

三菱電機技報

11

2019

Vol.93 No.11

電力システムにおけるデジタル化最新技術



目次

特集「電力システムにおけるデジタル化最新技術」

電力インフラの高度活用に向けて……………	巻頭言 1
電力システム変革を支えるデジタル技術……………	巻頭論文 2
原子力業界の将来動向を見据えた 原子力向けDXシステム開発コンセプト……………	7
発電プラント向けIoTソリューション……………	11
火力発電プラントの異常兆候検知システム……………	16
仮想発電所を活用した需給調整技術……………	20
電力システム改革に対応した新需給計画・制御への取り組み……………	25
再生可能エネルギー発電出力予測システム……………	29
電力流通分野向けアセットマネジメントシステム……………	33
スマートメータ網を活用したIoT通信基盤システム……………	38
発電機の稼働率向上に貢献する予防保全技術……………	42
発電機の信頼性向上に貢献する予防保全技術……………	46

一般論文

サテライトトカマク“JT-60SA”の超電導コイルの製作……………	50
-----------------------------------	----

Latest Digital Technology in Power Systems

Expectation to Advanced Utilization of Electric Power Infrastructure Soichi Hamamoto
Digital Technologies to Realize Changes of Energy Systems Seiji Tange
Development Concept for Future-oriented Nuclear Digital Transformation Systems Ryuta Inaba, Shinya Machida, Masahiro Kaji, Tadaaki Nagai, Kazufumi Yoshida
IoT Solution for Power Plant Kazuhiro Saito, Shota Tanaka, Ryota Sawamura
Abnormal Sign Detection System for Thermal Plant Kazuhiro Oda, Hiroyuki Tani, Tomoo Sako, Seiji Kondo
Supply-demand Balancing Control Technology Using Virtual Power Plant Kosaku Matsumura, Masashi Igarashi
Approach to New Balancing Scheduling and Control for Power System Reform Isao Matsuda, Kiyoshi Sakurai, Takeshi Suto
Output Forecasting System for Power Generation through Renewable Energy Shin Hanaoka, Shigeru Tonegawa
Asset Management System for Electrical Distribution & Transmission Line of Business Taichi Ide, Makoto Odagiri, Shunji Mori, Nobukazu Kishioka
IoT Communication Platform System with Smart Meter Networks Tsuyoshi Mikoda, Satoshi Kurosawa, Naoki Kaneko
Preventive Maintenance Technology for Improving Operational Availability of Turbine Generator Ryosuke Kawashima, Daichi Goto, Koji Yonekura
Preventive Maintenance Technology for Enhancement of Generator Reliability Kazuaki Ogura, Go Kajiwara

Manufacturing Superconducting Coils for Satellite Tokamak “JT-60SA” Kazuhiro Nomoto, Hiroyuki Horii, Yutaro Itashiki

関連拠点紹介……………	55
-------------	----

特許と新案

「監視制御システム」「データダイオード装置」……………	57
「監視装置及びこれを用いたプラント監視制御システム」……………	58

表紙：電力システムにおけるデジタル化最新技術

三菱電機は、原子力・火力・水力などの発電プラント事業や電力流通・情報システム事業を中心に、既存技術の更なる強化と応用技術開発の両面で事業拡大を進めている。

① 発電機用薄型点検ロボット

19.9mmの薄型構造によって回転子を引き抜かずして発電機内を短期間で点検。また独自の開発(タッピング機構)によって、人間が実施する従来の検査に比べて高信頼性を実現。

② 東北電力向け中央給電指令所システム(中給システム)

電力を安全かつ効率的に需要家まで届けるために、時々刻々変化する電力需要に対応して電力系統を統括運用する。最新の情報通信技術や最適化演算アルゴリズムによって電力系統運用の高度・省力化、信頼性向上を実現。

③ 電力需給管理システムのイメージ図

高度化する新電力(発電・小売事業者)の電力需給業務をサポートするとともに、電力需給の最適化と高度な電力取引を支援し、業務効率化と収益の最大化を実現。



①



②



③

巻/頭/言

電力インフラの高度活用に向けて

Expectation to Advanced Utilization of Electric Power Infrastructure

濱本 総一

Soichi Hamamoto



温室効果ガス排出削減に向けた電源の脱炭素化の拡大、分散型電源の導入拡大による電力ネットワーク次世代化に向けた機運の高まりなどを背景に、電力システムの構造変化が進展しています。電気の工業利用に始まり、配電網の普及など電力インフラの構築によって電気利用の多様化と電気の活用が20世紀の生産性向上の原動力となっていました。電気は輸送が容易で様々な用途に適した量に変換が容易な利点を持ち、大規模電源開発と長距離送電、配電網の整備、電力システムの安定運用をベースにしたエネルギー利用の高度化と効率化が一体となって現在の社会を支えています。引き続き、電気は持続可能な社会の実現に向けた原動力であり、より環境負荷の低いエネルギー活用、発電方式の開発、機器の高効率化、再生可能エネルギーの導入など、特に温室効果ガス削減に適応する技術応用への期待は大きく、電力インフラに常にハードウェア、ソフトウェア両面の先進技術を取り入れていくことは、インフラの高度活用に向けた基盤を成す重要な取組みです。

近年、エネルギーへの関心の高まりも相まって、需要だけでなく供給源としての電気も非常に身近なものとなっていますが、そこには大規模集中と小規模分散を柔軟にシステム統合すること、新たな市場の中で自由度高く運用されるというシステム融合で難易度の高い技術課題が内在しています。電力システム改革での新たな競争原理の導入と国際競争力の強化、市場参加者が多様化する中でエネルギーの安定供給、ICT (Information and Communication Technology) の進化がもたらす社会全体の変化など、新たなパラダイムでは、信頼できる基盤技術に裏付けされた確かな技術導入が期待されています。中でもデジタル化技術は、社会システムの多様性、持続可能性を担保する重要なファクタであり、三菱電機の電力システム製作所は長年培ったインフラ技術とその技術革新によって電力システムの変革を支え、電力の安定供給、持続可能な社会の実現に向けたグローバルな貢献を目指しています。

“国連持続可能な開発サミット”(2015年9月)で採択された、“持続可能な開発のための2030アジェンダ(SDGs)”の開発目標の一つに“全ての人々に手ごろで信頼でき、持

続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する”と示されています。また、同年の12月にフランス・パリで開催されたCOP21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)で、2020年以降の温暖化対策の国際枠組み“パリ協定”が採択されました。これらグローバル目標達成の中核にインフラ技術の革新や既存インフラの価値向上があります。多様なデータがデジタル化され、分断されていた情報システムと現場制御システムの融合によって、想定されていなかったデータの活用が発生します。フィールドデータの統合的管理から関連する情報を抽出して運用へフィードバックする、設備管理の視点から収集データを選定して管理を精緻化するなどの高度化が図られることになります。

高性能な機器・設備、監視制御の導入に加え、インフラを運用するための高度なインフラマネジメントを実現する要素を一体で織り込むことがライフサイクルコスト低減などインフラの質の向上を実現可能にします。設備運用は経済合理性の追求による収益最大化の中で一層重要度を増しています。正確な数値の把握は正しい評価と合理的な対策を導きます。設備資産そのもの、関連する業務、運用・保守を“見える化”するための情報の高度融合、情報量増大による基盤製品の高性能化への対応は、運用の高度化に向けて第一に適応しなければならない課題です。

新たな価値創造を可能にする先進のICTは、分野ごとの合理化や最適化が主たる目的であったものから、多様なモノや状態の膨大な情報を広域に収集、社会規模でデータの蓄積、解析、解析結果の実世界へのフィードバックといった一連のサイクルを実現し、これまでは困難であった又は想定していなかった情報を相互連携させて情報から新たな価値(知見)を生み出す作業を高速に繰り返すことを可能にしていきます。持続可能な社会の実現に向けて、付加価値の高いサービスと設備運用の高度化が両輪となって進展することが期待されます。将来的には電力システムだけでなく、交通、産業の各分野との相互関係を考慮した統合的なシステムが実現され、安全性、安定性、利便性、経済性を兼ね備えたシステムの導入も期待されます。



丹下誠視*

電力システム変革を支えるデジタル技術

Digital Technologies to Realize Changes of Energy Systems

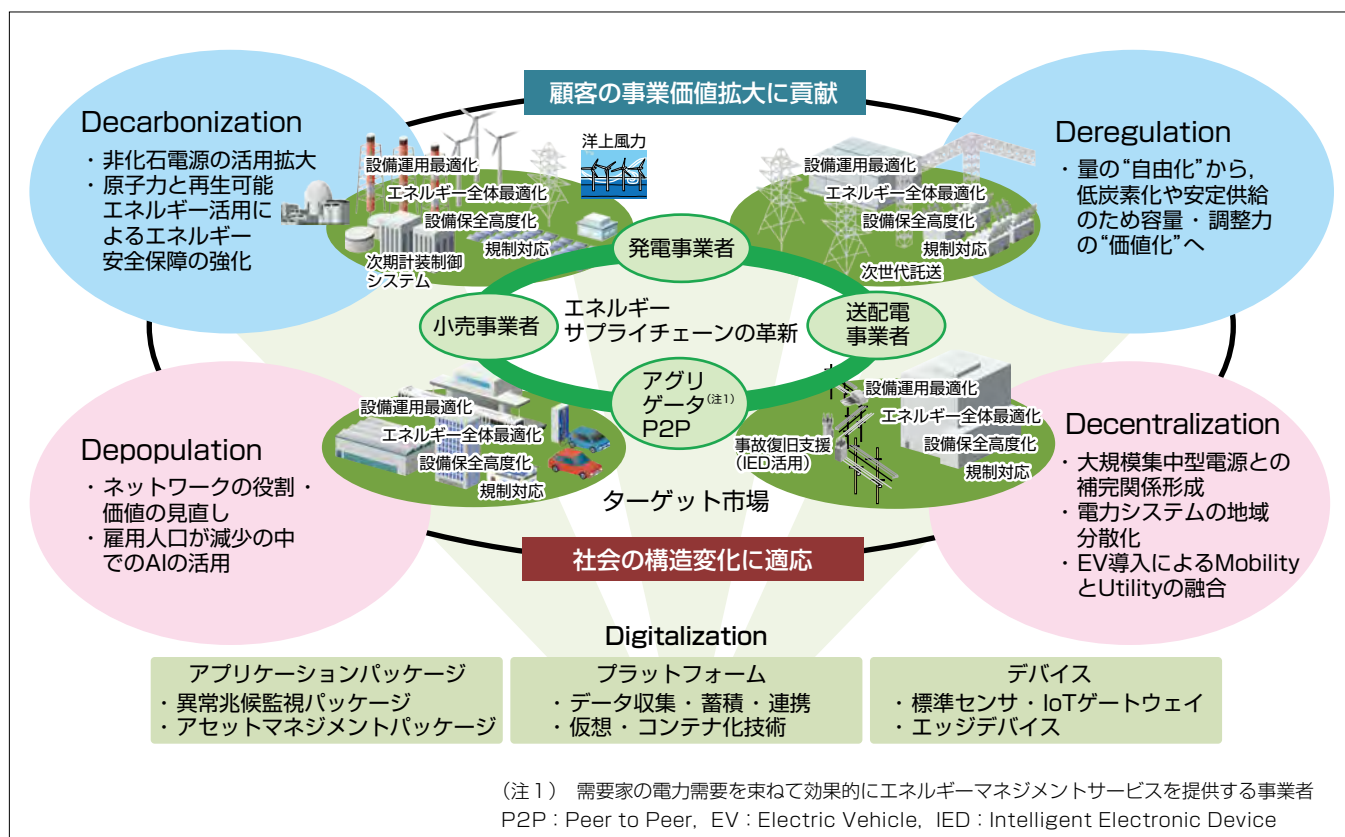
Seiji Tange

要 旨

第4次産業革命の技術革新の核となる“IoT(Internet of Things)技術と人工知能(Artificial Intelligence: AI)”を産業や社会生活に取り入れることによって、様々な社会課題を解決するSociety 5.0の実現に向け、電力システム分野では、安全性の確保を大前提に、安定供給・経済効率性・環境性のバランスを最大限追求する必要がある。

電力システムを取り巻く環境は、世界レベルで急速に進む脱炭素化(Decarbonization)に向けた再生可能エネルギーの導入と同時進行する分散化(Decentralization)、デジタル化(Digitalization)の“3D”に加え、国内で進行中の自由化(Deregulation)、将来の人口減少(Depopulation)など社会構造変化の“5D”のキーワードで概括できる。日本の電気事業は、電気事業の誕生と急激な発展の時代から

現在、自由化による発電・小売の競争市場と送配電の公平性を確保するための市場創設、安定的な電力供給に対応するシステム導入が急速に進行中であり、今後、電力市場の環境変化を象徴する“5D”を意識した更なる変革を迫られている⁽¹⁾。電力システム改革の進展、原子力再稼働の遅れ、再生可能エネルギーの大量導入に加え、電力需要の減少懸念など直面する課題の解決や競争力の強化に向け、新たなデジタル技術は、大きなポテンシャルを持っており、三菱電機は多様化する電力運用のユースケースと最適なビジネスロジックを創出し、当社が持つ幅広い電力技術と最新のデジタル技術を融合させた先進的なソリューションの開発に取り組んでいく。



電力市場の環境変化を象徴する“5D”

電力システムを取り巻く環境は、世界レベルで急速に進む脱炭素化(Decarbonization)と同時進行する分散化(Decentralization)、デジタル化(Digitalization)に加え、国内で進行中の自由化(Deregulation)、将来の人口減少(Depopulation)など“5D”のキーワードで概括できる。当社は、幅広い電力技術と最新のデジタル技術を融合させた先進的なソリューション開発に取り組む、電力システムの変革に貢献する。

1. ま え が き

電力システムを取り巻く環境は、世界レベルで急速に進む脱炭素化(Decarbonization)に向けた再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)の導入と同時進行する分散化(Decentralization)、デジタル化(Digitalization)の“3D”に加え、国内で進行中の自由化(Deregulation)、将来の人口減少(Depopulation)など社会構造化の“5D”のキーワードで概括できる⁽¹⁾。日本の電気事業は、再エネの拡大はもとより、脱炭素化を追求する原子力発電再稼働に向けた安全対策や、高効率火力の活用等を組み合わせたCO₂排出の長期大幅削減に向かっている。これに伴い、小規模な再エネや燃料電池といった分散型電源の導入が進展し、大規模集中型電源との適切な相互補完関係を形成していくと考えられる。また、AI・IoT・ビッグデータ等の活用が急速に進む中、原子力の超安全対策、発電所の保守高度化、送電線の保守省力化等に加え、電力系統の特性変化によって、需要家間によるP2P型電力取引の実現や、地域単位で需要・供給の両面を管理する高度なエネルギーマネジメントの普及等が起こり得る。

本稿では、多様化する電力運用のユースケースと最適なビジネスロジックを創出し、当社が持つ幅広い電力技術と最新のデジタル技術を融合させた先進的かつ将来を見据えた技術開発への取組みについて述べる。

2. 電力システムのデジタル化

2.1 電力システム変革を支えるソリューション

これまでの電力市場では、発電・電力流通・小売・需要家分野ごとの合理化や最適化が主たる目的であったが、デジタル技術の更なる進化は、データの収集、蓄積、解析、解析結果の電力市場へのフィードバック・融合の一連のサイクルを可能にしていく(図1)。電力システムを取り巻く環境は、太陽光・風力など制御困難な再エネの大量導入による電力系統特性の変化に対応する分散型電源を活用した社会インフラの構築と電力の安定供給(ゾーン1)、

電力取引市場の拡大に対応した発電コスト最適化や、複雑化する送配電ネットワークの電圧・周波数の安定制御、電力取引業務などの連携(ゾーン2)、AI、ビッグデータなど最新のデジタル技術を活用した業務革新であるデジタルトランスフォーメーション分野(ゾーン3)に分類され、これらの技術が融合し、スマートグリッド・スマートシティの実現に向けて更なる変革に向かうものと予想される。

また、デジタル技術の進展とともに、情報システム(IT)と運用制御システム(OT)の融合を実現した高度利用システムは、エネルギー分野だけでなく、交通、公共などの各分野で、相互関係を考慮した統計的な計画の立案と適正な運用を実現し、安全性、安定性、経済性を兼ね備えたシステムとして導入が期待されている⁽²⁾。

2.2 電力システム市場環境とデジタル化技術

2.2.1 Decarbonization(脱炭素化)

(1) 非化石電源の活用拡大

2020年以降の温暖化対策の国際枠組み“パリ協定”の採択によって、日本は、温室効果ガスを2030年度に2013年度比26%(2050年度に80%)削減する目標を表明した。

経済産業省が2018年7月に策定した第5次エネルギー基本計画では、2030年度にゼロエミッション電源比率を再エネの導入促進や、原子力発電所の再稼働を通じて、44%程度とする高い水準に置いた⁽³⁾。2016年度は16%程度であり、当社は、原子力発電所再稼働に向けた安全対策推進と再エネの急速な拡大の中、原子力発電所の安全対策工事と並行して、発電所のデータを管理し、AI、セキュリティなどデジタル技術を活用した超安全、保守点検高度化、遠隔監視、業務の自動処理、働き方改革など業務変革

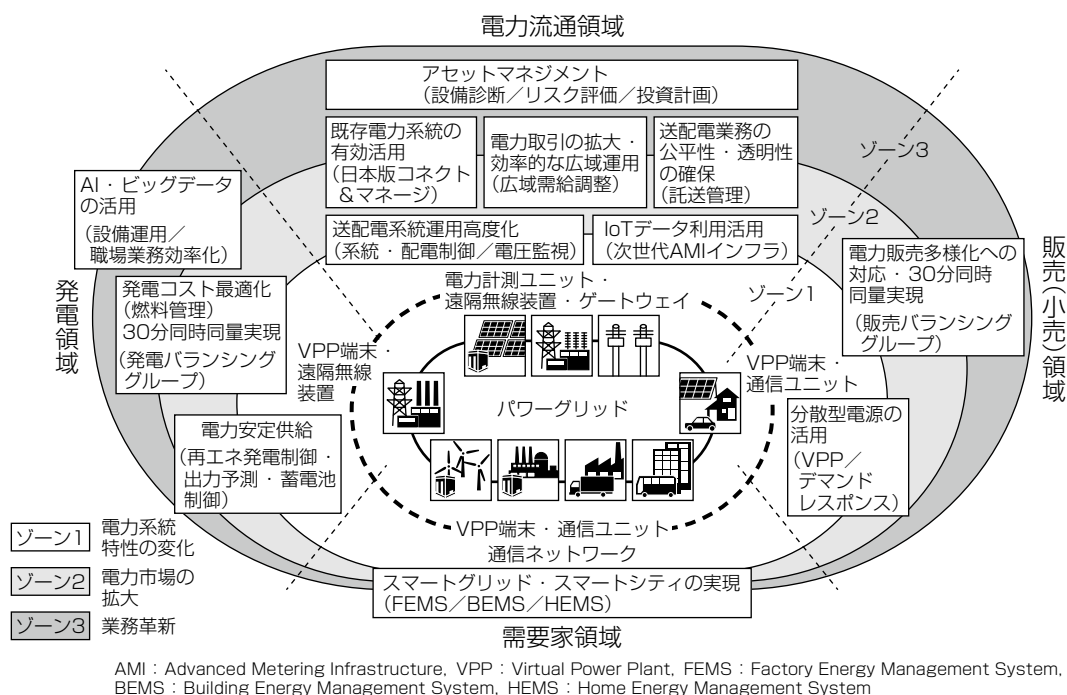


図1. 電力システム変革を支えるソリューション

に貢献するソリューションの開発を進めていく。

また、非化石エネルギー源である核融合エネルギーの早期実現のために国際熱核融合実験炉(ITER)計画と、日本と欧州が共同で実施するプロジェクト(JT-60SA計画)が進行中である。当社は、長年培ってきた超電導マグネットの技術蓄積を生かし、超電導コイルの製作にも取り組んでいる。

(2) 原子力と再エネ活用によるエネルギー安全保障の強化

天候などによって発電出力が変動しやすい太陽光発電や風力発電などの再エネ発電が拡大する中、環境への影響を考慮し、必要な量のエネルギーを、受容可能な価格で安定供給するためには、原子力発電をベース電源としつつ、電力の需給安定を担う予測技術の開発が一層重要となる。この再エネ発電出力予測は、気象予報情報を取り込み、再エネ発電所、又は、エリアごとに発電出力を予測するものであり、過去の予測値と実績値との関係を学習し、自動的に精度を改善するとともに、複数の予測モデル合成によって予測精度向上が可能である。また、再エネ発電出力変化量を推定して、それを相殺するように蓄電池の充放電を制御することで、電力の需給バランスを保ち、安定した周波数の電力を供給できる蓄電池制御技術も重要性を増している(図2)。当社は、これら技術を結集し、再エネの大量導入時でも安定な電力品質を確保し、再エネの導入拡大に貢献していく。

2.2.2 Deregulation(自由化)

(1) 量の“自由化”から低炭素化や安定供給のため容量・調整力の“価値化”へ

現在の電力市場では、計画値に対して不足する“量”(電力量: kWh)を取引するベースロード市場が開設されている。これに加え今後は、国全体で必要となる容量(kW)を取引する容量市場と、需給ギャップの補填や需給変動への対応、周波数維持等のための調整力($\Delta kW + kWh$)を取引

する需給調整市場が新たに創設される。一般送配電事業者は、発電事業者等から調達した調整力によって、電力供給区域の周波数制御、需給バランス調整を行う。2021年4月には、一般送配電事業者が調整力を広域調達するための仕組みとして需給調整市場(需給調整市場システム)の導入が予定されている。また各一般送配電事業者が確保した調整力を、その価格に基づきリアルタイムで広域的に運用する広域需給調整システムの開発が進められており、中給システムでは、調達した調整力の活用によって供給エリアの需給バランス調整と周波数制御を行う。今後、調整力のリソースとして、従来の大型電源に加え、需要家の受電点以下に接続されている分散型エネルギーリソースを用いたDR(Demand Response)や、それに系統接続の発電設備と蓄電設備を加えたVPPが需給調整市場に参入することで市場が活性化することが期待されている。

2.2.3 Depopulation(人口減少)

(1) ネットワークの役割・価値の見直し

臨海部に立地する大型発電所を前提とした従来型の送電ネットワークは、大規模再エネの適地からの送電に適したものとし、配電ネットワークは、小規模再エネやEVを含む蓄電池を始めとした分散型リソースとの最適構成が形成されていく。一方で、小売電気事業者は、電力会社が構築した送配電設備を利用して需要家に電気を供給しており、送電線の設備利用料金(託送料金)を送配電事業者に支払う必要がある。現行の託送料金制度は、送配電事業者の人件費、設備投資、経費等を見通した原価によって算定されており、将来の人口減少など電力需要の拡大が不透明な中、送配電インフラ設備のスリム化、設備のコンパクト化が求められてくるものと想定される。このような社会環境変化の中、電力ネットワークを含む公共インフラへの無線技術の活用が期待される。当社では、各電力会社管内のスマートメータシステムで構築された広域・大規模ネットワーク

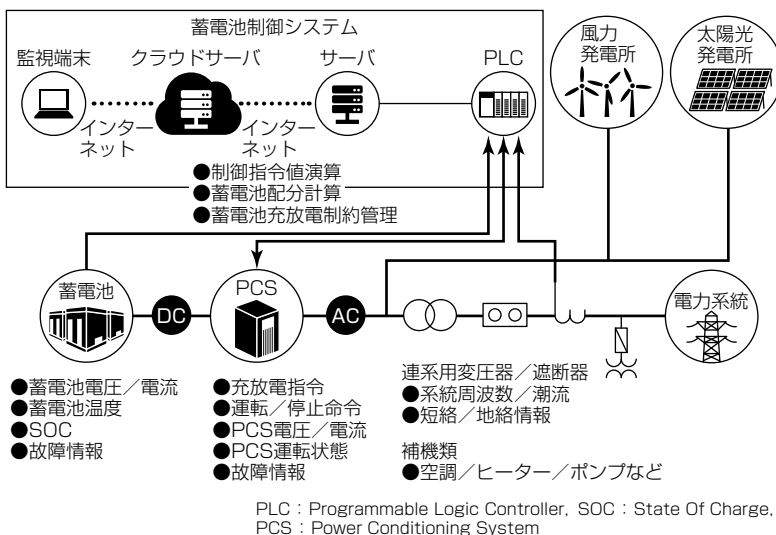


図2. 蓄電池制御システム構成

を電力システムだけでなく、社会インフラとして活用するためのIoT無線端末、及びIoT通信基盤システムを開発している。ガス・水道メータ向けの自動検針サービスやインフラ設備向けのセンサ情報を用いた監視・制御、各種データを収集・蓄積・分析することによる業務効率化、設備投入計画への適用といった様々なビジネス活用にご貢献できるものと考えている。

また、将来の送電・配電ネットワークの整備や、発電所設備を含む電力設備の高経年化に伴う保守・更新投資を見据えた最適な設備保全投資など経済合理性の追求での収益最大化が一層重要度を増すものになる。設備資産そのもの、関連する業務、運用・保守に見える化し、設備の状態・リスクに基づく設備保全投資計画と運

用計画など経営支援としてのアセットマネジメントシステムの導入によって、一層の業務革新が期待される。

(2) 雇用人口が減少の中でのAIの活用

デジタル技術の発展や少子高齢化を背景とした人手不足などの影響によって、あらゆる産業で自動化が進んでいる。しかし、新たな設備やシステムは費用対効果の面で円滑に導入が進まない状況が生じやすい。運用設備の重要度に加え、熟練技術者からの技術継承問題への対応、経済活動での必須の価値としての認識が広がることと、標準化や測定機器設置コストの低減とともに付加価値の高いサービスを伴いその設備活用と運用の高度化が両輪となって進展することが期待される⁽²⁾。従来の大型火力発電所でも、その役割を電力量供給源から調整力供給源にシフトさせているため、電力安定供給とともに運用の合理化、保全コストの最小化が求められており、AIを活用した設備状態の把握と予測を効率的かつ正確なものにすることが重要になる。

2.2.4 Decentralization(分散化)

(1) 大規模集中型電源との補完関係形成

小規模な再エネや燃料電池などの分散型電源の導入が進展し、今後、大規模集中型電源との適切な相互補完関係を形成していくと考えられる。火力発電には自然変動電源の補完等、電力安定供給への貢献が求められており、高効率化・低炭素化と並んで発電設備の安定稼働が重要な課題となっている。これに応じるため火力発電プラントは運転体系を多様化させており、発電機を長期間連続運転せずに一日の中で必要な時間だけ運転(Daily Start and Stop : DSS)させる運用になるため、起動停止回数は従来と比べて確実に増加することが見込まれ、特に回転子強度の点での信頼性向上が不可欠となっている。大規模三次元解析技術の導入によって、起動停止に対する低サイクル疲労強度評価の高精度化が実現され、通常のベースロード運用で想定している起動停止回数を大きく上回る起動停止による繰り返し負荷に対して、より信頼性の高い構造を適用することが可能になった。また、発電設備稼働率の維持・向上に貢献する予防保全技術開発として、タービン発電機の点検ロボット及び発電機の異常兆候早期検出を目的としたオンライン部分放電監視システムを開発し、更なるアフターサービス事業拡大を目指す。

(2) 電力システムの地域分散化

再エネの普及加速を目的として2012年に制定された固定価格買取制度(FIT)によって、住宅用太陽光発電パネルの設置や数多くの太陽光発電所が建設されたが、2019年末から太陽光発電の余剰電力を売電してきた一般家庭の買取期間が順次終了し、買取期間を終えたユーザーは、蓄電池などと組み合わせた“電力の自家消費”又は自らの電

気の売り先や価格決定による“余剰電力の売電”のどちらかを選ぶ必要がある。今後も分散電源の更なる導入拡大が加速する中で、発電・送配電システムと需要家エリアに新たに発生する分散エネルギーが各電力市場で有機的に連携する電力システム地域分散化(図3)での対応力への期待が高まっている。当社は、VPPソリューションを通して、電力網に分散している電源を統合制御した最適運用を実現していく。

(3) EV導入によるMobilityとUtilityの融合

EVの普及も世界規模で確実に進んでおり、電力貯蔵装置を抱えるEVは、従来型の電力供給システムを大きく変貌させるポテンシャルを持っており、その有効活用が求められている(図4)。また、太陽光発電、蓄電池、EVが普及すると、需要家が電気を売る側にもなる“プロシューマー”が出現すると予想され、ブロックチェーン技術によって、電力の利用状況が瞬時に分かり、需要家同士が電力を取引する新しい市場が期待されている。

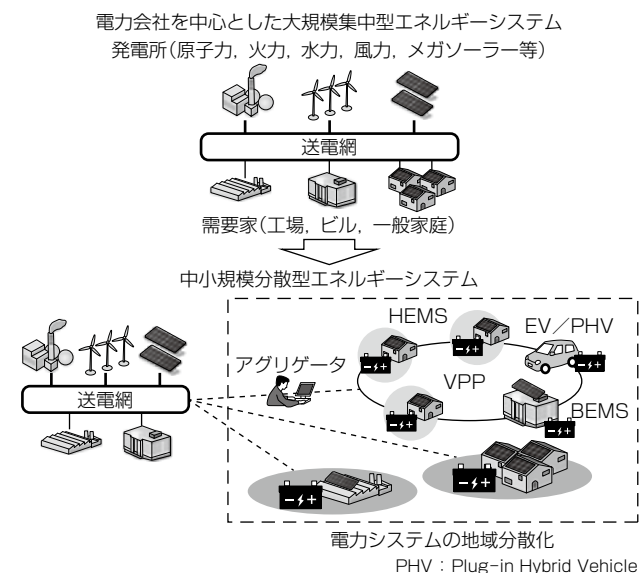


図3. 電力システムの地域分散化

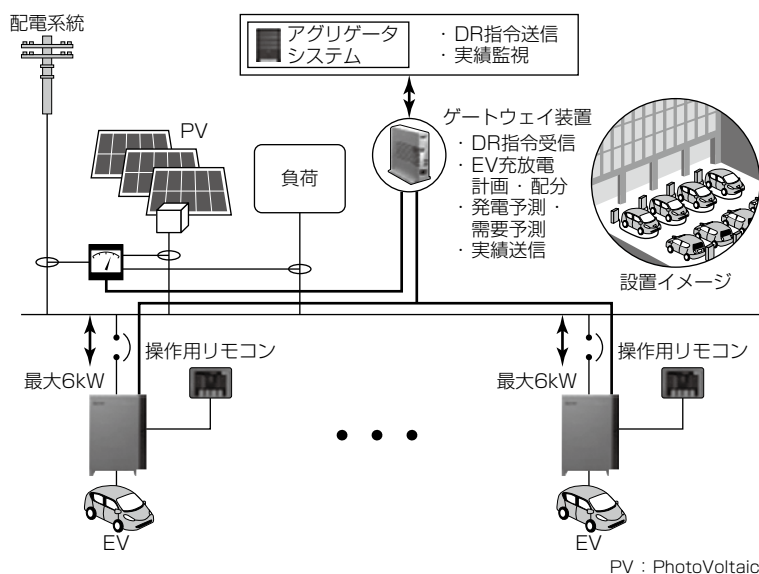


図4. V2G(Vehicle to Grid)実証例

3. Digitalization(デジタル化)

3.1 デジタルトランスフォーメーション(DX)

経済産業省のDXレポートでは、あらゆる産業で、新たなデジタル技術を活用してこれまでにないビジネス・モデルを展開する新規参入者が登場し、デジタル・ディスラプションと呼ばれるゲームチェンジが起き、どのようにビジネスを変革していくかの経営戦略そのものが不可欠であると提唱している⁽⁴⁾。電力システムへのDXの目的は、新規事業創出と、デジタル技術による設備運用の経済合理性追求や省人化・高効率化による収益最大化である。近年、電力各分野の情報を広域に収集し、ビッグデータ解析を行った上で、設備状態の見える化・予測・最適化や業務省力化にAIが急速に実用化されつつあり、当社AI技術ブランド“Maisart(マイサート)”を適用した新規事業創出と収益最大化に資する運用高度化を実現する。

3.2 電力システムへのAI適用

3.2.1 時系列データ分析技術

原子力発電所の超安全運用や火力発電の環境問題に対応するための運転最適化や省エネルギー化への対応、保安技術の向上などの課題を解決するため、デジタル技術の導入による設備稼働率向上や運転最適化が進められている。当社のビッグデータ分析技術の一つとして、時系列比較計算量を削減し、検知対象データからの外れ値検知をリアルタイムに実現する類似波形認識技術がある⁽⁵⁾。これまでのようにセンサの波形データの全てを見比べて異常兆候を見つけるのではなく、波形データを幾つかの典型的なパターン(クラスタ)に分類・学習し、そのパターンとの違い(外れ度合い)だけを抽出することで、少ない演算回数で素早く異常兆候を見つけだすことが可能な技術であり、発電機の稼働中の運用データに対して診断技術を高度活用した予防保全に適用している(図5)。

3.2.2 画像解析技術

送配電設備の“低廉で良質な電気を安定的に届ける”を将来にわたって維持するため、保全業務の更なる安全と業務効率化・高度化を図る必要がある。画像解析技術は“現場

業務高度化”と“データ見える化”に位置付けられ、ヘリコプタ、ドローン、車両巡視など情報収集手段が多様化する中、少ない演算量、メモリ量で学習用画像生成を効率化したコンパクトなAIが求められている。また、特徴量抽出(設備の特徴を数値化して異常を抽出)と深層学習(設備の正常・異常画像を学習させて異常を抽出)をする複数のAI技術を組み合わせたハイブリッドな画像解析による精度の高い電力設備の異常抽出によって、保全業務の効率化を実現する。

3.2.3 エッジコンピューティング

コンパクトな波形解析や画像解析AIを現場のエッジ領域に適用することによって、事故予兆検知や、災害現場等のリアルタイム解析への広がり期待できる。設備の最適運用や異常兆候検知を目的とした波形解析AI・画像解析AIを発電プラントの発電機、ボイラなどの現場設備(エッジ端末)や送配電設備の変電所・配電線情報を収集するIED(Intelligent Electronic Device)に搭載することによって、収集された多数の運用データをリアルタイムに処理し、運転効率向上や故障予知など経済合理性を追求する支援機能を情報システム(IT)で分析・予測するなど、運用制御システム(OT)と融合した電力システムによって、設備運用の経済合理性追求や省人化・高効率化による収益最大化が期待できる。

4. む す び

当社は、発電機や発電プラント監視制御システムなど、発電所の中核となる設備や、電力系統を監視・制御する機器やシステム、及び電力市場の変革と効率的運用をサポートするシステムなど、発電から送変電、配電に至る全てのフェーズで、電力インフラの発展に大きな役割を果たしてきた。さらに、エネルギーに関連する技術を高度に発達させた加速器や超電導の分野でも、豊富な経験と先端技術を持っている。クリーンエネルギーの需要が高まる中、デジタル技術を活用した電力システムの変革に向け、当社が持つ幅広い電力技術とデジタル技術を融合させた先進的なソリューションを提供していく。

参 考 文 献

- (1) 竹内純子、ほか：エネルギー産業の2050年 Utility 3.0へのゲームチェンジ、日本経済新聞出版社(2017)
- (2) 濱本総一：インフラの変革を支える技術、三菱電機技報、90, No.11, 604~608(2016)
- (3) 経済産業省：第5次エネルギー基本計画(2018)
- (4) 経済産業省：DXレポート～ITシステム「2025年の崖」の克服とDXの本格的な展開～(2018)
- (5) 中川路哲夫：“Connected Industries”の実現に向けたFA分野へのAI技術適用、三菱電機技報、92, No.4, 216~220(2018)

