

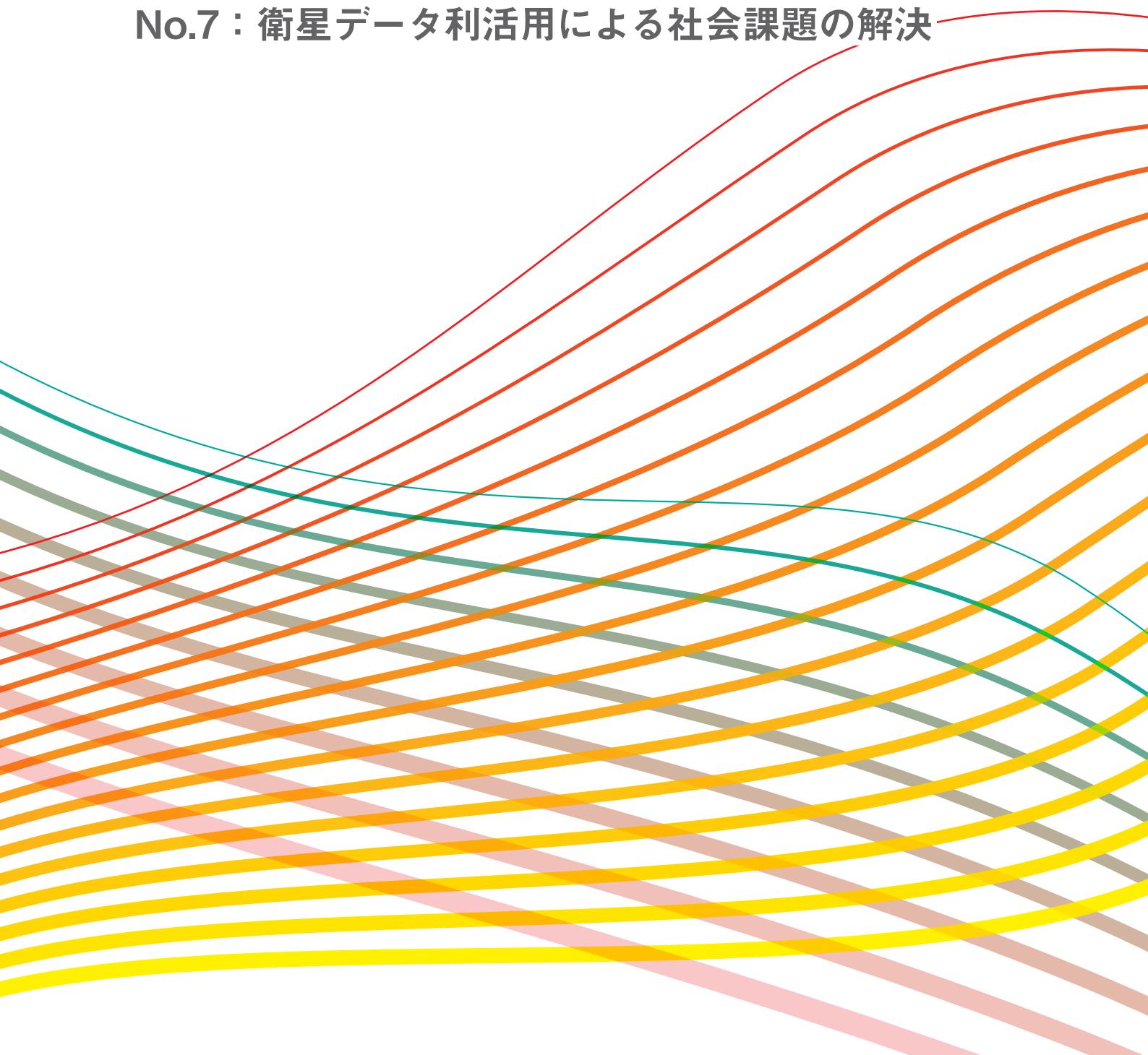


三菱電機技報

6-7 | 2022
Vol.96 No.6-7

No.6 : デジタルエナジー

No.7 : 衛星データ利活用による社会課題の解決



三菱電機では、暮らしを表す“ライフ”，生活に必要なものを生み出す“インダストリー”，社会を支える“インフラ”，これらをつなぐ“モビリティ”という4つの領域において、社会課題の解決に向けた価値創出へ取り組んでいます。

2022年からの三菱電機技報では、これら4つの領域とそれらを支える基盤技術をテーマとして取り上げていきます。

今回の特集ではインフラ領域の“デジタルエナジー”（6月号），“衛星データ利活用による社会課題の解決”（7月号）をご紹介します。

No.6

特 集 デジタルエナジー	Digital Energy
卷頭言	
デジタルエナジー技術の展望 4 加藤晴信	Prospects for Digital Energy Technology Harunobu Kato
卷頭論文	
カーボンニュートラル社会を支える技術の展望 5 前田英昭	Technology Outlook Supporting Carbon Neutral Society Hideaki Maeda
配電線路電圧管理システムの導入 11 寺脇 充・遠藤駿介	Introduce of Grid Control System for Power Distribution System Mitsuru Terawaki, Shunsuke Endo
監視・制御の高度化を図るエッジデバイス "MELPRO-i"シリーズ 15 匹田猛雄・高口雄介	Edge Device "MELPRO-i" Series for Highly Sophisticated Monitoring and Control Takeo Hikita, Yusuke Takaguchi
自励式HVDCシステムの検証 19 貞國仁志・石黒純也・久世裕子・山中大輔・菊地 健	Verification of VSC Based HVDC System Hitoshi Sadakuni, Junya Ishiguro, Hiroko Kuse, Daisuke Yamanaka, Takeshi Kikuchi
電力系統網の安定稼働に貢献する異常兆候検知 23 野村明裕・佐子朋生	Detection of Abnormality Signs that Contribute to Stable Operation of Power Grids Akihiro Nomura, Tomo Sako
カーボンニュートラルを目指したマルチリージョンEMS 27 千賀智幸・杉山瑛美	Energy Management System for Multi-region Digital Power Supply targeting to Carbon Neutrality Tomoyuki Chinuki, Emi Sugiyama
風力系統への適用を想定したC-GIS用Cable Switch 31 松永敏宏・香川耕一・大西健司・吉岡純生	Cable Switching Breaker for C-GIS Dedicated to Wind Power System Application Toshihiro Matsunaga, Koichi Kagawa, Kenji Onishi, Yoshiaki Yoshioka

No.7

特 集 衛星データ利活用による社会課題の解決	Provide Solutions to Social Challenges by Utilizing Satellite Data
卷頭言	
衛星データ利活用による社会課題の解決 の特集号に寄せて 35 松英稔久	A Preface for the Special Issue of "Provide Solutions to Social Challenges by Utilizing Satellite Data" Toshihisa Matsue
人工衛星による測位インフラ 36 井上禎一郎・山口雅哉・高山拓也・永倉 宣・今村征寛	Positioning Infrastructure by the Quasi-Zenith Satellite System Teiichiro Inoue, Masaya Yamaguchi, Takuya Takayama, Wataru Nagakura, Yukinobu Imamura
温室効果ガス・水循環観測技術衛星 GOSAT-GW及びTANSO-3 40 藤井康隆・鴨沢 誠	GOSAT-GW and TANSO-3 Yasutaka Fujii, Makoto Kamozawa
気象衛星ひまわりによる自然災害への備え 44 西山 宏・赤木茂樹	Preparation for Natural Disaster by Meteorological Satellite Himawari Hiroshi Nishiyama, Shigeki Akagi
宇宙からの地球観測ソリューション 48 栗原康平・三五大輔・桑野和孝・齋藤 進	Earth Observation Solutions Kohei Kurihara, Daisuke Sango, Kazutaka Kumeno, Susumu Saito
一般論文	
東京国際空港向け広域マルチラテレーション装置 52 伴野友彦・佐藤 亮	Wide Area Multilateration Equipment for Tokyo International Airport Tomohiko Banno, Ryo Sato
オンライン資格確認向け 三菱通信ゲートウェイ "smartstar" 56 横里純一・松坂孝一郎・佐藤浩司・名取英男・泉 裕作	Mitsubishi Communication Gateway "smartstar" for Health Insurance Online Confirmation Junichi Yokosato, Koichiro Matsuzaka, Koji Sato, Hideo Natori, Yusaku Izumi

巻頭言

デジタルエナジー技術の展望

Prospects for Digital Energy Technology



加藤晴信 *Harunobu Kato*

電力・産業システム事業本部 電力・産業システム技術部長
Senior General Manager, Energy & Industrial Systems Group, Engineering Planning Dept.

