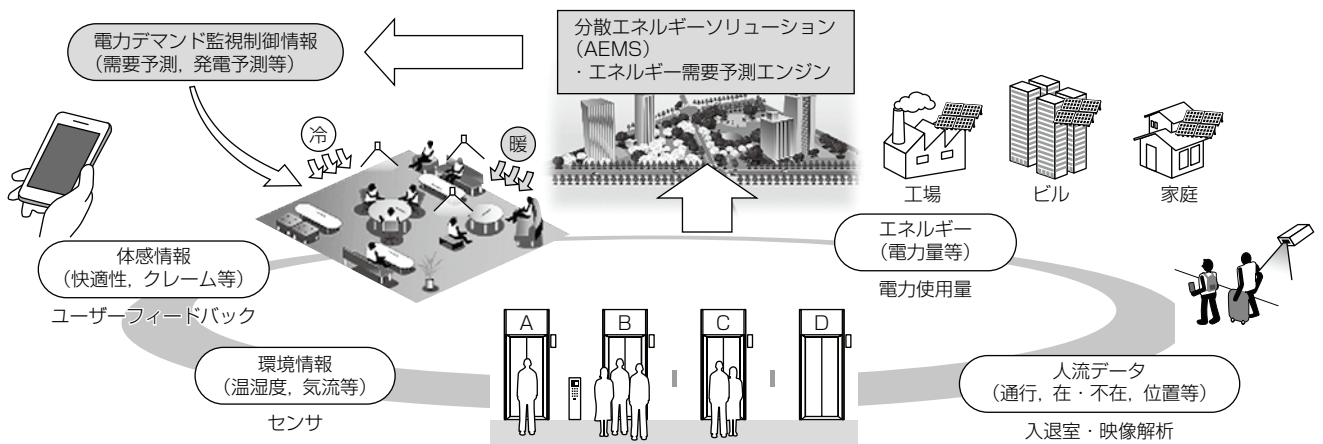


図2. エネルギーとファシリティの連携

自己託送の場合は通告変更等を行い、インバランスを最小にするため、同時同量制御を行う。合わせて、需要家に対しデマンドレスポンスを発動し、上げ／下げ指令を発出することでも需給調整を行うことが可能である。

AEMSでは電力調達(自家発含む)コストの最適化だけでなく、CO₂排出量の低減を目的にした最適化も可能であり、オーナーのニーズに合わせてコスト最適とCO₂最適(グリーン最適)を任意に選択可能にしている。将来的に環境会計上で炭素税相当を導入する際には、グリーン化にかかるコストと炭素税相当のペナルティとで経済合理性を最適化した電源調達計画を作成する。

2.3.2 環境性の向上

グリーン最適を選択した場合は、CO₂排出量が少なく、かつコストが低い電源を優先的に調達する。定置型蓄電池だけでなくEVを活用した充放電制御や域外の太陽光発電の自己託送の活用によって、需要を満たしつつCO₂排出量が少ない電源調達計画を策定することが可能になっている。グリーン最適では再生可能エネルギーを優先的に調達するだけでなく、非化石価値市場やグリーン証書の調達と託送料金、再生可能エネルギー賦課金にかかるコストをも考慮し、CO₂排出量の削減とコストとのバランスを最適化することが可能である。さらに、CGSの排熱利用、チラー等、熱交換器の運転計画を電力と熱供給を消費電力の観点から最適化することで、エネルギーコストの低減とCO₂排出量の削減を両立させている。

2.3.3 レジリエンスの向上

自家保有の電源設備を活用して、系統停電時に供給力と負荷との需給バランスを確保した上で、優先度の高い設備から順に復電していくBCP対応機能を持っており、都市全体のレジリエンス向上に役立てる。単に優先順位に従って復電するだけでなく、CGSや太陽光、EV、蓄電池など持っている供給力と負荷設備の特性を考慮した負荷投入順序制御を行い、必要な設備に必要なタイミングでエネルギーを供給可能にしている。

図4に系統停電時の電力供給イメージを示す。系統事故などによって停電を検知した場合は、無停電電源装置からの給電によって防消火設備への電力供給とともに速やかに非常用発電機を起動させ、非常用設備への電力供給が実施される。ついで、あらかじめ決められた優先順位に従って、照明→給排水設備→昇降機等への給電が実施される。

このとき、CGSや蓄電池、EV、太陽光発電設備などを持っている場合でも、負荷設備の電力需要と各種電力供給設備との需給バランスやタイミング(突入電流を含む)を総合的に調整できないため、通常はこれら電源設備は再起動されることなく、非常用発電機の定格出力範囲内で優先度の高い設備だけに電力供給が行われることになる。

そこで、当社AEMSでは電力会社向けに培ってきた発電設備のブラックスタート技術や系統周波数安定化技術、蓄電池制御技術を応用し、当社の持つ電源設備をフルに活用して、優先度に応じた負荷設備への給電を突入電流と配