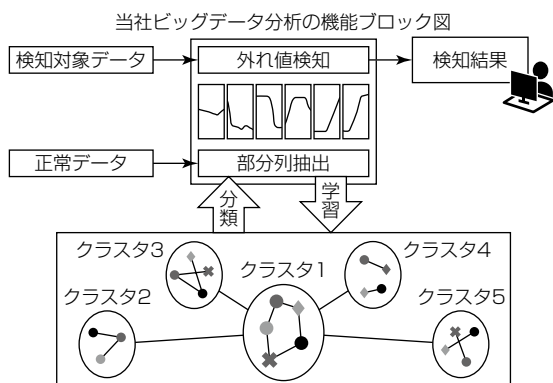


図5. 波形の類似度を算出する時系列データ分析

原子力業界の将来動向を見据えた 原子力向けDXシステム開発コンセプト

稲葉隆太* 永井貞光*
町田慎弥* 吉田和史**
梶 正弘*

Development Concept for Future-oriented Nuclear Digital Transformation Systems

Ryuta Inaba, Shinya Machida, Masahiro Kaji, Tadaaki Nagai, Kazufumi Yoshida

要 旨

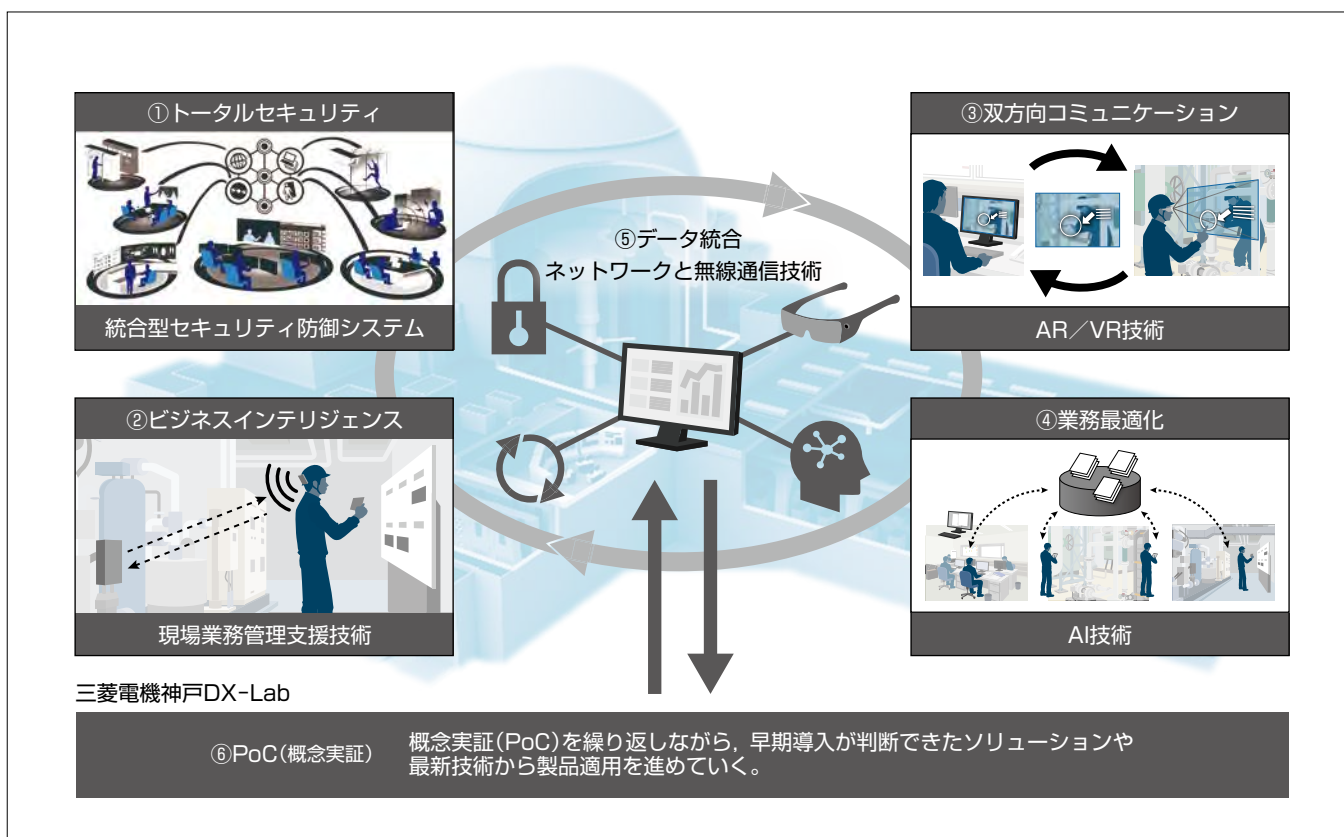
エネルギー分野では、電力自由化、発送電分離、再生可能エネルギー事業者の参入等、事業環境の変化点を迎えており、新規参入を含めた事業競争の激化が予想される。また、原子力業界では、更なる安全性向上に向けた新検査制度の試運用が開始され、電力事業者は炉監督プロセス(Reactor Oversight Process: ROP)に対応した自主的な安全対策の強化に取り組んでいる。

一方、IT業界では、AI(Artificial Intelligence)、ビッグデータ分析、AR(Augmented Reality)／VR(Virtual Reality)等の先端ICT(Information and Communication Technology)／IoT(Internet of Things)技術が急速に浸透し、クラウド技術を活用したサービス中心のビジネスへ

の移行など、ビジネスモデルの変革、事業構造のパラダイムシフトが世界的に加速している。このような状況で、経済産業省は国内企業の競争力低下の懸念から“DX(Digital Transformation)レポート⁽¹⁾”を公開し、各企業に対して、新たなデジタル技術を活用してビジネスモデルを創出・柔軟に改変するDXへの取組みを促している。

三菱電機は、これらエネルギー分野を取り巻く社会変化、技術変化等の未来予測を行い、原子力事業でのDXの目指す姿を構想し、PoC(Proof of Concept: 概念実証)^(注1)に向けた施設を整備して、DXシステムの開発を推進している。

(注1) 新たな概念やアイデアの実現可能性を示すために、簡単かつ不完全な実現化を行うこと。



原子力DXの全体構想

発電所の各種業務にビッグデータ分析、AI、AR／VR等の先端ICT／IoT技術を導入し、六つのコンセプトで原子力DXの実現を目指す。DX実現に向け、技術開発検証、PoCの対応を可能にする施設“三菱電機神戸DX-Lab”を構築し、短期間でのDXソリューションの有効性評価を可能にするとともに、評価結果を迅速にフィードバックできる開発環境を実現する。

1. ま え が き

エネルギー分野では、電力自由化、発送電分離、再生可能エネルギー事業者の参入等、事業環境の変化点を迎えている。また、原子力業界では、更なる安全性向上に向けた新検査制度の試運用開始によって、電力事業者は自主的な安全対策強化に取り組んでいる。

当社はこれまで、発電所電気計装設備での実績をベースとし、ICT技術等を活用した発電所の業務を支援するシステムを提供してきた。本稿では、これらの経験を踏まえ、エネルギーを取り巻く社会変化、技術変化等から原子力事業の未来予測を行うとともに、当社が考えるDX構想実現に向けた技術開発コンセプトを述べる。

なお、DX推進に当たり、原子力運転制御に関する領域は安全機能への影響の考慮等の計装制御に対する検討要素が多いため検討対象外とし、保全業務等の業務を対象にして検討を行った。

2. 原子力事業の未来予測

本稿での“未来”は、経済産業省のDXレポートに記載の2025年に設定した。未来予測には“インサイドアウト”と“アウトサイドイン”の二つのアプローチがある。インサイドアウトでは“既知の領域”（事実）から仮説を立てて未来を予測し、アウトサイドインでは“不確かな領域”（不確実性）を洞察して未来予測を行う。一般的に、インサイドアウトは経営計画等に用いられ、アウトサイドインは新事業構想、経営リスク抽出等に用いられる。

今回は、現実的で精度の高い予測を行うためインサイドアウトでのアプローチとし、マクロ環境分析のフレームワークとしてSTEEPを用いて分析を行った(図1)。

2.1 STEEP

STEEPは、事業を取り巻くマクロ環境を五つの観点で分析し、未来予測や課題抽出の前提条件を分析する手法(表1)である。

2.2 STEEPの分析結果から導出する原子力事業の課題

原子力発電は経済産業省のエネルギー基本計画⁽²⁾によって“重要なベースロード電源”として位置付けられており、2030年のゼロエミッション電源比率達成に向け、安全性の確保を大前提として一定の役割を果たしていく必要がある。このため、STEEPによって観点別の未来予測を行い、原子力事業の継続に向けた課題を抽出した(表2)。3章以降に、これらの課題についてのDXソリューションを述べる。

3. 原子力事業のDX構想

この章では、DX推進に向けて2章で検討した原子力事業の課題を類似性の観点で六つに分類した上で、DXコンセプトとして整理した結果(表3)について、具体的な利用

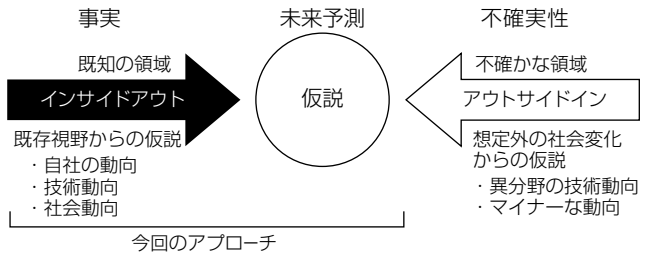


図1. 未来予測のアプローチ

表1. STEEPによる分析の観点と概要

観点	概要
Society (社会的要因)	人口の推移、ライフスタイル、文化、教育制度、ものの考え方の変化、競合の変化、世間の風潮
Technology (技術的要因)	自社の業界に影響のある技術の動向(新技術の誕生、技術革新、普及度)
Economics (経済的要因)	世界や日本全国、地域レベルでの景況(成長率、株価、物価変動、失業率)
Environment (環境的要因)	環境問題(温暖化、砂漠化、空気・海洋汚染)、エネルギー問題
Politics (政治的要因)	政界動向(政権交代、政府の方針転換)、自社の業界に影響のある法規制、施策

表2. STEEPの結果と導出した原子力事業の課題

STEEP観点	未来予測	課題
Society (社会的要因)	・働き方改革による労働時間の減少 ・少子高齢化に伴う働き手不足・海外人材採用 ・発電所近辺の過疎化 ・デジタルネイティブの社会進出 ・国際間紛争等によるテロ行為の増加 ・ビッグデータ社会の到来	・組織のダイバシティ化(組織の多国籍化等) ・働き手不足解消 ・テロ対策としてのセキュリティ強化 ・発電所のビッグデータ化とデータの利活用
Technology (技術的要因)	・デジタルツイン(実世界の設備をデジタル情報で再現)の普及 ・AI、RPAによる業務の省人化・合理化	・デジタル技術活用の利便性と安全性の両立 ・AI、RPA技術の適用効果の早急な見極め
Economics (経済的要因)	・モノ消費からコト消費への時代変化によるクラウドサービス産業の更なる台頭	・外部機関サービスの活用(業務クラウド化等)
Environment (環境的要因)	・SDGs推進による環境に配慮した事業活動	・事業活動で利用する森林資源や海洋資源保護への対策
Politics (政治的要因)	・安全性向上を目的とした原子力規制強化 ・発電事業への海外事業者の参画	・定期検査期間の長期化 ・電力コストの競争力強化

RPA: Robotic Process Automation, SDGs: Sustainable Development Goals

表3. 原子力DXのコンセプトと課題

DXコンセプト	課題
①トータルセキュリティ 物理セキュリティ、サイバーセキュリティを統合的に管理し、発電所のセキュリティ強化を実現	・テロ対策としてのセキュリティ強化 ・デジタル技術活用の利便性と安全性の両立 ・外部機関サービスの活用
②ビジネスインテリジェンス(BI) 変化の激しい市場で電力販売量を安定的に確保するために発電コスト構造改革を実現	・電力コストの競争力強化 ・定期検査期間の長期化
③双方向コミュニケーション 遠隔地や技術レベルの異なる人員間で紙資源を不要とした共通理解の促進を図るコミュニケーションを実現	・組織のダイバシティ化 ・事業活動で利用する森林資源や海洋資源保護への対策
④業務最適化 日常的に遂行する業務の自動化・機械化等による最適化を実現	・働き手不足解消 ・AI、RPA技術の適用効果の早急な見極め
⑤データ統合 プライオリティ・用途に応じたデータ管理(収集・格納)を実現	・発電所のビッグデータ化とデータの利活用
⑥PoC 最新技術の早期導入判断を支援する検証環境を実現	・AI、RPA技術の適用効果の早急な見極め

シーンを含めて述べる。

3.1 トータルセキュリティ

原子力発電所では、原子炉等規制法等で要求される核物質防護として、物理セキュリティ対策(フェンス、カメラ、侵入検知器等)を実施しており、当社はセキュリティ製品を納入している。また、昨今サイバー攻撃の脅威が増しており、制御システムのネットワーク、エンドポイントに対するサイバーセキュリティ対策の重要性が高まっている。今後、内部脅威者の存在を前提としたセキュリティ強化が必要と考えるため、物理セキュリティとサイバーセキュリティを統合した高度で合理的な監視・運用の実現が重要である⁽³⁾。要素技術として、統合型セキュリティ防御システム(4.1節)の製品開発を進めている。

3.2 ビジネスインテリジェンス

原子力発電所は、電気事業法によって約1年に1回の定期検査が義務付けられており、電力事業者は相応のリソースを投入して対応している。競争力を高めるには、発電コストの上昇を防ぐ必要があり、定期検査期間を合理的に短縮し、稼働率を上げることで発電コストに寄与できると考える。そのため、定期検査全体工程の実績を的確に把握し、短縮のPDCA(Plan Do Check Action)サイクルを回すことが重要である。要素技術として、現場業務管理支援技術(4.2節)の製品開発を進めている。

3.3 双方向コミュニケーション

原子力発電所は広大な敷地を持っており、発電所内で遠隔によって映像や音声を共有することで、現場作業員と情報を共有したり、デジタルツイン技術の応用によるベテランから若手作業員への属人的な技術伝承を拡張現実(AR)や仮想現実(VR)技術で統一された技術伝承を実現することで安全性向上に寄与できると考える。要素技術として、AR/VR技術(4.3節)の製品開発を進めている。

3.4 業務最適化

原子力発電所では、業務合理化を進めつつも、安全維持を継続的に行うためのリソースを投入している。今後、規制要求の更なる高度化に伴う作業増、働き手不足による従業員減少等が予測される中、機械化・自動化による業務最適化はより重要になる。要素技術の一つがAI技術であり、当社原子力部門では映像監視、設備異常兆候監視、自然言語処理の3分野でAI技術(4.4節)を応用した製品開発を進めている。

3.5 データ統合

DX推進の実現に当たっては、3.1節から3.4節の各DXコンセプトに関し、インプット及びアウトプットのデータをリアルタイムに収集し、有機的に連携することが求められる。また、今後現場に

タブレットやウェアラブルデバイス等の可搬型機器の採用が想定され、セキュリティを確保した無線通信の導入が重要になる。要素技術としては、ネットワーク/無線通信技術(4.5節)が必要となる。

3.6 PoC

DXはIoTやAI等新しい概念に基づくソリューションであるため、改良を繰り返すことで要求仕様を固めていくことが多く、当社が原子力分野で適用してきたウォーターフォール型開発が適さない場合もある。新しい概念をソリューション化するための重要なプロセスとしてPoCがあり、当社ではPoCを繰り返しながら、早期導入が判断できたソリューションや最新技術から製品適用を進めていく計画であり、PoC検証に向けて三菱電機神戸DX-Lab(4.6節)を整備している。

4. 当社の取組み

この章では、原子力DXに向けた技術開発の取組みについて述べる。

4.1 統合型セキュリティ防御システム

当社ではこれまで、データダイオード装置や記憶媒体チェック装置等のセキュリティ装置を製品化している。現在は、制御システムに対する高度なセキュリティ攻撃に備えて、物理的な侵入痕跡(カメラ画像、入退室履歴等)と電子的な侵入痕跡(操作ログ、認証等)の相関を分析し、サイバー物理複合攻撃を未然に検知するアルゴリズムの開発及び検知後の対応支援機能開発に取り組んでいる。これによって、セキュリティ攻撃の早期検知、分析、対応、封じ込め、復旧を支援する(図2)。

4.2 現場業務管理支援技術

定期検査の合理的な短縮実現に向け、作業員ごとの位置、作業進捗状況等を管理・分析することによって、工程や人員構成を最適化する機能の開発に取り組んでいる(図3)。

4.3 AR/VR技術

スマートグラス上にマニュアルや指示事項を表示するAR技術の開発を開始した。また、次世代の中央制御室の配置検討にVR技術を活用するとともに、デジタルツインを見据えた技術開発に取り組んでいる。

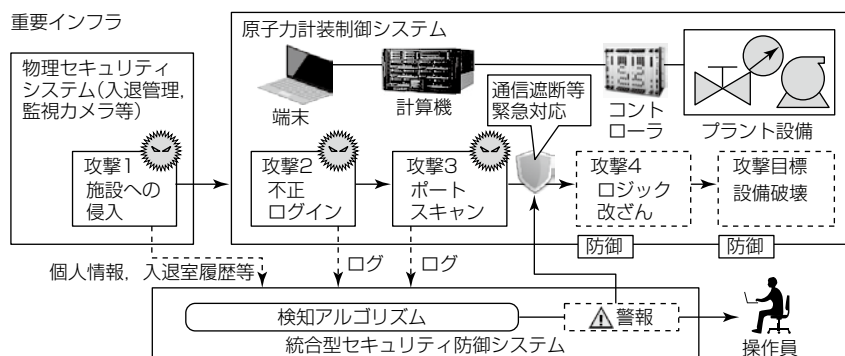


図2. 統合型セキュリティ防御システム

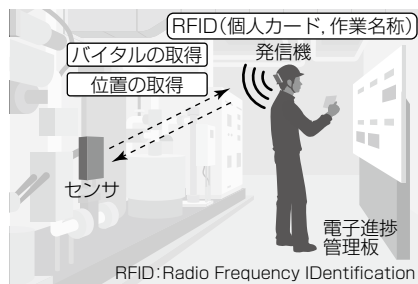


図3. 作業員管理のイメージ

4.4 AI技術

当社は当社AI技術ブランド“Maisart(マイサート)”の下、映像、時系列データ、テキストデータの分野のAI技術開発に取り組んでいる。

4.4.1 映像

映像データについては、主にセキュリティ監視及び品質確保の目的で利用されており、現在人手で行っている映像の判定・識別に関わる業務をAIで支援する技術の開発に取り組んでいる。AIの特性上、人手による作業を完全に代替することは難しいが、作業者の負担軽減という目的は達成できると考えており、用途・目的に応じた支援システムの開発に取り組んでいる。

4.4.2 時系列データ

時間管理保全から状態監視保全への移行に向け、プラントパラメータ(水位、圧力、温度等)について、過去の正常波形やパラメータ等のマッチングを行うことで、異常兆候の自動検知を行うシステムの開発に取り組んでいる。

4.4.3 テキストデータ

原子力分野では、安全性向上に向け、現場のレポートを広範囲に収集・評価することが求められるようになり、現場レポートの分析処理の負担が高くなることが想定される。当社原子力部門では、高い推論精度を維持したまま演算量を大幅に減らす特長を持った当社独自のニューラルネットワークによって現場レポートの重要度等を高速かつ高精度に一次スクリーニングすることで、分析処理を支援する技術の開発に取り組んでいる(図4)。

4.5 ネットワークと無線通信技術

原子力発電所では、無線ネットワークはEMC(Electro-Magnetic Compatibility)の観点からプラント運転に関連する環境下では導入されていないが、可搬型機器の導入に伴い、無線に対応した通信技術の導入が求められている。当社では、スマートメータシステム向けの無線ネットワーク技術や通信の暗号技術等を活用したDXシステムのネットワーク開発に取り組んでいる。

4.6 三菱電機神戸DX-Lab

PoCの実施設備として当社電力システム製作所内に“三菱電機神戸DX-Lab”を構築する。ここにPoC用システムを構築することで、顧客に実際に操作してもらい、効果

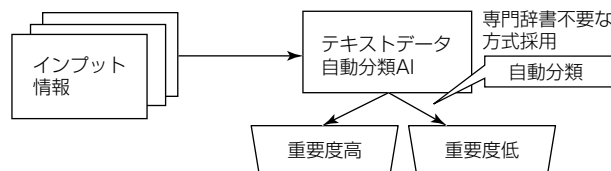


図4. テキストデータ処理のイメージ

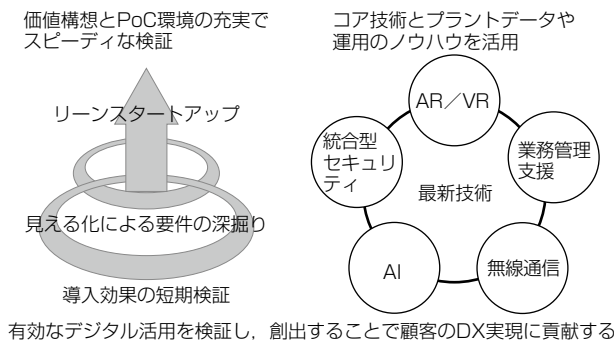


図5. 三菱電機神戸DX-Lab検証構想

の確認を可能にする。また、機能追加等の改良を行うことで最新技術のスピーディな適用推進を可能にする。DX-LabではPoC用システムを繰り返し進化させるプロセスが重要であり、IT業界で普及しているスクラム等アジャイル開発手法の中から原子力DXに適した開発プロセスを適用する。“三菱電機神戸DX-Lab”の検証構想を図5に示す。

5. むすび

エネルギー分野では、事業環境の変化によって、DX等による業務改善・生産性向上がより一層重要になると考える。また、原子力分野では、安全性向上に向け、規制対応や自主的な取組みによって業務負担が増加する傾向にある。

これらの背景から、原子力DXによる業務変革で安全性向上と生産性向上を両立させることが重要である。当社は総合電機メーカーとして他産業分野で先行するDX事例やICT技術を持っている強みを生かして、原子力分野に応用するとともに、三菱電機神戸DX-Labを活用して顧客ニーズとのマッチングを図っていくことで、原子力事業への貢献を継続していく。

参考文献

- (1) 経済産業省：DXレポート(2018)
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/20180907_report.html
- (2) 経済産業省：エネルギー基本計画(2018)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf
- (3) 稲葉隆太、ほか：原子力計装制御システムのサイバーセキュリティ対策の現状と展望、三菱電機技報、90, No.11, 625~628(2016)

発電プラント向けIoTソリューション

西都一浩*
 田中将太*
 澤村亮太*

IoT Solution for Power Plant

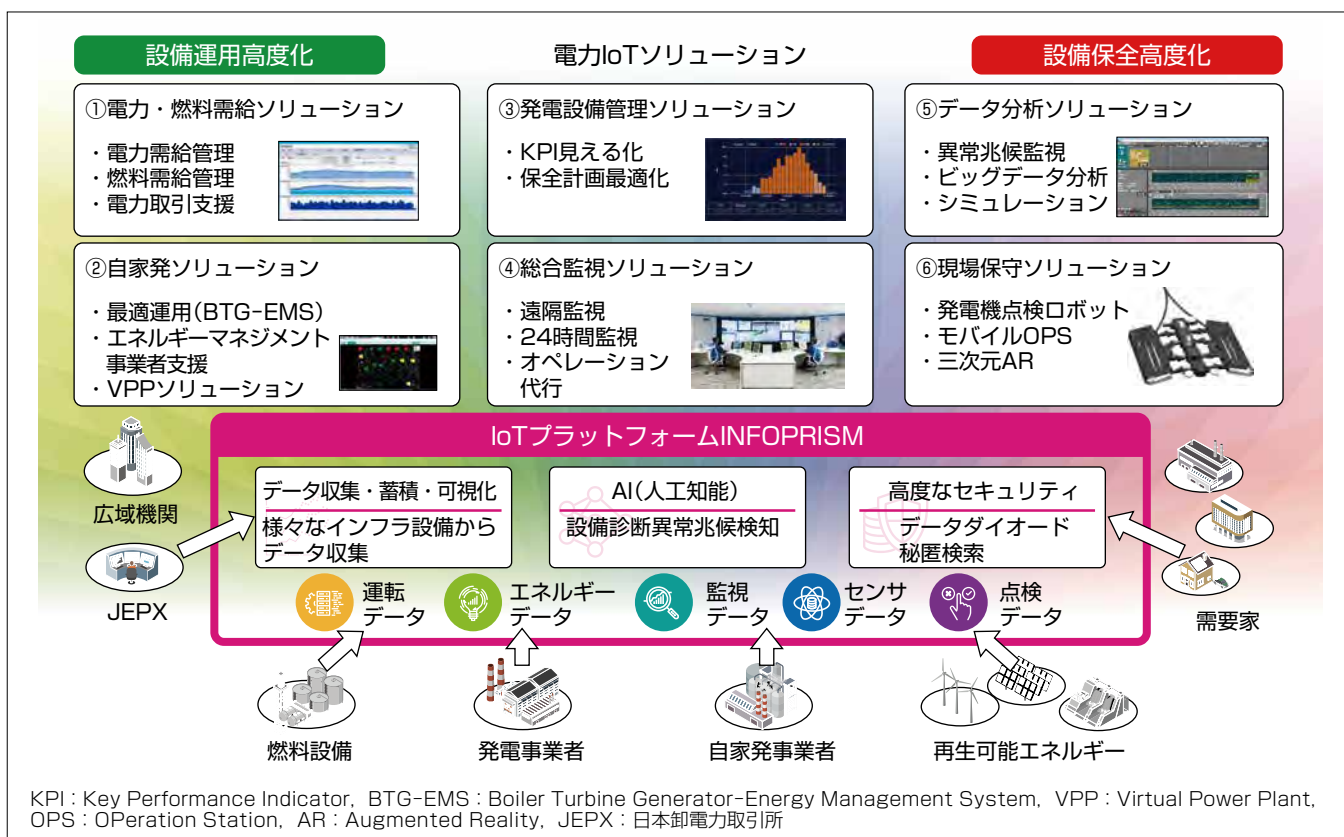
Kazuhiro Saito, Shota Tanaka, Ryota Sawamura

要 旨

近年、低炭素化社会の実現に向け、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー発電の導入が進んでいる。また、電力システム改革によって、発電部門は競争部門となることが想定され、電力安定供給とともに、運用の合理化、保守・保全にかかるコストの最小化が求められる。このような電力業界を取り巻く制度変化と環境変化に対応し、三菱電機ではIoT(Internet of Things)技術を駆使した各種ソリューションを提供している。

当社が提供する発電プラント向け電力IoTソリューションは、燃料の調達から発電、電力販売を担う燃料基地、発電所の設備運用業務、資産運用を最適化する設備運用高

度化と、日常点検、定期保守、及びトラブル対応に代表される保全業務の省力化・省人化を実現する設備保全高度化を支える。電力IoTソリューションを構成する各ソリューションは共通のIoTプラットフォーム“INFOPRISM”⁽¹⁾上に構築しており、これらソリューションを柔軟に組み合わせ、顧客ニーズにマッチしたシステム提供を可能にしている。代表的なソリューションとして、①電力・燃料需給ソリューション、②自家発ソリューション、③発電設備管理ソリューション、④総合監視ソリューション、⑤データ分析ソリューション、⑥現場保守ソリューションがある。



電力IoTソリューションの全体像

当社IoTプラットフォームINFOPRISM上に①データ収集・蓄積・可視化機能、②AI機能、③高度なセキュリティ機能を構築し、各種ソリューション間で共通化することで、アプリケーション間のデータ連携を容易にしている。また、OPC-UA(Object Linking and Embedding for Process Control-Unified Architecture)、PI System連携機能を標準でサポートしており、自社プラットフォームに限らず、他社システムとの情報連携を容易にしている。

1. ま え が き

低炭素化社会の実現に向け、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー発電の導入が進んでいる。また、電力システム改革によって、2020年4月から旧一般電気事業者は、一般送配電事業者と発電及び小売事業者に法的に分離される(発送電分離)予定である。このような状況の中、発電部門は電源供給事業者として競争部門となることが想定され、電力安定供給とともに、運用の合理化、保守・保全にかかるコストの最小化が求められる。図1に示すように、当社では電気を作る(発電)から送る(送変電)、配る(配電)、使う(需要)まで電力システムを上流から下流まで一貫して製品を提供している。

当社では先に述べた電力業界を取り巻く制度変化と環境変化に対応し、IoT技術を駆使した各種ソリューションの提供を行っているが、本稿では、その中でも発電プラントに求められる高度化要求である、設備運用の高度化と設備保全の高度化を支える電力IoTソリューションについて述べる。

2. 電力IoTソリューションの全体像

当社が提供する発電プラント向け電力IoTソリューションは、燃料の調達から発電、電力販売を担う燃料基地、発電所の設備運用業務、資産運用を最適化する設備運用高度化と、日常点検、定期保守、及びトラブル対応に代表される保全業務の省力化・省人化を実現する設備保全高度化を支える。電力IoTソリューションでは、対象、目的、及

び手段に応じて、次の六つのソリューションを展開している。各ソリューションは共通のIoTプラットフォームであるINFOPRISM上に構築しており、これらソリューションを柔軟に組み合わせ、顧客のニーズにマッチしたシステムを容易かつ短時間に提供可能である。

(1) 電力・燃料需給ソリューション

燃料の受入、在庫管理や配船計画と燃料消費(発電)計画を電力市場価格や需給バランスを考慮した、最適な燃料需給と発電計画を実現している。

(2) 自家発ソリューション

当社の提供する“BTG-EMS”では、自社工場単体での電力・蒸気需給を最適制御し、エネルギー総コストの低減、又は、同じ投入エネルギーでの発電出力を最大化するシステムに加え、蓄電池制御や自己託送機能、市場取引機能を組み合わせることによって、全国に点在する複数エリアの工場間で電力の需給最適化を行う、広域連携最適化機能を提供している。

(3) 発電設備管理ソリューション

30分コマ単位での発電コストの把握、市場価格予測に基づく期間収益のリスク(Earning at Risk : EaR)評価機能を提供する。また、発電所を構成する各種設備の現在の状態、故障リスクを数値化し、最適な予防保全計画を作成するシステム等、保全計画の立案から設備投資の経営意思決定までをトータルサポートしている。

(4) 総合監視ソリューション

複数の発電所の運転データを一元管理し、遠隔地から発電プラントの稼働状態を監視可能であり、発電プラントの

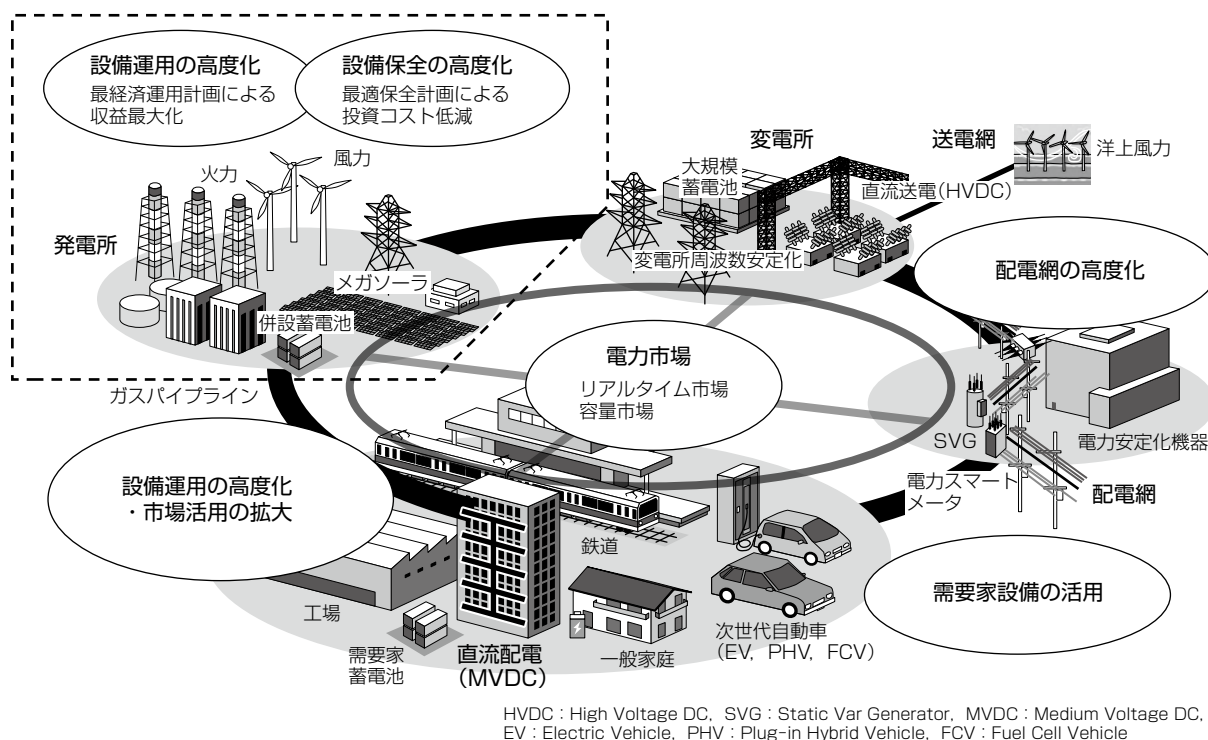


図1. 電力システム改革の進展と要求される高度化

運転状態を当社で24時間遠隔監視を代行するサービスを提供している。

(5) データ分析ソリューション

発電プラント運転シミュレータに加え、AIを活用したデータ分析技術を活用したプラント異常兆候監視システムを始め、ビッグデータ分析によって新たな価値を創出するシステムを提供している。

(6) 現場保守ソリューション

中央制御室のOPSと同等の監視画面、操作機能を備えたモバイルOPSや拡張現実(AR)技術を活用した巡視点検などの保全業務高度化システム、発電機ロータを引き抜くことなく点検が可能な発電機点検ロボット等、保守・保全業務の高度化・省力化を実現するシステムを提供している。

3. 電力IoTソリューションのシステム

図2に当社の電力IoTソリューションでのシステム連携を示す。それぞれのシステムは各々連携し、設備運用と設備保全の高度化を支援する。次に、電力IoTソリューションの代表的なシステムについて述べる。

3.1 アセットマネジメントシステム

発電設備管理ソリューションでの代表的なシステムであり、発電所を構成する設備の状態を定量化し、設備投資に関する経営意思決定をサポートする。このシステムは、設備状態管理(Asset Performance Management：APM)と設備投資最適化(Asset Investment Planning Management：AIPM)の二つの機能によって構成される。APM機能では、運転実績データや点検記録、事故記録などの情報を基に各設備の状態を数値化し、設備故障の発生確率及び故障時での影響度の推定・管理を行う。AIPM機能では、APM機能によって数値化した設備状態や故障リスクのほか、設備保全にかかる費用、設備のランニングコストなどの経済性