発電から送配電、さらに工場やビル、一般家庭といった需要家への小売りをつなぐ電力ネットワークは、電力自由化の進展、脱炭素化を背景とする再生可能エネルギー（以下“再エネ”という。）電源の大量導入及びエネルギーの需要構造の変化に伴い、ますます複雑化が進展していくことが想定されます。

日本では、2020年10月に“2050年カーボンニュートラル”を目指すことが宣言され、これを踏まえて2021年10月に第6次エネルギー基本計画が策定されました。この中で“電源構成における非効率な石炭火力などをフェードアウトさせつつ、再エネの割合を36～38%に高めていく”ことが示され、カーボンニュートラルに向けた道筋として、電力部門では脱炭素電源の拡大、産業・民生・運輸（非電力）部門では、脱炭素化された電力による電化、水素化、メタネーション、合成燃料等を通じた脱炭素化を進めが必要とされています。

一方、社会生活に欠くことのできない“電力エネルギー”については、再エネを中心とした脱炭素化電源の大量導入にあっても、安全性を前提とし、安定的で低コストなエネルギー供給を実現し、同時に環境への適合を図るS+3E（安全、安定供給、経済性、環境適合性）を高めていくことが重要になります。

これらの状況を受けて、発電分野では、高性能の機器・監視制御装置の導入に加えて、重要インフラのフィールドデータをIoT(Internet of Things)やセンサで収集し、取得したデータをAI技術などによって分析することで発電プラント全体の運用及び保守の高度化を実現する取組みが始まっています。

送配電分野では、機器単体の高効率化や対環境性の向上に向けた取組みが行われています。加えて、地域偏在性のある再エネ電源の大量導入に対して、パワーエレクトロニクス技術を活用した長距離直流送電による系統の増強や安

定度向上に寄与する系統安定化装置の導入などによるレジリエンスの強化が更に必要となってきています。また、太陽光や風力など発電量が季節や天候に左右される再エネ電源を大量導入するために、調整力として蓄電池を設置することで、電源の出力変動影響を一定の範囲内に制御し、その出力を最大限に活用する取組みが進められています。

一方、需要家サイドでも、省エネルギーの推進に加えて、電力消費での再エネ電源比率を高める動きが加速しています。大規模化石燃料電源から送電系統を介して需要家へ届ける従来の供給形態から、個々のエリアごとに普及した再エネ電源を活用した電力の地産地消、経済性と安定性を両立したマイクログリッドへの移行など分散化が想定される状況にあります。このようなマイクログリッドでは、電力需給制御技術、ネットワーク技術をコアに地産地消型の再エネや蓄電池等の分散リソースの活用、IoT、電力取引の活用などによる分散型エネルギーシステムの高度化が期待されています。

三菱電機では、ICT(Information and Communication Technology)技術やIoT技術を活用し、エネルギーの流れや状態を見る化し、最適に制御することで再エネの大量導入によるゼロカーボン最適技術と経済合理性を両立するソリューションを提供し、社会の脱炭素化に貢献することを“デジタルエナジー技術”と位置付けています。

地域偏在性を持ち、分散する再エネルギーの価値を集約し、デジタル制御と市場取引等で最大限に活用すること、そしてそれらを可能とするレジリエントな電力ネットワークを構築することは脱炭素社会の構築に不可欠であり、当社はたゆまぬ技術革新と限りない創造力で、デジタルエナジー技術の発展に貢献していきます。

この特集号では、これら電力システムのS+3Eに資するデジタルエナジーの最新技術について紹介します。

カーボンニュートラル社会を支える技術の展望

Technology Outlook Supporting Carbon Neutral Society



前田英昭*
Hideaki Maeda

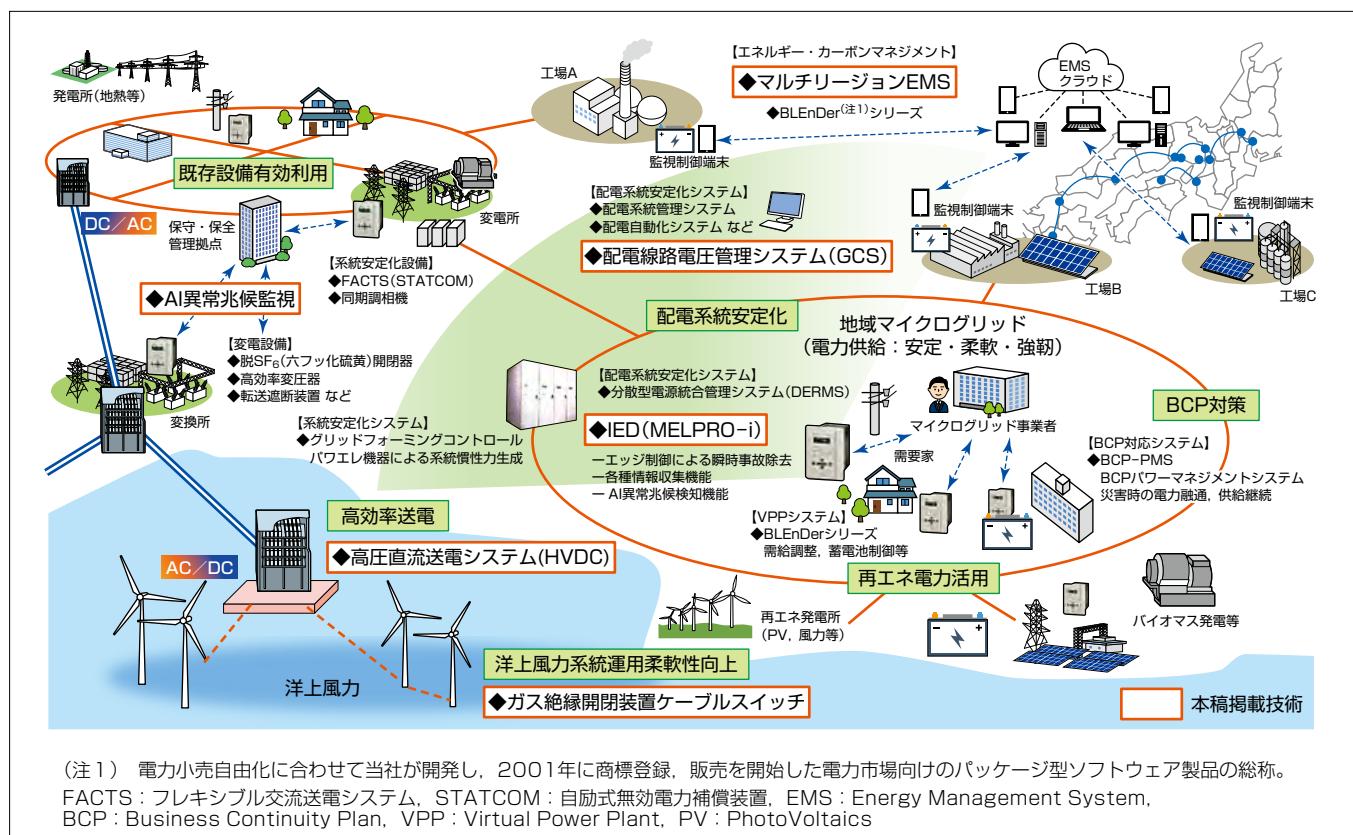
要旨

カーボンニュートラルへの取組みは世界的な趨勢(すうせい)となり、電力分野では電源の脱炭素化と電力の地産地消、需要分野ではエネルギーの電化とグリーン電力の利用による脱炭素化が求められている。また、カーボンニュートラルの実現に向けて経済的手法や金融的手法が導入されるなど様々な角度からのアプローチが試みられている。

新たな社会を支える技術についての議論も深まりつつある。電力分野では再生可能エネルギー(以下“再エネ”といふ)電源を最大限に利用できる次世代ネットワークへの転換が求められており、分散型電源の接続拡大による配電系統の安定性維持などが課題として顕在化している。系統安定化と電力品質確保に資する技術、高効率送配電技術、高経年化設備の有効利用に貢献できる技術の重要性が増して

いる。製造企業などの需要家分野では、サプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まりつつあり、企業活動の効率的な脱炭素化が今後必要となってくる。

三菱電機では電力の利用を含めたシステム全体が抱える課題の解決に貢献するため、様々なソリューションの開発を推進している。配電系統の安定化に貢献する配電線路電圧管理システム、保護制御機能に加えてエッジでの情報収集・分析機能をパッケージ化したIED(Intelligent Electronic Device)、需要家の脱炭素への移行を支援するカーボンマネジメントシステム等の実用化を進めている。また電力分野で培ったプラント及びシステムエンジニアリング力を社会ニーズに即した技術の探索や新たな製品・サービスの社会実装に向けて活用している。



(注1) 電力小売自由化に合わせて当社が開発し、2001年に商標登録、販売を開始した電力市場向けのパッケージ型ソフトウェア製品の総称。
FACTS：フレキシブル交流送電システム、STATCOM：自励式無効電力補償装置、EMS：Energy Management System、BCP：Business Continuity Plan、VPP：Virtual Power Plant、PV：PhotoVoltaics

カーボンニュートラル社会を支える次世代電力システム

電力システムの安定・柔軟・強靭(きょうじん)性の向上に貢献する製品群を例示している。地域マイクログリッドが各地に構築され、再エネ電力は高圧直流送電システム(High Voltage DC: HVDC)によって効率良く消費地へ送電される。系統安定化システム等は最適な機能と単位ヘスリム化と分散化が進展し、リアルタイム性を要する制御やエッジデータの一次処理でIEDが活用される。需要家サイドではエネルギー・カーボンマネジメントシステムが導入され経済合理性を伴ったRE100(Renewable Energy 100%)製品のものづくりが実現される。

1. まえがき⁽¹⁾

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

電力分野では、太陽光発電や風力発電などの非同期・出力変動電源の導入が拡大し、調整力の確保や系統の安定性維持、電力品質の確保が課題となっている。また、近年の自然災害の激甚化に対応するため、安定・柔軟・強韌性を備えた電力システムへの転換が求められている。

製造企業などの需要家サイドでは、温室効果ガスの排出削減だけでなく、サプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まりつつあり、製造企業が引き続き持続可能な活動を行うためには、効率的かつ経済的に企業活動のカーボンニュートラル化を進めることが必要となってくる。

本稿では、カーボンニュートラル社会の実現と、これを支える技術の展望について述べる。

2. 電力システムへ求められていること⁽²⁾

2.1 次世代ネットワークの構築と既存設備有効利用

再エネの主力電源化に向けた戦略的な議論が活発化している。既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大、陸上風力発電の導入拡大、さらには政府指定海域への大規模洋上風力発電所の建設などが進められ、これら再エネ電源を最大限に利用するための次世代電力ネットワーク(以下“次世代NW”という。)への転換が求められている。太陽光や風力発電は天候によって出力が大きく変動する特性を持っており、導入拡大に対する電力品質の確保と系統の安定性維持が課題となっている。また、電力系統の効率的運用の観点からは、電源と需要地が近接していることが望ましいが、再エネのポテンシャルを持つ地域と電力の需要地が離れていることが多い。送電設備の新增設に対する費用対効果を高めるためには、直流送電システムなどの高効率な送電技術の導入が必要である。さらには、近年の自然災害の激甚化に備えて、電力システムのレジリエンスを向上させることも必要になっている。