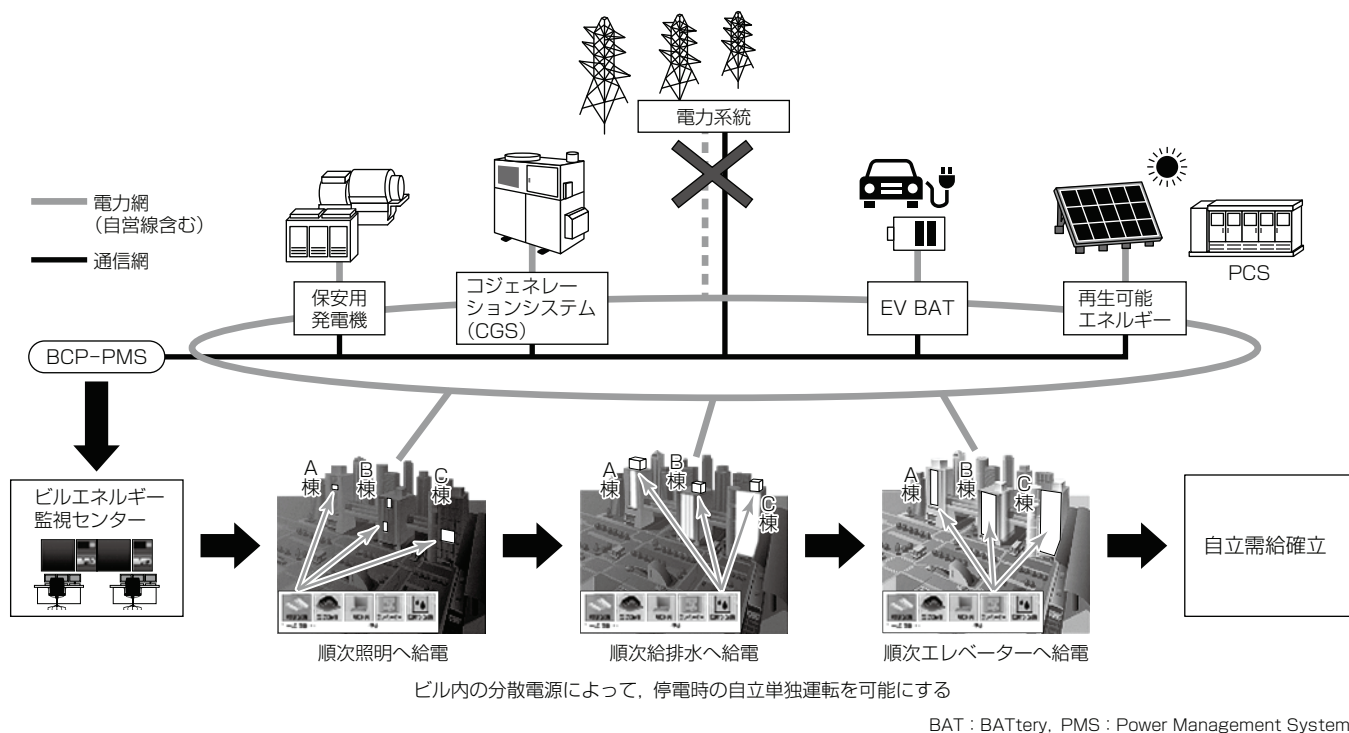


図4. 系統停電時の電力供給イメージ

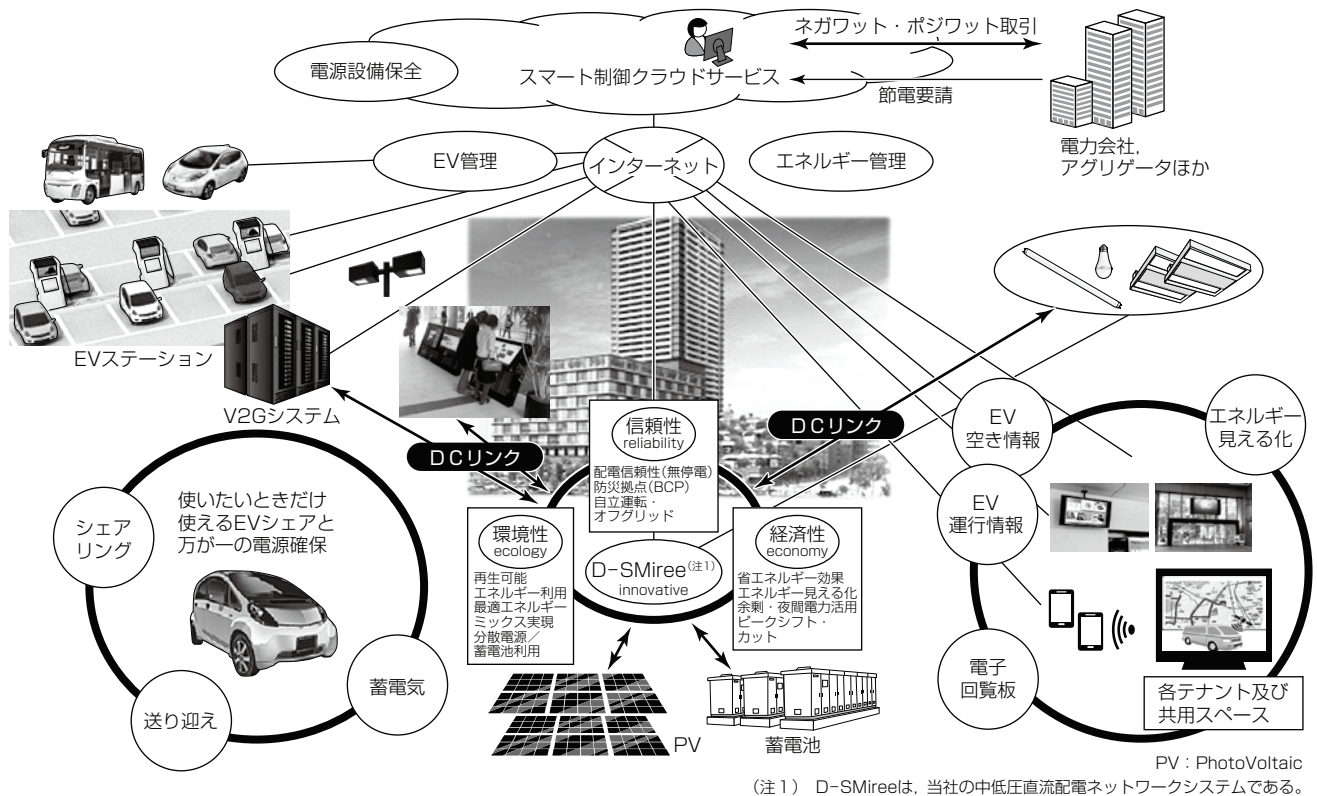


図5. 直流配電システムの将来イメージ

電網の周波数／電圧バランスを考慮した電源と負荷投入順序を制御することで、可能な限り復電範囲を拡大することを狙っている。また、人流や在室人員に応じて動的に復電設備の優先順位を調整することで、迅速な避難誘導、避難場所での生命維持活動への貢献を可能にしている。

3. 直流配電システム

最後に、カーボンニュートラルを実現するに当たっては、電源のCO₂排出量を削減するだけでなく、送配電にかかるロスを削減することで、発電したエネルギーを無駄なく利用することも重要である。そのような観点から、送配電システムの直流化を提案している。電力を効率よく運ぶには、送電ロス最小になるよう送電電力に応じた適切な電圧で送電する必要がある。従来は電圧変換の容易さと遮断時の安全面から交流が主流であったが、近年ではスイッチング技術等の電力変換技術の進展によって、送電電力や距離によっては送電ロスを考慮した場合、直流での送配電の方が交流より経済性が優れる場面が増加している。

ビル間の配電網を直流化するだけでなく、ビル内の配電網でも、直流化によって送電ロス低減効果が見込まれる。また、現在は直流を直接給電して動作する設備は照明設備程度であるが、空調機、昇降機などインバータ電源を搭載している設備では、直流系統への連系が容易であり、将来的にはZEB(net Zero Energy Building)／ZEH(net Zero

Energy House)では直流配電が主流になると想定している。さらには、太陽光発電と蓄電池はそもそも直流であり、直流配電システムとの親和性は高い。また、EVでも同様である。図5に直流配電システムの将来イメージを示す。

このように、スマートシティやマイクログリッド内の直流化が進展し、さらに都市間の連携も交流網と直流網を適切に組み合わせることで、電力ネットワーク全体での送配電ロスを低減し、CO₂排出量そのものの削減につながることを期待している。

4. む す び

カーボンニュートラルに向けたスマートシティへの取組みと将来展望について述べた。このほかにも、再生可能エネルギーを活用した水の電気分解による水素・アンモニア製造やオフサイトの再生可能エネルギーを託送することで偏在する再生可能エネルギー（グリーン価値）を適切な需要地に送配電することで、街全体としてカーボンニュートラルを実現する仕組みの検討など、様々な角度からカーボンニュートラルの実現への取組みを進めている。

今後も2050年カーボンニュートラルを見据えた様々なソリューションの提供と技術開発を推進する。

参 考 文 献

- (1) 分散電源ソリューション，三菱電機技報，95，No.1，56（2021）

配電用変電所向け 新型デジタルリレー

New Digital Relay for Distribution Substation

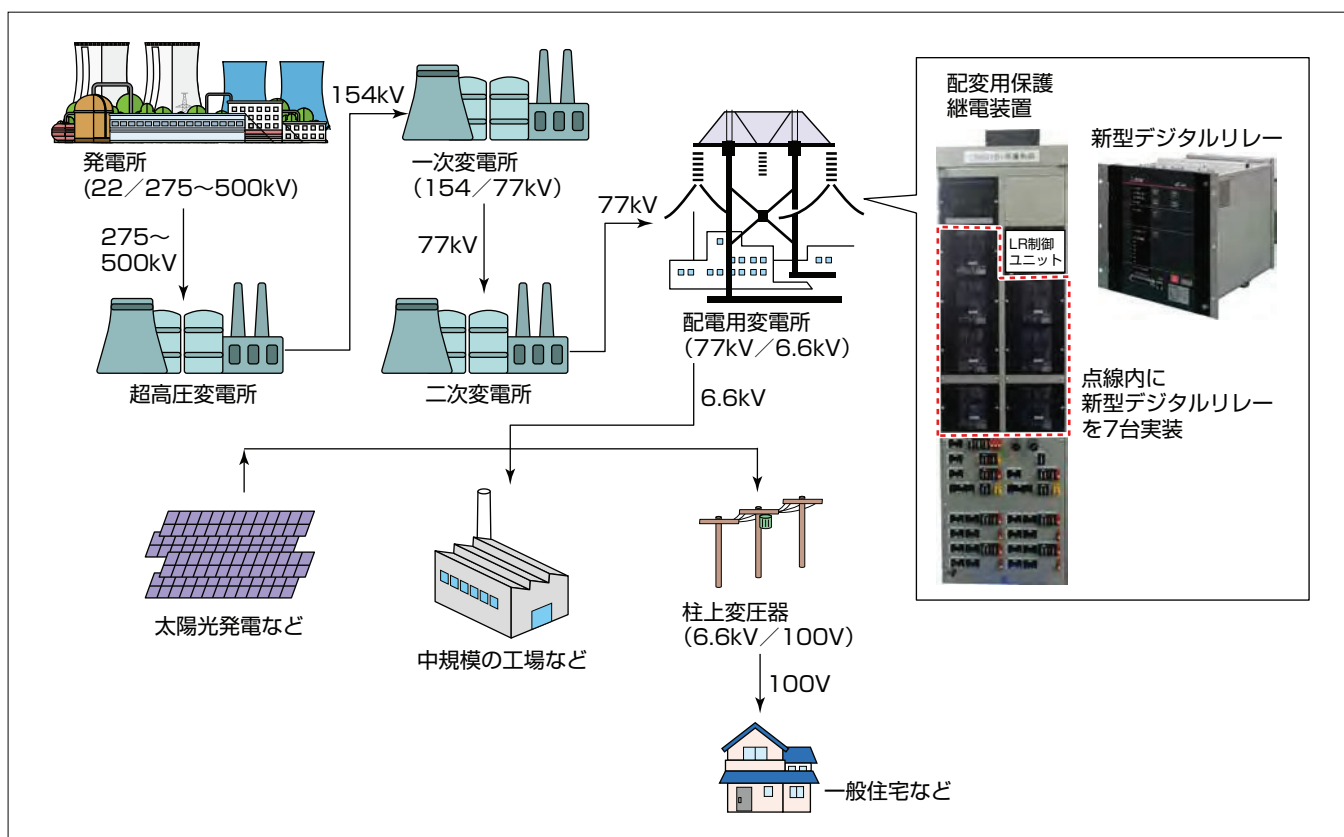
宮城 嵩*
Takashi Miyagi
内海康晴*
Yasuharu Utsumi
森 浩紀†
Hironori Mori