観点、予算、作業員制約、部品制約など様々な種類の情報を共通の尺度によって評価し、最適な投資計画を算出する。図3にアセットマネジメントシステムの構成を示す。

3.2 電力・燃料需給管理システム

電力・燃料需給ソリューションでの代表的なシステムであり、燃料調達から供給、取引販売を担う燃料基地、及び発電から電力供給、取引販売を担う発電所で、トータル収益最大となる運用計画を立案する。このシステムは、燃料基地運用をサポートする燃料需給計画機能と発電所運用をサポートする電力需給計画機能に分割でき、それぞれを個別提供することも可能である。図4に、燃料需給管理システムを示す。燃料需給計画機能では、燃料の自社消費計画や販売計画から算出できる燃料需要に対し、各タンクからの燃料払出配分、ライン運用、燃料調達のための配船計画などを立案する。また、燃料基地の実績データや取引情報をリアルタイムに取得し、立案した計画と実績の差分を監視可能である。

3.3 異常兆候監視システム⁽²⁾

データ分析ソリューションでの代表的なシステムとして、発電プラント異常兆候監視システムがあるが、このシステムはこの特集号の他の論文で詳細を述べているため、本稿ではコンベヤローラの異常兆候を音響解析によって早期検知するシステムについて述べる。このシステムはコンベヤのローラ動作音をマイクによって集音し、収集した音源を音響解析することによって、ローラの故障予兆を早期検知するシステムである。図5に、システム構成を示す。

ローラ周辺に集音マイクを設置し、ローラの動作音を収集する。安価な市販マイクをディジーチェーンで接続し、高価な専用マイクは不要である。集音マイクはWi-Fi^(注1)等、ワイヤレスで接続されて異常兆候を検知した際にはシステムから自動でオペレータに通知がされる。このため、

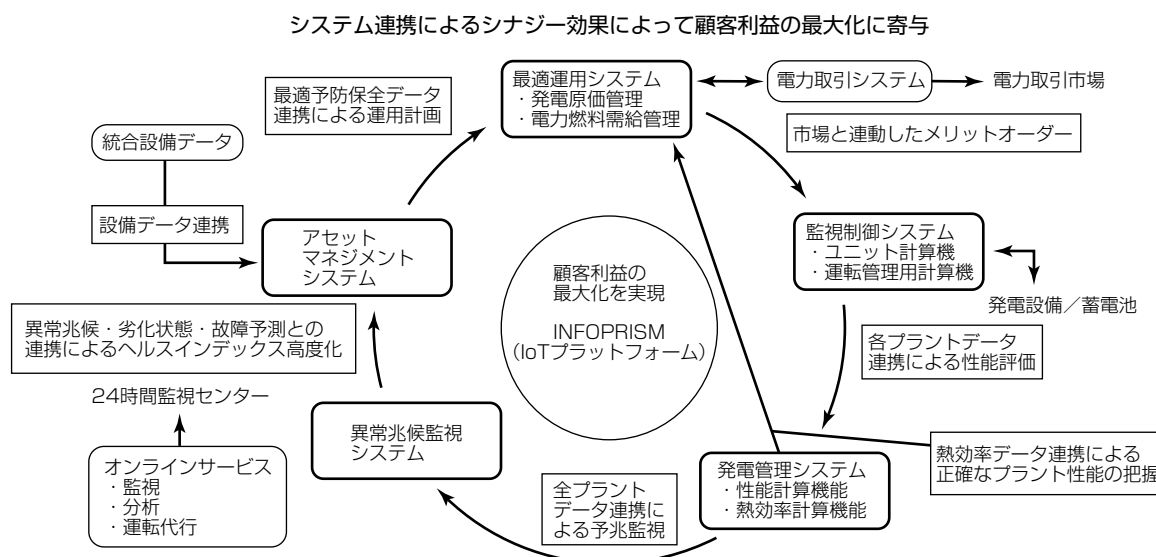
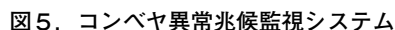
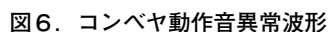


図2. 電力IoTソリューションでのシステム連携



(注1) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

機器の異常を早期発見するために、機器に特化した特殊センサを提供している。例えば、発電機向けには、部分放

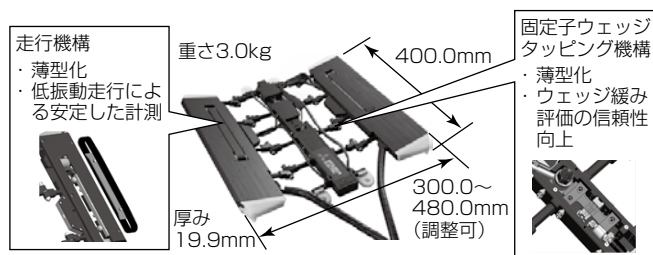


図7. 発電機薄型点検ロボット

電モニタ、層間短絡チェッカー、固定子コイルエンド振動モニタ等のセンサを組み合わせた発電機の遠隔監視・異常兆候監視システムを、GIS(Gas Insulated Switchgear)向けには、導体の異常加熱によって発生した分解ガスを検知し、GISの通電異常を検知するセンサを提供している。また、変圧器向けには、変圧器内の絶縁油の油中融解ガスを分析し、機器内部で発生している局部加熱や放電を早期発見するセンサを提供している。

3.4.3 電動機劣化監視システム

電動機や負荷設備の異常や劣化状態を検知するには、一般的には現場の機器に新たなセンサを追設し、状態監視することが多いが、多数のセンサが必要であり、また、現場工事の手間やその後の保守が負担となる。そこで、当社では新たにセンサを追加することなく、電動機・負荷設備の劣化をオンライン監視できるコントロールセンターを開発した。このコントロールセンターを適用することによって、現場機器の改造や新たな配線工事などを実施せずに劣化状態を監視することが可能になる。図8にシステムイメージを示す。

そのほかに、稼働中の高圧電動機の部分放電を計測し、絶縁寿命を診断するサービスを提供している。

3.4.4 モバイルOPS

このシステムはタブレット型端末によって、系統図やトレンドグラフ等OPSの主要な監視画面を現場や執務室など中央制御室以外で表示することが可能で、現場点検の効率化を支援するシステムである。異常発生時は現場から中央制御室への映像・音声配信が可能であり、迅速な状況把握を支援する。モバイル端末上で図面・マニュアル類の表示も可能であり、現場での迅速な確認によって省力化を支援する。図9にモバイルOPS端末の外観を示す。

3.4.5 現場保守作業高度化システム

最後に現場保守作業の高度化に向けたシステムについて述べる。

(1) 設備特性劣化監視システム

プラント構成設備単位の熱特性モデルを元に運転実績データの特性遷移をリアルタイムに監視する。

(2) 運転業務引き継管理システム

巡視点検やトラブル対応等の報告、起票作業等をワーク

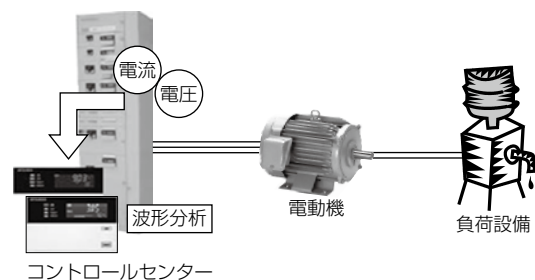


図8. コントロールセンターでの電動機劣化監視システム



図9. モバイルOPS端末

フロー化して情報共有を促進する。

(3) 巡回点検作業支援システム

モバイル端末を活用して巡回点検作業、計画作成、報告作成などを支援する。

(4) 系統構成・電源管理システム

現場作業時の各機器、弁等の入切状態を系統図形式で表示し、電源隔離、設備構成を適切に管理する。

(5) AR活用保守点検作業支援システム

三次元点群データ、音声認識、画像認識等を組み合わせ保守点検手順のAR表示、点検結果の自動記録などによって、保守点検作業の効率化を支援する。

4. む す び

発電プラント向けに当社が提供している代表的な電力IoTソリューションについて述べた。当社IoTプラットフォームであるINFOPRISMを活用し、今後も設備運用・保全高度化を支えるソリューションを拡充する計画である。これらソリューション群を活用し、設備運用・保全の両面から顧客の業務効率化、収益機会の拡大に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 廣岡俊彦：社会・電力インフラIoTプラットフォーム“INFOPRISM”，三菱電機技報，93，No.7，397～400（2019）
- (2) 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）

火力発電プラントの異常兆候検知システム

小田和弘* 近藤誠治*
谷 宏幸*
佐子朋生*

Abnormal Sign Detection System for Thermal Plant

Kazuhiro Oda, Hiroyuki Tani, Tomoo Sako, Seiji Kondo

要 旨

火力発電プラントの運営で、原子力プラントの再稼働や再生可能エネルギー発電の普及によって稼働率が低下して運転機会が減少、及びベテラン運転員の退職もあってスキル低下が懸念され、保安力向上ソリューションが期待される中、AI(Artificial Intelligence)技術を活用して発電プラント機器の異常兆候を早期に発見する異常兆候検知システム“INFOPRISM APR ANALYZER”の提供を開始した。

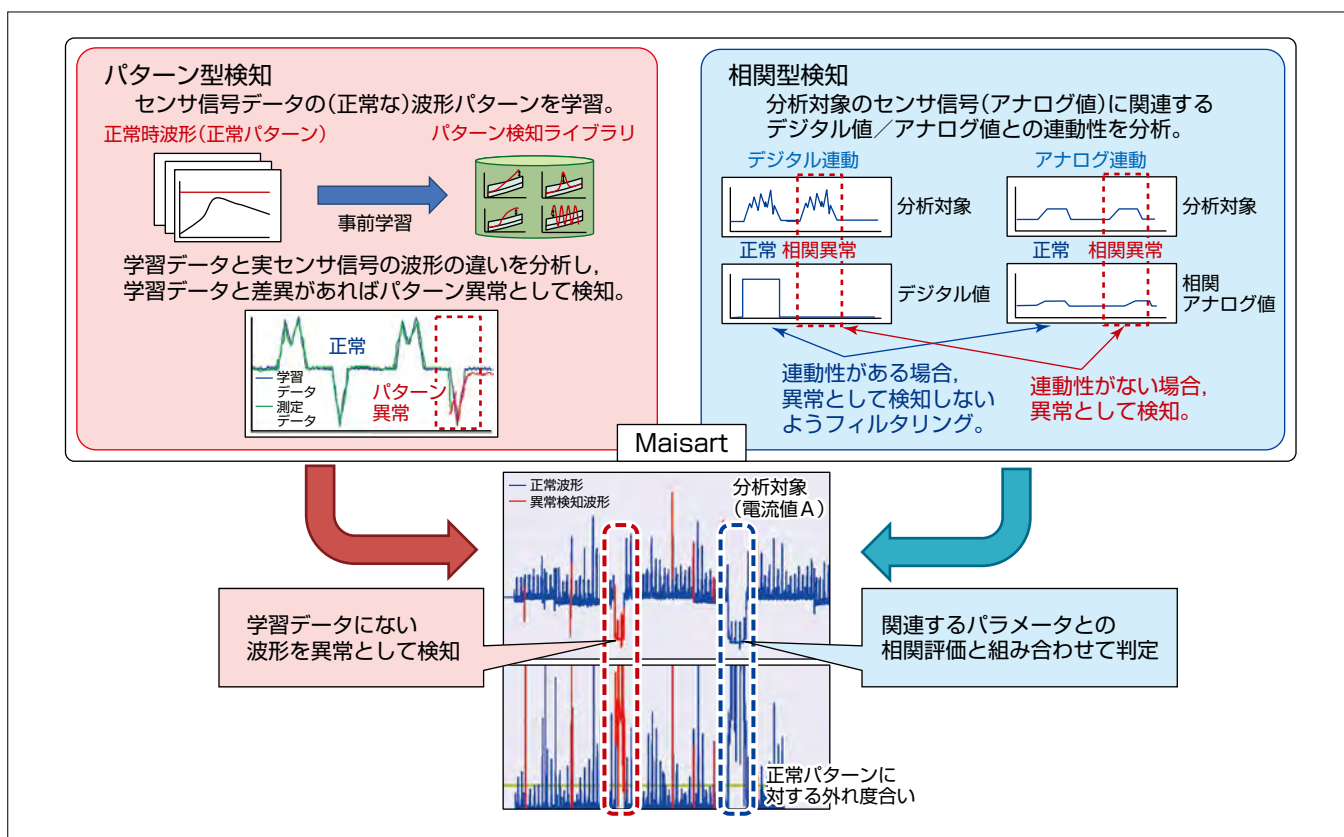
従来の異常検知方式は、プラントの計測値に対して警報制限値での判定を行っており、制限値以下でのトラブルに発展する可能性がある変動は検知できなかった。このシステムでは、正常運転時のデータの振る舞いを学習し、計測値が学習した運転データパターンと異なった“いつもと違う振る舞い”をした場合を異常と判定するため、警報制限

値を超える前にトラブルの兆候を捉え、かつ過去に経験がないトラブルの予兆も検知が可能である。

またパターン型検知がベースであるため、事前の相関抽出が不要で導入しやすく、全信号に対して検知ができ、相関型検知を組み合わせたハイブリッド型検知方式の開発によって、相関崩れの検知もできる特長を持つ。

さらに検知結果に対する正常／異常の判定結果をフィードバックして再学習させることで、継続的に検知精度を向上させていくことが可能である。

このシステムの導入によって、計画外停止の抑制や設備停止期間の短縮に寄与し、また異常時の処置などノウハウの蓄積も可能で故障要因の早期原因究明にも有効活用できる。



ハイブリッド型検知方式のイメージ

このシステムのパターン型検知技術は、信号ごとに過去の正常時の波形パターンを学習し、学習波形パターンとの差異度合いを外れスコア値として数値化し、統計分析によって相似性を判定する。

さらにデジタル／アナログ信号の相関、アナログ信号同士の相関分析も組み込んだ“ハイブリッド型検知方式”であり、これによって異常兆候の確実な検知と過剰検知の抑止を実現する。

1. ま え が き

近年、AIの実用化が急速に進んでいる。三菱電機も“コンパクトな人工知能(AI)”を始めとするAI基盤技術及び応用技術などをAI技術ブランド“Maisart(マイサート)”として事業展開しており、それを活用し、早期に設備の異常兆候を検知するパターン型検知技術を開発し、搭載した異常兆候検知システム“INFOPRISM APR ANALYZER”の提供を開始した。

本稿では、このシステムの概要と特長、及び発電プラントへの適用時の課題と対策事例について述べる。

2. 異常兆候検知システム “INFOPRISM APR ANALYZER”

2.1 機 能

(1) 異常検知通知

異常の兆候を検知した場合、監視画面(図1)に“検知カード”として表示する。また定期的にメールで状況を関係者に通知するメール通知機能も具備している。

(2) 関連信号との比較確認

あらかじめ関連する信号をグルーピングしておくことで、検知発生時に当該信号と関連する信号のトレンドを並べて比較ができる。

(3) 検知結果の評価支援

検知結果の評価支援として、検知回数や累積検知時間でのランキング表示による異常確度の優先付け、及び各信号の検知発生傾向を確認可能である(図2)。

(4) ノウハウ蓄積

発生した“検知カード”に対して、正常／異常の判定を行う際に判理由等のノウハウを入力し、判定履歴として蓄積できる。

2.2 シ ス テ ム

このシステムのプラントデータ取り込みは、OPC(Object Linking and Embedding for Process Control)-UA(Unified Architecture)やPI Systemなどと連携できる汎用通信機能をサポートしている。また、システム内に保存されている過去データの分析や、監視制御システムから取り込んだ最新データをオンラインで検知することにも対応可能である(図3)。

3. 異常兆候検知技術の特長

3.1 検 知 技 術

このシステムのパターン型検知技術は、事前に信号ごとに過去の正常時の波形パターンを学習し、検知期間の波形に対して、過去の学習波形パターンからの差異度合いを外れスコア値として数値化し、統計分析によって相似性を判定するものである(図4)。

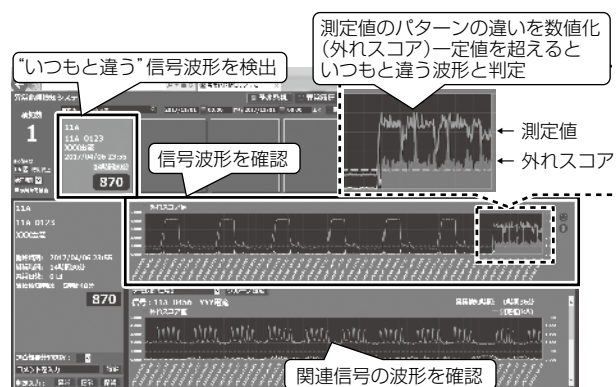


図1. 監視画面

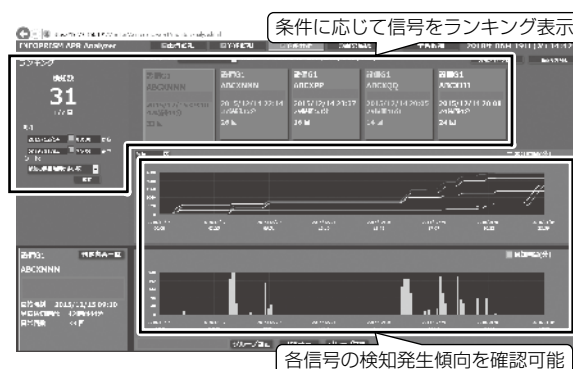


図2. 評価支援画面

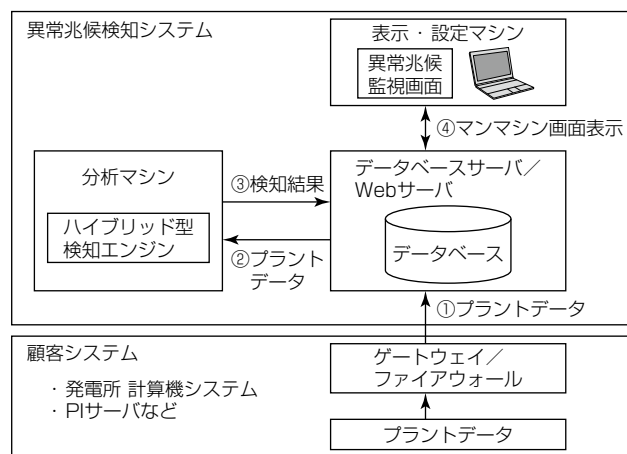


図3. システム構成

さらに、デジタル／アナログ信号の相関、アナログ信号同士の相関分析も組み込んだ“ハイブリッド型検知方式”であり、これによって異常兆候の確実な検知と過剰検知の抑止を実現している(図5)。

この検知技術は、過去の正常な運転期間のデータを投入することで自動的に正常な挙動／異常な挙動を導き出すため、故障情報を必要としないこと、及び相関分析による検知精度向上が可能であることが大きな特長である。

3.2 検知精度向上技術

3.2.1 判定結果のフィードバック

システムが検知した結果に対して“正常”と判定した場合、

判定結果をフィードバックして追加学習させることによって、ユーザーが大きな労力を割くことなく検知精度を向上させていくことができる(図6)。

3.2.2 過剰検知のフィルタ

学習が不十分な状態では不要な検知を行うため、検知結果を一定の条件でフィルタリングすることで、不要な過剰検知の抑制が可能である。

次にフィルタ機能の例を示す。

(1) デジタル相関フィルタ

デジタル信号の変化とアナログ信号の変化が連動している信号組を学習し、アナログ単信号では異常と判定しても、

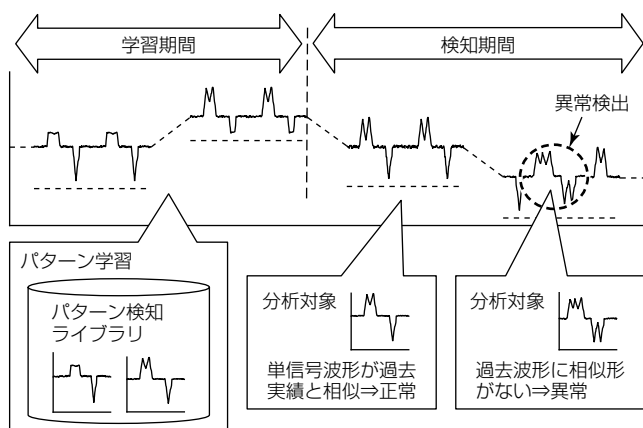


図4. パターン型検知

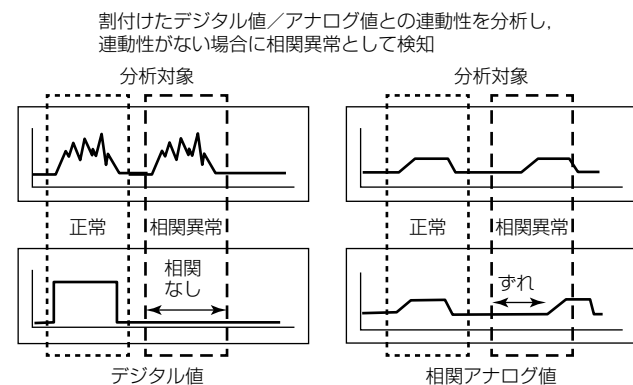


図5. 相関検知

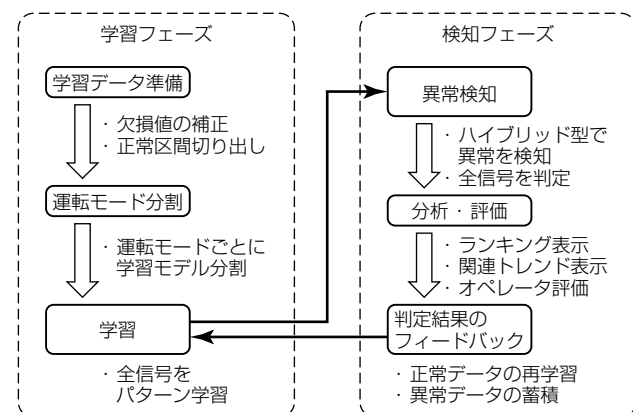


図6. 判定結果のフィードバック

学習した信号組のデジタル信号の変化情報を使い、結果をフィルタリングする。

(2) アナログ相関フィルタ

相関関係にある信号を相関組としてあらかじめ設定することで、アナログ単信号では異常と判定しても、相関組設定した信号同士が相関を保っていた場合は、検知をフィルタリングする。

4. 適用時の課題と対策事例

各メーカーが同様の異常兆候検知システムを開発しており、導入を検討している顧客側は、過去に起こった実際のトラブルをシステムが検知できるかの検知精度面や運用面を評価するオフライン分析でのコンペやオンライン検知での実証を行った上で、実導入するかどうかの判断及び採用メーカーを決定している。

ここでは実際にコンペや実証を通して出てきた課題とその対策について述べる。

4.1 パターン型検知の課題

パターン型検知の場合、人が見て信号の動きは正常であっても、学習データにない変動パターンであれば異常兆候と検知する。そのため学習データ不足やランダム性が高く学習ではパターンを網羅できない類の信号に関して不要な過剰検知が発生する傾向があり、検知精度向上には大きく次の二つの課題が挙げられた。

(1) 学習データの充足

(2) ランダム波形の種類に応じた対策

4.2 課題への対策

4.2.1 学習データの充足

学習データ不足に関しては追加学習で解消可能だが、効率よく学習データを充足させるためには、学習が不足しているデータ領域の選定を容易にする必要があった。

システムに保存されているデータから必要なデータを抽出し、学習データの充足度をグラフで可視化することで、学習不足領域を容易に選定できるようにし、追加学習の効率化を図った。

4.2.2 ランダム波形の種類に応じた対策

学習データ充足後に残った不要な過剰検知の信号を評価した結果、波形にノイズが重畳している信号、及び他信号の影響を受けて変動する信号が多く確認された。

このようなランダム性が高い信号に対しては、信号の変動パターンを学習データで網羅することは困難であり、学習データの充足だけでは十分な効果が得られないため、次の二つの対策を行い、その効果を確認した。

(1) ノイズが重畳した信号への対策

ノイズが重畳した信号は、ノイズの微小変動部分で短時間の不要な過剰検知を繰り返す傾向があった。そこで分析にかける前段階の処理で波形のスージング処理を行い、

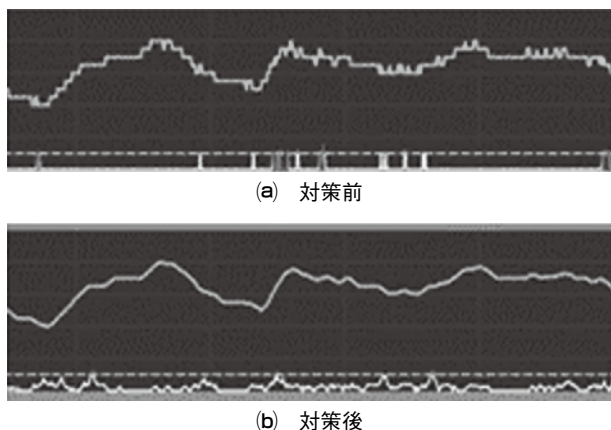


図7. 波形のスミージング処理

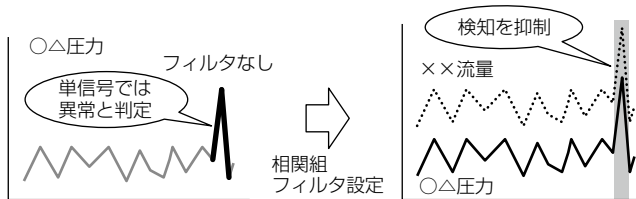


図8. アナログ相関フィルタのイメージ

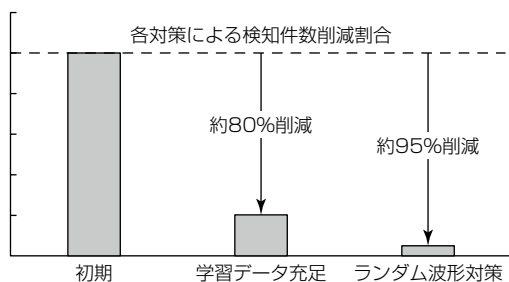


図9. 対策による不要な過剰検知の改善

ノイズ成分を取り除いた上で分析を行う対策を実施した(図7)。

(2) 他信号の影響を受けて変動する信号への対策

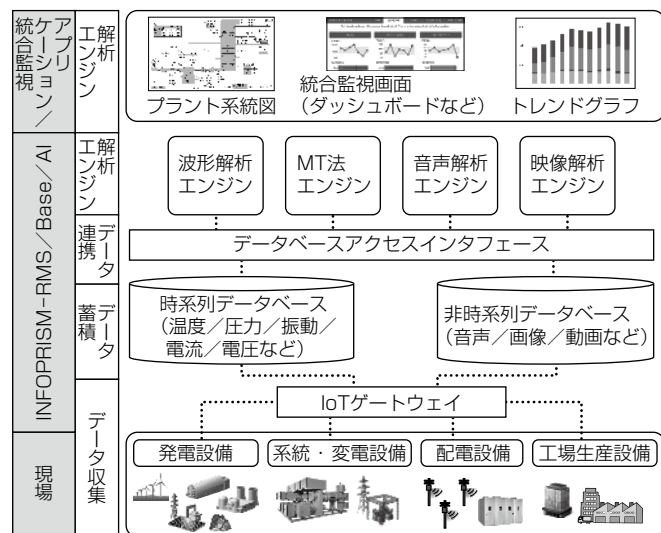
制御設定値に依存してプロセスデータが変化する信号や外部条件(大気温度や海水温度)に影響を受ける信号を過去の学習データで分析すると、不要な過剰検知が発生する傾向があった。アナログ相関フィルタを活用することで、過剰検知の抑制を図った(図8)。

4.3 対策の効果

学習データの充足及びランダム波形の種類に応じた対策を順次行った結果、1日当たりの検知件数が約95%削減される効果が確認できた(図9)。

5. 今後の展望と将来構想

本稿では、発電設備のアナログ信号の正常時との違いを検知することに優れる“波形分析”について述べたが、発電



MT : Mahalanobis-Taguchi, IoT : Internet of Things

図10. 発電プラント“まるごと監視”システム構成イメージ

プラントの監視要素としては、例えばモータの“異音”から設備の異常が分かるものや、設備に生じた亀裂など“見た目”で区別するものなどがある。

そこで、波形分析のほか、音声や映像データや設備の機械的な絶縁劣化など特徴的な異常兆候を捉える解析手法の開発を進めている。

これらは、発電プラントのセンサデータ及び異常兆候検知システム、監視制御システム、EMS(Energy Management System)など上位アプリケーションのデータを統合監視し、データアクセスインタフェースを介して、それぞれの解析エンジンでデータ解析を行い、その解析結果を統合的に監視・分析する仕組みを構築する(図10)。

このように、発電プラントの多種多様なセンサデータや機器の異変を、それぞれの解析エンジンにかけ、統合的に監視可能なユーザーインタフェースを構築することによって、発電プラントを“まるごと監視”可能なシステムを提供していく。

6. む す び

異常兆候検知システム“INFOPRISM APR ANALYZER”このシステムの実証で出てきた改善点の開発及び不要な過剰検知への対策を継続して進めていくとともに、検知結果を効率的に分析するための分析画面の機能拡充も進めていく。

参 考 文 献

- (1) 中村隆顕, ほか: 標本部分列を用いた時系列データ異常検知方式, 電気学会論文誌C, **136**, No.3, 363~372 (2016)

仮想発電所を活用した需給調整技術

松村 洪作*
五十嵐 政志*

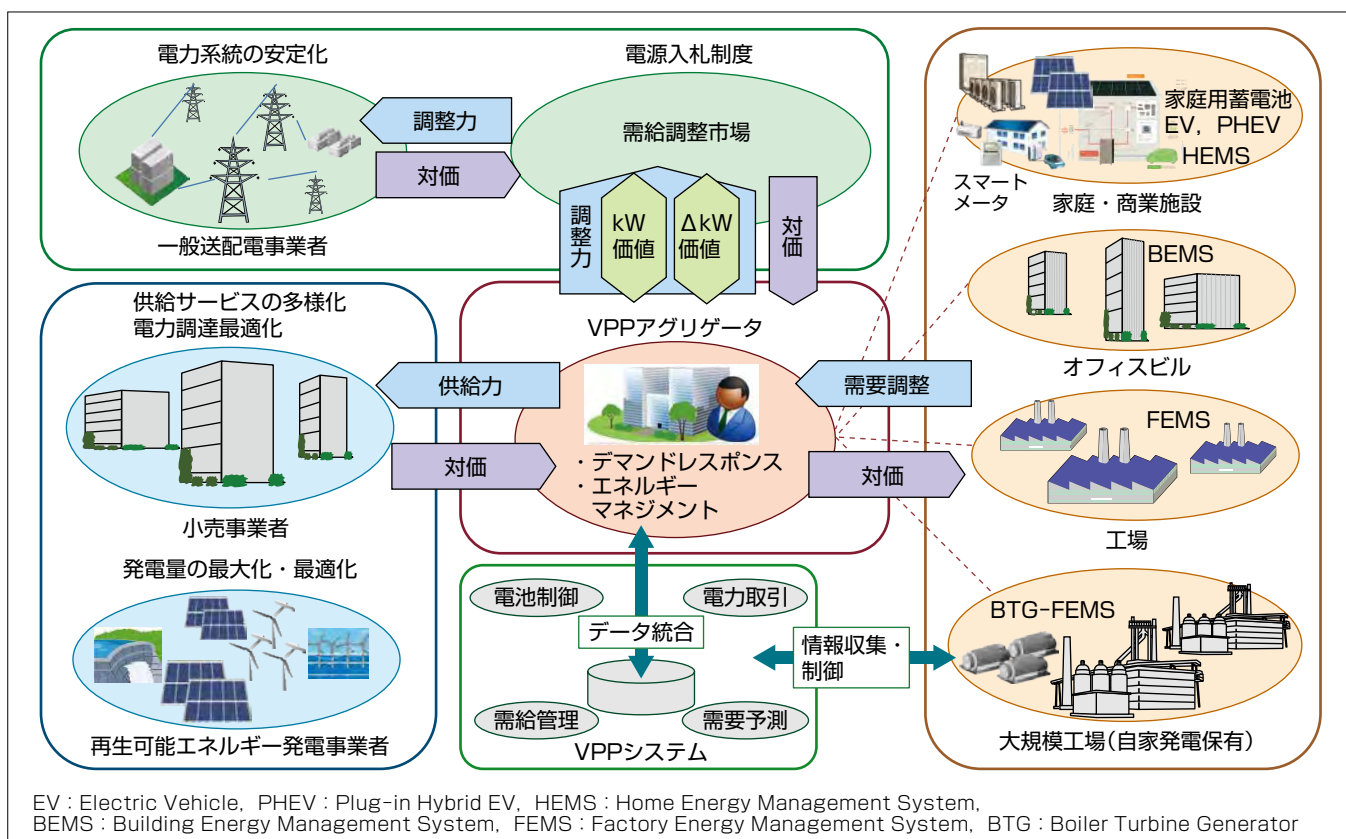
Supply-demand Balancing Control Technology Using Virtual Power Plant

Kosaku Matsumura, Masashi Igarashi

要 旨

固定価格買取制度によって太陽光発電(PhotoVoltaic：PV)や風力発電(Wind Turbine：WT)などの再生可能エネルギーの急速な普及拡大が進む中、従来、調整電源の役割を担ってきた火力発電機の低出力運転や停止に加え、PVの出力抑制頻度が増加してきており、需給調整力や配電系統での電圧逸脱など、電力品質の低下が懸念されている。一方で、2021年4月には需給調整市場の開設が予定されており、適切な競争環境下で、一般送配電事業者は市場から安価な調整力の調達を行うことになる。このような状況下で、需要家側に設置されるPVや蓄電池などの分散電源を統合制御し、仮想発電所(Virtual Power Plant：VPP)として大規模な発電設備に匹敵する電力を創出する可能性が期待されている。

三菱電機では2021年の需給調整市場に対応した製品展開を一つのターゲットとして、現在、経済産業省が主導するVPP構築実証事業に参画しながら知見やノウハウを蓄積している。その中で、当社はアグリゲータの業務からVPPシステムに必要な機能を整理し、アプリケーションパッケージ“BLEnDer DR”の開発を進めている。BLEnDer DRは複数の分散電源を管理し、制御基準値計算、指令値配分、電源制御までを自動化して運用可能である。また、国内標準規格に準拠した通信方式でのシステム間のシームレスな接続や強固なセキュリティ機能を持っており、今後発展するVPP事業に対して、大手の電力事業者や新規参入するアグリゲータのビジネス拡大に貢献できる。



当社が考えるVPP事業のイメージ

VPP事業はアグリゲータと呼ばれる仲介事業者が小売事業者や一般送配電事業者と需要家の間で供給力や調整力に関わるサービスを提供するイメージである。当社のBLEnDer DRは複数の分散電源を管理し、制御基準値計算、指令値配分、電源制御までを自動化して運用可能であり、国内標準規格に準拠した通信方式でのシステム間のシームレスな接続や強固なセキュリティ機能を持っている。

1. ま え が き

脱炭素化社会の実現を目指して、PVやWTのような再生可能エネルギー（以下“再エネ”という。）の世界規模での普及拡大による、供給電源の分散化が加速している。これらの再エネは主に電源構成に占める火力発電機の代替として期待されているが、天候由来で変化するこれらの電源は出力調整が難しく、導入量の増加に伴い、周波数変動や電力余剰による需給アンバランスを引き起こす要因となり得る。