次世代NWへの転換は、設備投資を抑制しつつ実現することが求められている。しかし、現在の電力系統を構成す

る設備は高度経済成長期に設置されたものが多く、高経年化が進んでいる。高経年化設備の重大事故を未然防止することで系統の安定性を維持しながら、既存設備を保全し、さらには情報化や環境負荷低減などの価値向上を図る必要がある。これらを実現するためには、設備の劣化・損耗状態を早い段階で、省力かつ効果的に検知し、設備特性(故障による影響度、対策期間等)に合わせて、CBM(Condition Based Maintenance)とRBM(Risk Based Maintenance)を適切に組み合わせたメンテナンスと設備のアップグレードを計画的に行うことが有効である。

2.2 地域マイクログリッドの構築

昨今の再エネ大量導入や蓄電設備を含む様々な分散型電源が配電系統へ接続されつつあり、また、配電事業ライセンス制の導入を契機にVPP事業者などの様々なプレイヤーが系統との連系を進める見込みである。これによって、従来、電力の流れは電源から送配電系統を介して需要家へ届く一方向の流れであったが、近年は系統混雑や逆潮流が発生するなど複雑化する傾向にある。既に、系統電圧が適正範囲を超える懸念が指摘されており、近い将来、電気自動車(Electric Vehicle : EV)の普及や充電スタンドの設置が進むと、更に予測困難な系統電圧の変動が生じる可能性がある。今後想定される配電系統が抱える課題に対応するためには、配電系統の状態を可視化し、リアルタイムできめ細かな系統電圧の管理が必要となる。また、分散型電源を統合管理し、制御することで系統の安定化を図る必要性が高まる。レジリエンス向上の観点からは、地域で再エネと蓄電設備などの分散型電源を組み合わせて、自律的に活用するなど、需給一体型の地域マイクログリッドの構築が求められている。

2.3 需要家の脱炭素化を取り巻く環境

カーボンニュートラルへの取組みは世界的な趨勢となりつつあり、世界全体で脱炭素・カーボンニュートラルを表明する国や企業が続々と増えている。グローバルな取引では、サプライチェーン全体における脱炭素化達成への要請が高まっており、製品の購入契約の条件に製造企業での脱炭素の取組みを課す事例も出てきている。また、政府主導でカーボンニュートラルにいち早く移行するための挑戦を行い、国際ビジネスで勝てる企業群を育成し、産・官・学が一体となり、経済社会システム全体の変革のための議論と取組みを行う場としてGX(グリーントランクスフォーメーション)リーグの創設などが計画されている。

このような背景の中、多くの企業が脱炭素に向けた取組みを加速している。再エネ電源の自社保有だけではなく、オンラインサイト／オフサイトのPPA(Power Purchase Agreement)

表1. カーボンニュートラル社会を支える製品の位置付け

カーボンニュートラル社会を支える技術	役割・機能				
	系統安定化、電力品質向上	高効率化	既存設備有効利用	レジリエンス、セキュリティ	カーボンマネジメント
配電線路電圧管理システム(GCS) (3.1節)	○				
先進・高機能IED端末(MELPRO-iシリーズ) (3.2節)	○ 保護・制御、エッジ情報収集		○ エッジAI機能搭載	○ μグリッド保護、セキュリティ強化	
高圧直流送電システム(HVDC) (3.3節)		○			
電力系統の安定稼働に貢献する異常兆候検知 (3.4節)			○		
カーボンマネジメントシステム(マルチリージョンEMS) (4章)					○
ガス絶縁開閉装置ケーブルスイッチ (5章)		○ 発電機会最大化			

の活用などによって再エネ電力の調達を拡大する企業が出てきている。しかしながら、自社保有の土地や工場内に必ずしも十分な再エネ設置スペースがあるとは限らず、また、十分な設置スペースを確保できたとしても、発電場所と需要場所が一致又は近接しているとは限らない。さらには、現在のRE100の枠組みでは、製造拠点の受電端での再エネ利用率で評価されるため、例えば、ある特定の製品や顧客向けの製品だけにRE100を先行して実現したい場合であっても、拠点全体の受電電力全てを再エネ電力で賄う必要があり、相応の再エネを導入しなければならない。再エネの供給力と需要地とが必ずしも一致しない課題を解決することが必要である。

2.4 カーボンニュートラル社会を支える技術展望

次世代NWの構築で不可欠となる配電系統やマイクログリッド系統の電力品質向上に向けて、次世代配電系統管理システム(ADMS)や配電自動化システムを用いた監視・制御の高度化開発などが進められている。一方、これらシステムが現在の課題に対応した所要の機能と性能を発揮するためには、配電系統の潮流や電圧変動を可視化する必要があり、また適切な電圧整定値をリアルタイムに設定する機能を備えたシステムの実現と連携を要する。

一方、昨今のデジタル化の進展に伴い、上位の監視・制御システムで集中的に処理するデータ量は肥大化する傾向にあり、データの分散化が課題となっている。リアルタイム性が求められる制御や上位層へ伝送すべきデータのスクリーニングはエッジ側で機能を分担することが必要となっている。例えば、系統接続されている電気設備で故障などが発生した場合、その影響が系統へ波及する事態とならないよう事故除去はエッジ側で高速処理することが有効であり、また、エッジ側のデータ収集や一次処理はエッジ側で行われることが望ましい。

これら課題を解決するため、当社では、配電線路電圧管理システムを開発するとともに、将来的なDERMSなどとの連携も視野に、保護・制御機能に加えて配電分野で必要とされる情報収集機能やエッジAI機能などをパッケージ

化したエッジ端末を製品化した。また、高効率送電を実現するためのHVDC、高経年化設備の有効活用に貢献できる異常兆候検知技術、需要家の脱炭素への移行を支援するカーボンマネジメントシステム(マルチリージョンEMS)、洋上風力系統の運用の柔軟性を向上させるガス絶縁開閉装置用ケーブルスイッチの開発を行った。3章～5章で述べる技術の役割・機能を表1に示す。

3. 次世代NWの実現に貢献する技術

3.1 配電線路電圧管理システム

これまで配電系統の電圧降下対策として、変電所にLRT (Load Ratio Control Transformer: 負荷時タップ切替器付変圧器)や、配電線上にSVR(Step Voltage Regulator: ステップ電圧調整器)を設置して、電力品質の安定・維持に努めてきた。しかしながら、近年、配電系統への再エネ電源や分散型電源の接続が増加するにつれて電圧変動や逆潮流が拡大し、現行のLRT・SVRでは刻々と変化する配電系統の供給電圧を適正範囲に維持することが困難になってきている。

このような課題を解決するために、LRT・SVRなどの現地機器を対象とした電圧管理システムとして配電線路電圧管理システム(Grid Control System: GCS)を開発した。

GCSは、配電自動化システムや高低圧ロードカーブ管理システムとデータ連携し、系統電圧を可視化するとともに、LRT・SVRの整定値を毎日、遠隔から自動的に更新し、電圧急変の際にはリアルタイムに整定値を自動更新する。このような、きめ細かな電圧制御で、配電系統の供給電圧を常に適正に維持することを可能にしている。

3.2 先進・高機能IED端末MELPRO-i⁽³⁾

保護リレー製品の開発や製品化で培ったリアルタイム制御技術、エッジコンピューティング技術などを応用し、ミドルレンジのエッジ端末、MELPRO-iシリーズを開発した。

MELPRO-iは、配電自動化システムなどとの通信に加えて、端末間での高速通信を可能にしている。また、事故情報を相互に通信することによって、例えば、変電所の保護リレーが動作する数百ミリ秒以内に事故区間を特定し、高速に事故区間を遮断できる。従来方式に比べて高速に事故区間の特定・遮断ができるため、停電区間を局所化し、事故復旧時間を大幅に短縮できる。

電力系統のレジリエンスを高めるため、マイクログリッドの実現に向けた検討が進められている。マイクログリッドでは、事故時の電流量の違いなどから上位系統連系時とマイクログリッド単独運転時で系統保護を切り替える必要がある。また、単独運転しているマイクログリッド系統を上位系統へ再連系することがある。遠隔整定機能を備えることで、上位系統連系時からマイクログリッド運用時への整定値変更を遠隔拠点から実施できる。上位系統へ再連系する場合にはマイクログリッド内の分散型電源を制御し電圧や位相を上位系統と同期させることができる。

近年の効率的な設備投資要求などへの対策として、配電線情報を活用した事故予兆検知及び事故原因推定に関する検討が進められている。当社では、事故予兆を検出する機能を独自アルゴリズムによってエッジ端末に搭載可能なAI機能を実現しており、この機能の搭載ができる。配電系統のエッジ側で事故予兆検知や事故原因推定が可能になり、現地作業の効率化、事故復旧の迅速化に寄与できる(図1)。