小澤辰哉‡
Tatsuya Ozawa
對馬宏介‡
Kosuke Tsushima

要 旨

一般家庭に電力を供給する6.6kV系統は、配電用変電所（以下“配変”という。）から供給される。近年、この6.6kV系統で再生可能エネルギーの連系が増加し、バンク逆潮流に対する保護など、配変に設置されるデジタルリレーに対して、新たな機能が要求されている。また、デジタルリレーの開発に当たって、特定のユーザー向け製品に特化せず、プラットフォームをより汎用化することによって、幅広い要求に対して、短期間で効率的に開発する環境の整備が必要である。これらの背景を踏まえて、新型デジタルリレーとして、“MELPRO-CHARGE2 Type-S”（以下“新機種”という。）を開発し、2020年3月に中部電力パワーグリッド(株)の配変向け初号機を製品化した。製品化に当たって、

中部電力パワーグリッド(株)の標準仕様に準拠した上で、機能集約による設備のスリム化、遠隔整定機能の実装や系統故障発生時の事故波形記録時間の拡張による運用保守性の改善、基板交換を可能にすることでの製品保守時の停電回数削減に貢献した。さらに国内電力会社でのデジタル保護リレー規格（以下“B-402”という。）の最新版（平成28年5月改定版）に準拠することによって、信頼性の確保を図った。現在、新機種のプラットフォームを用いた機種拡充の成果として、過電流保護継電装置や距離保護継電装置などの中部電力パワーグリッド(株)の一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置への適用を終えた。今後、適用範囲をより一層拡張するための提案を進めていく。



電力システムの概略図及び新型デジタルリレーの配変用保護継電装置への実装例

発電所で作られた電力は、各変電所を介して負荷へ供給される。変電所は、変圧器で系統電圧を降圧する場所である。発電機の出力電圧は22kVであるが、電気抵抗によるロスと勘案し、275～500kVに昇圧して送り出す。そして、各変電所で降圧し、工場や住宅に電力を供給する。各変電所には変圧器のほか保護リレーや遮断器などがあり、保護リレーが系統事故を検出すると、遮断器へ開放指令を送って、事故点を電力系統から切り離す。

1. ま え が き ⁽¹⁾⁽²⁾

国内電力会社向けのデジタルリレーでは、図1に示すとおり、“MELPRO-CHARGEシリーズ”及び“MELPRO-CHARGE2シリーズ”を展開している。これらのシリーズは、主に超高圧変電所、一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置を構成するType-I/Ⅲと、配変用保護継電装置を構成するType-Sに大別される。今回、MELPRO-CHARGE Type-S(以下“現行機種”という。)の後継として、新機種を開発した。開発に当たっては、再生可能エネルギーの連系に伴うバンク逆潮流の保護に関する対策の追加及びユーザーニーズである設備スリム化のための機能集約、現地作業省力化のための遠隔保守の改善や系統事故発生時の事故波形記録時間の拡張を行った。また、新機種の開発に当たって、環境負荷低減への取組みや開発合理化のためのプラットフォーム共通化を実現した。

現在、中部電力パワーグリッド(株)の配変に採用され、一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置にも機種展開して運用中である。

2. 新機種の特長 ⁽³⁾

2.1 バンク逆潮流に対する保護機能の実装

逆潮流とは、需要家の再生可能エネルギー発電量の増加に伴って、発電設備で発生した余剰電力を電力会社の電力系統に逆流させることを指し、バンク逆潮流とは、変電所の負荷を超えて、バンク一次側の負荷へ供給するために生じる逆方向の潮流を指す。バンク逆潮流中の地絡事故では、再生可能エネルギーの連系が解列されず、事故が継続するケースがある。そこで、中部電力パワーグリッド(株)の配変向けの新機種では、従来、別装置に実装されていた地絡事故を検出する地絡過電圧要素(以下“64要素”という。)及び逆潮流を検出する不足電力要素(以下“91要素”という。)を追加することで、バンク逆潮流中の地絡事故を検出し、保

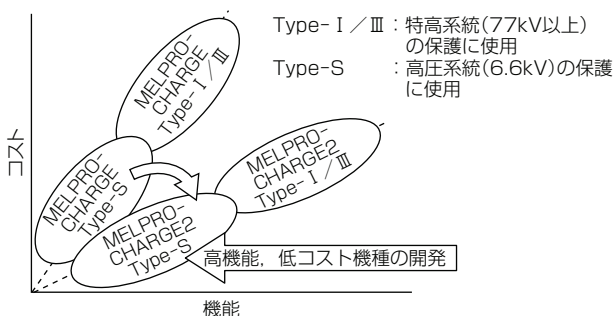


図1. MELPRO-CHARGE及びMELPRO-CHARGE2のラインアップ ⁽¹⁾⁽²⁾

護継電装置1面で適切な保護を可能にした。図2にその保護の考え方を示す。

2.2 機能集約によるスリム化

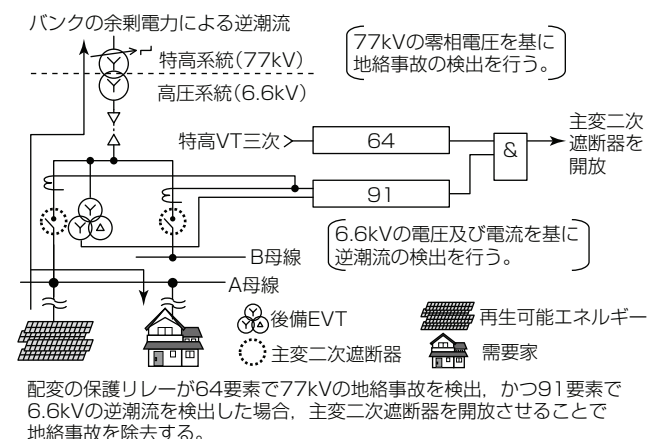
中部電力パワーグリッド(株)の配変では、現行機種を適用した場合、1バンク当たり最大で12台の保護リレーユニットで構成されていた。新機種では、運用を考慮して機能集約を図ることによって、7台のユニットで構成することを可能にした。また、適用する変電所の形態では、集約された機能の一部だけを使用するケースもあり、パソコンHI(Human Interface)(以下“PC-HI”という。)からの設定で容易に単独使用することを可能にした。例えば、配電線・配電線(SC(Static Capacitor))ユニットであれば、配電線の2回線一括保護又は配電線の1回線単独保護のどちらかを選択可能である。図3に配変の代表的な系統と保護リレーの構成、表1にその保護対象と機能集約の考え方について示す。

2.3 遠隔整定

電力会社では、現地作業省力化のため、遠隔整定機能の運用が進められている。新機種では、セキュリティ機能を向上させるため、PC-HIを接続する運用保守LANと制御を実施する制御LANをハードウェア分離するとともに、悪意を持った部外者による整定変更を防止するため、運用保守LANによってPC-HIから新整定値を設定した後、制御LANからその新整定値を有効にする操作を行う、別系統による二挙動操作を可能にした。図4にPC-HIの整定画面例を示す。なお、IDやパスワードによるログイン機能も計画している。

2.4 系統故障解析の機能向上

系統故障解析を容易にするため、故障発生時の波形を記録するデータセーブ機能を実装している。



配変の保護リレーが64要素で77kVの地絡事故を検出、かつ91要素で6.6kVの逆潮流を検出した場合、主変二次遮断器を開放させることで地絡事故を除去する。

VT: Voltage Transformer, EVT: Earthing VT

図2. 64要素及び91要素による逆潮流検出



当該装置を修理するに当たって、保護している電力系統の停電や作業員の現地への派遣など多くの労力が伴うことから、故障部位を迅速に特定し、短期間で復旧させる必要がある。現行機種では、この課題を解決するため、ユニット単位で代品と交換して仮復旧を行い、後日、修理品を差し戻す手法を採用していた。しかし、再生可能エネルギーの増加によって計画停電の調整が困難になっている状況を踏まえて、保守時の停電回数を抑制したい実状がある。新機種では、故障部位の特定を容易にするため、図6に示すとおり、推定不良部位をPC-HIに表示する機能を設けて、基板単位で現地交換を実施することによって、即日復旧を可能にした。

ユニットごとの保護対象		新機種での機能集約の 考え方
現行機種(12台)	新機種(7台)	
主変一次保護	主変一次・地絡後備保護	バンク停止の運用範囲から集約した。
地絡後備保護		
A母線 主変二次・切母保護	同左	従来を踏襲
B母線 主変二次・切母保護	同左	同上
F1配電線保護	F1・F2 配電線保護	配電線の電流容量と独立性を考慮し、2回線単位の集約にした。
F2配電線保護		
F3配電線保護	F3・F4 配電線保護	
F4配電線保護		
F5配電線保護	F5・F6 配電線保護	
F6配電線保護		
F7配電線保護	F7・SC 配電線保護	
SC配電線保護		