この問題の解決策の一つとして、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)のような蓄エネルギー（以下“蓄エネ”という。）の設備や、需要を制御するデマンドレスポンス(Demand Response：DR)などが需給バランスの調整役として期待されている⁽¹⁾。これらは一つ一つの規模が小さく、個々の制御では系統に与える効果は小さいが、これらを統合制御し、仮想発電所(VPP)として活用することで、大規模な発電設備に匹敵する電源としての活用が期待されている。

本稿ではVPPへの開発の取組みについて述べる。

2. 需給調整でのVPPの役割

2.1 VPP事業のイメージ

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と呼ぶ。一例として、アグリゲータは需要家へ需要調整を依頼して対価を支払い、小売事業者や一般送配電事業者へ供給力や調整力を提供するモデルがある。ただし、アグリゲータには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となるため、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と考えられる(図1)。

ここでVPPの代表的な活用ユースケースの例を表1に示す。VPP事業確立に向けて各地で電力会社やメーカーが様々な取組みや検証を行っており、事業化に向けては発展途上にある。

2.2 需給調整市場の制度動向

現在最もVPP活用先の検討が進んでいるのは調整力提供モデルである。調整力は一般送配電事業者が需要と供給を一致させるのに必要な電源調整能力であり、2021年4月以降は需給調整市場を介して取引することで、調達コスト低減や調達の透明・公平化が期待されている(図2)。

これに向けて現在は需給調整市場検討小委員会やエネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会(以下“ERAB検討会”という。)が設置され、取引要件や商品区分(表2)、VPP活用ルール具体化が行われている。

また2016年から開始された経済産業省主導のVPP構築実証事業⁽⁴⁾で、VPPを需給調整に活用するための技術検

表1. VPPの活用ユースケース例

VPPによる 提供サービス ⁽²⁾	対象ユーザー			
	一般送配電 事業者	小売電気 事業者	再エネ発電 事業者	需要家
調整力提供	○			
電力品質維持	○			
インバランス回避		○		
供給力提供		○		
出力抑制回避			○	
電気料金削減				○
再エネ有効活用				○

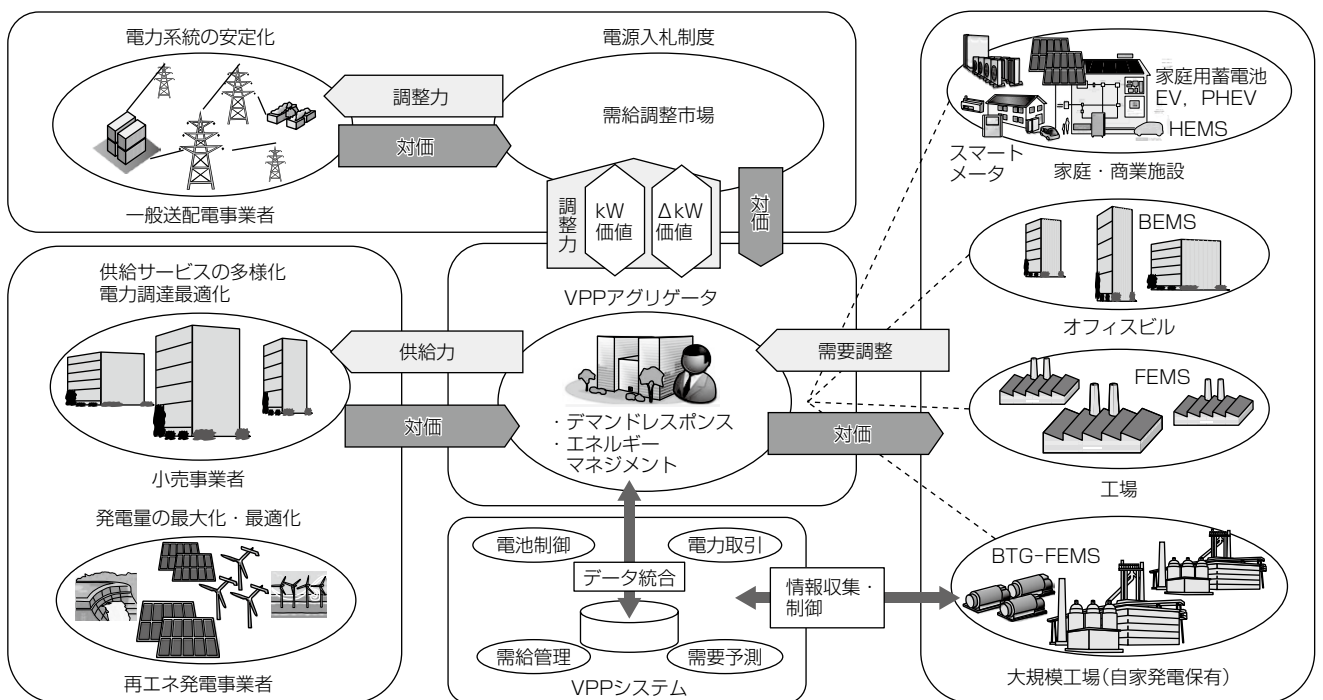


図1. VPP事業のイメージ

表2. 需給調整市場での商品の要件⁽³⁾

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve(FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve(S-FRR)	Frequency Restoration Reserve(FRR)	Replacement Reserve(RR)	Replacement Reserve for FIT(RR-FIT)
指令・制御	オフライン(自端制御)	オンライン(LFC信号)	オンライン(EDC信号)	オンライン(EDC信号)	オンライン
監視	オンライン (一部オフラインも可 ^(注2))	オンライン	オンライン	オンライン	専用線：オンライン 簡易指令システム： オフライン ^{(注2)(注5)}
回線	専用線 ^(注1) (監視がオフラインの場合は不要)	専用線 ^(注1)	専用線 ^(注1)	専用線 ^(注1)	専用線又は 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内 ^(注3)	45分以内
継続時間	5分以上 ^(注3)	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	ー(自端制御)	0.5～数十秒 ^(注4)	1～数分 ^(注4)	1～数分 ^(注4)	30分
監視間隔	1～数秒 ^(注2)	1～5秒程度 ^(注4)	1～5秒程度 ^(注4)	1～5秒程度 ^(注4)	1～30分 ^(注5)
供出可能量 (入札量上限)	10秒以内に出力変化可能な量(機器性能上のGF幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量(機器性能上のLFC幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量(オンラインで調整可能な幅を上限)	15分以内に出力変化可能な量(オンラインで調整可能な幅を上限)	45分以内に出力変化可能な量(オンライン(簡易指令システムも含む)で調整可能な幅を上限)
最低入札量	5 MW(監視がオフラインの場合は1 MW)	5 MW ^{(注1)(注4)}	5 MW ^{(注1)(注4)}	5 MW ^{(注1)(注4)}	専用線：5 MW 簡易指令システム：1 MW
刻み幅(入札単位)	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ

FIT：Feed In Tariff, LFC：Load Frequency Control, EDC：Economic Dispatching Control, GF：Governor Free

(注1) 簡易指令システムと中給システムの接続可否について、サイバーセキュリティの観点から国で検討中のため、これを踏まえて改めて検討。

(注2) 事後に数値データを提供する必要あり(データの取得方法、提供方法等については今後検討)。

(注3) 沖縄エリアはエリア固有事情を踏まえて個別に設定。

(注4) 中給システムと簡易指令システムの接続が可能となった場合にでも、監視の通信プロトコルや監視間隔等については、別途検討が必要。

(注5) 30分を最大として、事業者が収集している周期と合わせることも許容。

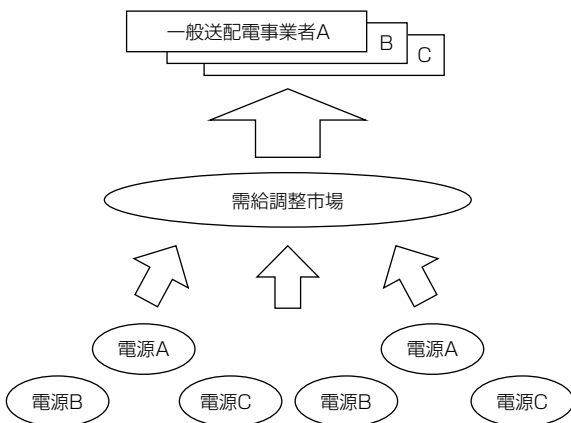


図2. 調整力の市場調達イメージ

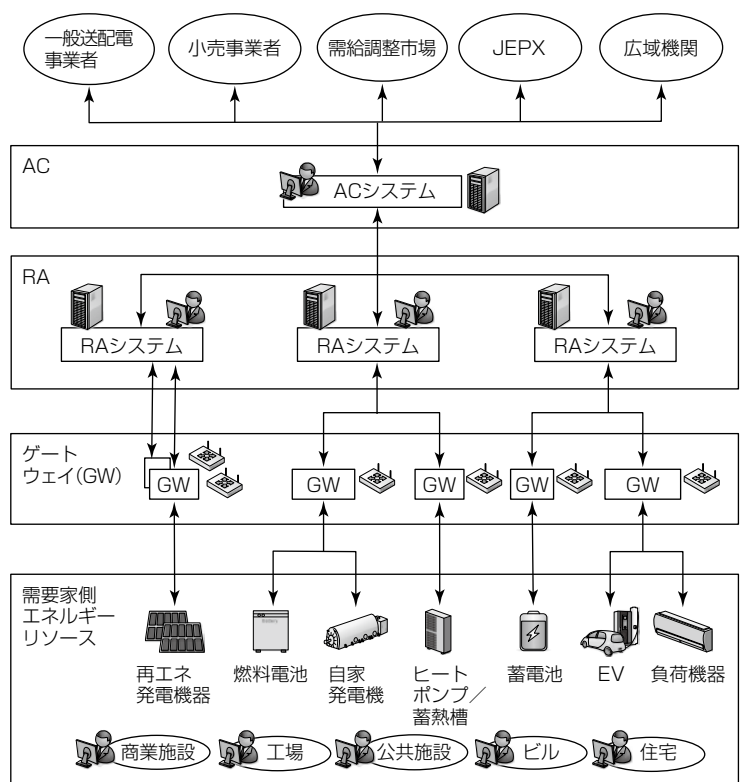
証が行われており、電力会社や新電力、他業界の小売事業者、電機メーカー、通信メーカーなど多様な企業が参加している。

当社も2017年から実証に参画し、システム開発に必要な知見やノウハウの習得を行うとともに、導入実績を拡大している。

3. VPPのシステム構成とシステム開発状況

3.1 VPPシステムの基本構成

VPPでは多くの需要家設備を活用することからシステムは図3に示すような役割ごとの階層構造となり、アグリゲータは、需要家とVPPサービス契約を直接締結してリソース制御を行うリソースアグリゲータ(以下“RA”という。)とRAが制御した電力量を束ね、一般送配電事業者や



JEPX：日本卸電力取引所

図3. VPPのシステム構成

小売電気事業者と直接電力取引を行うアグリゲーションコーディネーター(以下“AC”という。)に役割を分担される。

各システムや機器の役割と設備構成例についてまとめたものを表3に示す。

表3. VPPシステムの構成と役割

名称	主な役割	設備構成例
ACシステム	・一般送配電事業者や小売事業者とRAシステムの間に位置し、上位／下位それぞれと通信する。 ・上位の調整力提供指示に基づき、下位のRAを束ねて、調整力を供出する。	・Webサーバ ・パブリッククラウド等
RAシステム	・ACシステムとGWの間に位置し、上位／下位それぞれと通信する。 ・上位の調整力提供指示に基づき、下位の需要家側エネルギーリソースを束ねて調整力を供出する。	・Webサーバ ・パブリッククラウド等
GW	・RAシステムからの指令を、需要家側エネルギー機器への指令に変換する。 ・複数の機器に指示を出すものや、上位の指示を下位機器に合わせてプロトコル変換して指示を出すなど、様々な形態がある。	・IoT端末 ・シーケンサ等
需要家側エネルギーリソース	・需要家側エネルギー機器を制御することで得られる電力。 ・需要家が系統からの受電を調整することで、発電機の出力の調整と同等の効果が得られると想定される。	・再エネ機器 ・蓄エネ機器 ・負荷機器

表4. ACシステムの基本機能

機能	機能概要
RA情報管理	接続先RAの情報(契約容量、制御可能量、カレンダー等)を管理する
上位システム連係	一般送配電事業者の需給調整指令システムと連係し、指令値や実績データの送受信を行う
ベースライン計算	RAの過去データ(実績値、日付、気象)やカレンダーに基づき、ベースライン(精算時の基準需要)を計算する
調整力配分計算	各RAに対する調整力の配分量を計算する
調整指令発動依頼	RAに対し調整力供出依頼通知を配信する
調整発動確認	RAから調整力供出の依頼を受諾の回答を受信する
調整力供出実績収集	RAから指令発動期間中の実績値のレポートを受信する
実績値管理	RAごとの実績値(需要実績、調整力応答実績)を管理する

表5. RAシステムの基本機能

機能	機能概要
リソース情報管理	接続先リソースの情報(種別、契約容量、制御可能量等)を管理する
上位システム連係	ACシステムと連係し、指令値や実績データの送受信を行う
ベースライン計算	需要家の過去データ(実績値、日付、気象)やカレンダーに基づき、ベースライン(精算時の基準需要)を計算する
調整力配分計算	各リソースに対する制御量の配分を計算する
制御指令送信	各リソース又は集約GWに対して制御指示を送信する
リソース状態監視	リソースの死活状態を監視し、非活性時には配分対象から除外する
制御実績収集	各リソースの制御実績値を受信する
需要家向け情報公開	需要家向けに制御実績を公開する

表6. BLENder DRのサーバ構成

サーバ名	概要
VEN	上位システムとOpenADR通信するための連携用サーバ
APP	ベースライン計算や指令値配分計算、画面を起動させるためのアプリケーションサーバ
VTN	下位システムとOpenADR通信するための連携用サーバ
DB	各システムのマスタ情報と実績データの登録・変更・削除用のデータベースサーバ
Web	需要家向け情報公開用のサーバ

表7. BLENder DRのセキュリティ要件

	脅威項目	なりすまし	不正侵入・操作	サービス停止	盗聴	マルウェア感染
具体的対策						
アクセス制御(ログイン認証)		●	●			
パッチ適用						●
マルウェア感染対策						●
相互機器認証			●		●	
通信の暗号化			●		●	
冗長化サーバ				●		

3.2 BLENder DR

3.2.1 システムの基本機能

現在当社は調整力対応のVPPシステムとしてアプリケーションパッケージBLENder DRを開発している。BLENder DRが具備する ACとRA向けシステムの基本機能を表4と表5に示す。

現在のACとRAの業務は大きく、①制御可能なリソースを持っている需要家との契約、②調整指令発動当日のベースライン計算とリソースへの指令配分、③指令発動終了後の応動評価の三つに分類されている。BLENder DRでは①の契約情報を事前にシステム上に登録しておくことで、②、③の業務を自動化することが可能になっている。

また現行のBLENder DRの特長として、指令値を複数のリソースに対して配分する際の優先ルール方式の採用がある。これはリソースごとに設定・管理される制御回数実績や契約単価、契約登録順、過去の制御成功率から計算される信頼度などの指標を自由に組み替え、設定されたルールを基に優先的に配分する対象を決定する方式である。

従来大型発電機への配分は最適化計算方式が多く採用されてきている実績があるが、今後の需要家が持つ大量のリソースに対する配分指令の決定では、ルール設定によって演算ロジックをシンプルにすることで、システムの処理負荷を下げるのが狙いである。

3.2.2 サーバ構成／セキュリティ要件／通信機能

BLENder DRのサーバ構成を表6に、セキュリティ要件を表7に示す。

ACとRAシステムのサーバ構成は共通となっている。またセキュリティ要件はERAB検討会が発行している“エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するサイバーセキュリティガイドライン”に準拠することを前提に、BLENder DRは表7を要件として規定している。

BLENder DRの通信方式はOpenADR 2.0bを採用している。OpenADR 2.0bにはDR指令を送信するVTN(Virtual Top Node)機能と、これによって送信されたDR信号を受信するVEN(Virtual End Node)機能があり、VPPの各システム間をつなぐ標準プロトコルとして経済産業省が推奨している。当社はこのプロトコルのOpenADR Allianceの認証を2013年に取得しており、BLENder DRの標

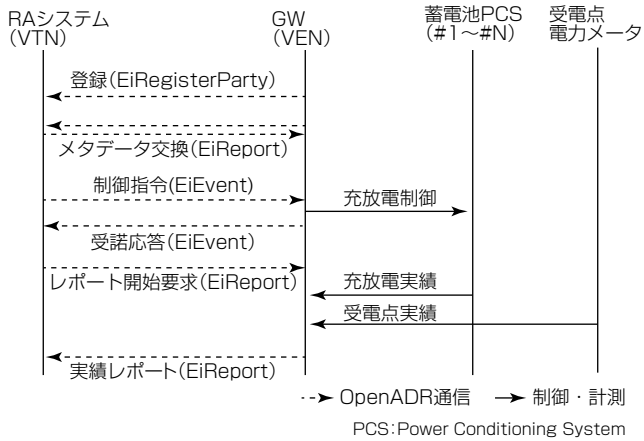


図4. OpenADRの通信シーケンス例

準インタフェースとして実装している。図4はVTN機能とVEN機能を使用したRAシステムとGW間の通信シーケンス例である。

3.3 VPP構築実証への適用による性能評価

経済産業省が主導するVPP構築実証事業では需給調整市場の商品要件に準じた共通メニューが用意されている。その中で2017年は当時の電源I-b(現在の二次調整力①②と三次調整力①に相当)に対応した実証が行われ、調整力供出の要請からその要請を達成するまでの時間を5分に設定したメニューで実証が行われている。この時、当社のBLENder DRはRAシステムとして実証本番ではリソースへの指令送信、及びACへの実績報告で1分以内の性能要求を課されており、問題なく達成している。その結果を表8にまとめて示す。

3.4 今後の開発の展望

BLENder DR開発の今後の展望を表9に示す。機能拡張については、今後需給調整市場の制度設計が進むことで事業者の業務フローが明らかになれば、前日段階での入札を含めた調整力供出計画や事後精算に必要な機能を追加していく予定である。また今後は、調整力不足のペナルティ回避や、表1に示したような調整力以外の目的でVPPを活用するニーズが高まることも想定されるため、例えば事前の計画と実績値の差分を高精度に補正する機能など、開発要件をブレークダウンしていく計画である。

性能向上については、将来のVPP事業規模拡大を想定し、演算ロジックやデータベース構造の見直しを行うとともに、MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)のような軽量の通信プロトコル採用による、大量データ通信に対

表8. BLENder DRの性能検証

評価項目	性能基準	測定実績
ACからの指令受信～リソースへの送信	1分以内	約35秒
リソース実績取得～ACへの送信	1分以内	約20秒

表9. BLENder DR開発の今後の展望

開発テーマ	現在の状況	将来の目標
機能拡張	・当日の需給調整要請に対応した業務機能が主体	・前日までの計画、入札業務及び事後精算関連機能の追加 ・調整力以外のVPP活用を目的とした機能の追加
性能向上	・実証のリソース規模に対応した性能	・大量のリソースに対して、データの送受信を短時間でを行うための通信や演算処理性能の向上
サービス化	・1システム1ユーザー利用 ・高価格モデル	・サブスクリプション型への移行による、1システム多ユーザー利用 ・低価格モデル

応していく考えである。

サービス化については、VPPへの新規事業者の参入障壁を下げることでBLENder DRの利用顧客拡大を目的とし、クラウドやオープンソースを活用した低価格かつサービス利用が可能な提供形態を目指した開発を推進する。

4. む す び

今後は国内の制度設計の動向を注視すると同時に、先行する欧米の事例調査を行いながら、要求されるニーズをいち早くキャッチアップすることで、当社のコア技術確立と製品展開を加速し、VPP事業へ参入するアグリゲータをターゲットとしたビジネス拡大に貢献する。

参 考 文 献

- (1) 板屋伸彦：需要家蓄電池と車載蓄電池を中核とした電力品質維持，スマートグリッド2018年4月号，21～25(2018)
- (2) 資源エネルギー庁：バーチャルパワープラント・デマンドリスポンスについて
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html
- (3) 電力広域的運営推進機関：(参考資料)需給調整市場について，第11回需給調整市場検討小委員会配布資料4-2-2，2019年4月25日(2019)
- (4) 資源エネルギー庁：エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会(第7回)-配布資料8-1 H29年度VPP構築実証事業の報告(2018)

電力システム改革に対応した 新需給計画・制御への取り組み

松田 勲*
桜井聖士*
須藤剛志*

Approach to New Balancing Scheduling and Control for Power System Reform

Isao Matsuda, Kiyoshi Sakurai, Takeshi Suto

要 旨

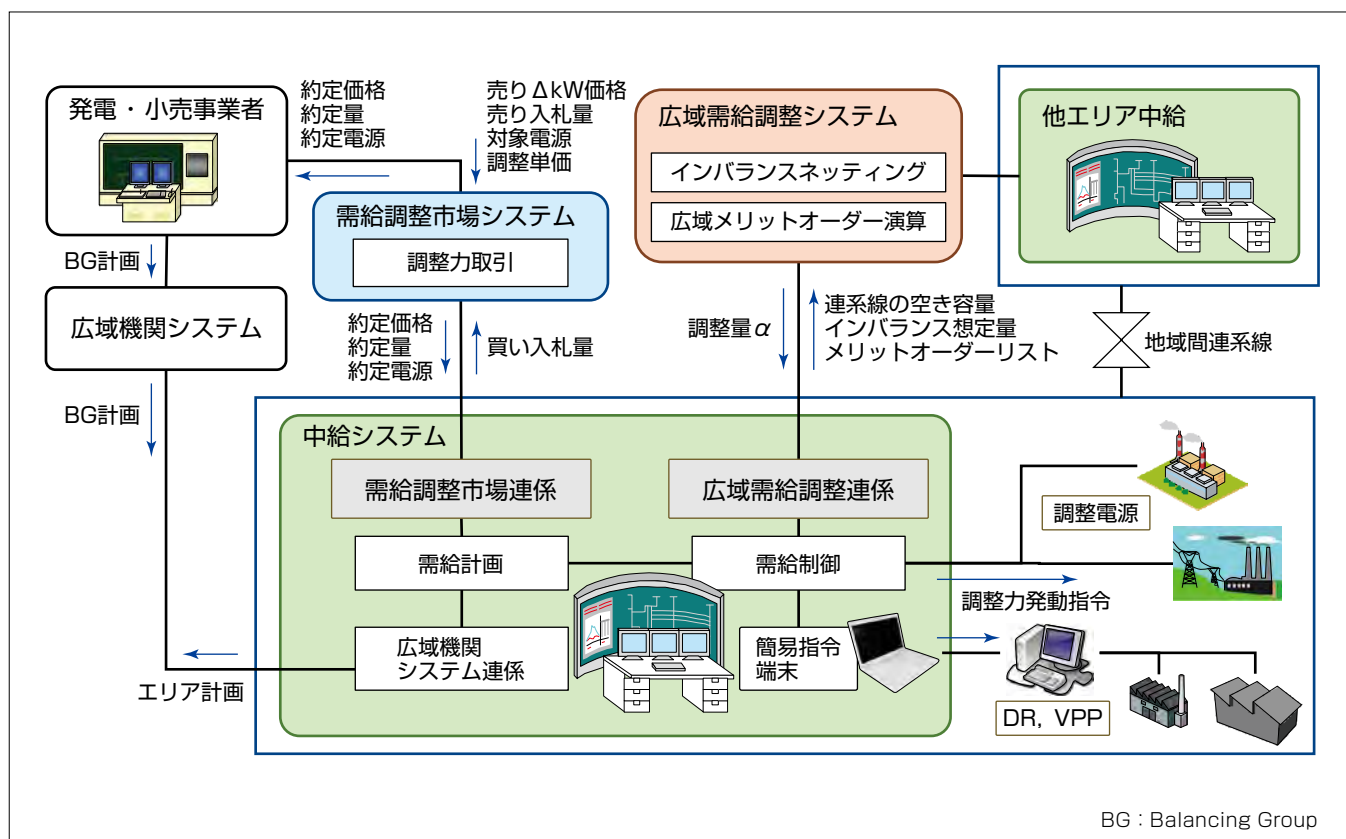
電力の安定供給の確保、電気料金の抑制、事業機会の拡大を目的として進められてきた電力システム改革の第3弾となる2020年の発送電分離に向けて、公正・公平な競争環境整備が進められている。

一般送配電事業者は、発電事業者等から調達した調整力によって、電力供給区域の周波数制御、需給バランス調整を行う。2021年4月には、一般送配電事業者が調整力を広域調達するための仕組みとして需給調整市場の導入が予定されている。また各一般送配電事業者が確保した調整力を、その価格に基づきリアルタイムで広域的に運用することが計画されている。その調整力の広域調達と広域的運用の実現に向けて、需給調整市場システムと、広域需給調整

システムの開発が進められている。

中給システムでは調整力の広域調達及び広域運用を実現するため、両システムとのデータ連係を行う。また、調整力を活用し、供給エリアの需給バランス調整、周波数制御を経済的に行うため、需給計画・制御機能の見直しを行う。また、需給調整市場への入札が想定されているデマンドレスポンス(DR)や仮想発電所(Virtual Power Plant：VPP)といった分散型のエネルギーリソースへの新たな指令方式を組み込む。

さらには、2021年の需給調整市場開設以降に予定されている短周期の商品市場化を見据え、周波数分析に基づく調整力必要量の算定方式について検討を行っている。



調整力広域調達・運用のための共通プラットフォームと中給システムの連係

調整力の広域調達と広域的運用の実現に向けて、共通プラットフォームとして需給調整市場システム及び広域需給調整システムの開発が進められている。中給システムは、両者と連係し、調達した調整力の活用によって供給エリアの需給バランス調整、周波数制御を行う。調整力のリソースとして、従来の大型電源に加え、DR、VPP等の分散型エネルギーリソースの入札も期待されている。

1. ま え が き

電力の安定供給の確保、電気料金の抑制、事業者の事業機会の拡大を目的として電力システム改革が進められてきた。その第3弾となる2020年の発送電分離に向けて、更なる競争の活性化実現のために、公正・公平な競争環境整備が進められている。

制度改革以前は、電力会社は各供給エリアで発電から送配電・小売まで垂直統合した計画・運用を実施しており、主として自社の発電所の出力を制御し、供給エリア内の需要家に対し電気を供給していた。それが2016年4月に施行された第2弾の改正電気事業法によって事業類型が見直され、それまでの電力会社は、事業内容から、発電事業者、一般送配電事業者、小売事業者に分割された。発電事業者及び小売事業者はいわゆる新電力と同等の立場から、計画値同時同量制度によって、30分単位で計画と実績を一致させる役割を担うことになった。一般送配電事業者は、小売事業者と発電事業者が策定した計画と実績の誤差、FIT(Feed In Tariff)特例制度による再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)予測誤差、30分より短い時間内での需要と供給の変動に対応して、電力供給区域の需給バランス調整及び周波数制御を行うことになり、そのために必要な調整力を発電事業者等から調達することになった(図1)。

調整力とは、一般送配電事業者が電力供給区域の周波数制御、需給バランス調整を行うために必要な能力であり、その調整力を調達するにあたって、特定電源への優遇や過大なコスト負担を回避しつつ、実運用に必要な量の調整力を確保する仕組みの構築が重要となる。

現在は、公募によって供給区域内から調整力を調達しているが、2021年4月には、一般送配電事業者が調整力を広域調達するための仕組みとして需給調整市場の導入が予

定されている。また一般送配電事業者が確保した調整力を、その価格に基づきリアルタイムで広域的に利用することが計画されている。具体的には、調整力の広域調達と広域的運用の実現に向けて、共通プラットフォーム(“需給調整市場システム”と、“広域需給調整システム”)の開発が進められている。

本稿では、調整力の広域調達・運用の基幹システムとしての需給調整市場システム及び広域需給調整システムについて述べた後、両者と連携し、調整力の活用によって供給エリアの需給バランス調整、周波数制御を担う中給システムでの新需給計画・制御への取組み内容について述べる。

2. 調整力の広域調達・調整

2.1 需給調整市場システム

調整力は、一般送配電事業者が周波数を維持し、安定供給を実現するために重要な役割を担っている。需給調整市場はこの調整力を取引する市場であり、市場開設によって、競争が促進され、調達コストの低減が期待されている。市場化に当たっては、調達の広域化とともに、取引される商品の細分化を行うことにしている(表1)。

商品はその要件から、表1に示すように五つの商品に細分化され、需給調整市場開設時点(2021年4月)では、そのうち三次調整力②が商品として取引されることになり、2024年度までに残りの商品取引も開始される予定である。

2.2 広域需給調整システム

広域需給調整システムは2020年4月に一般送配電事業者3社の中給システムとの連携を開始し、2020年度内に9社に拡大する予定である。

広域需給調整は、“インバランスネッティング”と“広域メリットオーダー”を組み合わせて、現時点から数十分先の調整力の広域運用を実現する。インバランスネッティングは、各供給区域の余剰インバランス想定量と不足インバランス想定量とを供給区域間で相殺することによって行う。また、広域メリットオーダーは、インバランス相殺後の調整必要量に対して、調整力のメリットオーダーリストに基づき、一般送配電事業者間の連系線(地域間連系線)の空き容量を制約として各供給区域に合理的に配分された量(調整量 α という)を、地域間連系線を介して融通することによって行う。

広域需給調整の演算周期は、広域需給調整が当初の運用開始時点では30分周期、9社に拡大される時点では15分周期となり、将来(2023年4月)は、5分周期で演算することが計画されている。数分ごとの演算に対し、運用者が介入することを回避するため、平常時は全自動で実施するような機能が必要である。

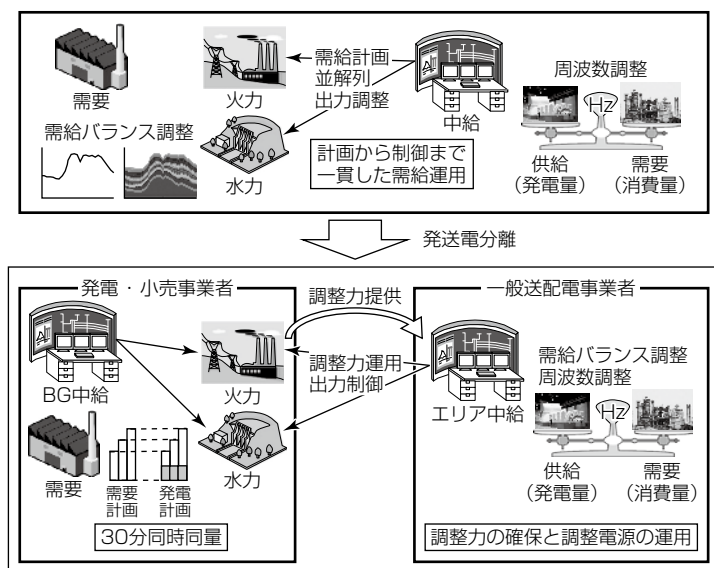


図1. 発送電分離による電力事業の分離

表 1. 需給調整市場の商品

	一次調整力	二次調整力 ①	二次調整力 ②	三次調整力 ①	三次調整力 ②
市場化 (予定)	2024年 4 月	2024年 4 月	2024年 4 月	2022年 4 月	2021年 4 月
指令・ 制御	オフライン (自端制御)	オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
回線	専用線	専用線	専用線	専用線	専用線または簡易指令システム
指令間隔	— (自端制御)	0.5～数十秒	1～数分	1～数分	30分
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内	45分以内
継続時間	5分以上	30分以上	30分以上	商品 ブロック (3時間)	商品 ブロック (3時間)

3. 新需給計画・制御への取組み

中給システムでは制度変更によって需給運用を取り巻く環境が変わることから(表2)、機能の見直しが進められている。制度変更に対応するための市場開設までの具体的な機能見直し内容について3.1節から3.4節に示す。市場開設以降2024年にかけて短周期変動に対応する商品が取引対象となる予定であり、その課題と対策を3.5節で述べる。

3.1 需給調整市場システムとの連係

需給調整市場が開設される2021年4月時点で取引される調整力である三次調整力②は、応動時間(指令タイミングから、出力がその指令値に到達するまでの時間)の最も長い商品であり、再エネ予測誤差に対応することと位置付けられている。一般送配電事業者は過去の実績に基づき必要量を算定し、前日段階で市場入札・調達を実施する。

3.2 広域需給調整システムとの連係

各中給システムでは、小売事業者等から提出された計画値とエリアの最新予測値の差をインバランス想定量として算定する。また需給制御の計算結果である将来の運転可能領域と発電事業者の発電計画値の差から各調整電源の調整可能量を算出し、調整可能量を調整コスト順に並べ替えたメリットオーダーリストを作成し、広域需給調整システムに送信する。広域需給調整システムでは、各社の結果から調整量 α を算出・送信し、中給システムは、調整量 α を受信した上で、これを制御目標値に反映し、需給制御を実施する。広域需給調整システムでは、各中給から提出されたメリットオーダーリストから広域的に最経済となるよう α を算出する。そのため、メリットオーダーリストと実際に調整力を発動する電源に差異が生じると、広域的な経済性が損なわれることになるため、インバランス想定量の算定に精度が求められる。インバランス想定量の精度とはすなわち最新予測値の精度であり、精度向上のためには、最新データを用いた数分から数十分先の需要予測・再エネ予測技術が必要となる。短期の再エネ予測技術としては、至近実績データを用いたモデルや最新気象情報を用いたモデル等、複数の予測モデルを組み合わせたアンサンブルモデルが再エネ出力予測システムに適用されている⁽¹⁾。

表 2. 需給運用の環境変化

	制度変更前	制度変更後
運用指針	予備力	調整力
経済性	運転コスト (起動費+燃料費)	調整コスト (運用費)
確保方法	主として自社	需給調整市場
調達・運用	供給区域内	広域
調達設備	発電設備	発電設備、DR、VPP
確保タイミング	長期(年間レベル)	短期(週間～前日)

3.3 調整コストの最適化

発送電分離によって、安定供給の役割は各事業者に分割される。長期的な需給変動対応は主として小売事業者の役割となる一方、一般送配電事業者は小売事業者のインバランス及び短周期の需給変動対応に必要な調整力を調達し、調達した調整力を経済的に運用して需給バランス及び周波数調整を実施する。需給計画・制御の経済性を評価する指標も従来用いられてきた電源の運転コスト(起動費+燃料費)の最小化から、市場等で調達した調整力を運用するための調整コスト(運用費)の最小化に見直される。

調整コストは調整電源ごとに発電事業者等(BG)が提出した出力計画30分電力値を基準とし、一般送配電事業者調整後の30分電力実績値がBG計画値より高ければ、上げ調整単価(V1)×電力量の差分をBGに支払い、逆に低ければ、下げ調整単価(V2)×電力量の差分をBGから受け取ることにしており、需給計画・制御の最適化手法の定義を見直している。また市場化以前は、V1、V2は週間単位でBGが提出する運用となっているが、市場化後は、実需給1時間前まで単価が差替可能になるように制度が変更される。計画段階では期間全体を通した最適化を実施しているが、実運用段階で単価が修正される可能性があるため、需給制御では、最新の調整単価を取得し、再計算を的確に実施するよう機能の見直しを行う。