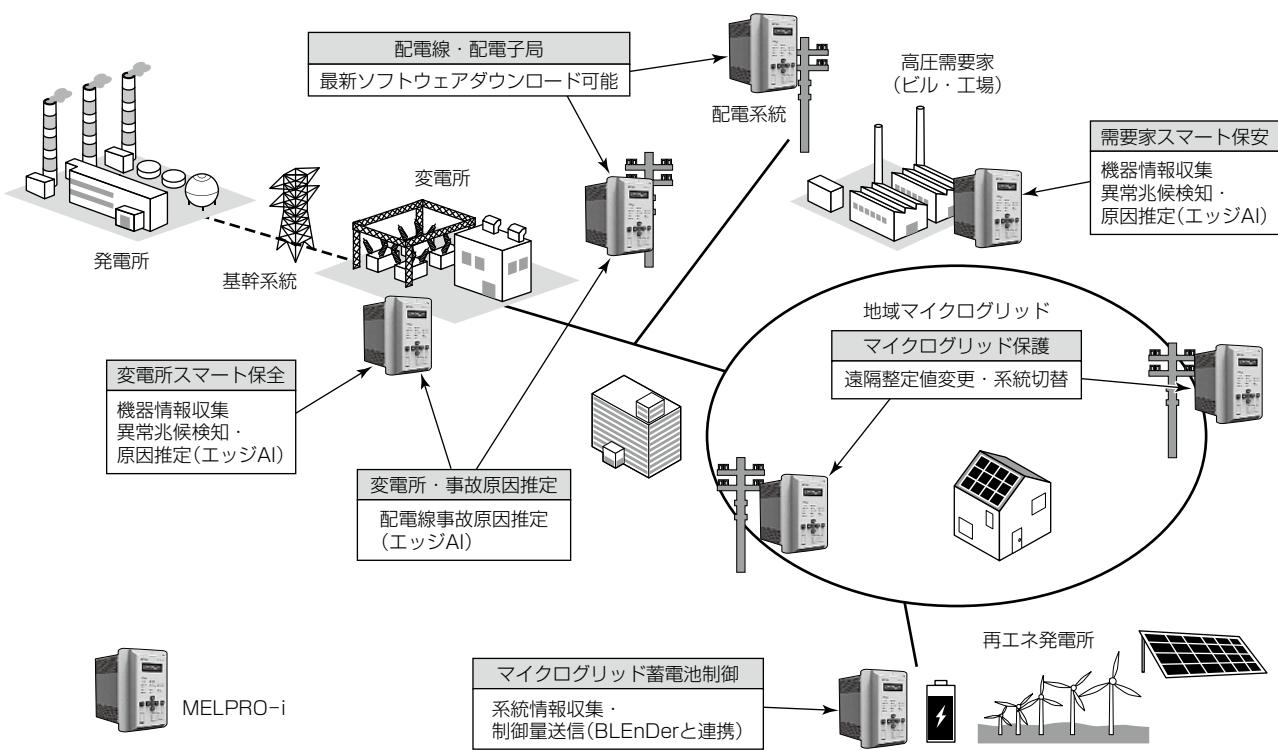
3.3 高圧直流送電システム

再エネ発電の適地から電力需要地までの高効率な長距離送電技術としてHVDCが注目されている。また、国内ではHVDCを適用して50Hzと60Hzを連系する周波数変換所の設備強化も進められている。

当社では、四国と本州の連系強化を目的に2000年に設置された紀伊水道直流連系設備に他励式変換器を含む機器を納入し、さらに自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムを開発した。当社系統変電システム製作所の敷地内には、容量50MWの直流送電システム検証設備を建設し、2018年から各種検証試験を実施している(図2)。各種検証試験として、電力融通試験、潮流反転試験、無効電力出力試験、ブラックスタート試験、直流短絡事故模擬試験などを実施し、変換器や制御保護装置など実機と同じシステムを用いて性能及び信頼性を確認した。

3.4 電力系統の安定稼働に貢献する異常兆候検知

電力系統の安定性確保と既存設備の有効利用が同時に求められている。近年、系統側への電気の流入を抑制する設備や、電源脱落時に連鎖的な電源脱落を回避する設備の導入が進みつつあり、高経年化設備や新たに導入される設備に対して、予期せぬ事故や電源の脱落を未然に防止するこ





(a) 検証棟



(b) HVDCバルブ

図2. HVDC検証設備

との重要性が増している。

設備によって劣化モードは様々であるが、例えば、絶縁劣化などの配電設備の異常兆候やドローン等によって撮影された鉄塔・送電線の映像からキズや撓(たわ)みなどの劣化兆候を把握するに当たり、AIを活用した異常兆候検知技術の開発を行っている。また、AIには不確実性を含むその技術特性に起因する特有のリスクがあるため、品質保証の共通指針を確立する必要がある。当社は、AI製品の品質保証について研究するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画し、AIプロダクト品質保証ガイドラインの策定を進めるとともに、このガイドラインを異常兆候検知技術に適用し信頼性の確保を進めている。

4. カーボンマネジメントシステム⁽⁴⁾

当社では、再エネ供給力の偏在問題を解決するソリューションとしてマルチリージョンEMSを開発している。再エネの利用率を向上させたい拠点にスペースがない場合でも、自社内の他の拠点に導入された再エネの発電電力を既存の電力系統を通じて送ることで、非化石価値が必要な拠点での再エネの利用率改善に貢献する。

複数の拠点間の再エネ由来の電力融通は、自己託送という国内制度に準拠して行われる。自己託送とは、電力会社

が持つ送配電系統網を利用して、自社保有の発電設備による発電電力を自社内の別の需要地点に送電するサービスであり、再エネの出力変動も含めて30分単位の電力の計画を毎日作成・提出し、実需給断面での同時同量監視・制御を24時間実施するなどの業務が必要となる。

当社のマルチリージョンEMSでは、BLEnDer需給管理パッケージを用いて、これら運用を総合的にサポートしている。また、拠点に蓄電池が導入されている場合には、蓄電池の充電量に占める再エネの発電電力量の割合を管理した上で、最適な充放電制御を行う。再エネ利用率の目標達成手段としては自己託送以外にも、再エネ価値付き電気メニューの契約や、環境価値証書の調達によって得た非化石価値も考慮した上で確実な目標達成計画を提案する(図3)。

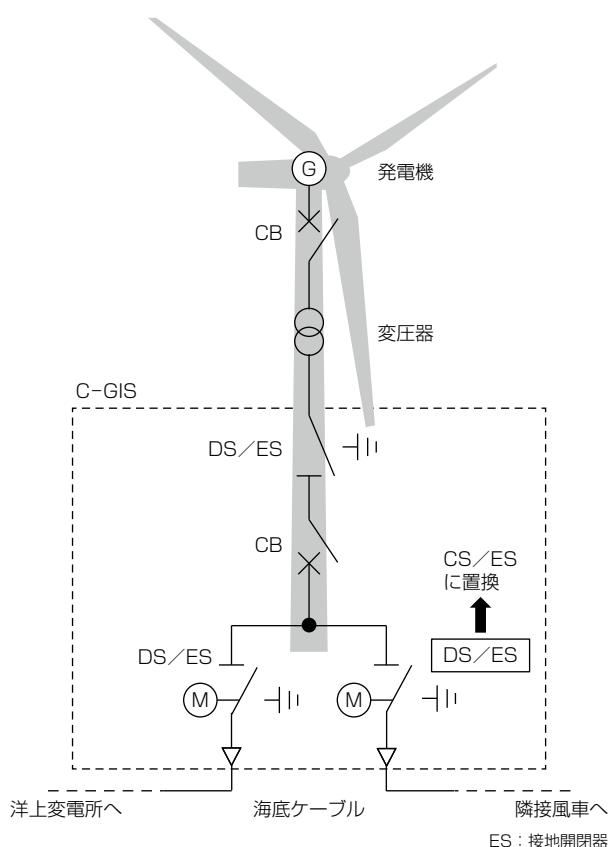
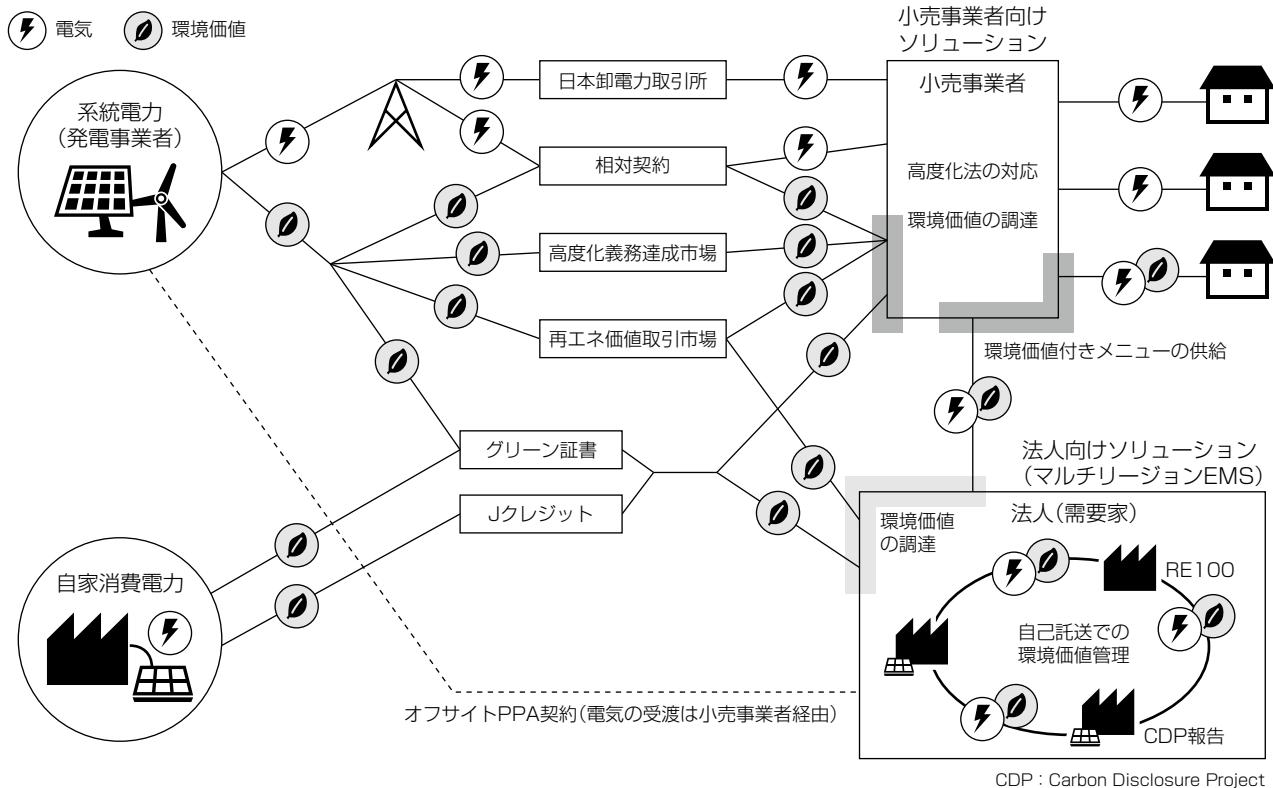
5. ガス絶縁開閉装置ケーブルスイッチ