装置故障は、電力の安定供給に影響を与えるだけでなく、

図6. PC-HIでの推定不良部位の表示例

	現行機種	新機種
DIOスロットの組合せ	固定	任意
メイン、FDへのDIOの割付け	基板単位	DIO 1 点ごと

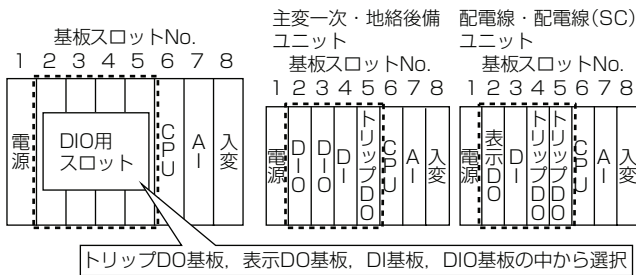


図7. 新機種の基板構成

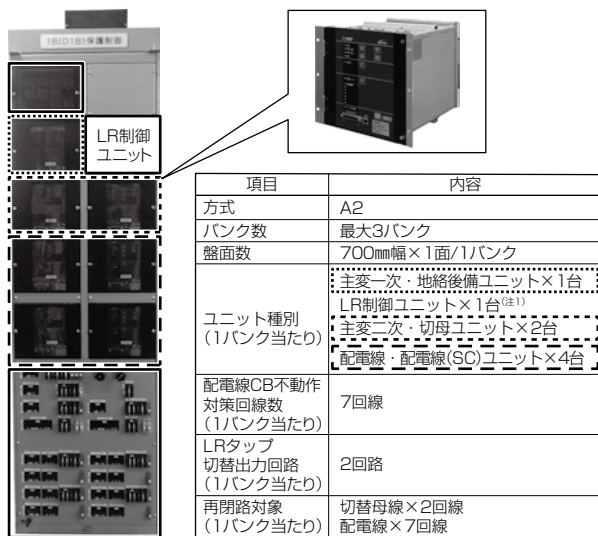
3. 配変保護装置への適用

3.1 装置構成例

新機種を名菱電子㈱へ供給して構成した中部電力パワーグリッド㈱向け配変用保護継電装置の外観及び構成例を図8に示す。配変用保護継電装置に適用した新機種では、機能集約によって設備のスリム化を図りつつ、保護リレーユニット単位で独立性を確保することで障害時の影響範囲を制限している。また、スリム化による部品点数削減や電源容量低減によって、環境負荷も考慮した構成を実現した。

3.2 評価試験結果

B-402に基づいて、ユニット単体試験及び装置試験を実施し、全て結果良好であった。B-402では耐ノイズ試験について、JEC-2501に準拠することが定められており、認定機関の設備を使用して評価した。一例として単体試験でのイミュニティ試験項目を表3に、その試験環境例を図9に示す。



(注1) 代表メーカーで製作
LR: Load Ratio, CB: Circuit Breaker

図8. 中部電力パワーグリッド㈱向け配変用保護継電装置の外観及び構成例

表3. イミュニティ試験の試験項目

試験分類	試験項目
イミュニティ試験	静電気放電イミュニティ、商用周波数イミュニティ、減衰振動波イミュニティ、電氣的ファストトランジェント/バーストイミュニティ、サージイミュニティ、商用周波数磁界イミュニティ、無線周波電磁界電動妨害イミュニティ、放射無線周波数電磁界イミュニティ

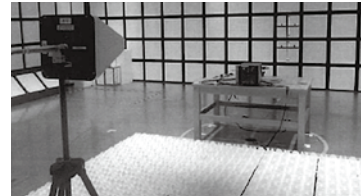


図9. 放射無線周波数電磁界イミュニティ試験の環境

表4. 中部電力パワーグリッド㈱の一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置

過電流保護 継電装置	調相一括保護 継電装置	距離保護 継電装置

4. 機種 拡 充

新機種のプラットフォームを用いて、保護リレーの機種拡充を図り、中部電力パワーグリッド㈱の一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置へ適用した。表4に各装置の外観を示す。

5. む す び

配変用保護継電装置を構成する新機種は、再生可能エネルギーによるバンク逆潮流に対する保護を考慮しつつ、機能集約によって1台で2回線の保護を可能にすることで、設備のスリム化への寄与、保守性の改善や系統故障解析の容易性を図り、中部電力パワーグリッド㈱の配変に採用され2020年3月に実用化した。また、同社の一次変電所及び二次変電所向け保護継電装置へ適用し、過電流保護継電装置を2020年6月、調相一括保護継電装置を2020年11月、距離保護継電装置を2021年5月に実用化した。今後、更に適用先の装置及び電力会社を広げるため、提案活動を進めている。

参 考 文 献

- (1) 清水利憲, ほか: ユニットタイプ新形デジタルリレーの開発, 電気学会, 保護リレーシステム研究会, PPR-07-01 (2007)
- (2) 清水利憲, ほか: ユニットタイプ新形デジタルリレーの実用化, 電気学会, 保護リレーシステム研究会, PPR-08-01 (2008)
- (3) 宮城 嵩, ほか: 配電用変電所向け新型デジタルリレーの開発, 電気学会, 保護リレーシステム研究会, PPR-21-002 (2021)

第3部 受配電システム

受配電システム機器の技術展望

Technology Outlook of Power Distribution Systems Equipment



橋本孝治*
Koji Hashimoto

要 旨

受配電システム機器は、社会のニーズに対応した技術の進展によって、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善が進められてきた。近年でも、変化する社会ニーズ(更なる安全性向上・電力安定供給、グローバル化・規格の国際化、IoT(Internet of Things)・高機能化・高信頼性、LCC(Life Cycle Cost)削減、省エネルギー・環境負荷削減、災害レジリエンス)に対応した技術の進展によって、三菱電機でも次に示すような技術を開発し、新製品を投入している。

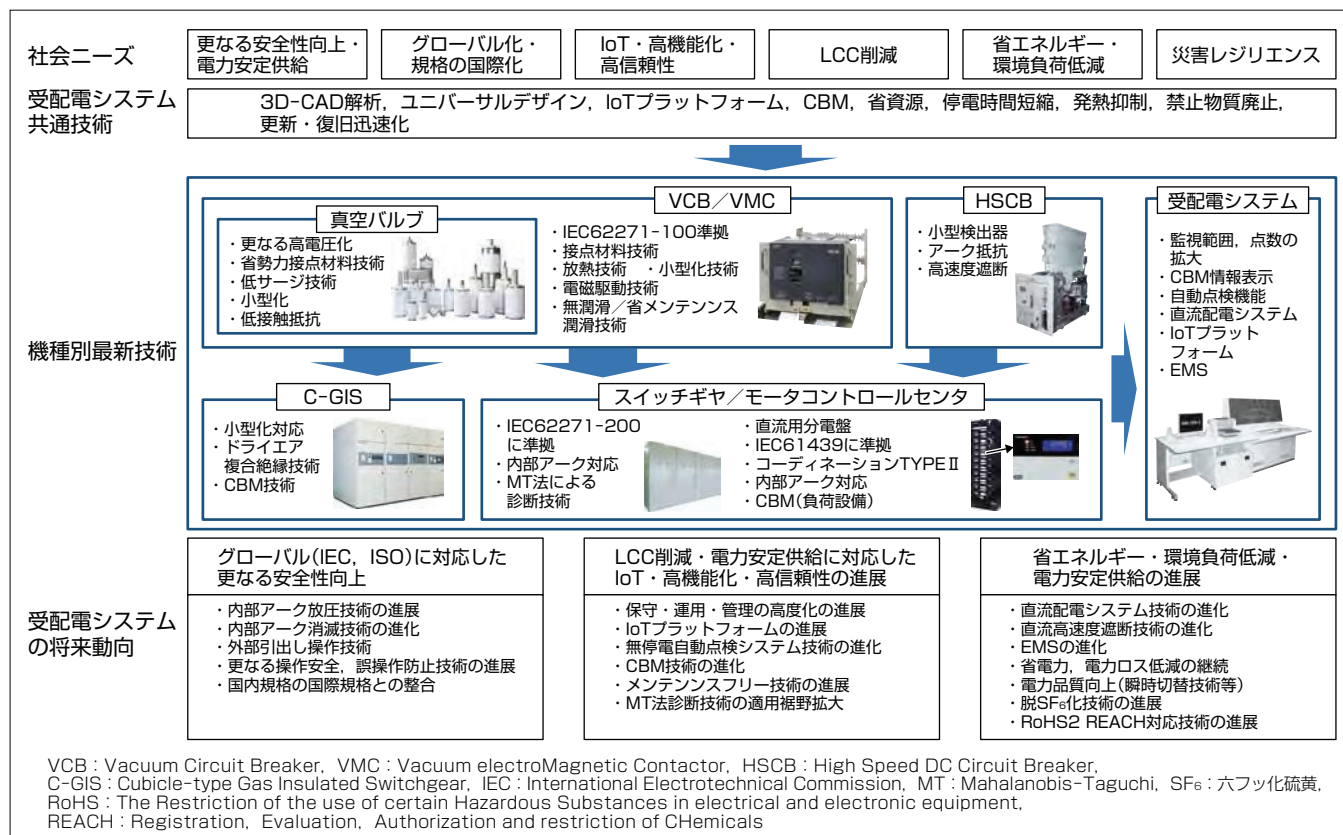
(1) 国際規格に準拠した内部アーク放圧技術の進展

- ①スイッチギヤのIAC(Internal Arc Classified) AFLR対応技術
- ②低圧モータコントロールセンタへのIAC対応技術

(2) IoT・高機能化・高信頼性の進展

- ①IoTプラットフォームの機能性向上技術
 - ②モータ負荷設備のCBM(Condition Based Maintenance)技術
 - ③真空遮断技術の高電圧化
- #### (3) 直流配電技術の進展
- ①直流配電システムと当該EMS(Energy Management System)技術の進化
 - ②直流高速度遮断技術の進化