3.4 調整電源の多様化

調整電源の種別としては、当面は引き続き火力発電所が主力となるが、需要家の受電点以下に接続されている分散型エネルギーリソースを用いたDRや、それに系統接続の発電設備、蓄電設備を加えたVPPの契約容量が増大する可能性があり、中給システムでは新たな電源種別として需給計画・制御機能に組み込む必要がある。これらは主に三次調整力②として調達され、専用線オンラインではなく簡易指令システムを通して需給バランス調整を指令する想定である。2021年4月には中給システムと簡易指令システムのデータ連係が計画されており、需給制御で調整力発動を決定した簡易指令電源に対し、簡易指令システムを介して指令が送信される。VPPやDRは分散型の新たな調整力源であり、追従性や精度等の制御性能が未知数であるため、その資格要件や評価方法が電力広域的運営推進機関(広域機関)の委員会等で検討されている。

3.5 需給調整市場商品細分化への対応

三次調整力②以外の商品は、より短周期の変動に関連するものであり、需給制御に密接に関わってくる。これまでは、主に自社電源設備によってエリア全体の安定供給に必要な供給力を確保した上で、長期から短期までの様々な需給変動に対応し、需給バランス調整及び周波数調整を実施してきたが、今後は需給制御に必要な調整力を市場調達によって確保することになり、需給変動の周波数分析によって各商品の調整力必要量を算定する機能が重要になる。

中給システムでは、電力系統の周波数及び連系線潮流を規定値に維持するため、周波数変化量や連系線電力変化量などを検出し、発電機の出力を制御する負荷周波数制御(Automatic Frequency Control/Load Frequency Control : AFC/LFC)と、将来の需要予測に基づき、計算期間全体で最経済となるよう各発電機の負荷配分を行う経済負荷配分制御(Economic Dispatching Control : EDC)の2種類のオンライン制御の協調によって需給制御を行っており、調整力商品のうち、二次調整力①、二次調整力②、三次調整力①が、中給システムのオンライン制御の対象になる。この3商品の運用によってAFC及びEDCが安定して実施できるよう、周波数分析を中心としたデータ分析技術によって必要量を算出し、効果的に調達することが調整力調達の今後の課題である。

ここでは、2021年度以降に予定されている需給調整市場商品の細分化に対応した調達量算出方法の試案として検討している、周波数分析について述べる。

中給システムのオンライン制御の対象となる商品は表1のうち、二次調整力①、二次調整力②、三次調整力①であり、うち二次調整力①がLFC信号、二次調整力②と三次調整力①がEDC信号に対応するものとされている。制御対象である総需要の変動は数秒から数時間程度の周波数変動が合成されたものであり、周波数成分に応じて、発電機のローカル制御であるガバナフリー(GF)と、オンライン制御であるLFC及びEDC制御で対応している。したがって総需要変動実績を周波数成分ごとに分解することで各制御に対応した商品の必要量を見積もることが可能になる。周波数分析手法としては、一次遅れフィルタや移動平均等のローパスフィルタによって特定の周波数成分を抽出する方法があるが、ここでは時系列データの周波数分解手法で

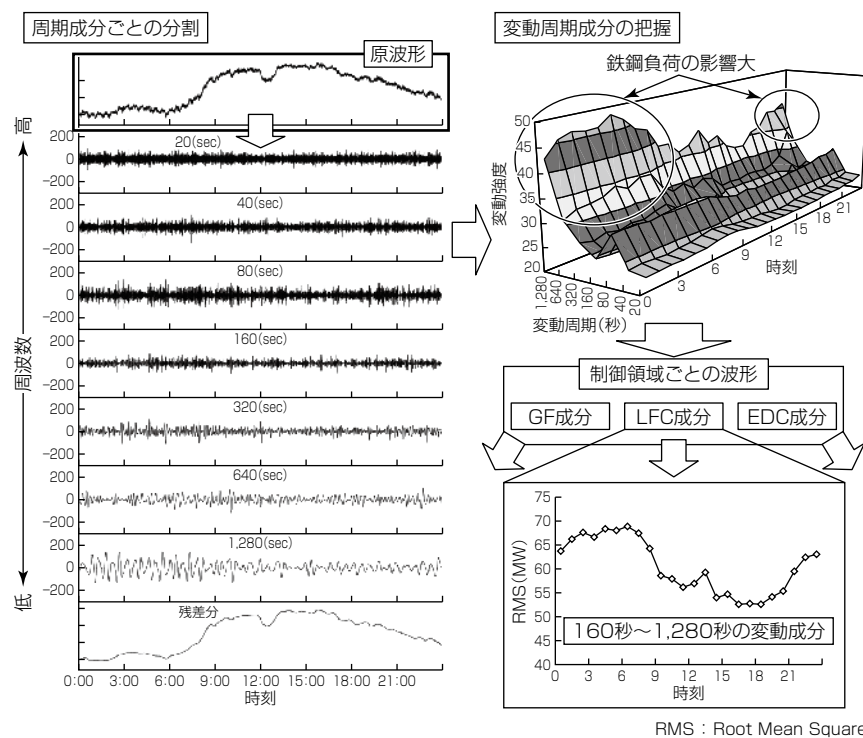


図2. ウェーブレット変換による周波数分析

あるウェーブレット変換の適用例を示す(図2)。ウェーブレット変換は周波数成分の時間による変化の特徴を表すことが可能であり、需要の周波数分析に適した手法である⁽²⁾。

将来商品化される短周期の調整力必要量の算定指標は、広域機関の委員会等で検討されているが、周波数分析によって、指標の妥当性を示すことが可能になる。

4. む す び

電力システム制度改革によって、これまで垂直統合されていた旧電力会社は、発電、小売、送配電の事業に分割された。一般送配電事業者は電力系統の安定化と経済性を維持するため、適切な調整力を、供給エリアをまたがって需給調整市場から調達し、広域需給調整システムとの連係を通して、広域的に運用することになる。

需給調整市場の詳細な仕様については、現段階で不明な点も多く、関連する委員会の動向を確認しながら、短期間で開発を進めるとともに、将来の商品多様化を見据えた中給システムの開発を行っていく。

参 考 文 献

- (1) 花岡 伸, ほか: 再生可能エネルギー発電出力予測システム, 三菱電機技報, 93, No.11, 639~642 (2019)
- (2) 平神真也, ほか: ウェーブレット変換を用いた系統動揺現象観測装置データの分類手法について, 平成26年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文No.124 (2014)

再生可能エネルギー発電出力予測システム

花岡 伸*
利根川 繁*

Output Forecasting System for Power Generation through Renewable Energy

Shin Hanaoka, Shigeru Tonegawa

要 旨

固定価格買取制度(Feed In Tariff: FIT)の導入以降、太陽光や風力といった再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)を利用した発電所の導入が急速に拡大している。再エネ発電は天候によって発電出力が大きく変動するため、電力を安定して供給するためには、事前に再エネの発電出力を把握することが必要になる。

三菱電機は送配電事業者向け再エネ発電出力予測システムを開発した。このシステムは、気象予報情報を取り込み、再エネ発電所、又はエリアごとに発電出力を予測するものであり、次のような特長がある。

(1) 学習による精度向上

過去の予測値と実績値との関係を学習し、統計的に誤差を補正することで、自動的に精度を改善する。

(2) 複数の予測モデルの合成による精度向上

特性の異なる複数の予測モデルによる予測を合成することで、予測精度を向上させる。

(3) 信頼区間の表示

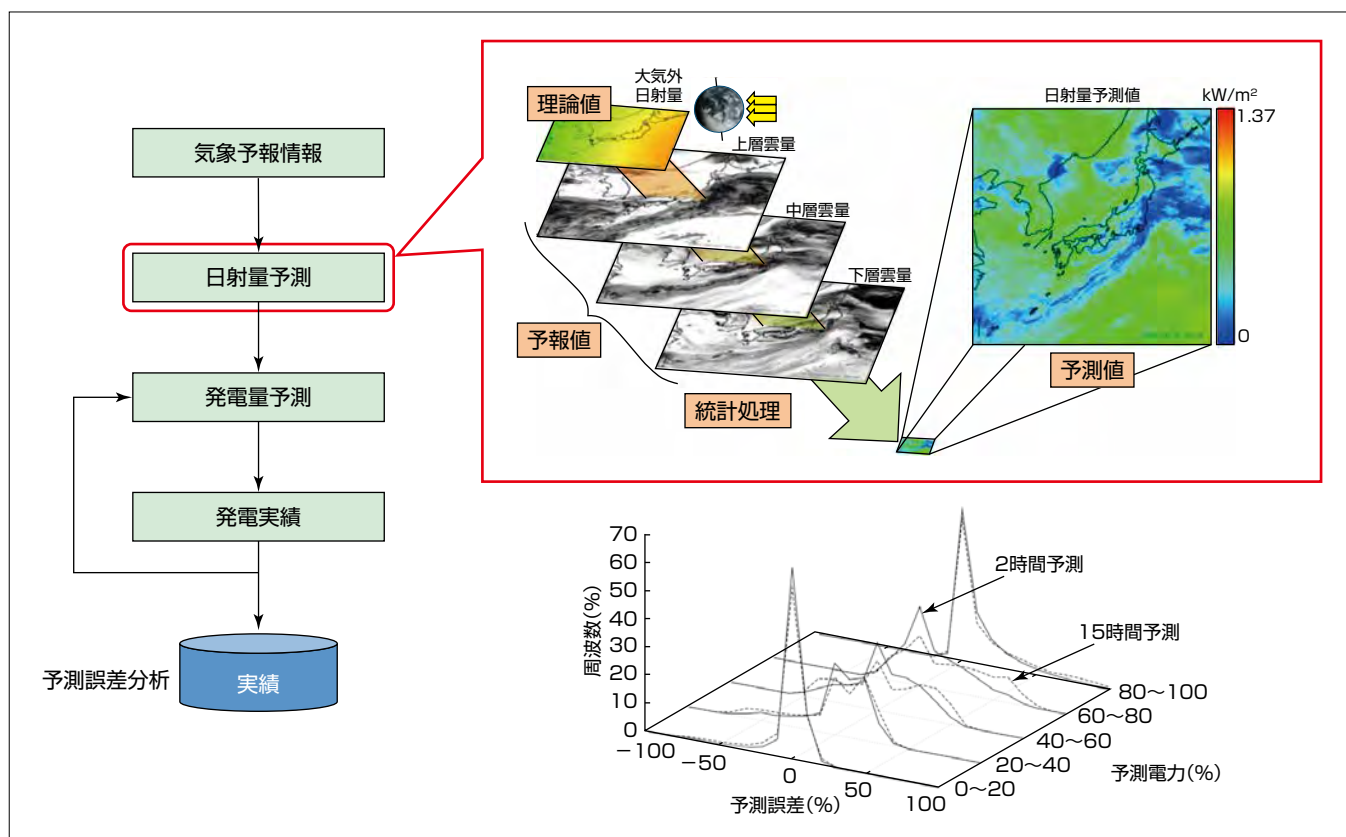
過去の予測誤差の実績から、統計的に誤差の分布を推定することで、予測の信頼度に応じた信頼区間を表示する。

(4) 設備量データの更新作業省力化

設備を管理するシステムとデータ連係することで、日々増加する再エネ発電設備量データの更新作業を自動化する。

(5) 積雪による影響の補正

積雪を予測して出力予測を補正することで、積雪時の予測誤差を抑制する。



再エネ発電出力予測の手法

再エネ発電出力予測システムでは、気象予報情報から日射量を予測し、さらに発電量を予測する。また、過去の予測値と実績値の関係を学習し、統計的に誤差を補正することで、自動的に精度を改善する。

1. ま え が き

FITの導入以降、太陽光を始めとした風力・地熱・バイオマスなどの再エネを用いた発電所の導入が急速に拡大し、電力系統全体に対する再エネによる発電量の割合が増加している。特に一部の送配電事業者管内では、電力需要が少ない大型連休の快晴日の昼間には、太陽光発電が全発電量の90%近くを占める状態も発生している。一方、太陽光、風力による発電出力は天候による変動が大きく、急激な出力変動に備えた予備電力の調達コストの増加や、電力系統の周波数変動などの電力の品質低下が問題となっている。そのため、最小限の予備電力で電力系統の品質を確保するには、天候によって変動する再エネ発電量の正確な予測が必要になる。

このような背景から、当社では、送配電事業者の需給運用業務を支援する目的で、再生可能エネルギー発電出力予測システム(以下“再エネ予測システム”という。)を開発し、複数の送配電事業者に納入してきた⁽¹⁾。

本稿では、再エネ発電のうち電力系統に大きな影響を与えている太陽光発電の予測について、システムの概要と今後の展開を述べる。

2. システム機能

2.1 機 能

再エネ予測システムでは、送配電事業者の需給運用で必要になる週間、翌日、当日の発電出力予測を行っており、週間は264時間、翌日は39時間、当日は12時間先までの発電出力の30分平均値を予測している。

予測の単位は、特別高圧(20kV以上)は太陽光発電所単位としている。高圧・低圧(6kV以下)には多数の家庭用太陽光発電設備が設置されているため、個々の予測は困難であり、送配電事業者による発電設備容量の集約地点単位(全体で100か所程度)を予測の単位としている。また、これらの予測結果をならし効果を考慮して積算することによって、供給区域全域又は地域別(県など)の予測を行っている。

送配電事業者の需給運用業務では、再エネ発電出力の実績値の計測も必要となる。特別高圧の太陽光発電所では実績値を計測しているが、高圧・低圧の実績値は計測していないため、このシステムには高圧・低圧の実績値を推定する機能を実装している。

予測、推定機能では、気象会社などから受信した気象データを基に日射量を算出し、さらに日射量に対する発電出力特性から発電出力を算出している。また、システム内に蓄積した過去の予測誤差をAI(人工知能)で学習し、予測値を補正する機能も実装している(図1)。

2.2 日射量予測機能

再エネ予測システム開発時には週間、翌日の日射量予報

が存在しなかった。そのため、当日、翌日の日射量は、気象庁から配信されているGPV(Grid Point Value)気象予報の過去の雲量予報値、及び日射量実績値を統計処理して独自に日射量予測モデルを作成し、このモデルに雲量予報値を入力して予測している(図2)。

当日の日射量については、様々な予測モデルが考案されており、3.2節で述べるとおり、これらの予測モデルを使用して、精度の高い予測を実現している。

2.3 日射量推定機能

予測に使用できる日射量の計測点は、一般に各県に1～3地点程度であり、粗いデータしか得られない。そのため、各県に20～30地点で計測されているアメダスの日照時間を利用して、日照時間から日射量を推定する機能を開発した。

この推定機能では、日射量計測地点と推定対象地点との日照時間の類似度を算出し、類似度に応じて重み付けを行い、複数の日射計測地点の日射量実績値を合成することで、推定対象地点の日射量推定値を算出している。

2.4 発電出力変換機能

発電出力変換機能では、過去の日射量実績値(又は推定値)と発電出力実績値を統計処理して独自に発電出力特性モデルを作成し(図3)、このモデルに日射量予測値、推定値を入力して発電出力の予測・推定を行っている。

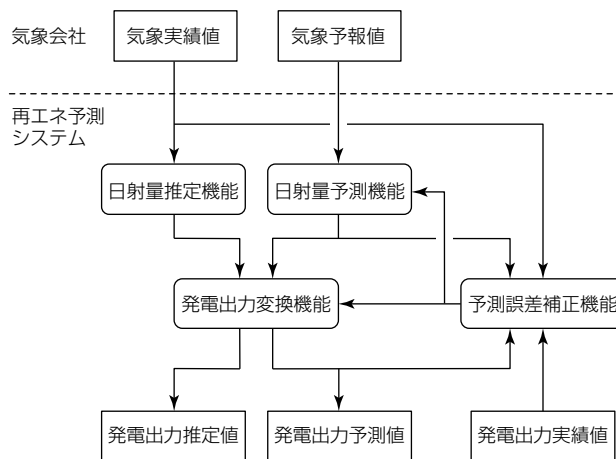


図1. 再エネ予測システムの機能構成

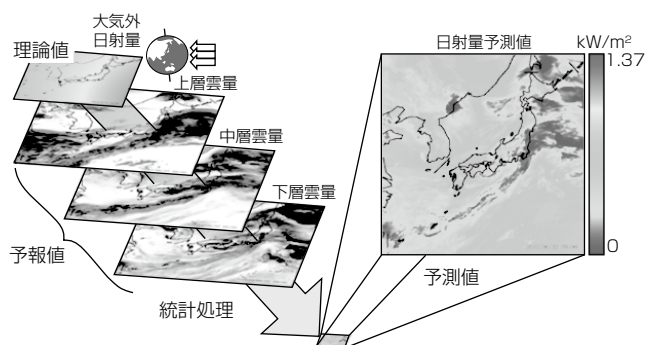


図2. 日射量の予測

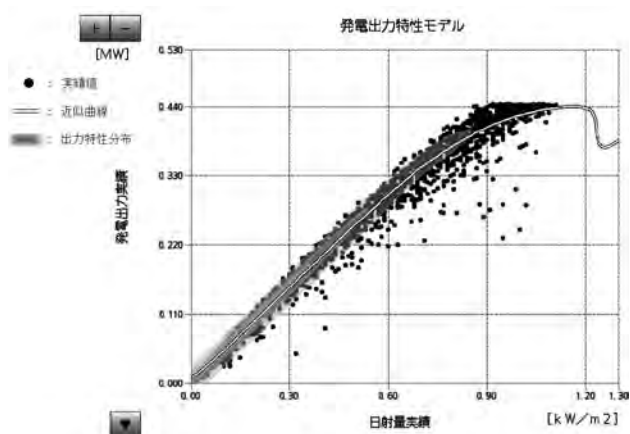


図3. 発電出力特性モデルの画面表示例

3. 予測精度向上への取組み

再エネ予測システムでは、予測精度を向上させるための各種機能を実装している。この章では、これらの機能について述べる。

3.1 学習による精度向上

日射量の予測値と実績値を分析した結果、季節によって偏りが発生する場合があることが分かっている。過去の発電出力の予測値と実績値の関係をAIによって統計的に学習し、誤差を補正することによって、精度を改善する機能を開発した(図4)。

この機能では、システム運用中に蓄積した誤差データを自動的に学習して、精度を改善可能である。

3.2 複数の予測モデルの合成による精度向上

当日の再エネ発電出力予測精度が悪いと、予備電力の調達コストの増加や電力品質の悪化への影響が大きい。当日の日射量予測には様々なモデルが考案されているが、モデルごとに予測精度の高い時間領域、低い時間領域がある。そこで、各予測モデルの予測精度を算出し、時間領域ごとに予測精度の高いモデルを適用するように自動的に重み付けして合成する(アンサンブル予測)ことによって、精度向上を実現した(図5)。

3.3 信頼区間の表示

予備電力の準備に当たっては、発電出力予測値がどの程度の誤差を含んでいるかを把握する必要がある。そこで、発電出力の予測誤差の実績値を基に予測誤差の分布を推定する機能を開発した。予測の信頼度に応じた信頼区間をグラフの濃淡で表現することが可能になっている(図6)。

3.4 設備量データの更新作業省力化

太陽光発電の設備量は日々増加するため、システム運用者による設備データ更新作業の負担が大きくなる。そこで、設備を管理するシステムとデータ連係して更新作業を自動化することによって、省力化を実現した。

3.5 積雪による影響の補正

積雪によって太陽光パネルが雪に覆われた場合には、発

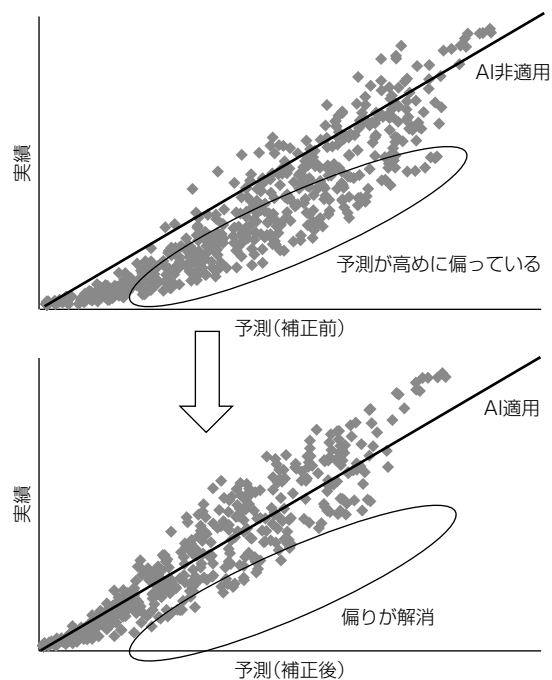


図4. AIを適用した誤差の補正

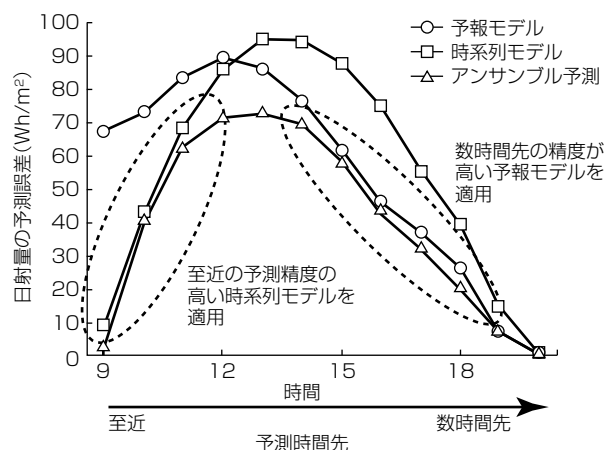


図5. 複数の予測モデルの合成

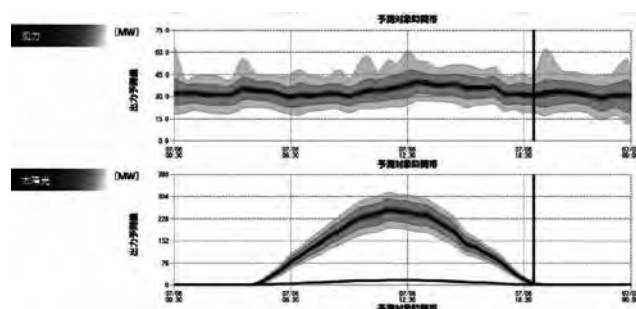


図6. 信頼区間の画面表示例

電出力が低下して過大な予測誤差が発生する。そのため、積雪を考慮して出力予測を補正する機能を開発した⁽²⁾。

この機能では、積雪による発電出力の減少を出力効率としてモデル化することで、降雪や融雪による太陽光パネル上の積雪の変化による出力変動を模擬している。図7に積雪補正による出力予測を示す。出力効率は日射量を発電

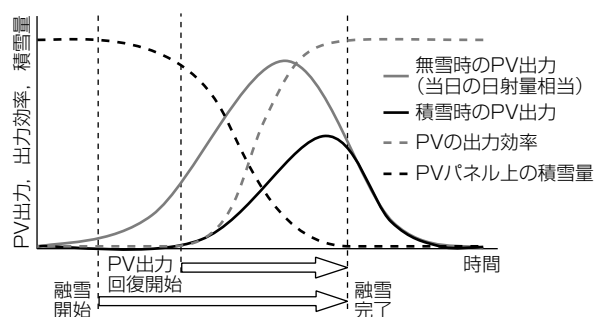


図7. 積雪時の太陽光発電出力推移のモデル

出力に変換する際の変換係数であり、太陽光パネル上に一定以上の積雪がある場合は0となり、積雪がない場合は100%になる。太陽光パネル上の積雪が一定量まで融雪すると徐々に出力が回復し、融雪完了とともに出力効率が100%になる。

この機能を実現するためには積雪量の予測値が必要となるが、積雪量の予報は存在しないため、GPV気象予報で得られる気温、降水量の予報値と、システム内で算出している日射量予測値を入力する積雪量予測モデルを合わせて開発した。

4. 今後の取組み

システムの開発から数年が経つが、再エネ発電の導入が更に進んでおり、より高い予測精度が求められている。

また、電力制度改革の観点でも精度向上が求められている。現行の制度では、再エネ発電出力の予測誤差によって発生した需給インバランスに対して、送配電事業者が公募によって確保した調整力を使用して需給バランスの調整を行っている。一方、2021年4月に需給調整市場が開設されると、再エネ発電出力の予測誤差に対応した調整力は、前日段階で市場から入札・調達する必要がある。また、実際に調整力を発動する際には、再エネ予測値などから算出されたインバランス想定量を基に、調整コストを最小化するように需給制御が行われる⁽³⁾。このように、電力制度改革によって、再エネ予測の精度が送配電事業者の託送コストに直接的に影響を与えるようになるため、再エネ予測システムには、更なる精度向上が求められている。次に精度向上に向けた取組みについて述べる。

4.1 発電出力予測地点の細分化

2.1節で述べたとおり、現在の高圧・低圧の出力予測は、100か所程度の集約地点単位で行っている。一方で、GPV気象予報では5kmメッシュで予報が提供されており、出力予測の地点数の約30倍の細かさになっている。このように、現在の予測方法では、予報のメッシュを十分に活用できていない。

そこで、高圧・低圧太陽光発電設備の工場、家庭1軒ごとの設置位置情報を基に、設備容量をGPV気象予報の

メッシュ単位に集約することによって、メッシュ単位の出力予測を可能にし、予測精度を向上させることを検討している。

4.2 スマートメータシステムとの関係

2.4節で述べた発電出力特性モデルは、実測値を計測している特別高圧の太陽光発電所では精度の高いモデルを作成している。一方、高圧・低圧では、設備の代表的な発電効率を基にしたモデルしか作成しておらず、実態のモデルと乖離(かいり)しており、予測精度に課題がある。

そこで、スマートメータの実績値を取り込み、出力地点単位に集約することによって、高圧・低圧についても精度の高い変換モデルの作成を検討している。

4.3 短時間先予測の精度向上

調整力を発動する際に使用されるインバランス想定量を算出する際には、数分から数10分先の高精度の予測が必要となる。そこで、短時間先予測に対応した気象予報値の取り込み、及び実績値をベースに予測するモデルを活用した短時間先予測手法について検討している。

4.4 信頼区間の精度向上

需給調整市場開設後、予備電力の調達コストを削減するためには、予測自体の精度に加えて予測誤差(信頼区間)の精度を向上させる必要がある。供給区域全域の予測に対する信頼区間の算出には、ならし効果の影響を正確に評価するなど、精度向上の余地があるため、信頼区間の推定精度向上について検討している。

5. む す び

FITの導入以降、太陽光を始めとした再エネを利用した発電所の急速な導入に対応して、当社が開発した送配電事業者向けの再エネ予測システムについて述べた。現状、再エネ予測システムは複数の送配電事業者で適用されており、更なる精度向上に向けて様々な改善を行っている。

今後、再エネ発電所は主電源としての位置付けが高くなり、制御が必要になってくると想定される。予測機能だけでなく、電力制御としての機能を適用し、再エネ発電の中核システムとして展開していく。

参 考 文 献

- (1) 花岡 伸, ほか: 再生可能エネルギー予測システムの開発, 電気学会保護リレー研究会発表資料, PPR-16-027 (2016)
- (2) 花岡 伸, ほか: 積雪を考慮した太陽光発電出力予測手法の検証について, 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.114, 1-2-25~1-2-26 (2018)
- (3) 松田 勲, ほか: 電力システム改革に対応した新需給計画・制御への取組み, 三菱電機技報, 93, No.11, 635~638 (2019)

電力流通分野向け アセットマネジメントシステム

井手太一* 岸岡伸和*
小田桐真人*
森 俊治*

Asset Management System for Electrical Distribution & Transmission Line of Business

Taichi Ide, Makoto Odagiri, Shunji Mori, Nobukazu Kishioka

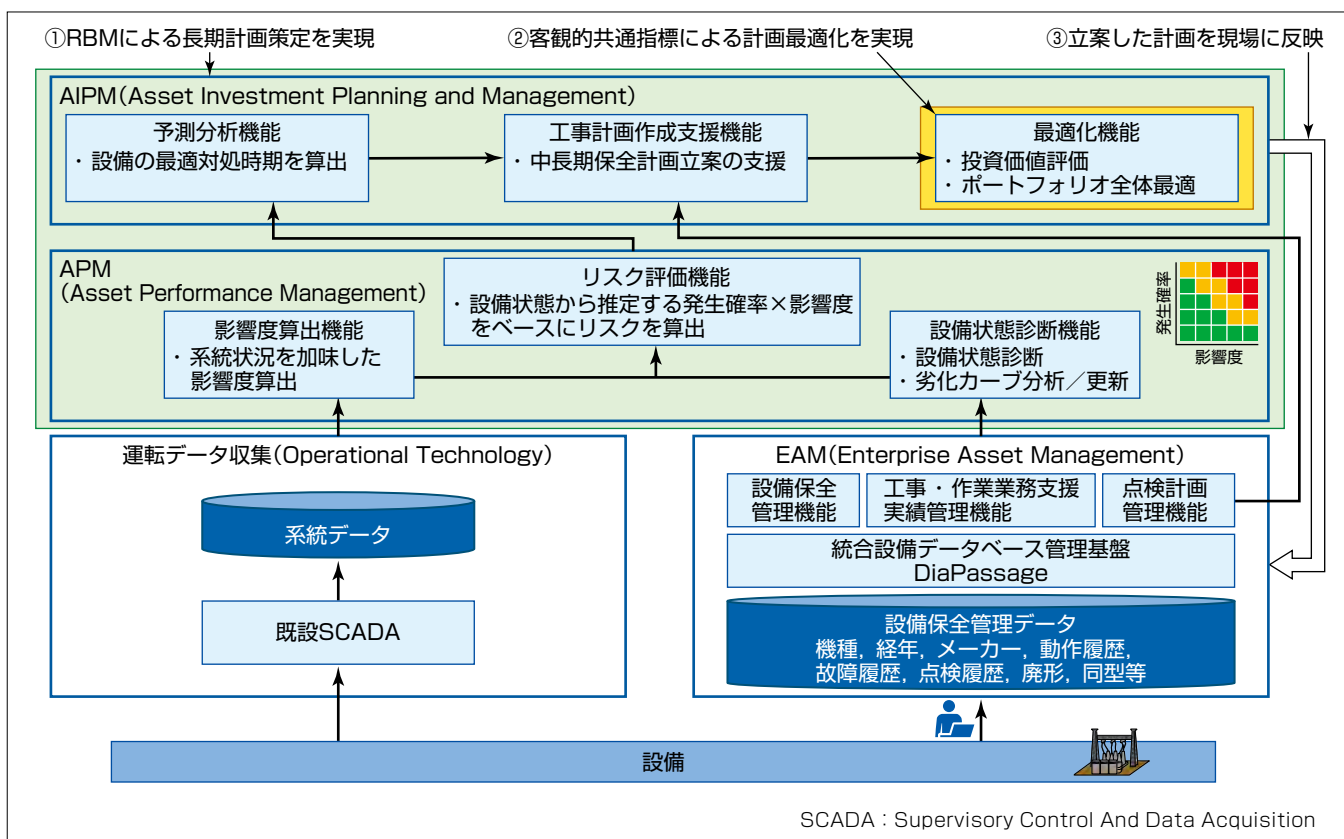
要 旨

電力流通分野は、高度経済成長期からバブル期に大量導入した設備が高経年期を迎えており、保全費の増大が予想される。さらにベテラン作業員の高齢化に伴う作業力減少が懸念される。一方で、託送料金制度の下、託送原価として適正な設備投資費用の説明が必要になり、従来の設備経年に従って修繕・取替えを実施するTBM(Time Based Maintenance)に代わり、設備の状態・リスクを把握し、これに基づいた設備保全投資の計画立案と運用を行うRBM(Risk Based Maintenance)が求められる。

これらの課題が存在する中、アセットマネジメントについて、ISO55000シリーズの考え方をベースに電力流通分野の設備に関するアセットマネジメントにスコープを

当ててIEC(International Electrotechnical Commission)のTC123が国際標準化に向けて検討を進めている。

三菱電機は、これまで社会インフラに携わる顧客に提供してきた統合設備データベース管理基盤“DiaPassage”に加え、これら動向を踏まえ、設備状態や影響度からリスクを評価するAPM(Asset Performance Management)の実現及びAIPM(Asset Investment Planning and Management)領域で海外実績の豊富なCopperleaf社とパートナー契約を締結し、Copperleaf社製品C55と当社製品の組合せによって電力流通分野に適したアセットマネジメントシステムを提供していく。



当社が提供する電力流通分野向けアセットマネジメントシステムの構成

電力流通分野向けアセットマネジメントシステムは、顧客が日々管理する設備保全管理データ及び系統データをインプットに系統リスク等を評価し、それらリスクを基に最適な投資計画を導出するシステムである。

1. ま え が き

託送料金制度の下、託送原価として適正な設備投資費用の説明が求められる。一方で、高度経済成長期からバブル期に大量導入した設備が高経年期を迎えており、保全費の増大が予想される。さらにベテラン作業員の高齢化に伴う作業力減少が懸念される。保全費抑制及び作業力減少と相反する課題が存在する中、電力システム安定化のため、必要な設備の保全投資を適正な説明の下で行う必要がある。そこで従来の設備経年に従い修繕・取替えを実施するTBMに変わり、設備の状態・リスクを把握し、これに基づいた設備保全投資の計画立案と運用を行うRBMが求められる。

本稿では、当社が提供する電力流通分野向けアセットマネジメントシステムの構成と機能について述べる。

2. アセットマネジメントに対する動向

アセットマネジメントに関する国際規格として、2014年にISO55000シリーズが発行された。ISO55000シリーズでは、組織の計画・組織の目標(ビジョン)から方針、戦略、現場レベルの計画まで、一つの流れ(以下“Line of Sight”という。)とし、トップマネジメントから現場レベルまで一貫して取り組む仕組みの構築が求められる(図1)。

また、ISO55000シリーズの考えをベースに日本主導で電力流通設備のアセットマネジメントにスコープを当てたIEC/TC123(Management of network assets in power system)が2016年10月に設立され、中長期戦略、ライフサイクルコスト、リスク分析等標準化に関し検討している。

さらに、電気協同研究会でも2018年度から“変電設備の保全高度化とアセットマネジメント研究”として文献調査による研究を行っている。

これら動向を踏まえ、当社は、設備の状態、定量化に基づくリスク評価及び立案した計画の現場反映の実現を目指す。

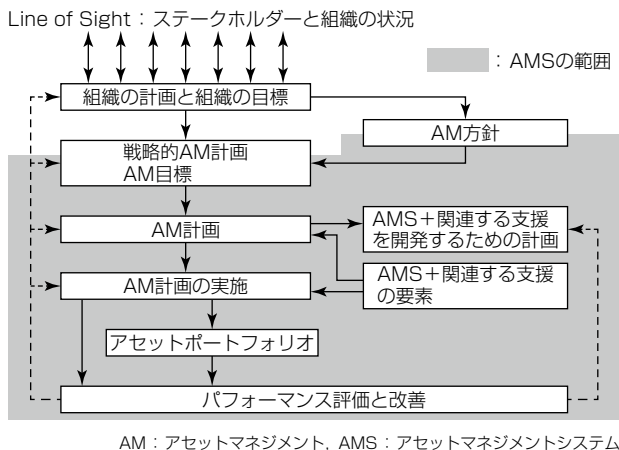


図1. アセットマネジメントシステムの要素間の関係⁽¹⁾

3. 当社アセットマネジメントシステムの構成と機能

2章で述べたとおり、国内外でアセットマネジメントが求められる中、当社は電力流通分野向けアセットマネジメントシステム(以下“アセットマネジメントシステム”という。)を提供する。昨今の動向及び電力流通分野での課題を加味し、求められる要件を表1、実現する機能を表2、システム構成を図2に示す。