大規模洋上風力発電所の建設は欧州を中心に本格化しており、今後、北米やアジア圏も加わって洋上風力発電の導入が更に加速する見込みである。大規模洋上風力発電所では、発電効率を最大化して安定的な電力供給を実現するため、柔軟な系統の運用が求められる。

大規模洋上風力発電所は、複数台の風車が海底ケーブルによって直列に接続された連系回路が洋上変電所から複数本ツリー状に配置され、一つの集電システムを構成する。各々の風車には、風車内の発電機と連系回路、そして連系回路上に隣接する別の風車とを相互に接続・断路する役割を担うため、ガス絶縁開閉装置(以下“C-GIS”という。)が搭載されている(図4)。

一般的に、風力系統向けC-GISの連系回路側には断路器(Disconnecter: DS)が用いられるが、DSは電流開閉能力を持たないため、増設や点検などに伴い1台の風車を連系回路と接続・断路する際には連系回路上のほか全ての風車もC-GIS内の遮断器(Circuit Breaker: CB)を開極して発電機を連系回路から切り離し、洋上変電所内の連系回路に直結されたCBも開極して当該の風車を含む連系回路全体も電力系統から切り離さなければならない。また送電停止後、海底ケーブルの残留電圧が放電されてからでないと接続・断路ができないことから、回路状態切替の時間だけ発電機損失が発生する。

そこで既存のDSをベースとして接点部の速動機構を組み入れることで、ケーブル充電状態での電流開閉能力を付与したケーブルスイッチ(Cable Switch: CS)を開発した。C-GISの連系回路側DSをCSへ置き換えることで、洋上変電所のCBを開極することなく、CSを用いて風車と連系回路を速やかに接続・断路することが可能になり、発電機損失を最小限に抑えた柔軟な系統の運用が実現できる。



6. む す び

これまで当社では、発電・送電・変電・配電・利用の各分野で、時代に則した革新的な製品・システムを提供し、電力システムの安定性や効率性、経済性の向上に貢献してきた。これら電力インフラの構築で培われてきた技術は、現在、カーボンニュートラル社会を支える新たなソリューションの開発に応用している。

また、発電・変電分野で培ったプラントエンジニアリングや電力情通・監視制御分野で培ったシステムエンジニアリング能力は、社会のニーズに即した技術の探索、製品・システムを横断的に組み合わせたソリューションの提案、新たな製品やサービスの社会実装に向けて活用している。

引き続き、持続可能な社会の実現に貢献するため製品及びサービスの提供に努めていく。

参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）(2021)
- (2) 経済産業省：再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 中間整理(第4次) (2021)
- (3) 石本智之, ほか：次世代配電系統での配電高度化技術, 三菱電機技報, 95, No.11, 682~685 (2021)
- (4) 西都一浩：カーボンニュートラルに向けたスマートシティへの取組み, 三菱電機技報, 95, No.11, 699~703 (2021)

配電線路電圧管理システムの導入

Introduce of Grid Control System for Power Distribution System

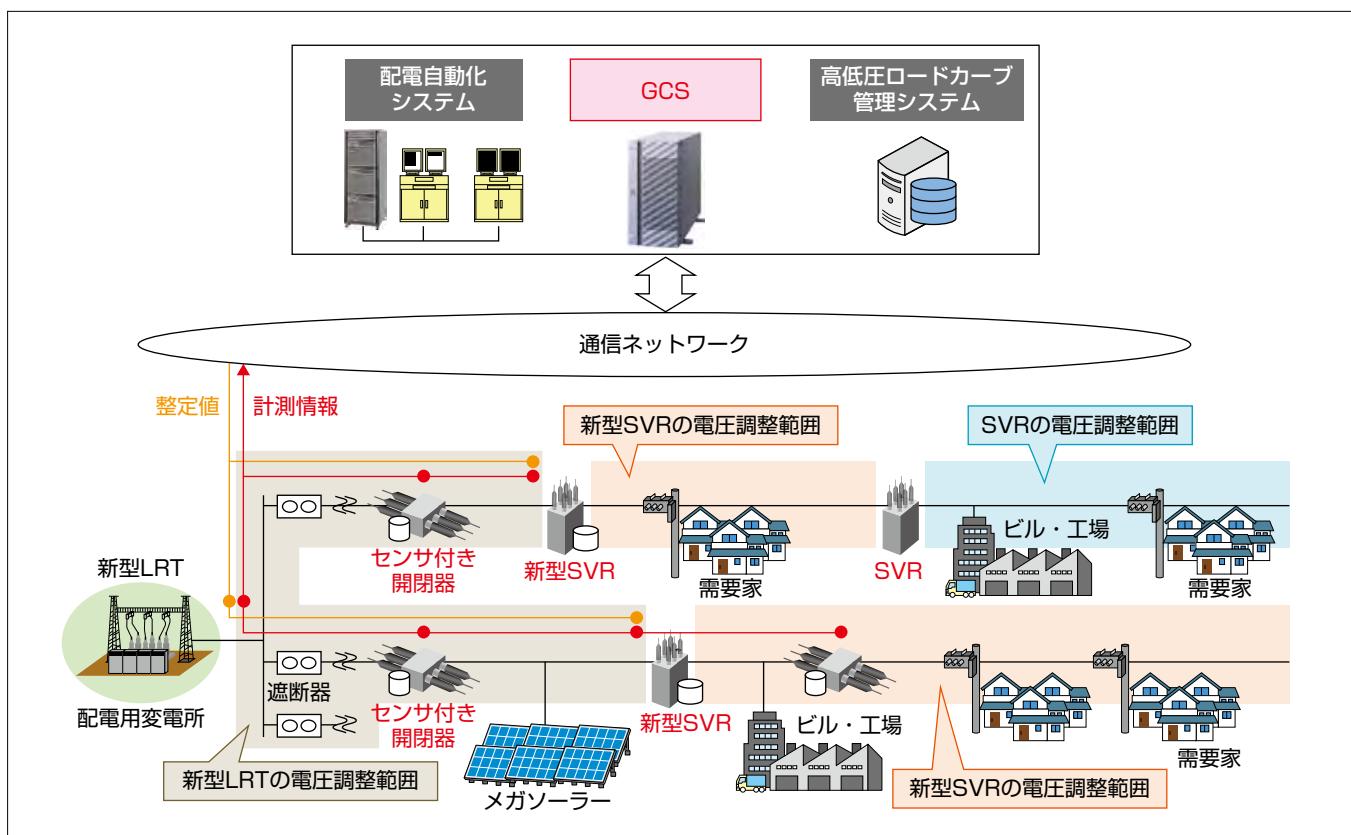
要旨

近年の配電系統は、太陽光発電(PV)などの再生可能エネルギー導入拡大によって、長短周期での電圧変動や逆潮流が拡大し、さらに、送電系統側に起因する電圧変動も複雑に影響し合う状況にあり、現行の電圧調整器では、刻々と変化する配電系統の供給電圧を適正範囲に維持することが困難になっている。

三菱電機では、配電系統を対象とした電圧管理システムとして、配電線路電圧管理システム(Grid Control System: GCS)を開発した。2021年度に中部電力パワーグリッド㈱へ納入しており、GCSとともに開発された高低圧ロードカーブ管理システムや機能高度化された配電自動化システム・次世代電圧調整器と連係し、協調動作することで、システムによる電圧集中制御が実現可能になった。

GCSは、現地の電圧調整器に対して、配電自動化システム及び高低圧ロードカーブ管理システムから取得した連係データに基づき、翌日の整定値を決定するとともに、電圧急変の際には、リアルタイムに遠隔整定を実施し、配電系統の供給電圧を適正に維持する機能を備える。GCSの導入で、各SVR(Step Voltage Regulator: ステップ電圧調整器)での電圧制御範囲が広がるため、SVR設置台数の増加抑制効果も期待できる。

今後の再生可能エネルギーの更なる増加を見据え、分散電源を活用による配電電圧・潮流を適正に維持・管理することを目的としたシステムの開発に取り組むとともに、更なる系統運転の高度化に向けた技術開発を推進する。



GCS

GCSは、現地のLRT(Load Ratio Control Transformer: 負荷時タップ切替器付変圧器)やSVRなどの電圧調整器に対して、高低圧ロードカーブ管理システムから取得した連係データに基づき、翌日の整定値を算出し、遠隔で自動更新する。現地機器から連係された計測情報を配電自動化システム経由で受信し、電圧急変によって適正電圧範囲の逸脱を検出した場合は、リアルタイムに整定値を算出し、遠隔整定実施することで、配電系統の供給電圧を適正に維持する機能を備える。

1. まえがき

配電系統では電圧低下対策として、変電所に配電用変圧器であるLRTや配電線上に電圧低下補償用のSVRを設置し、安定的な電気の品質維持に努めている。

しかしながら、近年の配電系統は、PVの大量連系によって、長短周期での電圧変動や逆潮流が拡大し、さらに、送電系統側に起因する電圧変動も複雑に影響し合う状況にあり、現行のLRTやSVRでは、刻々と変化する配電系統の供給電圧を適正範囲に維持することが困難になっている。

このような課題を解決するために、中部電力パワーグリッド(株)では、現地機器として、次世代電圧調整器、配電用変電所配電盤向けLR制御ユニットが開発され、設置が進んでいる。これらの現地機器を対象とした電圧管理システムとして、当社では、GCSの開発を行った⁽¹⁾。GCSによる電圧管理手法を適用することによって、タイムリーな整定値更新が実現でき、よりきめ細やかな電圧制御が可能になり、各SVRでの電圧制御範囲が広がるため、SVR設置台数の増加抑制効果も期待できる。

GCSは、現地機器に対して、配電自動化システム及び高低圧ロードカーブ管理システムから取得した連係データに基づき、翌日の整定値を決定するとともに、電圧急変の際には、リアルタイムに遠隔整定実施し、配電系統の供給電圧を適正に維持することを目的とするシステムである。本稿では、GCSのシステム概要について述べる。