今後も顧客ニーズは多様化し、高度化していくと考えられる。先に述べた受配電システム技術を更に発展させて、製品開発に反映し、受配電システム機器として付加価値の高い製品を提供することで社会に貢献していく。



受配電システムの技術マップと将来動向

受配電システムの社会ニーズに基づく技術マップと将来動向を示す。

1. ま え が き

受配電システムは、電力会社の配電線から電力を受ける鉄道・工場・ビル・店舗等の受電点から動力・照明など配電端負荷に至るまでの電力供給用設備、保護・計測・監視・制御装置を構成要素としている。これらは、公共・民間を問わず、社会インフラでの重要な基幹システムに位置付けられる。

受配電システム機器は、以前から社会ニーズに対応し、技術の進展によって、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善が進められてきた。また、近年でも、変化する社会ニーズに対応した技術の進展によって、国際規格に準拠した内部アーク放圧技術、IoT・高機能化技術、直流配電技術等が進展してきている。

本稿では、社会ニーズに対応することで発展している受配電システム機器の技術開発や製品化動向と展望について述べる。

2. 高圧配電盤の技術動向

長年国内高圧配電盤の準拠規格であった日本電機工業会規格JEM1425が国際規格IEC62271-200への統合の流れによって、2021年7月にJIS C 62271-200:2021として新規発行され、配電盤操作員に対する安全性がより重視されるようになった。そこで国際規格IEC準拠の海外市場向け配電盤を製品化した知見を活用し、このJIS規格に対応した安心・安全な配電盤を近日製品化予定である。近年このような規格国際化や、アフターコロナに対応したりモータ監視化の流れに従って、より高い安全性を追求し、IoT技術を用いた状態監視・診断等に対応した配電盤の需要が高まっている。

また特高配電盤領域では、絶縁媒体としてドライエアーやSF₆ガスを封入したC-GISが用いられているが、近年、カーボンニュートラルの実現に向けた脱SF₆ガスの流れに従って、ドライエアー等SF₆ガス以外の絶縁媒体を用いたC-GISの需要が高まっている。

2.1 JIS C 62271-200:2021対応中圧配電盤

JIS C 62271-200では、内部短絡等の事故によってアークが発生しても配電盤操作員に危険を及ぼさない要求事項がオプションとして指定される。

この要求に対応するには、図1のように、内部アークを配電盤操作員に危険が及ばない安全な方角(基本的に上方、要求によって後方や下方)にだけ放出する構造が求められる。そこでIEC準拠海外市場向け配電盤開発で培った堅牢



図1. 内部アーク安全性試験の様子



図2. JIS C 62271-200:2021準拠高圧配電盤のイメージ

(けんろう)な箱体構造技術、放圧フラッパー動作機構技術、内部アーク挙動解析技術等を展開し、この規格に準拠した国内市場向け配電盤(図2)を近日製品化の予定である。

2.2 特高C-GIS

一般に33kV以上の定格電圧では、SF₆ガス等の絶縁性能の高い絶縁ガスを絶縁媒体として、コンパクト・高信頼性のC-GISが用いられることが多い。SF₆ガスは、高い絶縁性能の反面、地球温暖化係数が高く、世界的に使用抑制の動きがある。当社では、耐環境性を重視したドライエアーをいち早く採用し、環境に配慮した特高C-GISをラインアップしてきた。今後も運用性、環境性、安全性を考慮したより使いやすい製品へのニーズに対応していく。

3. 配電用高電圧クラス遮断器の技術動向

受配電システム用の3.6~84kVの遮断器及び負荷開閉器には主に真空遮断技術が用いられている。近年はカーボンニュートラル実現に向けた再生可能エネルギーの普及に伴い、高電圧直流(HVDC)送電や84kVを超える特高開閉器の脱SF₆ガスの要求があり、これらを構成する変換設備や遮断器にも真空遮断技術の適用が拡大されている。

3.1 高電圧真空遮断器

高電圧のスイッチギヤに収納される遮断器には、小型・軽量・保守の容易性等の多くの特長から真空バルブを収納した真空遮断器が主に適用されている。図3に真空バルブの外形の変遷を示すが、50年余りの技術革新によって、開発当時の10%以下の容積にまで小型化できている。真空バルブの小型化によって、真空遮断器自体も、注油周期の延長、操作エネルギーの低減、部品点数の削減を進めるとともに、安全性向上・環境保全の観点から、RoHS指令で使用制限される有害6物質を不使用(最大許容濃度以下)としてきた。近年、スイッチギヤの規格がJEM1425から国際規格に整合させて新たに制定されたJIS C 62271-200に更新され、遮断器取り外し等の保守時での安全性の向上がより求められるようになってきている。

3.2 特高クラス以上への真空遮断技術適用

84kVを超える特高クラスの開閉器に主に使用されてきた、環境負荷の高いSF₆ガスを削減するための解決策の一つとして、真空遮断技術の特高クラスへの適用拡大が進められている。当社では2002年から図4に示す72/84kV用一点切り真空バルブを用いた遮断器を製品化しているが、より高い電圧クラスへ適用するためには、特に短絡遮断性能や耐電圧性能、大型化に伴う機械強度の確保等が課題であり、真空バルブを始めとした構成部品の材料、形状等の研究開発を進めている。

3.3 真空遮断器技術の他用途への応用

短ギャップでの高い消弧性能、絶縁性能と多数回開閉性能を特長とする真空バルブは、これまで変圧器用のタップチェンジャーにも適用されてきたが、これに加えて近年ではHVDC送電のための交直変換設備や機械式高電圧直流遮



図5. 真空式バイパススイッチ



図6. JH形直流高速度遮断器

断器の高速転流回路等への適用が進められている。図5は、最近適用が進むIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いた自励式変換器に設置される保護用のバイパススイッチの外形である。このスイッチには極間を短ギャップで構成できる真空バルブが適用されており、IGBT素子故障時に高速投入して素子極間を短絡して変換器を保護する役割を果たす。

一方、真空遮断器の高速駆動技術や電磁力によるアーク制御技術は、直流用気中遮断器に応用されている。図6は、主に鉄道用の直流系統に適用される直流高速度遮断器の外形を示す。直流系統では、故障発生後に故障電流が急激に増加するため、できるだけ早期に遮断することが求められるが、故障電流検知からの高速接点駆動技術を電磁駆動によるアーク制御技術やガス流制御技術と組み合わせることで13ms以内での高速消弧を実現して遮断性能を向上(50kA→100kA)させている。

4. 低圧直流配電及びIoT活用MCCの技術動向

受配電システム用低圧クラスの配電盤やモータコントロールセンタ(MCC)は、近年、カーボンニュートラル実現に向けた再生可能エネルギーの普及に伴い、電源(太陽光発電、定置型蓄電池等)を直流連系して配電する低圧直流(LVDC)配電の需要が高まっている。また、MCCが取得した計測値を解析して波形の分析結果から機器の劣化を予測したり、顧客のSCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)や当社プラットフォームと連携して新たな価値を提供するIoT化の技術が進展している。

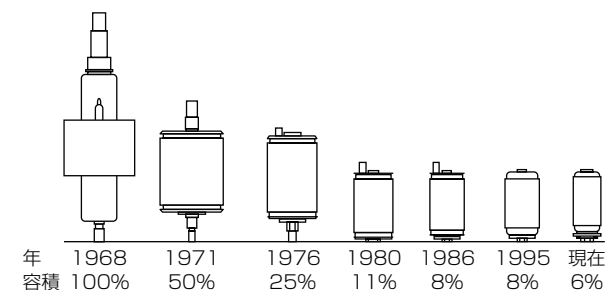


図3. 7.2kV-600A-12.5kA汎用遮断器用真空バルブの変遷



図4. 72/84kV用真空バルブ

4.1 直流給電用分電盤

再生可能エネルギー電源系統との連系点、又は負荷設備へ給電するための主母線を直流化(DC380V)し、電圧の変換段数を削減することでシステム全体の電力損失低減(=省エネルギー)を実現するDC380V直流給電システム用の分電盤(図7)を開発した。分岐MCCB(Molded Case Circuit Breaker)収納ユニットにプラグイン構造を採用し、他系統への電源供給を維持しながら安全にユニットの追加、撤去、交換作業が可能である。各分岐に負荷電流、漏洩(ろうえい)電流、電力量等の計測・液晶表示が可能な電子式マルチDC計測装置(表1)を搭載した。

4.2 IoTを活用したモータ診断システム

工場や上下水道プラント、発電所などで使用されるモータ設備に関しては、設備の故障停止による被害が甚大になることから定期的な点検作業を実施している。敷地内に点在するモータ設備に対して巡視点検が必要になることから、点検作業には多大な時間を要している。また、点検には音やにおい等、熟練作業者の五感によるノウハウによって点検される場合も多いが、少子高齢化が進んで、熟練作業者の不足も課題の一つとして挙げられる。