3.1 EAM

多種・多様の設備を持っている企業に対し、当社は従来、保全業務で共通で利用可能な機能及び統合設備データベース管理基盤DiaPassageを社会インフラに携わる顧客に提供してきた。設備保全管理機能によって、設備の仕様と各種図面、巡視・点検の記録、事故の履歴や事故同型機器の情報等が一元的に管理されて現場の設備保全業務を支援する。また、最適化工事計画に基づきリソース(ヒト、モノ)の割当て及び作業管理を実現する。

3.2 APM⁽²⁾

当社のAPMは、設備状態診断機能、影響度算出機能及びリスク評価機能で構成しており、設備状態及び影響度からリスクを算出する(図3)。また、国際標準を組み込み、システム開発を進めている。

3.2.1 設備状態診断機能

設備状態診断機能は、EAMから提供される設備データや点検データ等から、設備状態を定量評価する機能である。設備状態とは、設備劣化度合い及び故障発生確率を指す。設備劣化度合いは海外で運用中の方法論を適用して算出する。さらに当社は、定量化の元データとなる点検データから設備の劣化ランクを判断する際に、属人性を排除する技

表1. アセットマネジメントに求められる要件

No	アセットマネジメントに求められる要件
①	設備の状態、定量化に基づくリスク評価
②	リスク評価に立脚した設備の更新・修繕計画立案、客観的評価
③	Line of Sightを踏まえ、立案した計画を現場に反映

表2. アセットマネジメントシステムの機能

機能	内容
EAM	設備保全管理
	企業が持つ設備台帳と記録を一元管理する。
	点検計画管理
APM	工事・作業業務支援実績管理
	立案した計画に対し、ヒト・モノの割当て及び作業管理
	設備状態診断
	点検データ等を基に設備劣化ランクを算出、推定する。
AIPM	影響度算出機能
	系統データを基に故障時の系統影響度等を算出する。
	リスク評価
	設備の状態、影響度をインプットにリスクマトリックスを用いリスクを算出する。
	予測分析
最適化	経済性やリスクを加味し、設備ごとの最適対処時期を算出する。
	工事計画作成支援
	点検計画を基に中長期保全計画の立案を支援する。
最適化	立案した投資を評価する。グルーピングした投資群(以下“ポートフォリオ”という。)全体で最大価値となる計画を算出する。

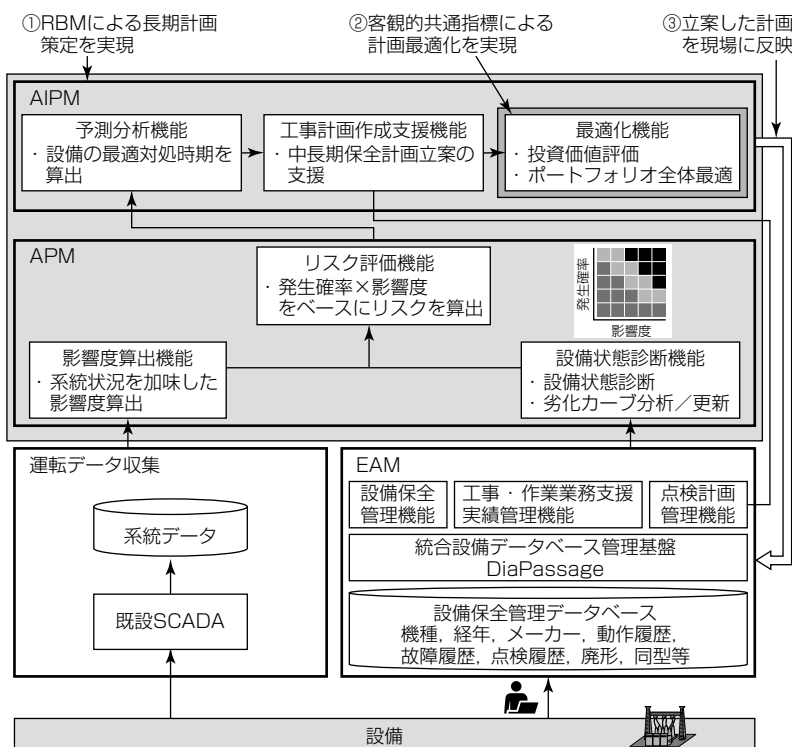


図2. アセットマネジメントシステムの構成

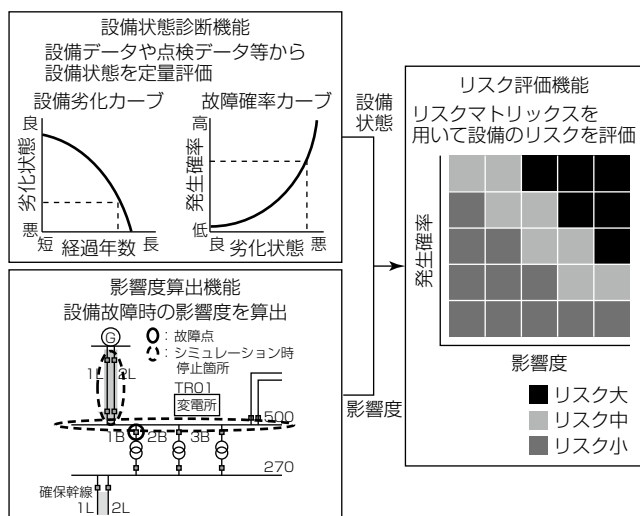


図3. APMの機能構成

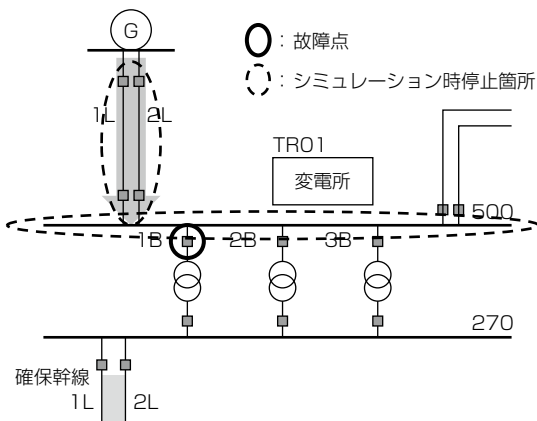


図4. 影響度算出のシミュレーション

術を開発した。点検データと劣化ランクとの関係を統計的に判断し、点検データから劣化ランク遷移を推定する。

3.2.2 影響度算出機能

影響度算出機能は、設備故障時の影響度を算出する機能であり、その算出方法は様々な方法論が提案されている。当社はこれら方法論で提案されている影響度算出をサポートするとともに、独自に系統上の影響度算出機能を開発した。系統上の設備が故障等で停止した場合、周辺の系統及び需要側に及ぼす影響を定量化し、影響度合いを判定する（図4）。この機能によって系統への影響度を定量化し、設備ごとの故障影響度の大小を決定する。

3.2.3 リスク評価機能

リスク評価機能は、各機能で求めた設備状態及び影響度から、設備ごとのリスク評価を行う。リスク評価にはリスクマトリックスを用い、発生確率と影響度の積によってリスクの大小を評価する。リスクが大きい設備は優先的な対処が必要と判断でき、一方でリスクが小さい設備の対処は先延ばし可能だと判断できる。この機能によって設備ごとの状態判断と故障影響度に基づきリスク評価する。また、異なる観点の影響度からリスクを算出するとき、共通指標に変換する（図5）。

3.3 AIPM

当社のAIPMは、予測分析機能、工事計画作成支援機能、最適化機能から構成され、設備のリスクをベースに投資を立案、ポートフォリオ内の投資群を最適化する。当社は、AIPM領域で海外実績の豊富なCopperleaf社とパートナー契約を締結し、Copperleaf社製品C55と当社製品の組合せによって電力流通分野に適したAIPMを実現する（図6）。

3.3 AIPM

当社のAIPMは、予測分析機能、工事計画作成支援機能、最適化機能から構成され、設備のリスクをベースに投資を立案、ポートフォリオ内の投資群を最適化する。当社は、AIPM領域で海外実績の豊富なCopperleaf社とパートナー契約を締結し、Copperleaf社製品C55と当社製品の組合せによって電力流通分野に適したAIPMを実現する（図6）。

C55は、視点の異なる価値指標（例：供給支障リスク回避価値と作業効率化価値）を共通の価値指標（以下“バリュー”という。）を基準に定量化することで、共通の組織目標に基づく機械的な最適化が可能になる。さらに投資によって得られる便益等のリスク以外の観点も含め、計画をバリューベースで判断するVBM (Value Based Maintenance) を取り入れている。

3.3.1 予測分析機能

予測分析機能は、3.2節で述べたAPMで算出済みの設備の状態、影響度をインプットに設備ごとの最適対処時期を算出する。設備状態診断機能で算出した劣化カーブ及び現状の設備状態と影響度の掛け合わせによって、現時点のリスクを計算する。この機能が算出するバリューはリスク低減量を指す。左記計算を将来N年まで繰り返し、バ

リユーが最大となる最適対処時期を算出する。この機能によって長期の設備状態及びリスクの把握が可能になる(図7)。

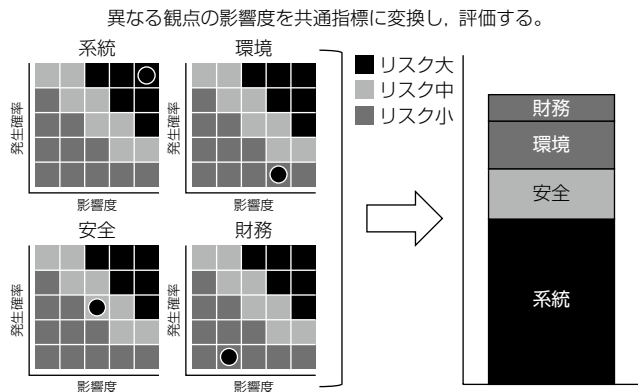


図5. リスク評価のイメージ

3.3.2 工事計画作成支援機能

工事計画作成支援機能は、予測分析機能で算出された対処設備情報と点検計画情報を元に効率的な工事計画の作成を支援する。例えば、電力流通分野は、同調という考えが存在する。同調とは、対処予定設備の周辺に至近対処予定の設備が存在した場合、同時に対処することを指す。同調を考慮した工事計画によって、出向回数の削減を実現する。

3.3.3 最適化機能

投資最適化機能は、ポートフォリオのバリューが最大となる投資計画を算出する。投資は既設設備への対応(例：更新、修繕、撤去等)と新規設備導入の2パターンが考えられる。この機能では、その双方を最大バリューに向け最適化が可能である。例えば、既設設備への更新投資の場合、設備更新による電力供給支障発生リスク低減の価値がある一方で、新規設備導入の投資の場合、安全性や作業効率

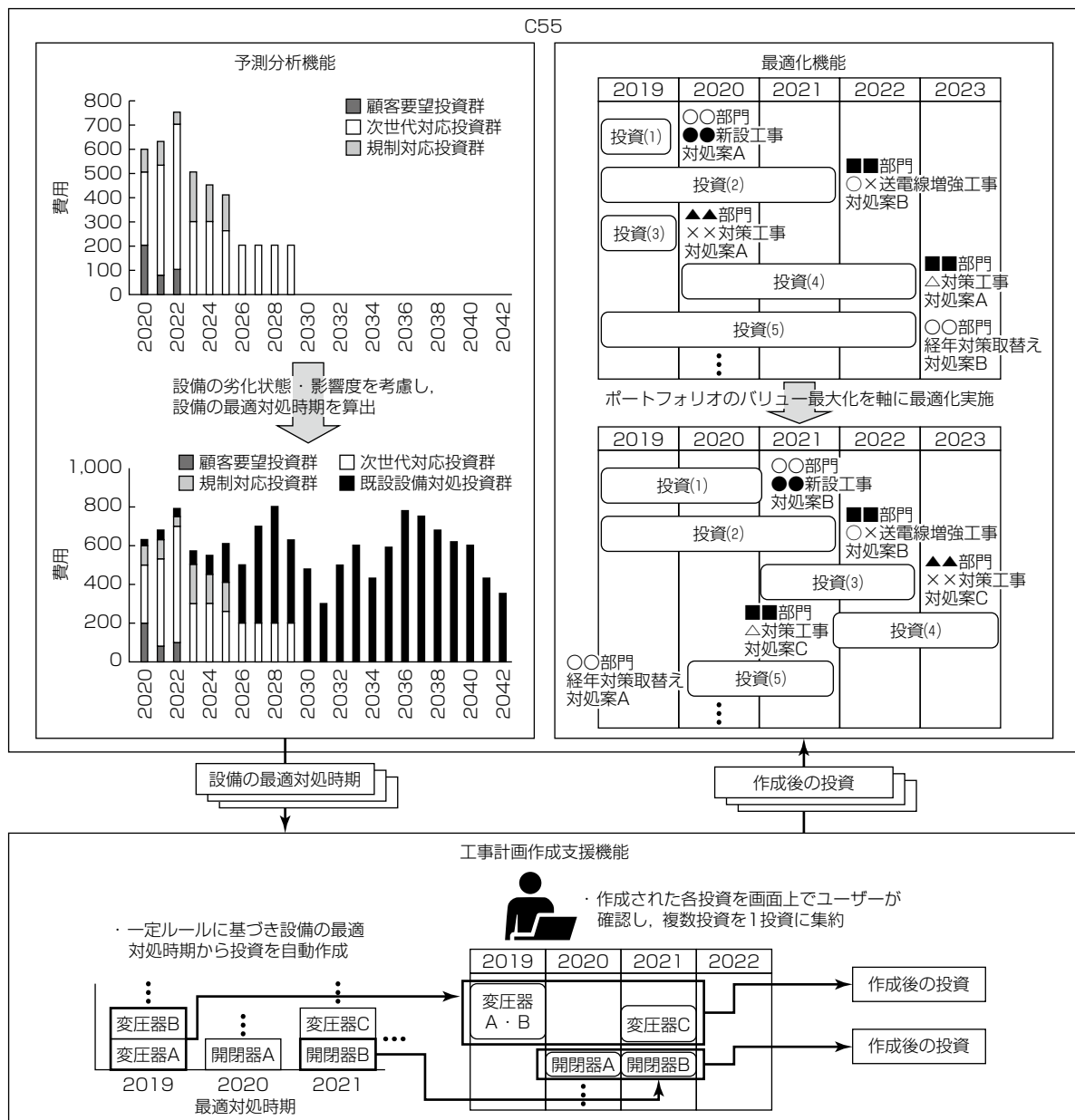


図6. AIPMの機能構成

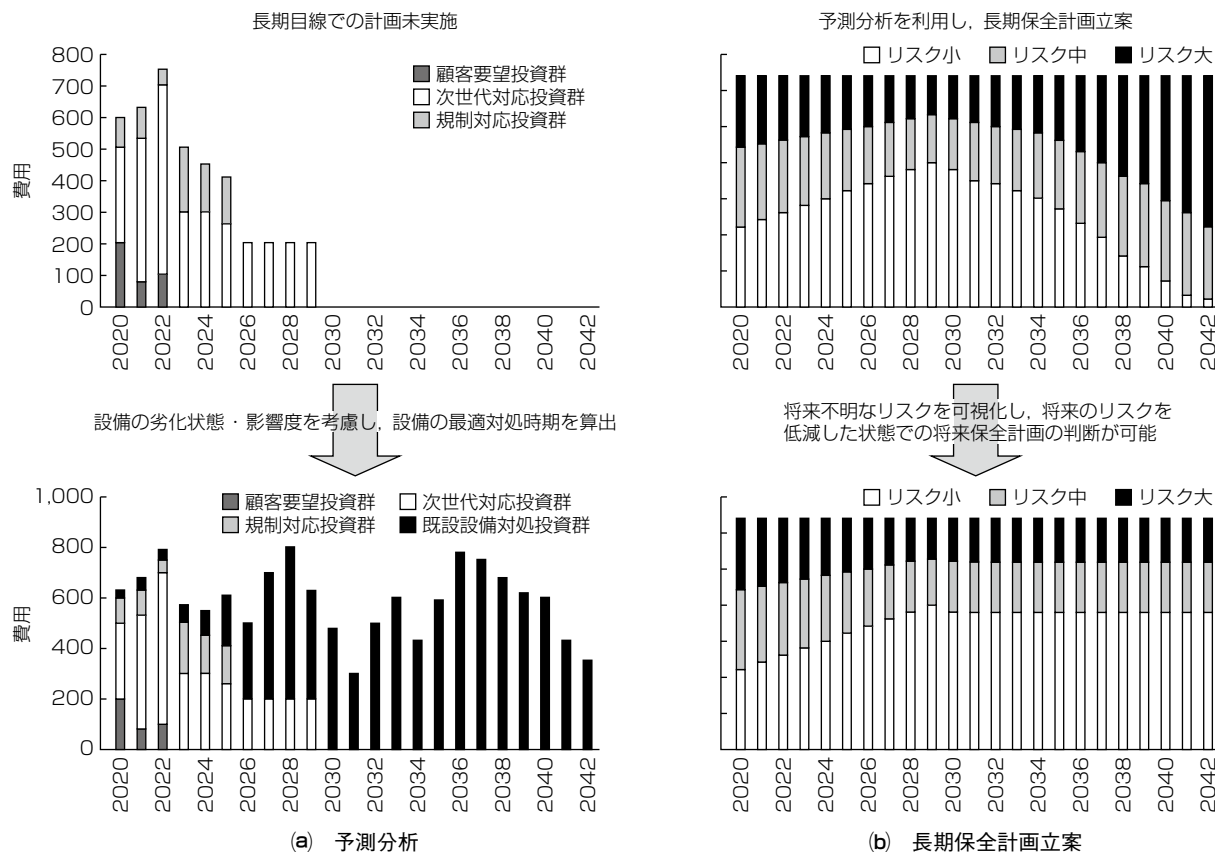


図7. 設備リスクを加味した予測分析と工事計画作成

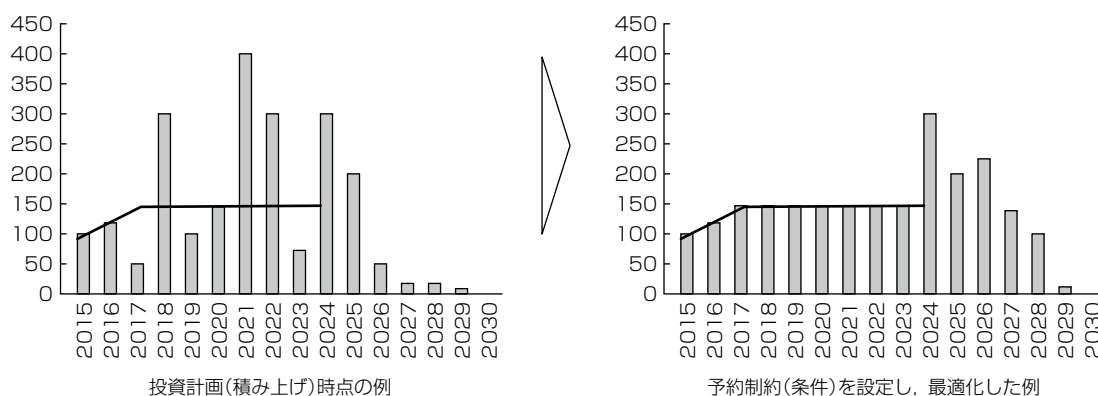


図8. 最適化前後の例

化の価値がある。それら観点の異なるメリットをバリューで評価する。

また、図8のとおり、計画時点では、投資費用や作業員のリソースが年ごとにばらつきが発生する。制約を設定し、最適化を実行することで、制約を遵守しつつ、最大バリューとなる投資の組合せを導出する。

4. む す び

当社が提供する電力流通分野向けのアセットマネジメントシステムの全体像及び各機能によるアセットマネジメント要件の実現について述べた。

今後も国際標準の動向を注視するとともに設備の稼働情

報を用い、APM及びAIPMの精緻化・高度化によって電力流通分野向けアセットマネジメントの高度化・効率化に寄与していく。

参 考 文 献

- (1) 河野広隆：ISO 55001：2014アセットマネジメントシステム要求事項の解説，日本規格協会，41～43 (2015)
- (2) IEC White Paper：Strategic asset management of power networks (2018)
<https://www.iec.ch/whitepaper/powernetworks/>

スマートメータ網を活用したIoT通信基盤システム

三小田 剛*
黒澤怜志*
金子直樹*

IoT Communication Platform System with Smart Meter Networks

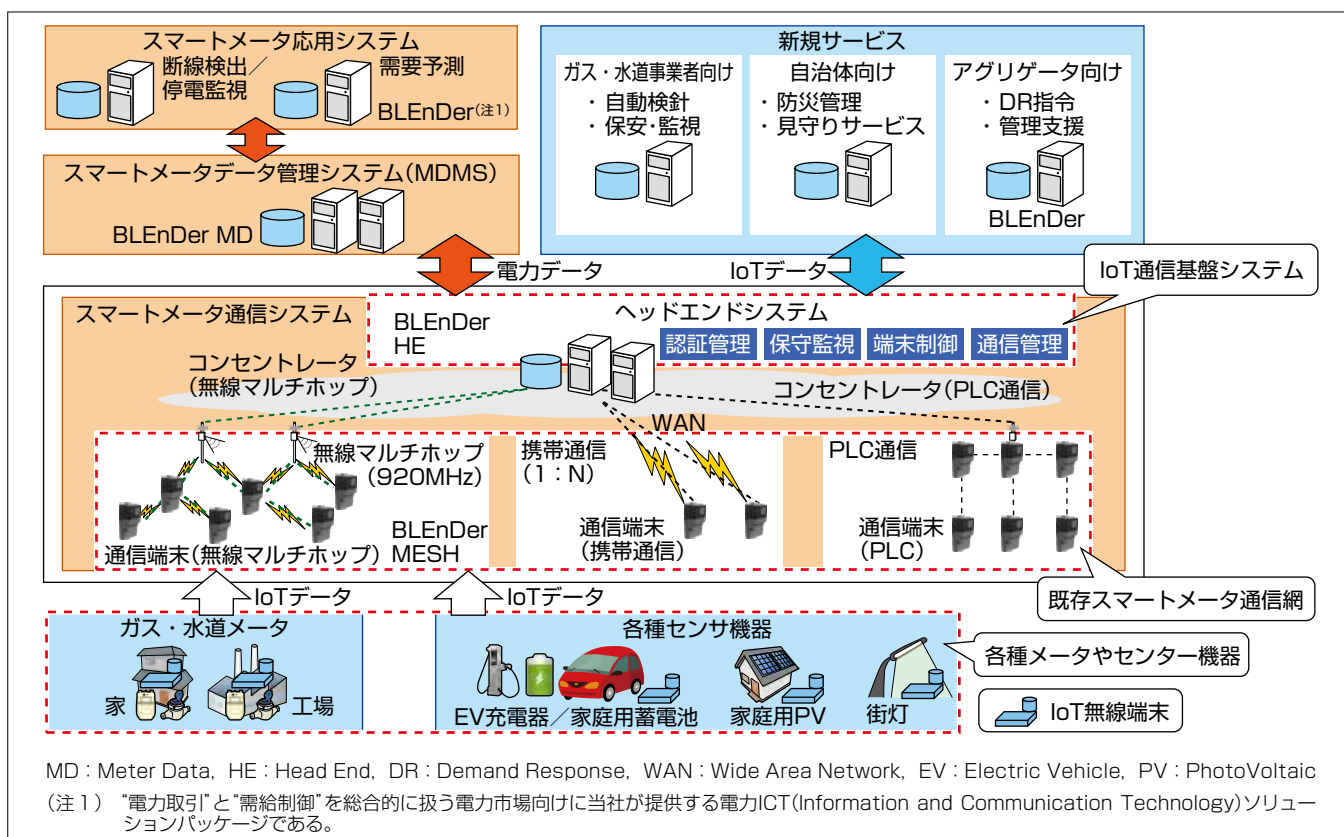
Tsuyoshi Mikoda, Satoshi Kurosawa, Naoki Kaneko

要 旨

国内の各電力会社では2014年から通信機能を搭載した電力メータ(スマートメータ)を順次導入しており、2020～2024年には全世帯への設置を完了する計画である。スマートメータに採用されている通信方式は無線マルチホップ(920MHz特定小電力無線)方式、1:N無線(携帯電話回線)方式、PLC(Power Line Communication)方式があり、各電力会社は接続性、コスト等の最適配置の観点から通信方式を選択している。スマートメータは全世帯に設置されるため、各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、自動検針(遠隔での検針やメータ制御業務)による業務効率化を実現している。

三菱電機はスマートメータ及びスマートメータで構成さ

れる通信システムの開発に携わっており、このネットワークを、電力システムだけでなく、社会インフラとして活用するためのIoT(Internet of Things)無線端末及びIoT通信基盤システムを開発している。このIoT無線端末はスマートメータとの無線通信機能を持っており、電力スマートメータ網のサービスエリアで、各種メータやセンサ機器を、容易にネットワークに接続できる。例えば、ガス・水道メータ向けの自動検針サービスや、センサ情報を用いたインフラ設備の監視・制御サービス等に活用することで、各種データの収集・蓄積・分析による業務効率化や設備投入計画への適用といった様々なビジネスニーズに対応できる。



既存スマートメータ網に接続可能なIoT無線端末とIoT通信基盤システム

電力会社で導入が進んでいる通信機能を搭載した電力メータ(スマートメータ)との無線通信が可能なIoT無線端末と電力会社向けのスマートメータ通信システムにAdd-onするIoT通信基盤システムを開発している。この無線端末をスマートメータ以外の各種メータ、センサ機器に接続することで、IoT通信基盤システムを介して、例えばガス・水道メータの遠隔での自動検針やセンサ情報を用いた監視・制御といった業務を遠隔で実現できる。

1. ま え が き

国内の各電力会社では2014年から通信機能を搭載した電力メータ(スマートメータ)を順次導入しており、2020～2024年には全世帯への設置を完了する計画である。

スマートメータに採用されている通信方式は無線マルチホップ(920MHz特定小電力無線)方式、1:N無線(携帯電話回線)方式、PLC方式がある。各電力会社は接続性、コスト等の最適配置の観点から通信方式を選択することによって、高い接続率・収集率のサービスレベルを実現・維持している。

スマートメータは全世帯に設置されるため、一部の通信困難エリアを除き、各電力会社管内をカバーする広域・大規模ネットワークとして形成・運用されており、自動検針(遠隔での検針やメータ制御業務)による業務効率化を実現している。

また、近年センサ機器の小型・省電力化や、通信技術の多様化が進み、IoTのコンセプトのとおり、これまでネットワークに接続されていなかったあらゆるモノがインターネットにつながり、相互に情報交換可能なサービスが実現されつつある。電力会社で導入されたスマートメータもIoTサービスのひとつと考えられる。

当社はスマートメータ及びスマートメータで構成される通信システムの開発に携わっており、このネットワークを電力システムだけでなく、社会インフラとして活用するためのIoT無線端末及びIoT通信基盤システムを開発している。この開発によって、電力スマートメータ網を、ガス・水道メータ向けの自動検針サービスや、センサ情報を用いたインフラ設備の監視・制御サービスにも活用することが可能になる。

本稿では、IoT無線端末及びIoT通信基盤システムの開発について述べる。

2. スマートメータ網接続用IoT無線端末

2.1 特 徴

IoTを実現する通信技術として、消費電力を低く抑えつつ、遠距離通信を実現するLPWA(Low Power Wide Area)が注目されている。このLPWAに属する通信方式は多数存在するが、大きく分類して無線局免許が必要なライセンス系と免許が不要なアンライセンス系が存在する。一例として表1に開発中のIoT無線端末を接続するスマートメータ通信網の通信方式と他通信方式の比較を示す。

IoT無線端末の通信速度は他のLPWA通信方式と同等以上であり、大量データが不要なガス・水道メータや各種センサ情報の通信量程度であれば十分適用可能である。また、他通信方式は基地局と呼ばれる装置が必要であり、基地局からの距離や遮蔽物の影響によって通信が不安定となる可

能性がある。一方、IoT無線端末は各世帯に導入されたスマートメータ自身が基地局として機能するため、新たな基地局の設備は不要であり、周辺スマートメータとの通信が可能であれば、ネットワークに接続できるとともに、周囲には基地局(=スマートメータ)が多数存在するため、耐障害性が高い。

2.2 ハードウェア構成

IoT無線端末は各種処理を実行する制御部、無線通信を可能とする無線部、外部接続機器とのインタフェースを可能とするインタフェース部、電源供給の電池で構成される(図1)。IoT無線端末のハードウェア仕様を表2に示す。

図1に示すとおり、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ため、Nライン(5bit)、Aライン(8bit)、U-Busの物理インタフェースを1本(どれかを排他使用)

表1. IoT向け通信方式の比較

	スマートメータ通信網	Sigfox	NB-IoT
周波数帯	920MHz帯	920MHz帯	LTE帯
仕様	IEEE 802.15.4	仏Sigfox社仕様	3GPP Rel-13
無線免許	不要	不要	要
通信速度(上/下)	100kbps/100kbps	100bps/600bps	63kbps/27kbps
通信制限	送信時間 Duty比10%	上り140回/日 下り4回/日 (最大12B単位)	制限なし
通信距離(最大)	数km	数十km	十数km

LTE : Long Term Evolution

3GPP : Third Generation Partnership Project

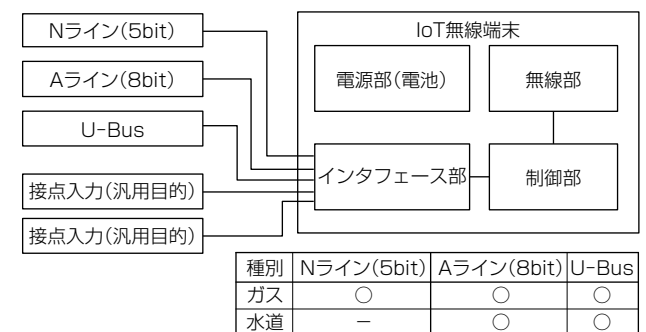


図1. IoT無線端末の構成

表2. IoT無線端末のハードウェア仕様

項目	仕様
制御部	CPU 32bitマイコン
	耐タンパ性 プログラムや暗号鍵は耐タンパ性を確保する
無線部	アンテナ 2プランチダイバーシチ
	無線インタフェース ARIB STD-T108
インタフェース部	Nライン、Aライン、U-Bus 接点入力×2
電源部	入力電源 電池駆動
	連続動作時間 10年(通信頻度に応じて変動)
設置条件	屋外

ARIB-STD : 電波産業会標準規格

具備している。また、汎用センサ用途の接点入力インタフェースを2本具備しており、各種センサの監視をこのIoT無線端末で実現可能である。

2.3 基本機能

IoT無線端末の基本機能を表3に示す。表に示す機能を持つことで、スマートメータで構築されたネットワークを介して、IoT無線端末に接続される機器の自動検針や遠隔監視・制御を可能にする。

2.4 スリープ動作検証

IoT無線端末は電池駆動を前提とし、低消費電力を実現するため、IEEE 802.15.4-2015に準拠したRIT(Receiver Initiated Transmission)通信方式を採用している⁽¹⁾。RIT

通信方式は受信端末(IoT無線端末)から送信端末(スマートメータ)に対して、定期的に受信データ有無を確認する方式であり、常時受信データを待機する必要がないため、実行処理がない時間帯は装置をスリープ状態にすることで消費電力を抑えることが可能である。

IoT無線端末のRIT通信方式の処理実行状態とスリープ状態それぞれの消費電流の測定結果を図2に示す。図に示すとおり、スリープ状態時の消費電流は非常に低く、処理実行状態と比較して、スリープ状態の消費電力を1/1,000以下に抑えることが可能である。

外部接続インタフェースに接続される各種メータや接点入力とのアクセス頻度、及び上位システムとの通信頻度によって稼働時間は大きく変動するが、低頻度であれば10年間電池交換することなく稼働できる見込みである。

表3. IoT無線端末の基本機能

機能	説明
MAC	IEEE802.15.4規格に基づくフレーム通信、ARIB STD-T108に準拠した機能を備える。
無線周波数選択	スマートメータが使用する無線周波数を探索し、自装置の周波数を決定する機能を備える。
間欠通信	定期スリープによる間欠通信の機能を備える。
ネットワーク	6LoWPAN, IPv6, UDPの機能を備える。
時刻同期	スマートメータと時刻同期を行う機能を備える。
参入	参入可能なスマートメータを探索し、参入する機能を備え、IoT通信基盤システムからの設定を記録する。
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機能を備える。
装置情報通知	装置情報を定周期で送信する機能を備える。
管理・保守	装置の保守機能として、次の機能を備える。 ・LED表示機能 ・ログ・統計・接続情報管理機能 ・遠隔リセット機能 ・装置障害監視機能(自己復旧機能含む) ・初期化機能 ・電池残量情報通知機能 ・接点入力機能
ファームウェア更新	IoT通信基盤システムからファームウェア更新及びパラメータを更新する機能を備える。
検針	各種メータとの通信制御をサポートし、指定された周期で検針値を収集、指定された周期でIoT通信基盤システムへ送信する機能を備える。

MAC: Medium Access Control, 6LoWPAN: IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks, IPv6: Internet Protocol version 6, UDP: User Datagram Protocol

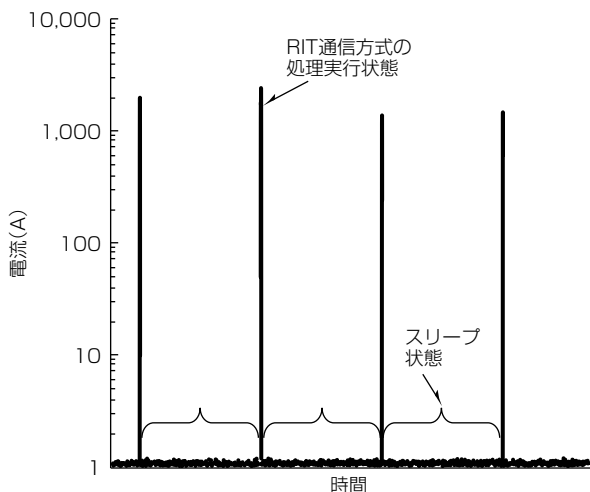


図2. IoT無線端末の消費電流の比較

3. IoT通信基盤システム

3.1 システム構成

IoT通信基盤システムの構成を図3に示す。図に示すとおり、電力会社向けのスマートメータ通信システム上に今回開発したIoT通信基盤システムをAdd-onすることで、IoT無線端末をスマートメータ網経由でIoT通信基盤システムに収容が可能になる。また、他事業者サービス向けに外部連携インタフェースを提供することで、IoT無線端末に接続された各種メータやセンサ情報のデータを他システムに連携可能である。