2. システムによる電圧集中制御

これまで電圧調整を実施する場合、LRT・SVRの整定値を、過去1年分の整定値の電圧プロフィールから汎用の表計算ソフトウェアを使用して手計算で算出していた。また、算出したデータに基づき、年1~2回現地に出向し、整定値の更新を手動で行っていた。

今回GCSの導入によって、整定値の計算は、過去7日分の電圧プロフィールなどからシステムによる自動算出が可能になり、整定値の設定は、現地へ出向せずとも、毎日遠隔で自動更新することが可能になった(図1)。

全配電線を対象としたシステムによる電圧集中制御は国内初^(注1)の試み⁽²⁾となり、“系統電圧の見える化”と“整定値の自動算出”を実現した。

(注1) 2021年6月10日の中部電力パワーグリッド(株)プレスリリース

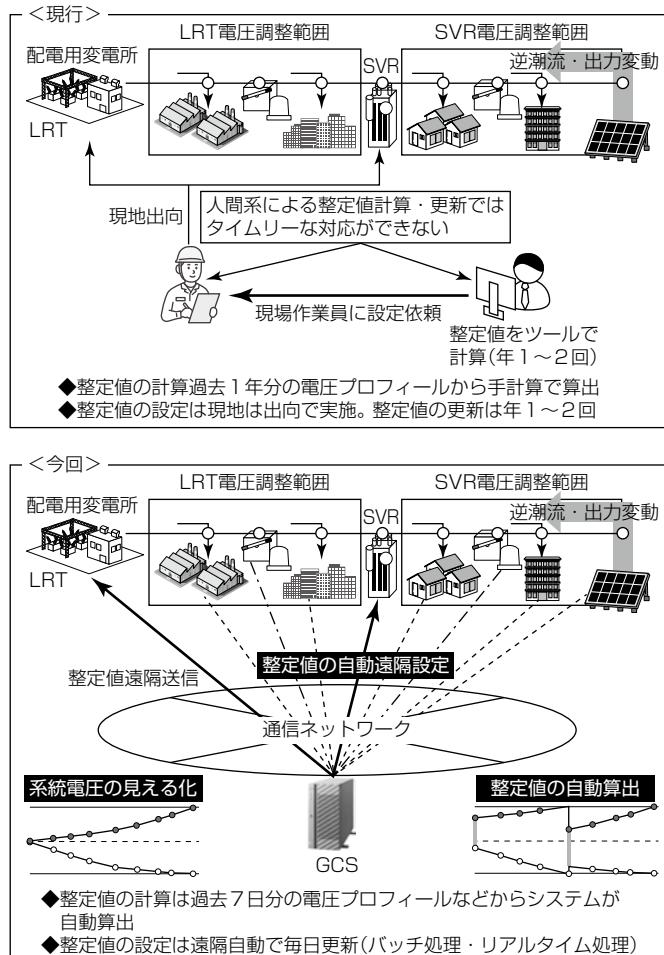


図1. システムによる電圧集中制御

3. GCS

3.1 特 徴

GCSが実装している電圧制御機能の主な特徴として、次の2点がある。

- (1) バッチ処理：毎日定時に整定値を自動更新する機能
- (2) リアルタイム処理：配電系統電圧を常時監視し、適正電圧からの逸脱を検出した場合に整定値を自動更新する機能

基本的にはバッチ処理(図2)で、最適な整定値(基準電圧及び不感帯幅)を事前に作成し、毎日更新する。予期せぬ電圧変動が発生し、適正電圧範囲を逸脱した場合には、リアルタイム処理(図3)で更に更新する。

このように、バッチ処理とリアルタイム処理の2段構えとすることで、GCSは適正電圧を維持できる。

3.2 機 能

機能の大分類は系統解析、系統計算、設備データ管理、及び他システム連係であり、次のとおりである。

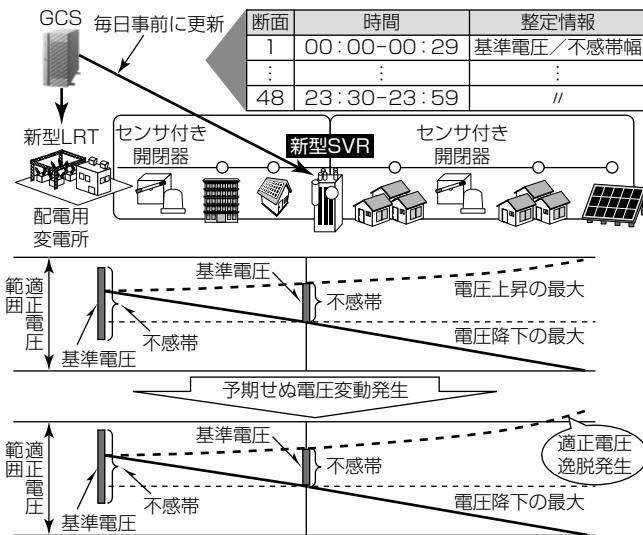


図2. パッチ処理の動作イメージ

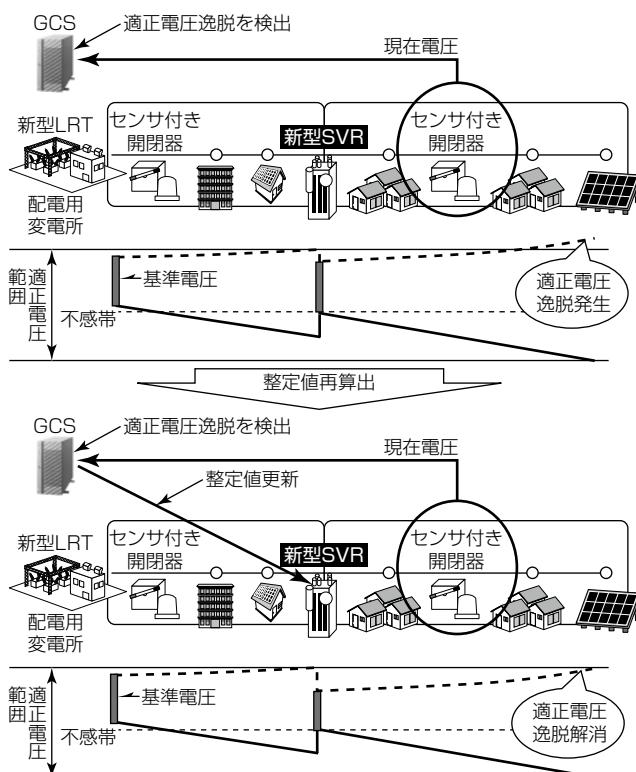


図3. リアルタイム処理の動作イメージ

(1) 系統解析

系統解析は、1分周期で、系統固定・SV(SuperVision)解析・TM(TeleMeter)解析の処理を実行する。系統固定では、配電自動化システムから連係されたSV(自動開閉器の入切情報などの2値情報)及びTM(現地機器によって計測された電流・電圧などの数値情報)の現在断面を切り取り、系統解析用データとして固定する。SV解析では、固定したSVをGCSで持つ設備データに割り付けるとともに、現在の系統状態の把握を実施する。TM解析では、固定したTMをGCSで持つ設備データに割り付けるとともに、

TM値の有効性の判定を実施する。

(2) 系統計算

系統計算は、 ΔV 算出処理・リアルタイム処理・バッチ処理・ローカル整定値算出処理で構成されている。

ΔV 算出処理は、電流分布データをGCSで持つ設備データに割り付け、開閉器区間単位の ΔV (電圧上昇量又は電圧下降量)を算出するとともに、電圧調整範囲内の最大電圧上昇値、最大電圧下降値を算出・蓄積する機能である。

バッチ処理は、高低圧ロードカーブ管理システムから連係された過去の実績データを基に、将来の電圧分布を推定し、適正電圧範囲を逸脱しないように、LRT・SVRの整定値を決定する。 ΔV 作成対象となった配電線に現在所属する演算対象設備の整定値を算出する。

リアルタイム処理は、1分周期で現在の系統での電圧監視箇所から末端までの電圧最大上昇量・最大下降量を推定した電圧逸脱の監視を実施し、一定時間継続して電圧逸脱を検出した場合は、逸脱量分だけLRT・SVRの整定範囲を狭めるように、整定値の補正を実施する。系統解析実施後に動作し、計測電圧の逸脱監視を実施するとともに、逸脱を連続して検出した場合、新たな整定値を算出し、LRT・SVRに設定されている整定値の補正を実施する。

ローカル整定値算出処理は、高低圧ロードカーブ管理システムから連係された年間の最大負荷・発電データを基に、将来の電圧分布を算出し、適正電圧範囲を逸脱しないように、LRT・SVRのローカル整定値を決定する。 ΔV 作成対象となった配電線に標準系統で所属する演算対象設備の整定値を算出する。ローカル整定値は、何らかの理由によって、GCSから現地機器に対して、遠隔での整定値の自動更新を実施できなくなった場合に使用することを目的にしている。

(3) 他システム連係

他システム連係は、系統解析・系統計算に必要なデータを収集するため、配電自動化システムや高低圧ロードカーブ管理システムなどとのデータ連係を実施する。

配電自動化システムから連係した配電系統の設備データ情報を基に、系統解析・系統計算機能に必要なデータベースを作成し、管理する。配電自動化システムでの設備データ更新のタイミングと同調して、GCSでも設備データ更新を実施している。