これらの課題を解決するため、オンラインでモータ設備を自動診断するシステムを開発・製品化した。このシステムは、独自解析アルゴリズムで、モータ設備稼働中の電流／

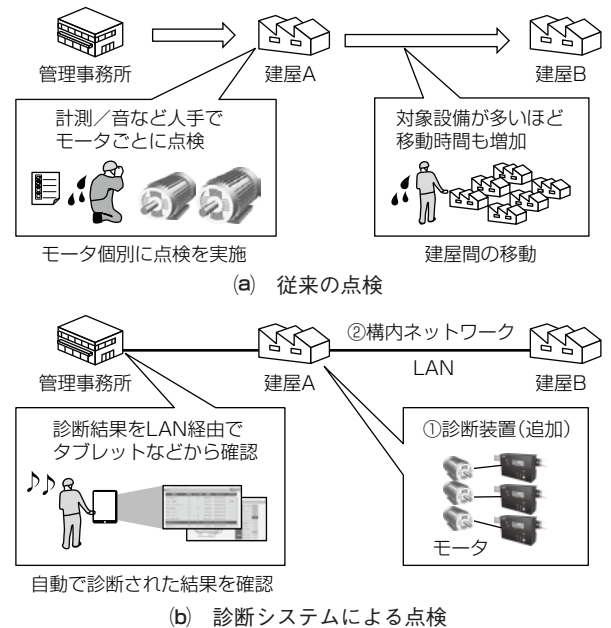


図8. モータ設備の点検イメージ

電圧情報からモータの異常発生前に兆候を検出する。

従来点検とこの診断システムによる点検イメージを図8に示す。従来点検では敷地内のモータ設備それぞれに対して移動／点検を実施していたが、診断システムによる点検では、診断装置をモータごとに設置し、構内ネットワークLANに接続しておくことで、タブレットやパソコンから診断結果をLAN経由でいつでも確認することが可能になる。

5. む す び

受配電システム機器の技術展望を、最近の技術・製品動向を主体に述べた。受配電システムは社会インフラの根幹を支える設備であり、更なる安全性向上・電力安定供給、省エネルギー・環境負荷削減などの社会的ニーズは今以上に高まると考えられる。また近年では、太陽光発電や風力発電のような自然エネルギーを利用した分散型電源の普及が進んで、直流配電技術を活用した、蓄電システムと再生可能エネルギー電源の併用による高効率運用・省エネルギーの促進が予想される。さらに、IoTプラットフォームとの親和性向上によるCBMや自動点検による保守作業の省力化、停電時間の短縮も進展すると予想されるなど、国内外を問わず顧客ニーズは多様化し、要求も高度化している。このような社会動向の中であって、今後も当社は、技術開発を更に進めて、受配電システムとして付加価値の高い製品とサービスを提供することによって、活力とゆとりある持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 長谷潤一郎：受配電システム機器の技術展望、三菱電機技報、94, No.11, 612～617 (2020)



図7. マルチDC計測装置搭載の直流給電用分電盤

表1. マルチDC計測装置の仕様

機能		測定・設定範囲
計測・表示	負荷電流	電流設定値の0～135%
	漏洩電流	0～250mA
	主回路電圧	0～440V
	電力	0～999,999kW
	電力量	0～9,999,999kWh
アラーム(表示)	過電流ブレイアラーム	50～115%
	漏電ブレイアラーム	0.2～50mA

直流配電システムの取組みと今後の展望

Initiatives for DC Power Distribution System and Future Prospects

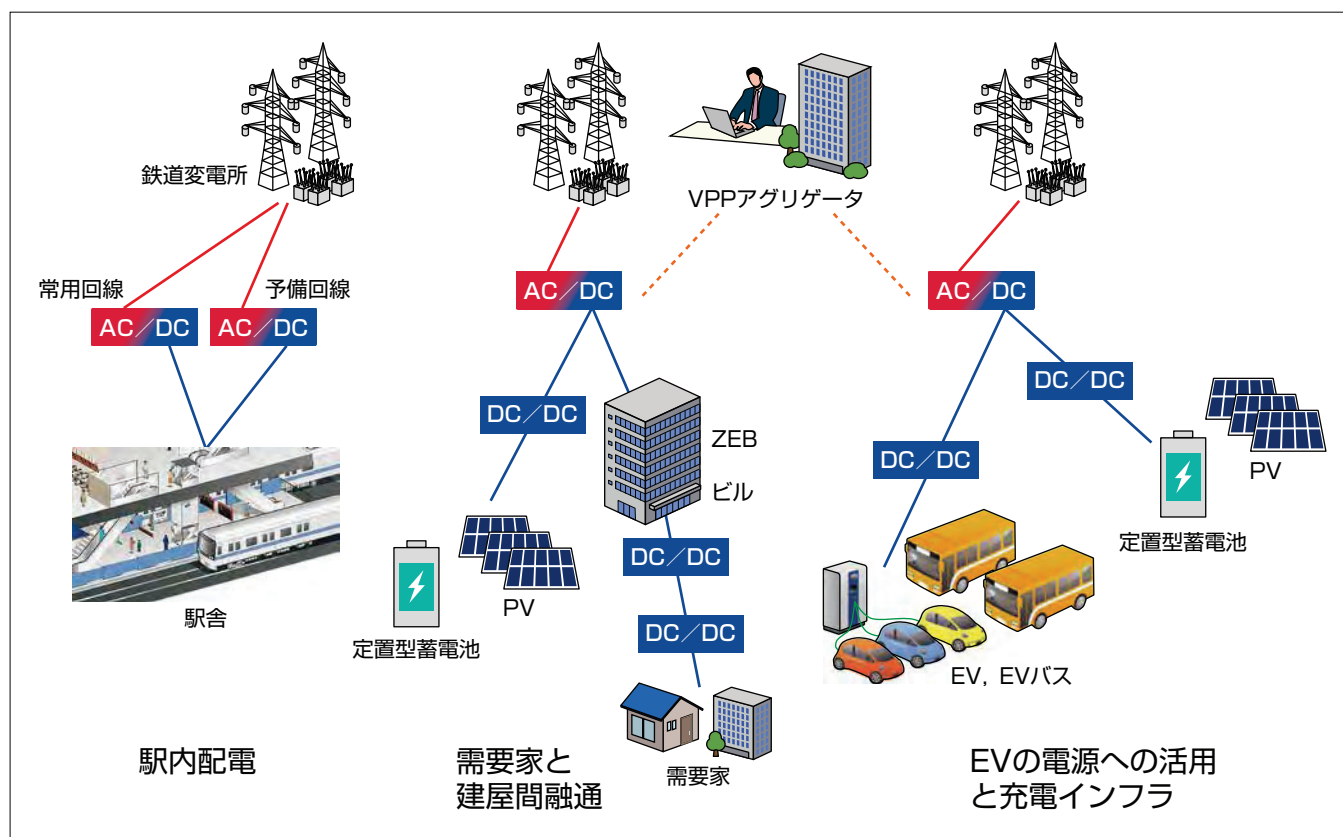
要 旨

2020年12月25日に経済産業省は、“2050年カーボンニュートラル”への挑戦を、“経済と環境の好循環”につなげるための産業政策として“2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”を策定し、成長戦略会議で報告した⁽¹⁾。この報告書に“直流給電等による住宅・建築物間のネットワーク化や水素等を活用した再エネ主力化と整合した柔軟性の確保、電気・熱・モビリティのセクターカップリング等に係る技術の実証・社会実装を図りつつ、普及のための適切な市場の設計によるビジネスモデルが確立される必要がある”という記載があり、政府が直流給電を省エネルギーや脱炭素社会を実現するための重要技術の一つとして期待していることがうかがえる。

三菱電機は、2016年に中低圧直流配電システム実証棟

を当社受配電システム製作所内に建設し、直流配電システムの安全性・信頼性の実証に取り組んできた。2020年には直流系統内の太陽光発電電力や回生電力などの再生可能エネルギーの余剰電力を逆変換して交流系統に融通可能に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(単機100kW)”を開発した。

また、脱炭素社会に向けてバス・トラックなど大型EV(Electric Vehicle)向けの新たな充電インフラをこの直流技術を活用して構築し、大容量EVスマートチャージングシステムの実証に電力会社と共同で取り組んでいる。最適な充電計画に基づく自動制御充電等によって、受電点でのピーク電力の抑制を可能にして、大型EV同時充電時でも配電系統の安定化と充電コストの削減を実現する。



直流配電システムの適用先

適用先として太陽光発電(PV: Photo Voltaic)等の再生可能エネルギー電源を備えたビルであるZEB(net Zero Energy Building)のほか、近隣の需要家と建屋間で直流電力を融通し合うことが可能なシステム、及び駅内配電システムの直流化によって“電源品質の向上”“設備の簡素化”“省エネルギー化”が期待できる駅舎向けへの適用を目指している。また、EVバスの車載電池のVPP(Virtual Power Plant)電源への活用、配電系統の安定化とシステム最大電力を抑えて充電コストの削減が可能な充電インフラを志向している。