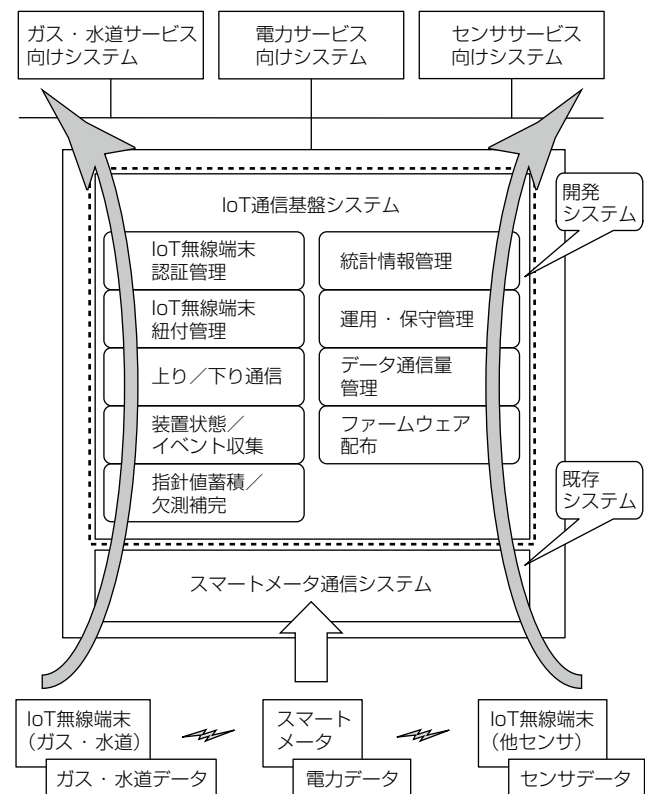


図3. IoT通信基盤システムの構成

表4. IoT通信基盤システムの基本機能

機能	内容
IoT無線端末認証管理	IoT無線端末の認証情報を管理し、ネットワーク接続期間の制御を可能にする。
IoT無線端末紐付(ひもつけ)管理	IoT無線端末とスマートメータとの接続情報を管理し、端末への下り制御を可能にする。
上り／下り通信	IoT無線端末との上りデータ、下りデータ通信機能を提供する。
装置状態／イベント収集	IoT無線端末に関する装置状態、イベント情報(装置異常等)の収集・管理機能を提供する。
統計情報管理	IoT無線端末に関する統計情報の収集・管理機能を提供する。
運用・保守管理	IoT無線端末に対する初期運用の設定や保守(ログ取得等)に必要な制御機能を提供する。
データ通信量管理	IoT無線端末に関するサービスレベル(収集率、通信成功率)の収集・管理機能を提供する。
ファームウェア配布	IoT無線端末のファームウェア更新機能を提供し、遠隔での機能追加を可能にする。
指針値蓄積／欠測補完	IoT無線端末から収集した各種データの蓄積、欠測補完機能を提供する。

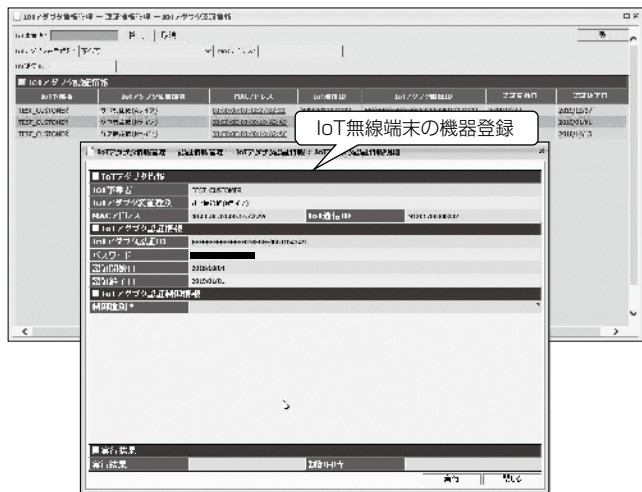


図4. 運用・保守管理画面(機器登録)

3.2 基本機能

IoT通信基盤システムの基本機能を表4に示す。表に示す機能を持つことで、データ収集だけでなく、機器認証制御、遠隔ファームウェア更新、事業者ごとに異なる初期運用情報(データ収集周期等)の設定を可能にする。

3.3 運用・保守管理機能

図4、図5にIoT通信基盤システムの運用・保守管理画面の一例を示す。この例に示すとおり、IoT無線端末の機器登録、ネットワーク接続可能期間の設定といった運用面、IoT無線端末の状態監視、装置情報(状態・ログ)の取得と

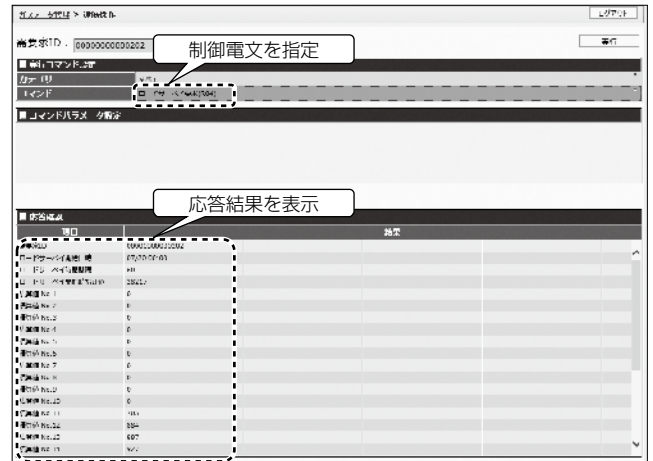


図5. 運用・保守管理画面(機器制御)

いった保守面の機能を提供しており、製品化に向けて更なる機能拡充を進めている。

4. む す び

開発中のIoT無線端末及びIoT通信基盤システムを適用することで、各電力会社管内をカバーする広域・大規模ネットワークに各種メータやセンサ機器を容易に接続できる。これによって、電力システムだけでなく、社会インフラとして例えば、ガス・水道メータ向けの自動検針サービスや、センサ情報を用いたインフラ設備の監視・制御サービス等に活用することで、各種データの収集・蓄積・分析による業務効率化や設備投入計画への適用といった様々なビジネスニーズに対応できる。

参 考 文 献

- (1) IEEE Std. 802.15.4-2015, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) (2015)

発電機の稼働率向上に貢献する予防保全技術

川島 諒祐*
後藤 大智*
米倉 浩二*

Preventive Maintenance Technology for Improving Operational Availability of Turbine Generator

Ryosuke Kawashima, Daichi Goto, Koji Yonekura

要 旨

自然エネルギーの発電規模が拡大する中、火力発電事業に対しては自然変動電源の補完等、電力の安定供給への貢献がより強く求められている。この背景の下、三菱電機は発電機の稼働率向上に貢献する次の2点の発電機予防保全技術開発を進めてきた。

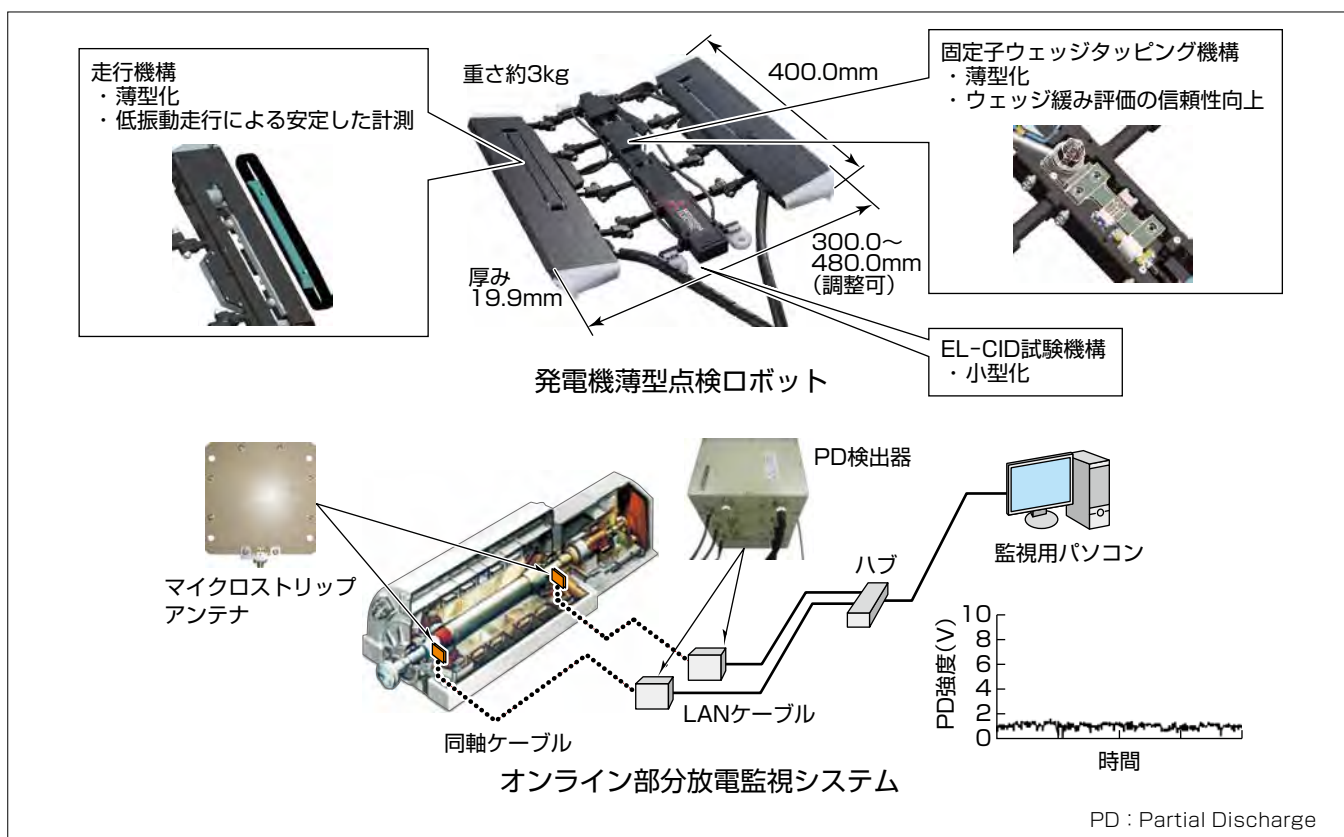
(1) 発電機薄型点検ロボット

当社の発電機薄型点検ロボットは、独自の走行機構によって外形を薄型化し、点検カメラ、固定子ウェッジタッピング、固定子コア層間短絡診断試験の機能を搭載し、回転子挿入状態での機内点検を実現する。特に、発電機の重要点検項目である固定子ウェッジ点検では、独自機構の採用によって段階的な緩み検知を可能にし、健全性の評価精度向上を実現した。

(2) オンライン部分放電監視システム

当社のオンライン部分放電監視システムは、固定子コイル絶縁で発生する部分放電の電磁波をオンラインで監視・計測し、長期間の運転で生じる経年劣化・異常の兆候を初期段階で検出する。このシステムは、電磁波検知用アンテナを発電機へ影響を及ぼさない高電位部から離れた場所に取り付けることで、タービン発電機の絶縁設計に悪影響を与えず、高い信頼性を実現している。また回転子を引き抜かず、短期間での設置工事を可能にしている。

当社はこれら発電機予防保全技術を積極的に展開することで、電力の安定供給・高稼働率の実現に貢献していく。



発電機薄型点検ロボットとオンライン部分放電監視システム

発電機薄型点検ロボットは独自の走行機構によって外形を薄型化し、点検カメラ、固定子ウェッジタッピング、固定子コア層間短絡診断 (ELectromagnetic Core Imperfection Detection : EL-CID) 試験の機能を搭載し、回転子挿入状態での機内点検を実現する。部分放電監視システムは、固定子コイル絶縁で発生する部分放電の電磁波をオンラインで監視・計測し、長期間の運転で生じる経年劣化・異常の兆候を初期段階で検出する。

1. ま え が き

2015年、COP(Conference Of the Parties)21で地球温暖化問題に取り組むための仕組みを示したパリ協定が採択された。同協定による約束草案では、温室効果ガスの削減目標が定められており、これを達成するために自然エネルギーを利用した発電システムの規模拡大や化石燃料の更なる高効率利用が急務となっている。一方で火力発電事業には自然変動電源の補完等、電力安定供給への貢献が求められており、高効率化、低炭素化と並んで発電設備の安定稼働が重要な課題となっている。これに応じるため火力発電プラントは運転体系を多様化させており、DSS(Daily Start and Stop)運転等のタービン発電機にとってより熱的・機械的な負荷が大きい運転が求められるケースが増加している。このような背景の下、当社では発電機の稼働率向上に貢献する予防保全技術開発を進めている。

本稿では、タービン発電機に関する予防保全技術のうち発電機薄型点検ロボット及びオンライン部分放電監視システムについて述べる。

2. 発電機固定子巻線の過酷な使用環境

タービン発電機(図1)の出力運転時で、固定子スロットに装填される固定子巻線は、高電圧、高温かつ電磁加振力等による振動が加わる環境下に置かれる。この環境下で、固定子巻線導体を被う主絶縁が劣化して絶縁破壊が起きると、発電機は固定子地絡によって運転停止に陥る。また固定子スロット内に固定子巻線を含むスロット内容物を強固に固定するために固定子ウェッジが使用されているが、この固定子ウェッジでも長期間の運転環境下で、熱や振動によって緩みが生じる可能性がある(図2)。固定子ウェッジ

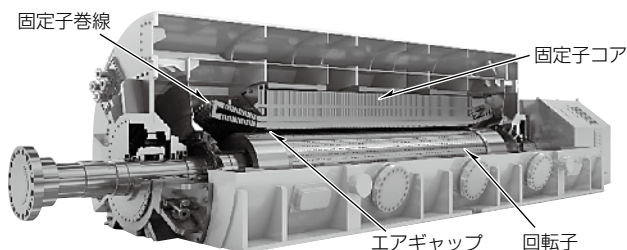


図1. タービン発電機の構造⁽¹⁾

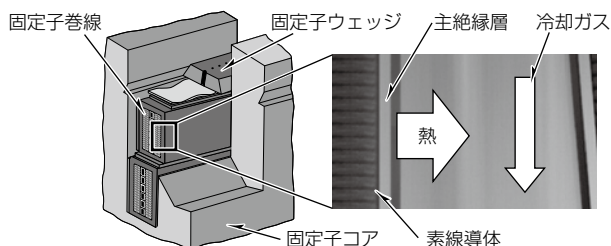


図2. 固定子巻線の周囲

の緩みが発生すると、固定子スロット内に隙が生じやすくなり、固定子スロット内構成物が固定子巻線から発生する電磁加振力によって繰り返し振動するフレットングが起こる。このフレットング振動も固定子巻線主絶縁の劣化を進行させ、最終的に絶縁破壊による地絡を引き起こすおそれがある。固定子巻線主絶縁及び固定子ウェッジは発電機の信頼性に大きく関わる主要部品であり、同部品の診断技術は発電機の信頼性を評価する上で重要である。

3. 発電機薄型点検ロボット

当社が開発した発電機薄型点検ロボットは、独自の機構によって薄型化と高機能化を実現している。近年はメンテナンス省力化の観点から、回転子引き抜き作業を行わずに高精度の点検を実現することが求められており、発電機薄型点検ロボットの活用によるメンテナンス計画の早期立案や、発電機の稼働率向上への貢献が期待される。

3.1 点検ロボットの構成と仕様

発電機薄型点検ロボットの構成を図3に示す。点検ロボットの仕様を表1に示す。最新型では独自の走行機構の適用によって、厚み寸法を従来機に比べて縮小した。これによって従来機では対応が困難であった発電機のエアギャップ(図1)が狭い機種(図4)にもロボット点検を適用することを可能にしている。

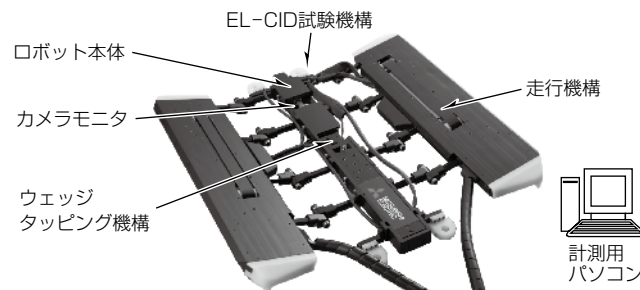


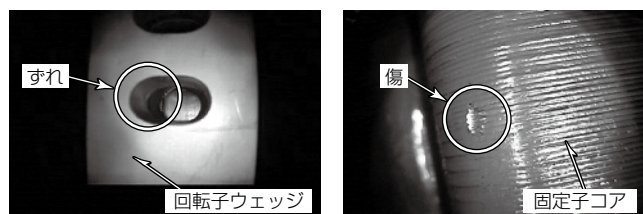
図3. 点検ロボットの構成⁽¹⁾

表1. 点検ロボットの仕様

	従来	最新型
長さ(mm)	420.0	400.0
厚み(mm)	30.0	19.9
重さ(kg)	3.0	3.0



図4. 点検ロボットによるエアギャップへのアクセス



(a) 回転子通風孔 (b) 固定子コアの内径表面
 図5. 点検ロボットのカメラモニタ映像

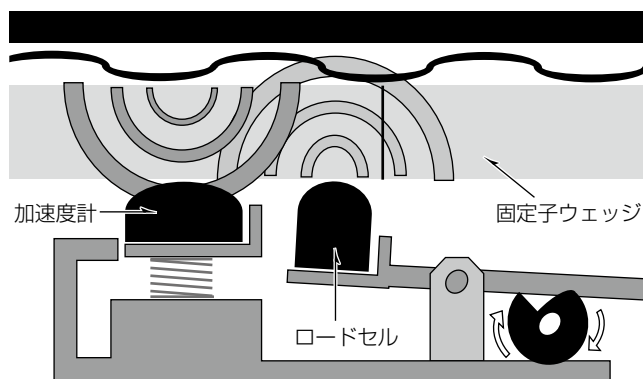


図6. 固定子ウェッジタッピング機構

3.2 カメラによる目視点検

図3に示すとおり、点検ロボットは高精細のカメラモニタを搭載しており、これによって固定子コア内径表面及び回転子表面の傷や過熱痕、固定子及び回転子のスロット内構成物のずれや摩耗粉の発生などの異常を検出することが可能である。図5(a)は回転子スロット内構成物の半径方向通風孔の位置ずれ、図5(b)は固定子コアの表面についた傷を点検ロボットのカメラモニタで捉えた画像である。

3.3 固定子ウェッジタッピング診断

図6に示すとおり、固定子ウェッジタッピング機構には加速度計を所定の力で固定子ウェッジに押し付けた状態を維持し、ウェッジ打撃時にシーソー構造の先に取り付けたロードセル打撃-振動の伝達特性を導出し、対象ウェッジの緩み程度を推定する手法を実装した。

従来の点検ロボットが固定子ウェッジの緩み程度を主に“tight”及び“loose”の2パターンで評価しているのに対し、最新型の点検ロボットは固定子ウェッジの緩み程度を5段階で評価可能である。これによってウェッジの“緩み始め”を精度良く評価することを実現した。また図7に示すように各固定子ウェッジの緩み程度をマッピングすることによって、対策を要するウェッジの位置や個数を視覚的に把握することも可能にしている。

3.4 固定子コアの層間短絡診断

固定子コアが絶縁損傷した際の層間短絡電流は過度の局部過熱を引き起こし、固定子コアの溶融を引き起こすおそれがある。

固定子コア層間短絡診断(EL-CID)試験では、固定子に多芯線を巻いて直流電流を流して固定子コアを励磁した状

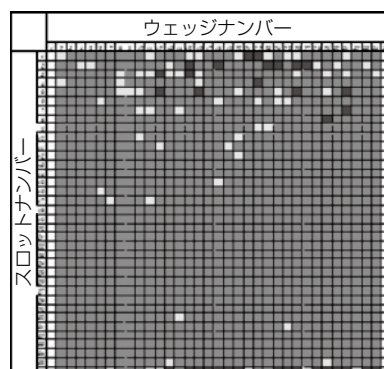


図7. ウェッジ緩み程度のマッピング

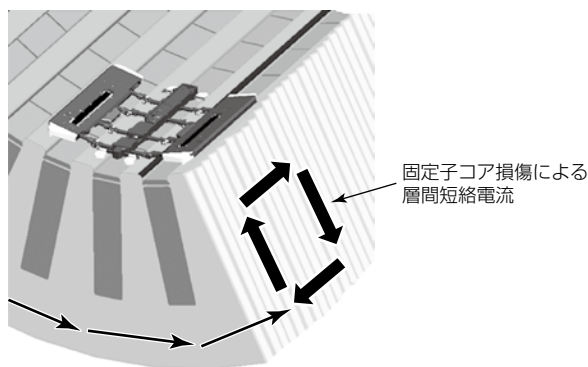


図8. 固定子コアの層間短絡診断

態で、ロボットに取り付けたチャック巻線によって短絡部の電流を検出する(図8)。この固定子コアの層間短絡診断結果に基づき、精密点検の実施要否や補修計画の効果的な立案を行う。

4. オンライン部分放電監視システム

タービン発電機の遠隔監視システムでは様々なパラメータが監視対象として考えられるが、主な監視対象の一つとして固定子巻線で発生する部分放電が挙げられる。当社のオンライン部分放電監視システムは、発電機内部の高電位部から離れた場所かつ回転子を引き抜かずにアクセス可能な部位に放電検知用のアンテナを設置する構成であることから、システム導入時の高信頼性化と短期間での設置工事を実現する。

4.1 システムの構成と仕様

オンライン部分放電監視システムの構成を図9に示す。部分放電(Partial Discharge : PD)発生時の電磁波(1.8GHz±10MHz)を発電機内に取り付けられたマイクロストリップアンテナで受信し、同軸ケーブルによって機外のPD検出器に伝達される。PD検出器でノイズ処理・A/D変換後、監視用パソコンでPD信号データを表示する⁽²⁾。

4.2 部分放電データの取得と評価

このオンライン部分放電計測システムで取得できるデータは、“部分放電強度のトレンド”と“部分放電の位相特性”の二つである⁽²⁾。

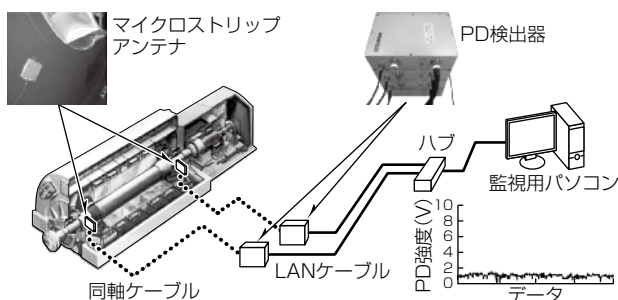


図9. オンライン部分放電監視システムの構成

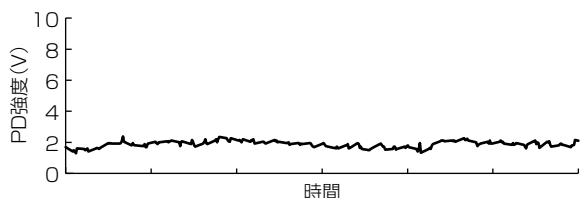


図10. 部分放電強度のトレンド

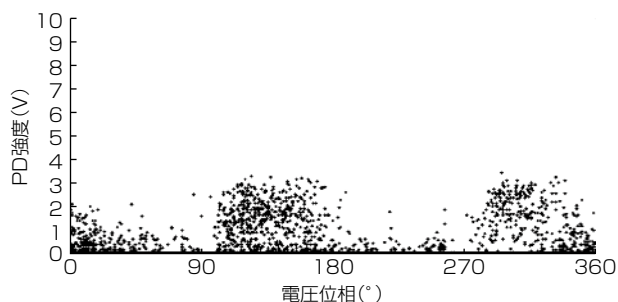


図11. 部分放電の位相特性(2)

4. 2. 1 部分放電強度のトレンド

図10は部分放電強度のトレンドを示した例である。アンテナで受信した部分放電信号の強度を一定時間(例えば1時間について5秒間の計測を5回)ごとに時系列に従ってプロットする。長期間にわたって部分放電強度のトレンドを監視することで、部分放電が一定レベルにあるのか、又は上昇傾向にあるのかといった情報が得られる⁽²⁾。

4. 2. 2 部分放電の位相特性

図11は部分放電の位相特性を示した例である。アンテナで受信した部分放電信号は強度と位相の情報を持っているので、一定時間に発せられる全ての信号をプロットすることで、位相特性が得られる。部分放電は主絶縁の損傷形態によって特徴的なパターンを示すため、その特徴を把握することで絶縁損傷の形態を把握できる。

4. 3 実機での部分放電監視事例

既設のタービン発電機である海外A機で、予防保全技術が有効に活用された事例について述べる。海外A機では、部分放電計測開始初期では、部分放電強度は低レベルで安定していた。しかし、運転を継続していく中で、タービン側コイルエンド近傍に設置したアンテナで、初期値と比較

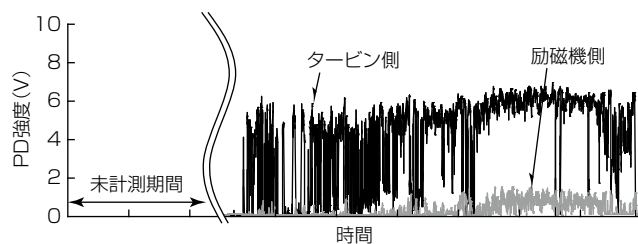


図12. 海外A機での部分放電強度トレンド監視結果

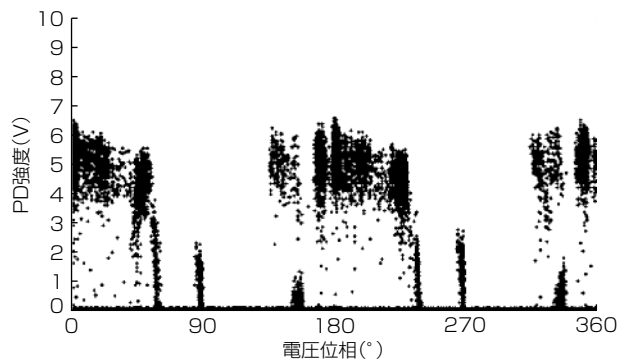


図13. 海外A機での部分放電の位相特性

して非常に大きな部分放電強度が継続して観測されるようになった。図12に海外A機の部分放電強度のトレンド監視結果の一部を、図13には同時期の部分放電位相特性を示す。海外A機では、図13のように空隙放電を示す部分放電位相パターンが確認された。このため、固定子巻線に何らかの空隙放電が増大する形態の不具合が生じている可能性が高いと判断し、発電機の運転を停止して固定子巻線の点検を実施した。その結果、固定子巻線タービン側端部及び固定子スロット内直線部で巻線間詰物の脱落や主絶縁の摩耗などが発見された。このように部分放電監視は固定子巻線の異常発生 of 早期発見及び重大事故の未然防止に対して有効である。

5. む す び

予防保全技術の一例としてタービン発電機用の薄型点検ロボットとオンライン部分放電監視システムについて述べた。今後は発電機の信頼性向上、運用の柔軟性向上などの要望が更に高まるものと予想されることから、当社は発電機点検用ロボットの回転子点検に関わる新機能搭載や部分放電を含む各種の発電機運転データから統合的に判断する異常兆候検知技術の開発を継続して進めている。

参 考 文 献

- (1) 楠本裕也：タービン発電機の予防保全技術，電気評論，103，No.3，7～10 (2018)
- (2) 佐古 浩，ほか：マイクロストリップアンテナによるタービン発電機のオンライン部分放電計測・評価，電気評論，98，No.9，23～28 (2013)

発電機の信頼性向上に貢献する予防保全技術

小倉一晃*
 梶原 剛*

Preventive Maintenance Technology for Enhancement of Generator Reliability

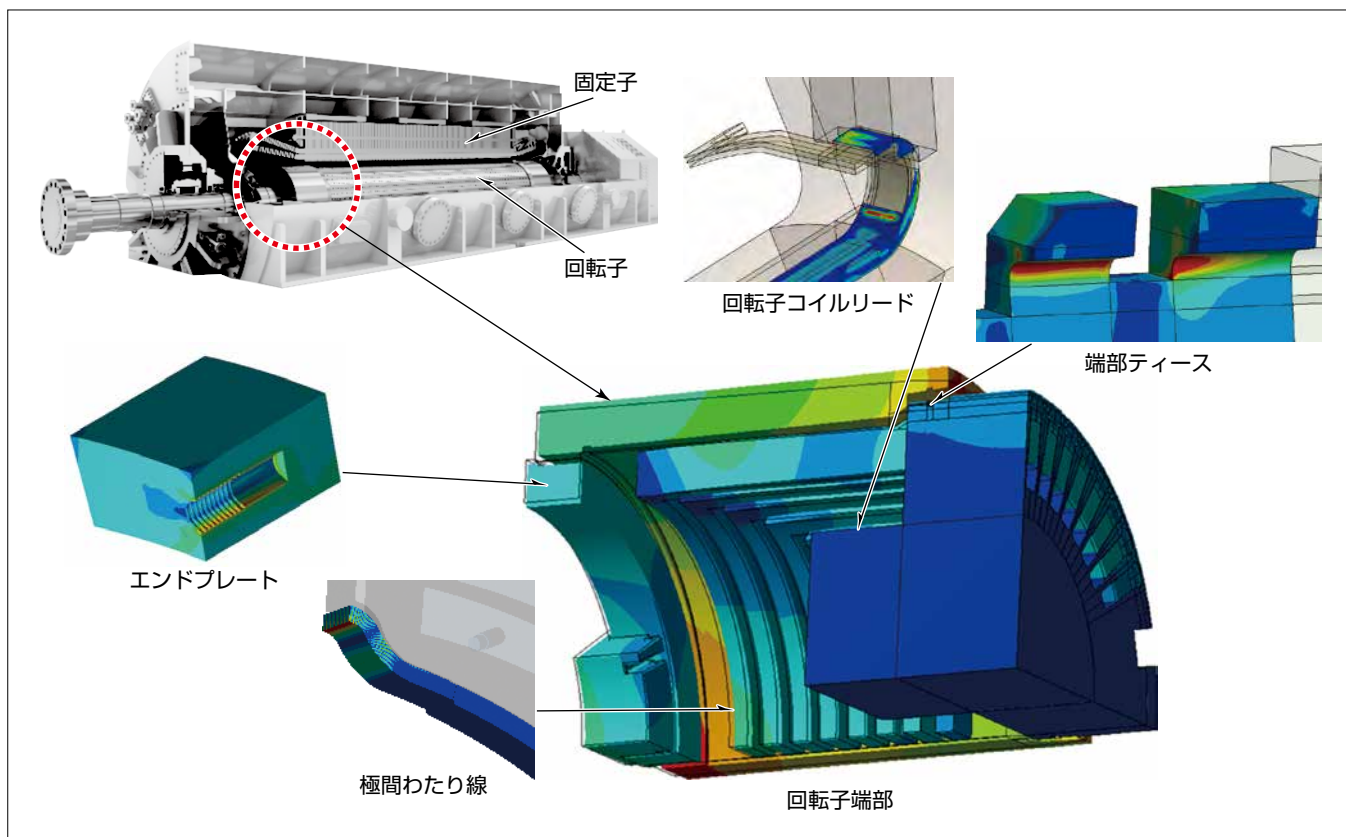
Kazuaki Ogura, Go Kajiwara

要 旨

近年、太陽光発電システムに代表される再生可能エネルギーを利用した発電システムの普及が着実に拡大している。それらの発電量は変動が大きいため、電力安定供給には系統の負荷調整力や予備力が必要となる。火力発電に求められる役割は、従来のベースロード運用から、出力調整用のピーク運用へと変化している。発電機をこれまでのように長期間連続運転せずに一日の中で必要な時間だけ運転(Daily Start and Stop : DSS)させる運用となるため、今後の火力発電プラントでの発電機の起動停止回数は従来と比べて確実に増加することが予想される。特に発電機の回転子部品は、起動停止回数の増加に伴って各部に作用する遠心力による繰り返し負荷の回数が増加するため、疲労に

よる破損リスクの増大を避けられない。そのため、三菱電機では、発電機の今後の長期間運用での高信頼性を確保するため、破損が懸念される部品を抽出し、最新解析技術を駆使した高精度な寿命評価技術の開発を進めている。

また、発電機運用が過酷化していく一方で、定期点検に割かれる費用と機会は削減傾向にあるため、予防保全技術の重要度は増している。破損リスクの予知だけでなく、定期点検期間内で短時間かつ確実に損傷を検知する点検技術も不可欠であり、回転子部品の新しい非破壊検査技術、及び予防保全工事での付加価値向上を実現する新規開発を進めている⁽¹⁾。



タービン発電機の回転子端部モデルと変位・応力分布

回転子端部の大規模三次元解析モデルを使用して計算した半径方向変位分布(右下図)、及びこれらの結果を基に計算した回転子各部の応力分布(右上・左下図)。

1. ま え が き

近年、再生可能エネルギーを利用した発電システムの普及が着実に拡大しており、火力発電に求められる役割は、従来のベースロード運用から、出力調整用のピーク運用等へと変化している。発電機を一日の中で必要な時間だけ運転(DSS)させる運用となるため、タービン発電機の起動停止回数は従来と比べて確実に増加することが予想される。特に発電機の回転子部品に関しては、起動停止回数の増加に伴って各部に作用する遠心力による繰り返し負荷の回数が増加するため、疲労による破損リスクの増大を避けられない。そのため発電機の今後の長期間運用での高信頼性を確保するため、最新解析技術を駆使した高精度な寿命評価技術の開発を進めている。さらに、回転子部品の新しい非破壊検査技術、及び予防保全工事内で付加価値向上を実現する新規開発の一例についても、本稿で併せて述べる。

2. 発電機のDSS運用と回転子部品の低サイクル疲労

DSS運用とは、火力発電プラントを電力需要ピーク時の負荷調整用等として使用し、一日当たり約一回のサイクルで起動と停止を繰り返す運用方法である。この運用を継続することによって起動停止回数は数年で千回に達する。

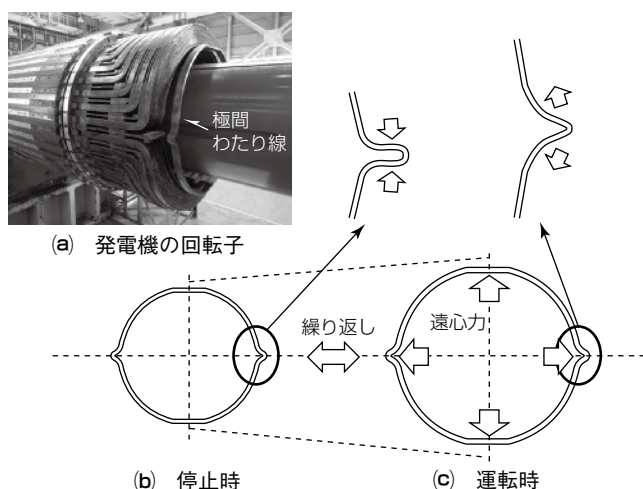


図1. 起動停止に伴って回転子部品に発生する繰り返し応力

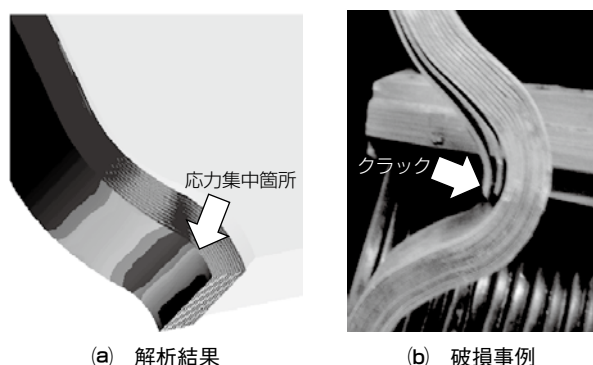


図2. 低サイクル疲労による回転子部品の破損事例

発電機運転時、回転子各部には遠心力や、温度上昇による熱応力が発生するが、その応力レベルが材料の降伏点を超えない程度であっても、発電機の起動停止に伴って応力が振幅となって繰り返し作用した場合、低サイクル疲労破損が生じる可能性がある。一般的に低サイクル疲労は 10^4 回レベルで破損が発生するものを指すが、破損のしきい値は繰り返し回数と応力振幅の大きさで決定するため、応力の大きさによっては数千回程度で破損が生じることも起こり得る。