3.3 他システムとのデータ連係

システムによる電圧集中制御は、複数のシステム間でのデータ連係によって実現している(図4)。

整定値を算出するためには、配電線路の電流分布を見える化する必要がある。まず区間単位の大まかな電流分布を把握するために、センサ付き開閉器の電流情報を配電自動

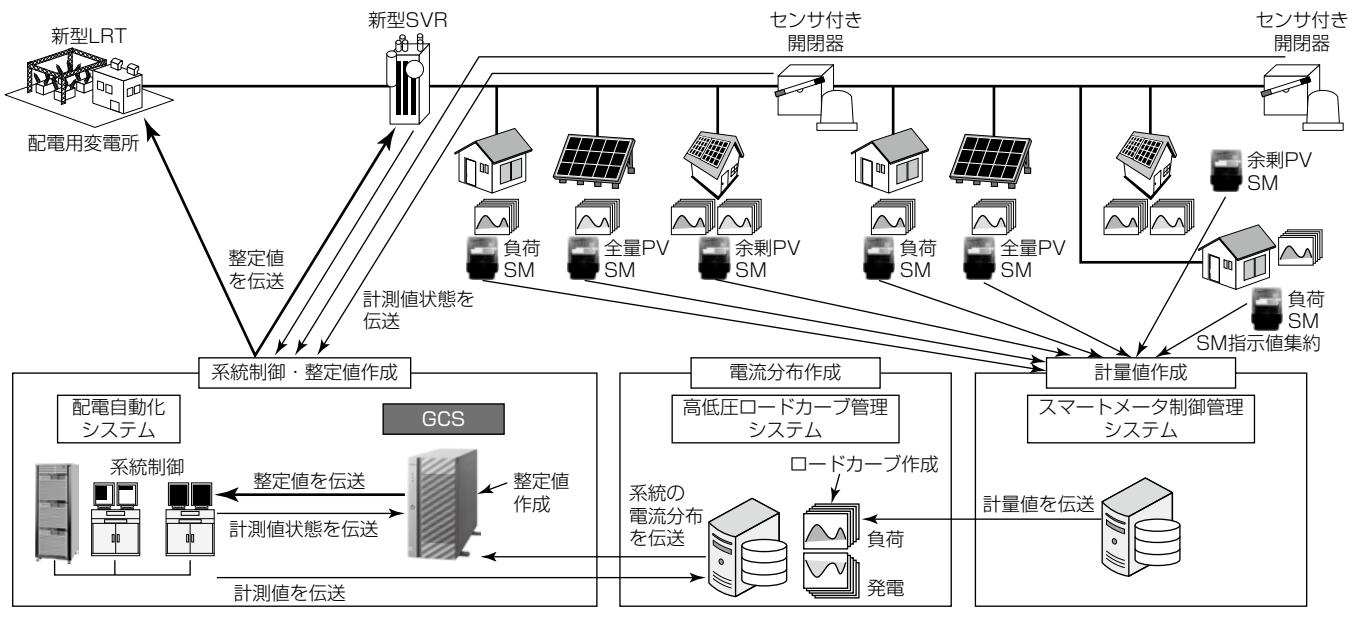


図4. システム間でのデータ連係イメージ

化システムによって収集する。また、PVなどの発電量を把握するために、スマートメータの計量値をスマートメータ制御管理システムから収集する。これらの情報を合算し、高低圧ロードカーブ管理システムによって、高圧需要家、変圧器単位に電力量を算出し、配電用変電所の計測値や配電系統のセンサ付き開閉器の計測値を活用して、配電系統全体の電流分布を算出する。電流分布は30分単位(1日当たり48断面)のデータであり、算出した電流分布を高低圧ロードカーブ管理システムからGCSに対して送信する。GCSは、連係された電流分布を基に適切な整定値をバッチ処理によって算出する。算出した整定値をGCSから配電自動化システムを経由して電圧調整器に1日に2回送信する。

GCSは、配電自動化システムと常時データ連係を実施している。配電自動化システムから連係された現地機器の計測情報に基づき、適正電圧逸脱監視や整定値算出などを実施しており、連係された配電系統の設備情報に基づき、データベースの作成を実施している。

3.4 システム運用開始後の評価

2021年度に、GCS導入による効果の確認を目的として、GCS内に蓄積した実績データを活用して、実データ解析による評価を実施した。評価対象は、2021年6月から本格運用を開始した新型SVR13台に対する実績データとした。運用開始前後のタップ動作回数の比較を行った結果、評価対象の全ての新型SVRでタップ動作回数が減少していることを確認した。また、バッチ処理・リアルタイム処理で更新した整定値、計測電圧、電圧逸脱の有無、リアル

タイム処理の動作実績などのデータを解析した結果、GCSによる電圧制御によって、適正電圧が維持できており、期待した効果が表れていることを確認した。

4. む す び

今後もPVなどの再生可能エネルギーの更なる増加が見込まれていることに加え、電気自動車などの大量導入による影響も懸念されており、配電系統の供給電圧を適正範囲に維持することがより困難になっていくと考えられる。今回実現したGCSによるきめ細かな電圧管理に加え、配電系統に接続された分散電源(蓄電池、電気自動車など)の活用によって、配電電圧・潮流を適正に維持・管理することを目的としたシステムも必要になると考えており、その開発にも取り組んでいる。また当社では、分散電源を大規模に制御可能なセンター集中型システムと小規模に制御可能なエッジ分散型端末を協調動作させることによる、システム全体としての最適化にも取り組んでいる⁽³⁾。今後も分散電源導入拡大を見据え、系統運転の更なる高度化に向けた技術開発を推進する。

参 考 文 献

- (1) 中部電力パワーグリッド(株)：次世代配電系統の構築に向けた取り組み、テクノフェア2016 (2016)
https://www.chuden.co.jp/resource/seicho_kaihatsu/kaihatsu/techno/techno_naiyou2016/techno_naiyou2016_12.pdf
- (2) 中部電力パワーグリッド(株)：配電系統高度化(次世代グリッド化)の取り組み (2021)
https://powergrid.chuden.co.jp/news/press/1206577_3281.html
- (3) 石本智之, ほか：次世代配電系統での配電高度化技術, 三菱電機技報, 95, No.11, 682~685 (2021)

監視・制御の高度化を図るエッジデバイス “MELPRO-i”シリーズ

匹田猛雄*
Takeo Hikita
高口雄介*
Yusuke Takaguchi

Edge Device "MELPRO-i" Series for Highly Sophisticated Monitoring and Control

要旨

分散電源や電力インフラ設備などの監視・制御の高度化を図るため、保護機能だけでなく、以下の特長を持つエッジデバイス“MELPRO-i”シリーズを開発・製品化した。MELPRO-iは、三菱電機の既存の保護リレーをベースとして、機能を拡張させたミドルレンジのIED(Intelligent Electronic Device)である。

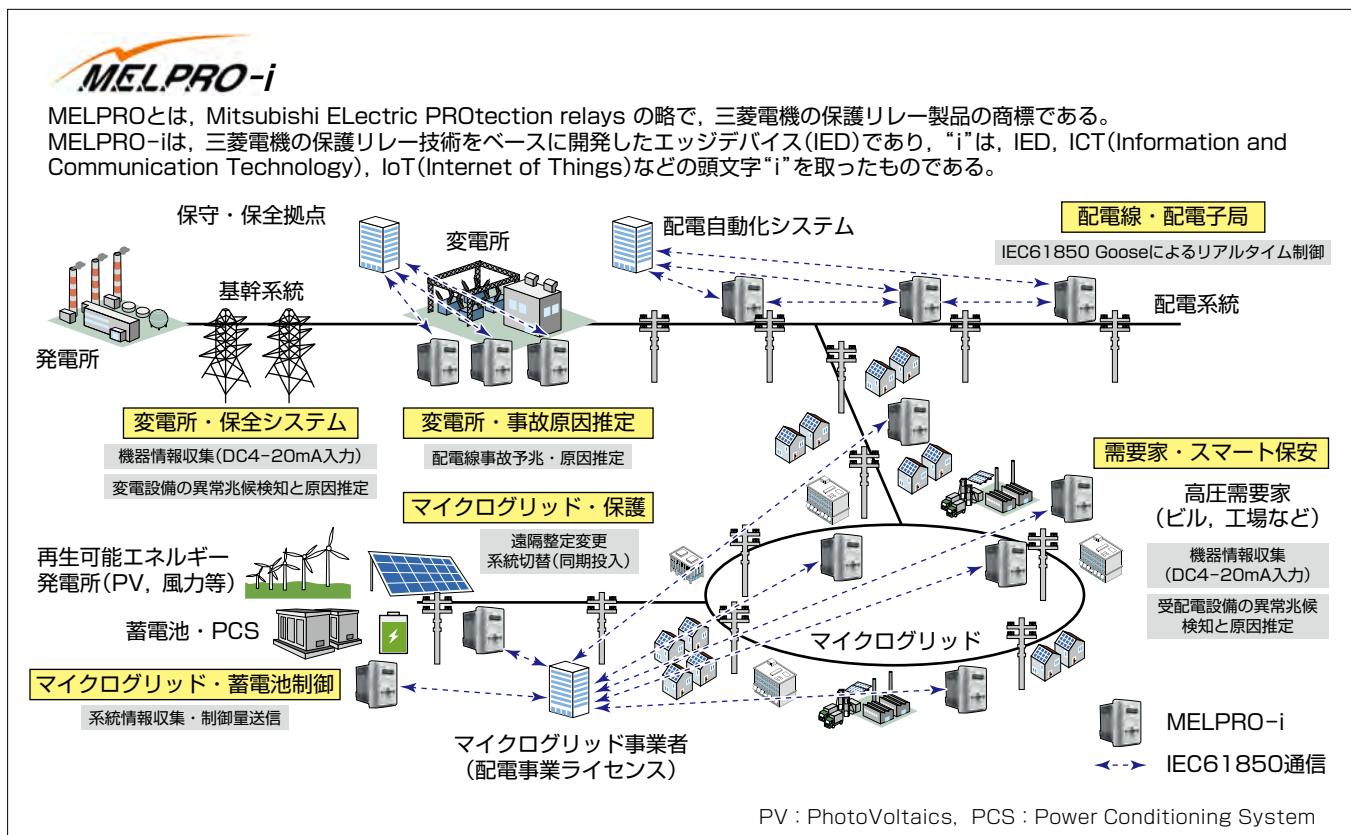
MELPRO-iは、国際標準の通信プロトコルIEC 61850で定義されるGoose(Generic Object Oriented Substation Events)や各種通信サービスをサポートしており、監視・制御システムの高度化が可能である。