1. ま え が き

直流配電システムは、“省エネルギー”や“電源の高信頼化”といった市場の要求に対応する配電方式として注目されている。直流配電は、従来の交流配電に比べて、電力の変換回数を少なくして変換ロスを抑えることができるため、省エネルギーにつながる。また、直流は周波数、無効電力等を考慮する必要がないため、交流に比べて複雑な制御をせずに、高信頼な無停電電源を供給できる。ただし、小型化・低コスト化や直流で直接動作する負荷側機器の市場拡大が今後の課題である。

本稿では、直流配電システムのメリットや今後の課題に加えて、具体的な適用イメージや実証例を述べるとともに、大容量EVスマートチャージングシステムの構成と実証例について述べる。

2. 直流配電システムのメリット

2.1 電力の変換回数削減による省エネルギー

直流配電システムは、直流／交流の変換回数を抑えることができるため、エネルギー損失を減らすことができる。

電源側のPV、蓄電池は直流電力を供給する。風力発電（Wind Turbine：WT）は交流電力で発電するが、風況によって周波数が安定しないため一旦直流に変換している。交流で配電する場合は、これらの直流電源を直流／交流変換する必要があるが、直流配電ではこの変換が不要である（図1）。

また、負荷側の電気機器の多くは、コンセント等から受電した交流電力を直流電力に変換して動作しており、この変換の際にエネルギーの損失が生じている。直流で配電すれば、この変換が不要になる。

PV、WT等の再生可能エネルギーと、各種負荷を直流配電で接続することで、電力変換回数を削減し、省エネルギーにつなげることができる。

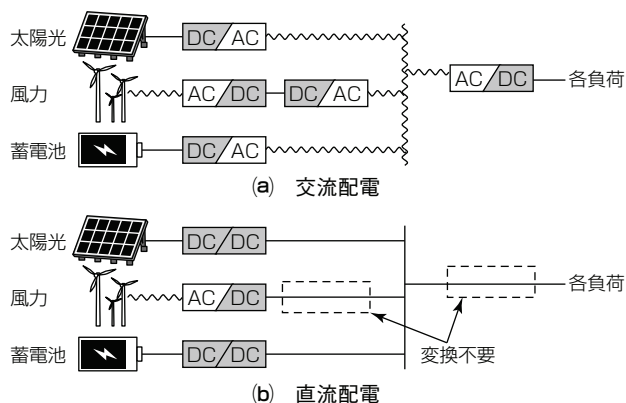


図1. 電力変換回数削減のイメージ

2.2 シンプルな設備構成による高信頼化

直流配電システムは、交流特有の位相や無効電力の考慮が不要であるため、各種電源を連系する際に比較的シンプルな設備構成になる。構成要素が減少することで、設備全体の故障率が下がり、信頼性向上につながる。

位相については、例えば、不足周波数継電器、過周波数継電器等の継電器があり、交流配電特有の保護が必要である。また、交流系統にPV電力等の再生可能エネルギーを接続する場合は、商用電源の周波数と同期させる仕組みが必要である。

誘導電動機等を接続する場合、交流配電では、無効電力対策が必要である。そのため、進相コンデンサ等を設置して、力率改善を行っている。直流配電では、このような交流特有の対策が不要になり、機器数を減らすことができるため、電源の高信頼化や保守性改善等が期待されている。

3. 直流配電システムの課題

今後、直流配電システムが普及していくに当たって、配電機器の小型化・低コスト化、負荷側機器の直流対応等の課題がある。

3.1 配電機器の小型化・低コスト化

直流配電システムが交流配電から置き換わるためには、構築する機器の小型化・低コスト化が必要である。例えば照明等の入切を行うスイッチは、直流配電ではアーク放電の影響が大きく、その対策のため、装置が大きくなる。また、それを収納する筐体（きょうたい）も大きくなり、コストも高くなる。今後、このような課題を解決し、交流配電と同等の機器サイズ・コストにすることが求められる。

3.2 負荷側機器の直流対応

直流配電システムの普及には、“直流入力可能な負荷側機器の充実”“電圧階級の統一”も必要である。この課題が解決されないと、直流配電システム導入による省エネルギー効果を最大限発揮できない。例えば、交流100V入力にしか対応していない機器は、直流配電システムと接続する際に、直流／交流の変換が必要になり、エネルギーロスが発生する。また、電圧階級が統一されていなければ、負荷側機器に合わせた電圧変換を行わなければならない、ここでもエネルギーロスが発生する。これらの課題を解決するため、直流配電の早期規格化と同時に、直流対応機器の開発が求められている。なお、現在IEC(International Electrotechnical Commission)で、直流給配電のガイドライン及び直流電力の品質の規格化が進められている。

4. 直流配電システムの実証⁽²⁾

当社では、“ビル丸ごと直流化”をコンセプトに、中低圧直流配電システム実証棟を建設し、直流配電の安全性・信頼性検証を行っている(図2、図3)。この実証で構築した直流配電システムは、三菱スマート中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”として製品化、商用変換器の容量によって“Standard(100~700kW)”, “Mini(3.5~10.5kW)”の2種類のラインアップを持っている。

また、直流配電システムで供給している電圧に対応していない負荷に合わせて直流電圧の変換を行う電圧変換装置(マイグレーション装置)を持っている。

4.1 D-SMireeの導入事例⁽³⁾

D-SMireeに関してこれまで社内外含めて複数の導入事例があるが、ここでは社内導入事例について述べる。

これまでのD-SMiree Standard(単機100kW)の片方向(順変換だけ)のシステムに対する機能拡張として、交流系



図2. 中低圧直流配電システム実証棟
(香川県丸亀市, 2016年7月稼働開始)

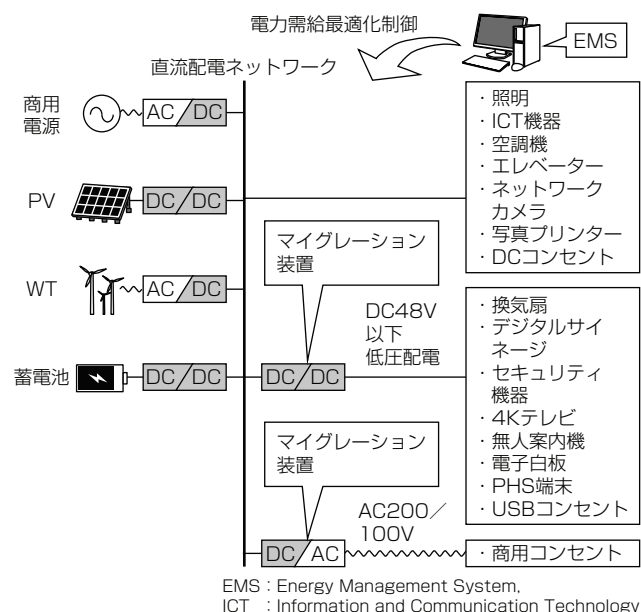


図3. 中低圧直流配電システム実証棟の構成

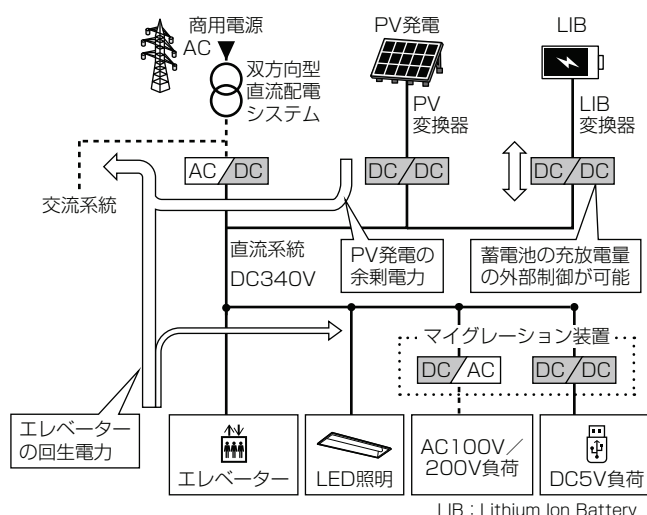


図4. 当社ZEB関連技術実証棟SUSTIEへの導入例

統と直流系統間を双方向に電力融通できるようにした。特長は次のとおりである。

- (1) 交直共存環境で直流系統での余剰電力を交流電力に変換して使用する電力融通や仮想発電所(VPP)への対応が可能

①直流母線電圧の上昇を双方向AC/DC変換器で検出し、自律的に交流系統へPVなどの余剰電力を供給する。

②蓄電池の充放電量を外部制御することによって交流系統と直流系統間の電力融通量を制御可能である。

- (2) システムの故障率が極めて少なくなる冗長化に対応

AC/DC変換器を二重化し、故障時に主従を自動切替え可能である。

- (3) 商用電源停電時に負荷への給電が可能

商用電源停電時でもPV発電及び蓄電池から直流系統内の負荷へ無停電での給電が可能である。

このシステムを当社情報技術総合研究所内のZEB関連技術実証棟“SUSTIE”に導入し、2020年10月から稼働を開始している(図4)。

5. 大容量EVスマートチャージングシステムの実証

世界的に“脱エンジン車”の方向で進んでおり、日本でも2035年までに乗用車新車販売で電動車100%を実現する方向であり⁽⁴⁾、今後は大型車両でもEV化が急速に進展すると予測されている。中でもEVバス、EVトラックは、車載電池の容量が乗用車EVの数倍と大きいことから、VPPの電源としての活用を期待されている。その一方、大型EVの運用に欠かせない急速充電インフラの大量導入には、電力事業者の配電系統が不安定になったり、バス事業者の充電コストが増加したりするなど、新たな課題が想定され、対策が求められている。当社は、これらの課題を解決するために大容量スマートチャージングシステムを構築し、