発電機の起動停止に伴って回転子部品に発生する繰り返し応力の例を図1に示す。極間わたり線は一円構造であるため、運転中には自身の遠心力によって周方向に引張力が発生する。さらに一部で変形を吸収する構造になっているため、図2(a)に示すような応力集中箇所が存在する。この状態で運転を行っても瞬時に部品が破損することはないが、発電機の起動停止に伴い応力振幅の回数が増加すると、当該部に亀裂が生じる可能性がある。図2(b)に示すとおり、計算上の応力集中箇所と実際に破損した箇所はよく一致する。このように、発電機の起動停止回数が増加する場合は、応力集中箇所の応力振幅を正確に計算して低サイクル疲労強度を評価することが重要となる。

3. 回転子部品の大規模三次元解析技術

3.1 発電機回転子の端部構造

図3にタービン発電機の回転子断面形状を示す。回転子は主に回転子コイルと、回転子軸(シャフト/ティース)、及びウェッジで構成され、シャフトの軸方向溝(スロット)の内部にコイルとウェッジが格納される構造である。運転時、コイルの遠心力はウェッジを介してティースが保持するため、ティース及びウェッジには引張力が作用する。停止時にはこの引張力が除荷され、起動停止に伴い応力振幅が発生する。図4に回転子端部構造を示す。リテーニングリングは回転子端部コイルの遠心力を保持する部品であり、運転時に離間しないようシャフト及びエンドプレートに十分強く嵌(は)め合う構造(焼嵌(やきば)め)を採用している。そのため、リテーニングリングとシャフト又はエンドブ

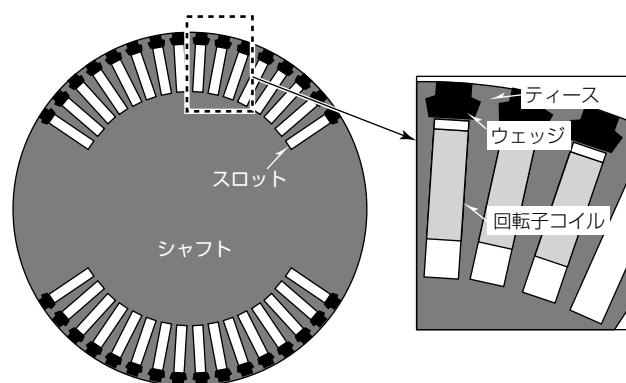


図3. 回転子の断面形状

レート嵌合(かんごう)部では停止時に焼嵌めによる圧縮力が作用し、運転時には遠心力による引張力が作用する。つまり起動停止に伴って端部ティースやエンドプレート、リテーニングリングに応力振幅が発生する。

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、リテーニングリングや回転子コイル等を含む回転子端部構造を三次元で丸ごとモデル化した構造解析が実用レベルで可能になった。これら背景に伴い、過去の要素検証の再評価や実機運用状態との比較評価を通じ、低サイクル疲労寿命に影響する先に述べた回転子各部の複雑な形状の局所応力のより正確な評価が可能になり、各部品の寿命評価の高精度化を実現した。

3.2 三次元解析結果及びその妥当性

図5に回転子端部の構造解析モデル(1/4円周)、図6に発電機起動停止1回当たりの回転子端部各部の応力振幅値(運転時と停止時の応力変動幅)を示す。矢印で示される部分が応力集中箇所であり、起動停止の繰り返しに伴う低サイクル疲労による破損リスクが高い部分と一致する。回転子端部ティース、エンドプレート、リテーニングリングの応力は周方向に分布を持ち、軸方向についても従来の二次元解析とは異なる傾向が得られており、これは当初想定した応力振幅値を上回る結果であった。これは実機の低サイクル疲労破壊に対する許容可能な起動停止回数は想定よりも小さいことを示しており、三次元解析によって得られた新たな知見である。この結果から、従来解析で周方向に対称と仮定していた回転子端部は、実機を持つわずかな構造的な非対称性が、低サイクル疲労寿命評価の点で無視できないことが明らかとなったと言える。

また、既存データとの比較評価からこの三次元解析は設計上十分な推定精度を持っているが、予防保全工事での付加価値提案を見越し、発生応力の計算精度再確認の位置付けで、実機モデル回転子を使用した回転子各部の歪(ひず)み計測を実施した。計測結果の一例として、図7に回転子ウェッジとリテーニングリングの歪み計測結果を示す。図では回転子ウェッジとリテーニングリングそれぞれの計測値のうち最も大きいものを1として正規化している。どの

結果も、周方向及び軸方向の差分を含め、解析値と歪み計測値は問題なく一致しており、境界条件を含む現行解析手法の妥当性が示されたものと考ええる。なお、材料側の疲労特性については、実機を模擬した試験片でデータを個別に収集し、高精度な疲労寿命評価を実現している。

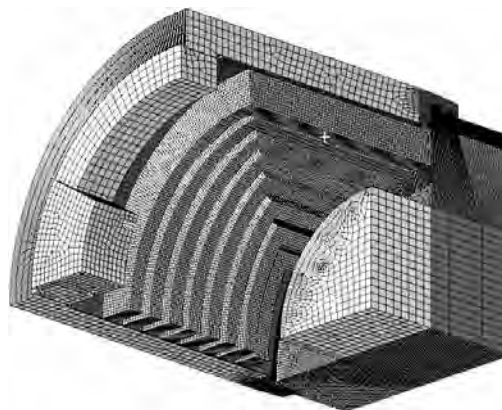


図5. 回転子端部の構造解析モデル(1/4円周)

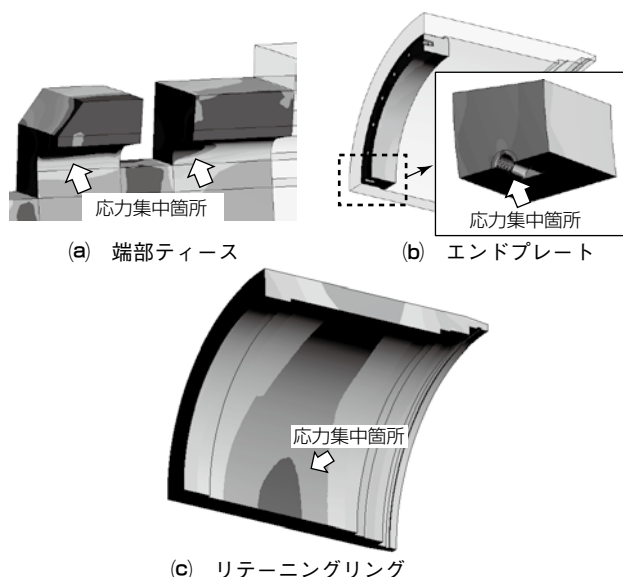


図6. 回転子端部の起動停止時応力振幅

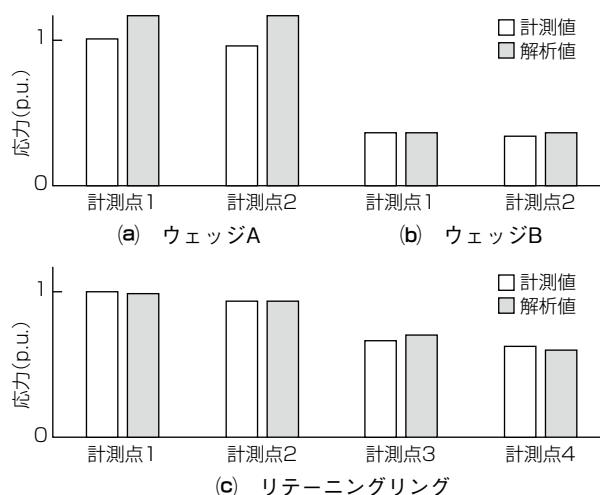


図7. 回転子ウェッジとリテーニングリングの歪み計測結果

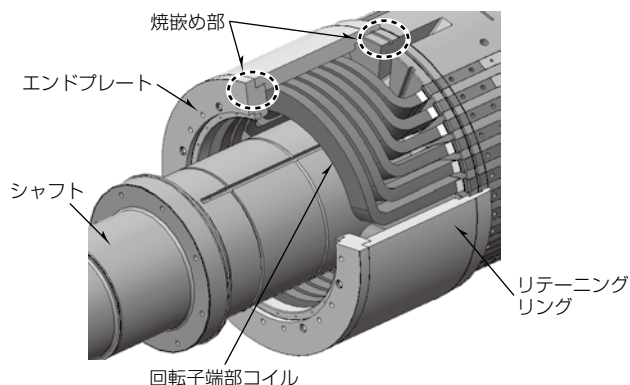


図4. 回転子端部構造

4. 顧客メリット創出に向けた予防保全技術

4.1 回転子部品の非破壊検査技術

3章で述べた三次元解析を用いた上で、実際の発電機の運用状態と照らし合わせることによって、破損リスクの事前予知は可能である。しかし、過去に製作した全発電機の寿命評価を行うことは費用対効果の面で現実的ではなく、定期点検期間の短縮・頻度低下の昨今の状況を踏まえ、実機点検の機会に短時間で確実に回転子の損傷を検知する点検技術の開発も必要不可欠となってきた。

発電機の起動停止に伴い、低サイクル疲労によって発生した亀裂は、発生前と比較して小さな負荷であっても進展し、破断に至るおそれがある。回転子部品の周辺は運転時に遠心力が作用するほか、軸振動に起因した微小な繰り返し応力が継続して発生する環境にあるため、亀裂が残存したままの状態では運転を継続することは安全面から許容はできず、このような場合は初期亀裂を早期に発見することが重要になる。従来、回転子部品の微細な初期亀裂を発見するためには浸透探傷検査を必要としていたが、例えば図8に示す回転子端部ティースの亀裂発生箇所であれば、リテーニングリングの内側に隠れる構造のため、直接的に検査を行うことは不可能であった。したがってこの部分を検査するためには回転子を発電機から引き抜いた後、各部品を分解する必要があるが、検査工程が長期にわたることから顧客ニーズとも合致していなかった。

現在、当社では検査工程短縮のための技術開発を進めており、先に述べたリテーニングリング内側部の回転子端部ティースの超音波探傷検査のイメージを図9に示す。新技術ではリテーニングリングの表面からその内部にあるティース部の亀裂を、超音波探傷で検知する手法としており、この技術の導入で回転子端部部品の分解をすることなく検査を実施することが可能になる。つまり、従来の検査工程の大幅短縮を実現するとともに、従来の定期点検期間内では実施不可能であった回転子部品の詳細点検を、今後は無理なく所定の期間内に組み込み、回転子部品の詳細点検機会を増加させることが可能になる。今後、同様の技術を回転子各部品の点検に展開することを計画しており、火力発電プラントの稼働率を低下させることなく、破損リスクの早期発見と重大事故の未然防止を可能にするために開発を継続していく。

4.2 予防保全工事での付加価値向上

各部品の正確な疲労寿命評価は、発電機の適切な点検時期及び部品の適切な交換時期を提示し、発電機長期運用の信頼性を高めることが可能になるだけでなく、部品レベルの強度設計基準を適正化することで、発電機の効率向上や低コスト化への寄与も実現できる。その具体例として、

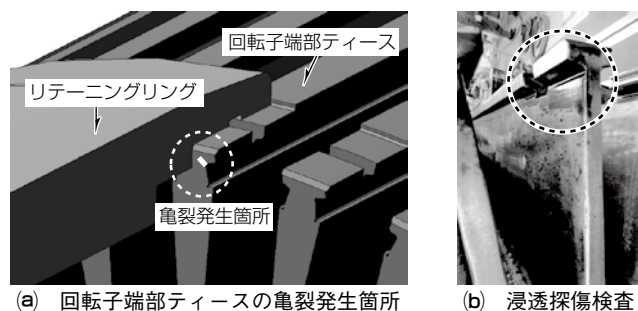


図8. 回転子端部ティースの浸透探傷検査

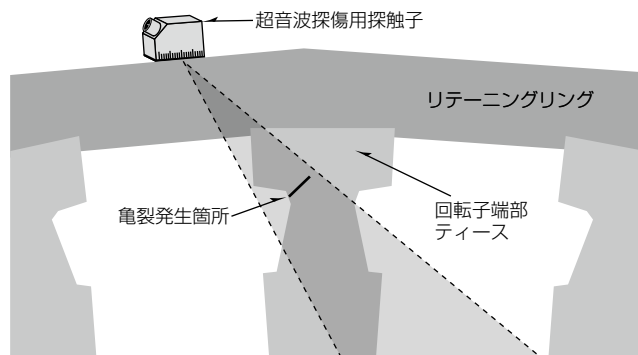


図9. 回転子端部ティースの超音波探傷検査のイメージ

今回の結果を回転子断面の設計に反映し、形状を最適化することによって発電機効率の0.02%の向上を可能にした。発電機効率の向上によって、環境面からはCO₂排出量削減に貢献できるほか、発電量あたりの所要コストを低減させることによって発電所の収益性向上に貢献できる。

5. む す び

火力発電プラントの運用環境が変化してきており、タービン発電機では特に回転子部品の予防保全技術の重要性が高くなってきている。そのため当社では、最新の解析技術を駆使し、実機検証や材料の要素試験結果と組み合わせることによって回転子部品の寿命評価技術を進歩させた。さらに定期点検期間短縮・発電機稼働率向上の観点から、回転子部品の破損を短時間で確実に検知する検査技術の新規開発も進めている。

今後はこれらの技術を用いて、適切なメンテナンス時期だけでなく、予防保全工事時に付加価値向上に関わる要素技術を併せて提案することによって、発電機の長期運用での信頼性向上及び収益性向上に対して継続して貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 舟崎陽一，ほか：水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と要素技術の既設機への展開，三菱電機技報，90，No.11，635～638（2016）

サテライトトカマク“JT-60SA” の超電導コイルの製作

野元一宏*
堀井弘幸*
板敷祐太郎*

Manufacturing Superconducting Coils for Satellite Tokamak "JT-60SA"

Kazuhiro Nomoto, Hiroyuki Horii, Yutaro Itashiki

要 旨

JT-60SAは、欧州との国際協力の下、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST)那珂核融合研究所で建設中の大型プラズマ実験装置である。プラズマの磁場閉じ込め及び制御のためトロイダル磁場(TF)コイル、中心ソレノイド(以下“CS”という。)、平衡磁場(EF)コイルの3種類の超電導コイルが設置される。欧州がTFコイル18台の調達を担当し、日本はEFコイル6台及びCS 1台の調達を担当する。

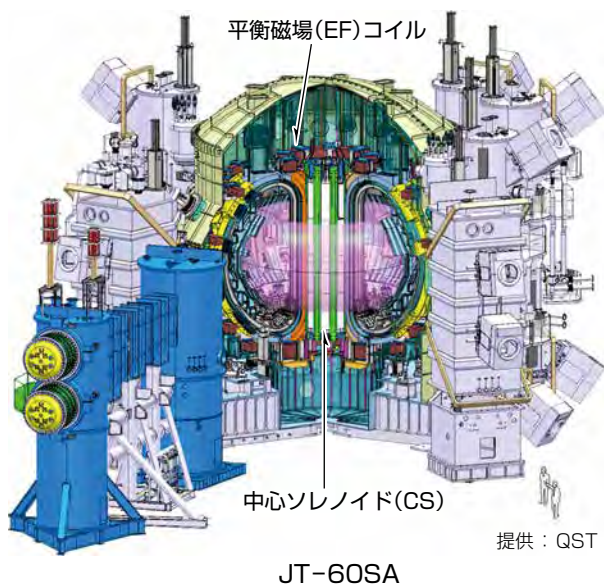
三菱電機は2009年から日本担当分全ての超電導コイル製作を担当した。これらのコイルは当社でも経験のなかった大型の超電導コイルであり、2009年から製作設備の製作・要素試作を始め、2016年8月にEFコイル、2019年3月にCSを完納した。

EFコイルは、ニオブチタンの超電導線材を用いたコイルであり、外径が最大12mと大きく陸送できないため、2012～2016年の間、QST那珂核融合研究所構内に製作設備を立ち上げ、現地生産を行った。

CSは、52層549ターンという多層ソレノイドコイルであり、高磁場下で使用するためニオブスズと呼ばれる超電導線材を用いる。ニオブスズは熱処理が必要であり、熱処理後に超電導特性を劣化させないため、設計と生産技術の両面で数多くの工夫を行った。

当社は、EFコイルとCSに加えて超電導コイルに電源供給するTFコイル用給電機器の製作も行った。

現在、QSTがこれらの機器の据付けを実施している。



EFコイル



CS

JT-60SA

左図は欧州との国際協力の下、建設が進められている国内核融合実験装置JT-60SAの鳥瞰(ちょうかん)図であり、2020年ファーストプラズマの予定である。右上図は那珂核融合研究所内本体室搬入前のEF1・EF2・EF3コイルであり、一番手前のEF1コイルは直径12m、質量29t、ニオブチタンを使用した2019年時点で世界最大級の超電導コイルである。右下図は当社工場出荷前のCSであり、直径2m、質量100t、ニオブスズを使用した超電導コイルである。

1. ま え が き

JT-60SAのEFコイルとCSは当社として実績のない大型超電導コイルであり、製造プロセスごとに製作設備を新規に設計・製作し、試作開発を行って課題を解決した。

本稿では、EFコイルとCS、及びTFコイル用給電機器の製作について述べる。

2. EFコイルとCSの特長

JT-60SAの超電導コイルの鳥瞰を図1に、EFコイルとCSの主要パラメータを表1に示す。EFコイルとCSで使用した超電導導体の方式はケーブルインコンジットと呼ばれ、ステンレス鋼のジャケットの中に超電導燃線(よりせん)と液体ヘリウムが流れるスパイラルが格納されており、運転時に導体にかかる電磁力を支持する(図2)。

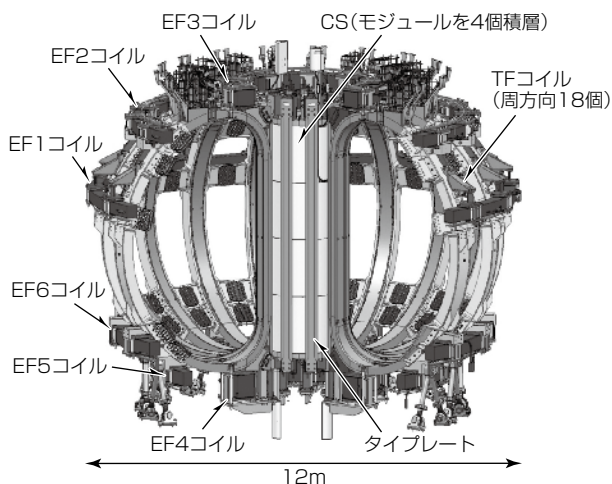


図1. JT-60SAの超電導コイル(提供: QST)

表1. 超電導コイルの主要パラメータ

	EF(6種類)	CS
超電導線	ニオブチタン	ニオブズ(熱処理必要)
外径(m)	4.4~12.0	2.0
内径(m)	2.0~11.0	1.3
高さ(m)	0.5~1.5	12.0
製品質量(t)	20~25	100

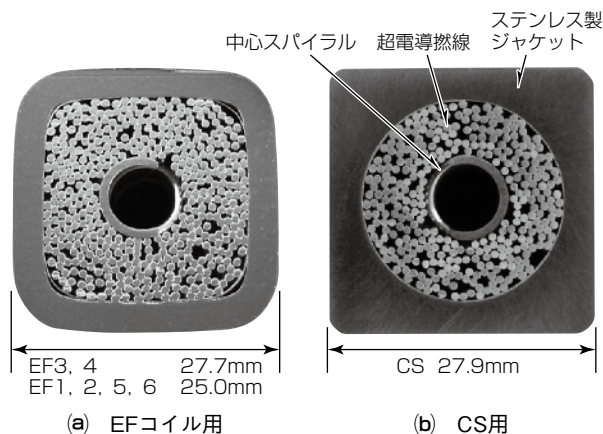


図2. 超電導導体断面図(提供: QST)

3. EFコイルの製作

EFコイルはプラズマの形状と位置を制御するため、コイル電流中心の真円度と平面度の確保が技術課題である。EFコイルの製作手順を図3に、積層後の断面を図4に示す。

巻き線は2層を一塊とするダブルパンケーキ(DP)巻き線を採用しており、精度の良いDPを製作できるが、コイル電流中心精度に影響する。EFコイルは寸法を表1に示すように各DPが直径に対し非常に薄い円盤である。樹脂加熱硬化時の熱歪(ひず)みや製造過程の輸送による物理的な歪みが生じた場合、積層時にコイル電流中心精度を調整できない可能性があった。

そこで、次の対策を行って高精度のDP製作を行った。

- (1) 導体曲げシミュレーションコード開発(CSと共用)
- (2) 高精度巻き線対応の巻き線ヘッド開発(CSと共用)
- (3) 連続自動巻き線
- (4) 加熱硬化容器(導体と同じ熱伸びとし、寸法を確保)
- (5) 樹脂選定と試作・検証

EFコイル巻き線を上から見ると図5(a)のように一定R部とターン渡り部で構成されるパンケーキ巻きとなっている。EFコイル製作に使用する超電導導体の剛性は高く、

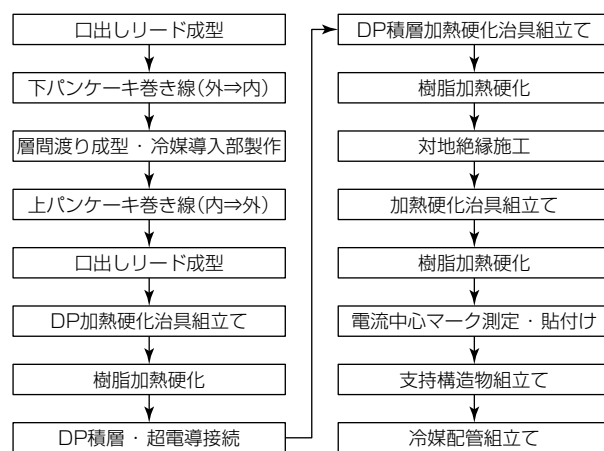


図3. EFコイルの製作手順

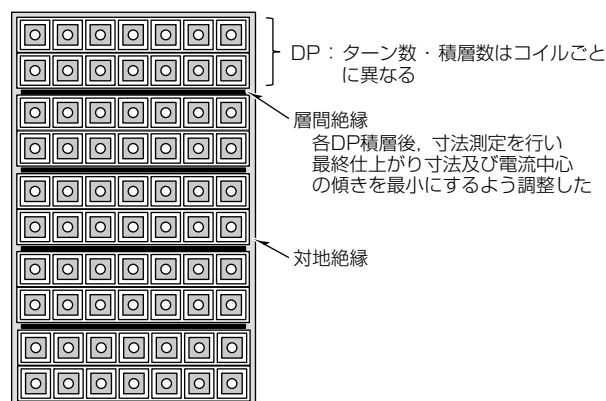
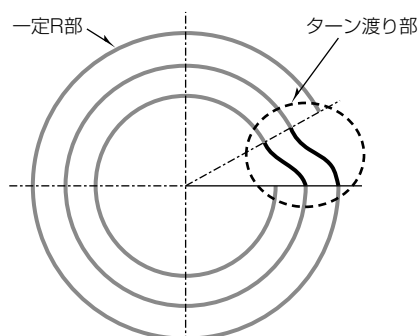
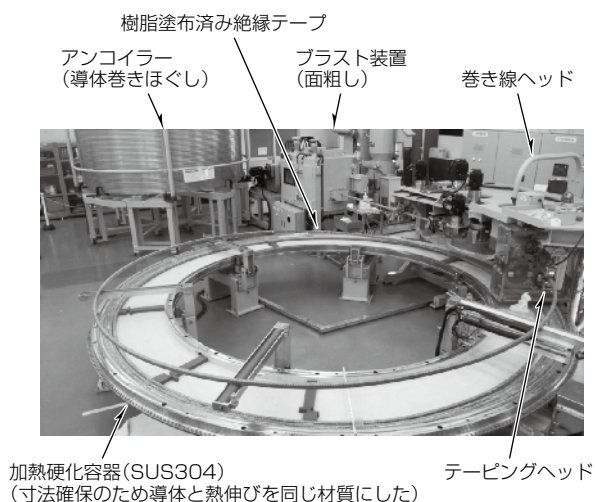


図4. EFコイルの断面図(例)

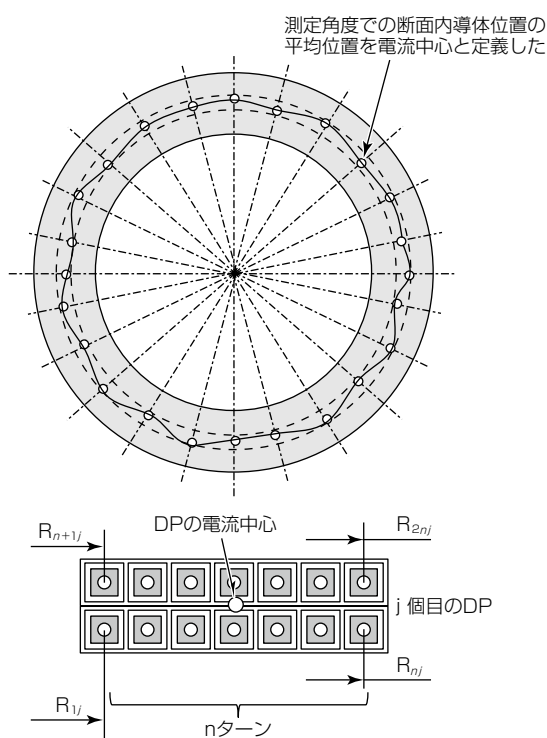


(a) パンケーキ巻き線の模式図



(b) 巻き線装置(FE4製作時)

図5. パンケーキ巻き線と巻き線装置



■DP m個からなる、ある角度位置での電流中心位置は次のとおり

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} R_{ij} \right)$$

図6. 電流中心の定義

表2. EFコイル電流中心真円度測定結果(単位: mm)

	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6
真円度	0.3	0.4	0.2	0.6	0.6	1.3
仕様	8以下	7以下	6以下	6以下	7以下	8以下

巻き線ヘッドで曲げ加工した導体を真下へ降ろしていく方法を採用した。専用の巻き線ヘッドとシミュレーションコードを開発し、一定R部とターン渡り部を連続巻き線することで、加工時間の短縮、成型ばらつきの抑制を行うことができた(図5(b))。

次に電流中心の定義を図6に示す。この工事での電流中心は各測定断面での幾何学的な導体の中心であり、プラズマの性能に直結するパラメータである。電流中心の測定結果は表2に示すとおり、全てのEFコイルで仕様値を大きく下回る真円度を達成できた。

4. CSの製作

CSは独立した電流制御を行うためCSモジュールと呼ばれる52層のコイル四つを積層した構成である。JT-60SAのトカマク中心に設置され、8.9Tもの高磁場下で、交流運転による電磁力に耐える構造となっている。極低温での運転時コイル間にギャップが生じないようにタイプレートと呼ばれる構造物でモジュールを予備加圧(プリコンプレス)している。CSの製作手順を図7に示す。

4.1 CSモジュールの製作

CSの超電導線は熱処理(650℃×100h)が必要なニオブスズであり、熱処理後は過大な歪みを与えると超電導特性が劣化する。そのため、熱処理後に導体に与える歪みが0.1%以下となるように製作設備を設計し、コイル製作を行った。導体はジャケット厚さ及び材質のばらつきによって曲げ半径が変化するため、巻げ半径を測定し、巻き線ヘッドにフィードバックをかける方式にすることで高精度での巻き線を可能にした(図8)。

CSモジュールの製作精度もEFコイルと同様に電流中心(図6)の真円度で評価する。真円度の測定結果を表3に示す。真円度の要求仕様4 mm以下に対し0.6mm以下の精度でモジュールを製作できた。

4.2 CSモジュールの積層

CSモジュール4個の積層ではモジュール間に絶縁スペーサを挿入することで位置決めと高さ調整を行い、各モジュール上面で平面度1 mm以下を達成した。またCSモジュールの電流中心測定結果から算出される幾何中心を位置度φ1 mm以下に設置できた(中心軸位置度仕様: φ2 mm以下)(図9)。

4.3 プリコンプレス

プリコンプレスとは、極低温でのコイル熱収縮量相当分を常温状態であらかじめコイルを圧縮しておくことである。

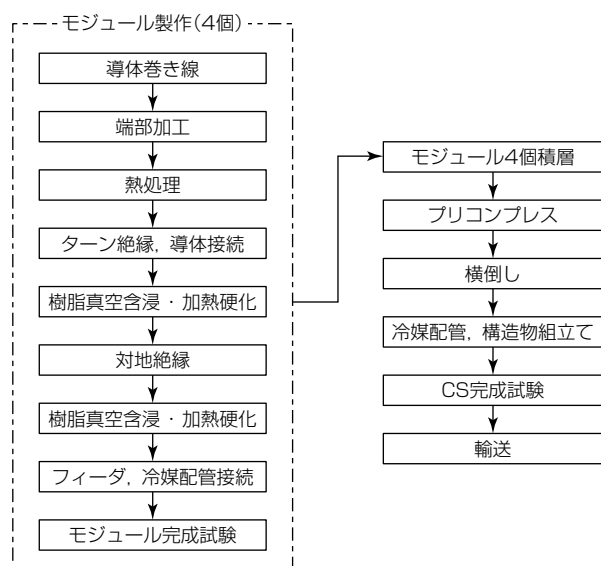


図7. CSの製作手順

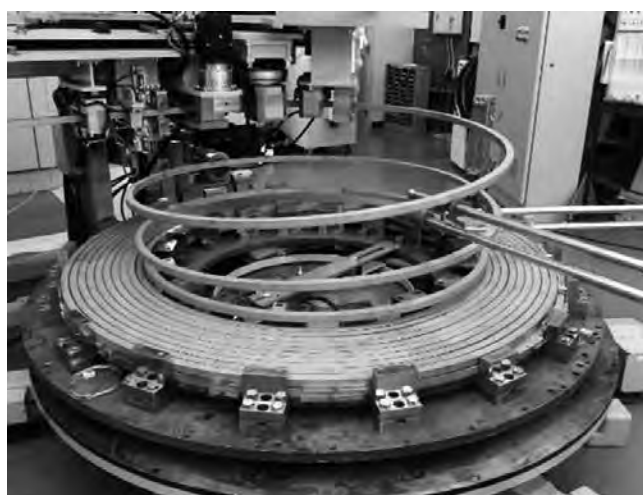


図8. CS巻き線装置

表3. CSモジュールの電流中心真円度測定結果(単位: mm)

モジュール	CS1	CS2	CS3	CS4
真円度(仕様4以下)	0.4	0.6	0.6	0.3

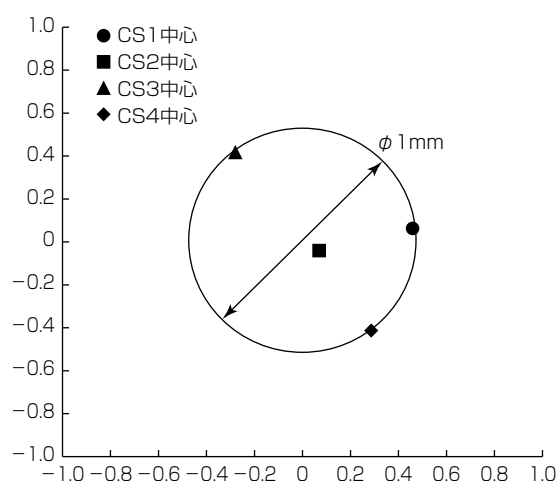


図9. 積層後のCSモジュール幾何中心位置



図10. CSの横倒し(提供: QST)



図11. CSの現地輸送・縦起こし後のトカマク本体への挿入(提供: QST)

タイプレートと呼ばれるステンレス製の構造物をコイル内外に全周9か所の計18本設置し、コイルに37.5MNの荷重を与える。荷重を均等に与えるようタイプレートに設置した歪みゲージで荷重を管理し、24時間保持後に荷重が抜けていないことを確認した。

モジュール積層、プリコンプレスは縦置状態で組立てを行ったが、那珂核融合研究所に輸送するためには一度横置状態にする必要がある。製作工程内での変形を構造計算で評価し、製品での横倒しと縦起こしを実施し、横置状態にしても寸法変化がないことを確認した(図10、図11)。

5. TFコイル用給電機器の製作

極低温の超電導コイルと常温の電源とを接続するために、高温超電導電流リード(HTS-CL)と超電導導体を用いた専用の給電機器が5台使用される。当該給電機器はコイルターミナルボックス(CTB)と呼ばれる(図12、図13)。当社はTFコイル用CTB 1台の製作を担当した。

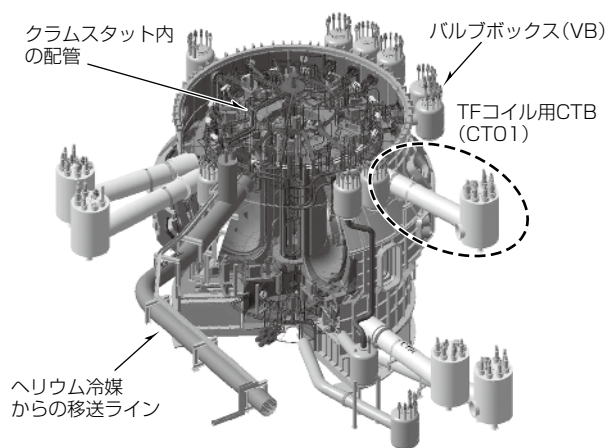


図12. CTBの組立て状態 (提供：QST)



図14. CTBフィーダ曲げ形状例

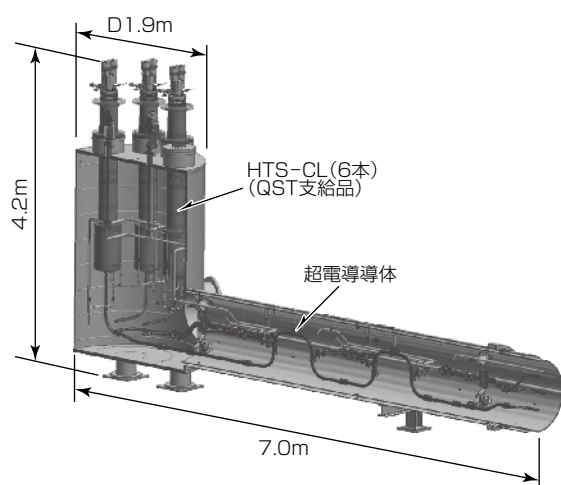


図13. TFコイル用CTB (提供：QST)



図15. TFコイル用CTB完成時外観 (提供：QST)

この機器の特徴は、各HTS-CLに対して1本ずつ長尺の超電導導体を曲げたフィーダを接続し、電流の行きと戻りのフィーダを対にしている点である。当社ではEFコイル製作の実績を生かした高精度な曲げ加工によって、HTS-CLと無理なく接続できた(図14)。

6. む す び

QSTの多大なる協力でJT-60SA EFコイルとCS及びTFコイル用CTBの製作を無事完遂した(図15)。今回のものづくりで得られた知見を生かし、今後も核融合発電の実現に向けて貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 野元一宏，ほか：核融合大型超電導コイルの製作，三菱電機技報，87，No.11，652～655 (2013)