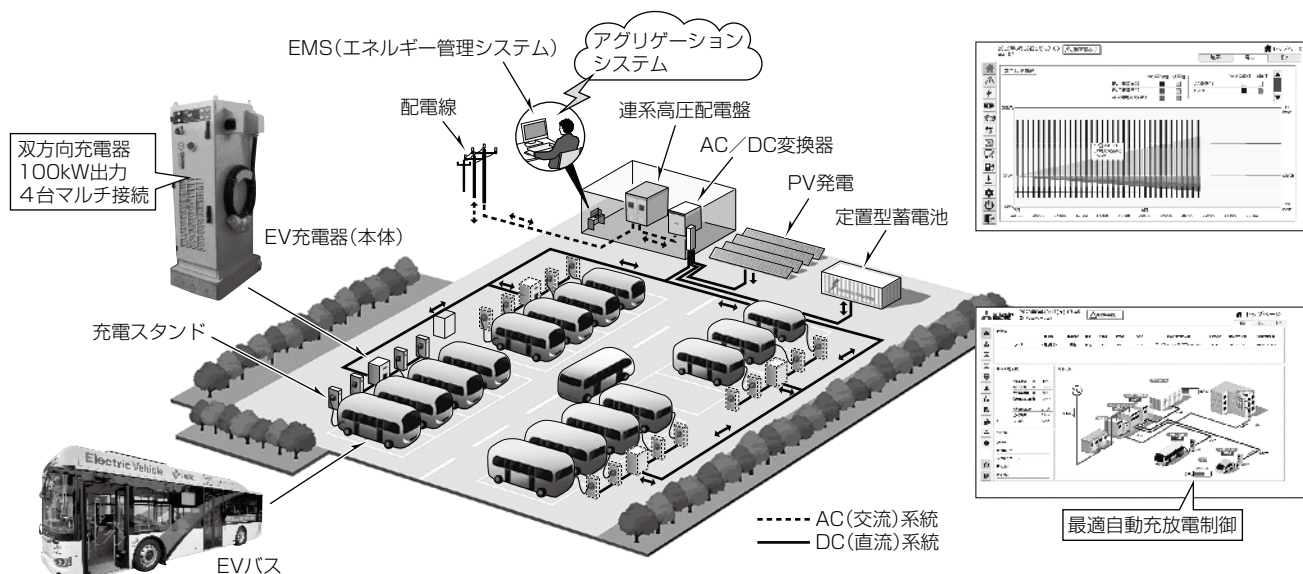


図5. 大容量EVスマートチャージングシステムのイメージ

表1. 大容量EVスマートチャージングシステムの構成

連系系統電圧		3 相交流 6,600V
基本構成	構成	AC/DC変換器(出力: 250kW): 1 台 EV充電器(出力: 100kW): 4 台(蓄電池がない場合は3 台) 蓄電池用変換器(出力: 最大100kW): 1 台 太陽光発電用変換器(出力: 最大100kW): 1 台
	EV接続数	同時に最大16台(蓄電池がない場合は最大12台) 1 台のEV充電器で4 台のバスに接続

電力会社と共同で2020年12月からEVバス用充放電器システムの実証に取り組んでいる(図5, 表1)。

製品化の際に目指している特長は次のとおりである。

(1) 充電計画の自動作成

①大型EVの電池残量や翌日の走行スケジュールからシステムが自動で策定した最適な充電計画に基づいて、EVへの充電を制御することで、受電点でのピーク電力を抑制可能である。配電系統の安定化や充電コスト削減に貢献する。

②PVで発電した電力を併設する定置型蓄電池に充電し、その電力を大型EVへの同時充電時に活用することで、配電系統への更なる負荷抑制が可能である。

(2) 再生可能エネルギー機器との直流連系を実現

PVや定置型蓄電池と直流連系することで電力の変換損失を低減し、システム全体での低消費電力化を実現する。

(3) 大容量蓄電池として利活用

大型EVからの高出力放電にも対応させることで、VPP用電源として活用可能である。また、電力停電時にもシステム内に電力を供給することが可能でありBCP(Business Continuity Plan)対策に有効である。

(4) マルチEV充電への対応

1 台の充電器で4 台の大型EVを充電できる充電器を採用し、システムの低コスト化や省スペース化を実現する。

(5) 他社製充電器への対応

当社製充電器だけでなく、一般に普及している他社製の充電器とも連携し、トータルでの最適充電制御を可能にすることで、システムの柔軟性を向上させる。

6. む す び

省エネルギーの実現、再生可能エネルギーの活用などのため、直流配電が注目されており、当社を含む多数の企業や大学での省エネルギー効果検証が活発に行われている。このような流れを受けて、直流配電システムの普及は今後加速していくと考えられる。一方、直流配電システムが普及し、省エネルギー社会を実現していくためには、負荷側機器の直流化も求められている。

今後は、小型化・低コスト化や安全性・信頼性向上の取り組みを継続するとともに、負荷側機器の直流化に関する標準化への取り組みも強化し、より広範囲での省エネルギー実現に貢献していく。また、EVスマートチャージングシステムによって、拡大が見込まれるEVを単に燃料が化石燃料から電気に変わることによる脱炭素社会への貢献だけでなく、蓄電池(直流電源)と捉えて、再生可能エネルギー電源の出力抑制時やデマンドレスポンス時の調整力としても活用が期待できる。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2020)
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>
- (2) 竹内勇人: データセンター・ビル施設向け中低圧直流配電ネットワークシステム, 三菱電機技報, **91**, No.9, 500~503 (2017)
- (3) 双方向型直流配電システム“D-SMiree Standard”, 三菱電機技報, **95**, No.1, 57 (2021)
- (4) 経済産業省: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>



革新的な製品とソリューションで、“活力とゆとりある社会”の実現に貢献し続けます

エネルギーシステム

三菱電機は、未来のエネルギーインフラをデジタル技術で連携させ、最適にコントロールすることで、“電力の安定供給”を実現します。エネルギーシステムサイトでは、電力エネルギーに関する製品・ソリューションを紹介しています。

<https://www.MitsubishiElectric.co.jp/eig/energysystems/>

主なコンテンツ



“電気の安定供給”“レジリエンス強化”“デジタル化”など、話題のビジネストピック・社会課題などのキーワードから製品・ソリューションを探ることができます。



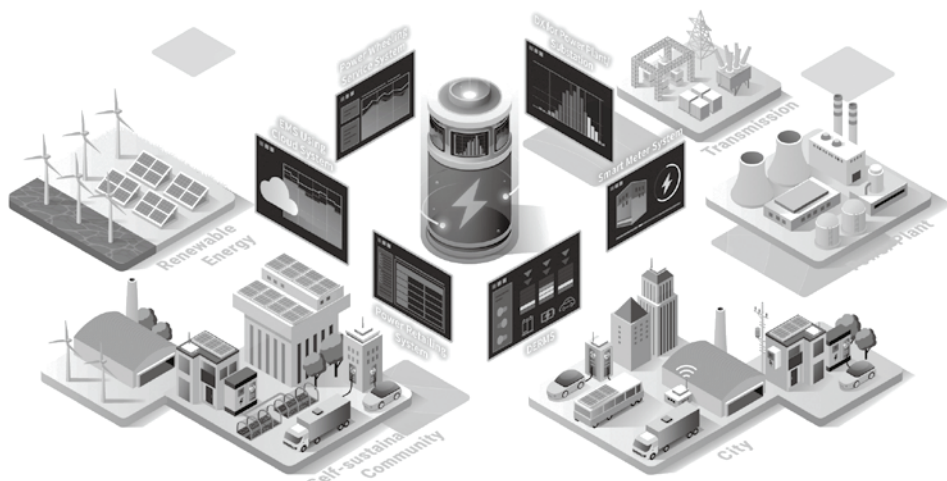
“発電”“送配電”“電力取引・電力小売”など、業種別に当社の製品・ソリューションをご案内しています。



会員様向けソリューション紹介サイト“PoC Lab.”は、お客様とともにアイデアの事業可能性を検証し、事業を創り上げるきっかけを作る場です。

これからのエネルギーインフラで必要とされる機能や課題に対して、当社の強みであるデジタル技術を駆使したソリューションを提供し、お客様のニーズに対するソリューション

提案にも応えていきます。ソリューションのご案内や、ソリューションを具体的に体感できるコンテンツ(デモ動画等)をご用意しています。実際に試して、実現性を確認することも可能です。(ご利用にはサイトから会員登録が必要です。)



▶ 詳しくはWEBサイトでご覧いただけます。

三菱電機 エネルギーシステム

検索