また、当社AI技術“Maisart”を応用したAI処理専用のCPUを搭載しエッジAI機能が利用可能になる。当社IoT

プラットフォーム“INFOPRISM”を活用することで配電線や電力インフラ設備の異常兆候検知・原因推定ができる。

また、当社製エンジニアリングツール“MELGEAR”によるPLC(Programmable Logic Controller)機能の拡張によってユーザー自身でシーケンスロジックのプログラミング性の改善や、プログラミング容量の拡大、処理時間の短縮などの機能向上が実現した。

さらに、IEDのセキュリティ規格であるIEEE 1686に準拠し、通信の暗号化に対応するほか、RBAC(Role Based Access Control)機能などを実装することで、サイバーセキュリティのニーズに対応し、情報漏えいや不正アクセスを防止できる。



エッジデバイス“MELPRO-i”的ユースケース

MELPRO-iは、従来の保護機能に加え、IEC 61850やエッジAI、PLC、サイバーセキュリティなどの機能を備えるエッジデバイスである。IEC 61850通信を活用したユースケースとして配電制御やマイクログリッドなどがある。また、エッジAIのユースケースとして、変電設備・配電線・受配電設備の異常兆候検知と原因推定などがある。

1. まえがき

カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギー・分散電源の増加、エネルギーの地産地消、災害に強い街づくりなどを目的とした配電ライセンス制度の導入を背景に、災害等による大規模停電時には電力会社系統から独立したグリッドで自立的に電力供給可能なマイクログリッドの増加が見込まれている。一方、電気保安の分野では、各種電気設備の経年劣化や少子高齢化に伴う保守・保全業務の省力化・高度化(スマート化)のニーズが高まっている。これらのニーズに対応するため、国際規格であるIEC 61850通信のほか、エッジAI、PLC、セキュリティなどの機能を搭載した製品として、MELPRO-iを開発・製品化した。

本稿では、MELPRO-iの開発の狙いと各開発要素の内容とユースケースについて述べる。

2. 開発の狙い

現在の保護リレーは、IEDと呼ばれているものもあり、それらは通信機能やPLC機能、記録機能などの保護機能以外の機能が充実した製品となっている。また、保護リレーとしてのユースケースだけでなく、分散電源やマイクログリッドなどの運用に必要となる系統情報の計測・制御端末などへ適用されるなどユースケースが拡大している。

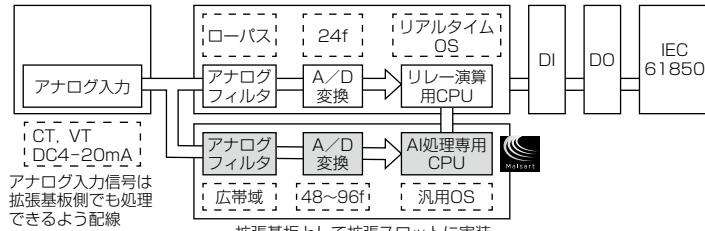
当社でも、IEDを製品化済みだが、次の機能を拡張・実装することで、ユースケースの更なる拡大と監視・制御の高度化を狙いとして、MELPRO-iを開発・製品化した。

- ・IEC 61850 Edition2.0対応
- ・当社AI技術Maisart搭載
- ・PLC機能の拡張
- ・サイバーセキュリティ

3. 開発内容

3.1 IEC 61850 Edition2.0対応

IEC 61850通信は、変電所での保護制御の領域で導入が進



CT : Current Transformer, VT : Voltage Transformer, DI : Digital Input, DO : Digital Output

図1. エッジAIのハードウェア構成

み、現在は、Edition 2.0への移行が進んでいる。MELPRO-iでもEdition2.0に対応するとともに、次の通信サービスを新たに実装した。

- ・選択制御(SBOes: Select Before Operate with enhanced security)サポート

- ・遠隔整定(Setting Group内の整定値の変更)

- ・数値Goose送受信

- ・ソフトウェアアップデート(FileTransfer利用)

このうち、ソフトウェアアップデートについては、IEC 61850で規定されておらず、規定されている通信サービス、オブジェクトモデルを使用して、MELPRO-i内のソフトウェアをアップデートするものである。

3.2 当社AI技術Maisart搭載

(1) AI処理専用CPU搭載

MELPRO-iにはオプション基板を実装可能な拡張スロットがあり、拡張スロットにAI処理専用のCPUを搭載した拡張基板を実装することによって、エッジAI機能が利用可能になる(図1)。リレー演算用に入力するアナログ入力信号は、拡張基板側でも取り込めるように配線されており、リレー演算用とは異なる、より広帯域の周波数特性を持つアナログフィルタを経由し、高速サンプリング(最大5,760Hz)を行う構成としている。MELPRO-iは、設置環境・製品寿命等を考慮し、ファンレスとなっている。

(2) 当社独自のAIエンジン

エッジAIのソフトウェア構成を図2に示す。先に述べたとおり、MELPRO-iはファンレスであり、エッジAIアプリで、AIエンジンの起動要否を判定する事前演算を実施し、AIエンジンの実行を適正化することで、低消費電力化を図っている。

当社IoTプラットフォームINFOPRISMに対応させることによって、当社独自のAIエンジンが利用可能である。現在利用可能なAIエンジンとしては、類似波形認識技術⁽¹⁾を用いたものがある。

類似波形認識は、異常の有無(通常と異なる)の判定に用いる手法である。学習フェーズで、学習用波形を基に、スコア値(全波形から見て、切り出した波形が他の部分とどの程度似ているかの指標)を算出し、スコア値のしきい値を決定する。検知フェー



図2. エッジAIのソフトウェア構成

ズでは、検知用波形のスコア値(学習用波形とどの程度似ているかの指標)を算出し、学習フェーズで算出したしきい値を超えていれば異常発生として検知できる。

今後、データの分類(判別)、回帰(予測)などの用途で使用される機械学習手法の一つであるランダムフォレストを用いたAIエンジンも利用可能になる予定である。ランダムフォレストは、データごとに利用する特徴量(周波数成分、実効値などの変化等)を決めて、決定木を作成し、複数の決定木を統合させるアルゴリズムであり、判定結果の多数決で分類結果を決定する。事故・異常の原因推定に用いることを想定している。

3.3 PLC機能の拡張

(1) PLC機能

IEDの特長の一つにPLC機能⁽²⁾がある。ユーザーは、PLCの国際規格であるIEC 61131-3に準拠したプログラミング言語で、シーケンスロジックをプログラミングすることが可能である。従来、IED内の組み込みソフトウェア又は盤配線で実現していたシーケンスロジックをPLCでプログラミングすることで、大幅なコストダウンが可能である。

(2) 当社製エンジニアリングツールMELGEAR(開発中)によるPLC機能の拡張

開発のベースモデルである“MELPRO-D”⁽³⁾では、メンテナントールであるPC-HMIを使用して簡易なPLC機能が使用できる(図3)。PC-HMIの画面上に用意されたブロックにAND・OR等のロジックを選択することでプログラミングできるようになっており、熟練者でなくとも容易に操作が可能である。しかしながら、扱えるロジックの機能に制約があり、またプログラミング容量が少ないという課題があった。

MELPRO-iでは、MELPRO-DのPLC機能の課題を解決するため、当社製エンジニアリングツールMELGEAR(開発中)を使用することで、PLC機能を大幅に拡張する予定である。MELGEARでは、IEC 61131-3に準拠したFBD(Function Block Diagram)やST(Structured Text)などの言語が利用可能であり、図4に示すようにツール画面上で必要な機能のロジックシンボル及び信号を選択し、ロジックのプログラミングを可能とする予定である。

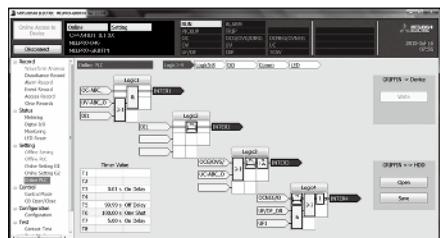


図3. PC-HMIによるPLC機能

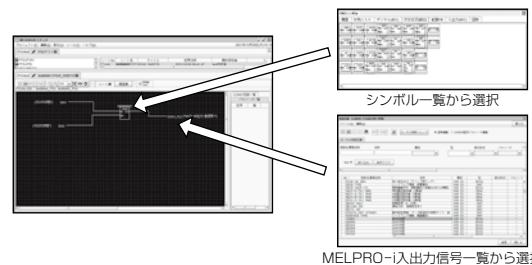


図4. MELGEARによるプログラミング

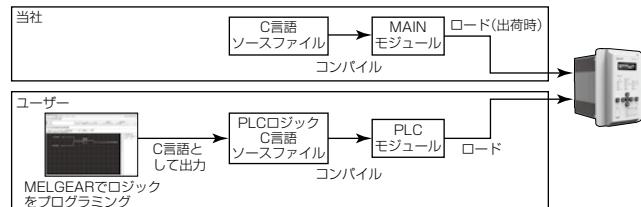


図5. MELGEARによるPLC機能の拡張

プログラミングしたロジックは、C言語に変換して出力できるようになっており、コンパイル後、MELPRO-i専用のソフトウェアローダを使用し、MELPRO-iにロードし、実行できる(図5)。

3.4 サイバーセキュリティ

(1) IEEE 1686への対応

IEDのセキュリティ規格として、IEEE 1686が規定されており、海外ベンダーのIEDもIEEE 1686への対応を謳(うた)っている。IEEE 1686では、規格の全項目を満足する必要はないが、各項目への適応レベルを明記したTOC(Table of compliance)を作成し、ユーザーへ提示する必要がある。MELPRO-iで検討中のTOCを表1に示す。表1に

表1. MELPRO-iのTOC

番号	条項	ステータス
5.1.1	IEDアクセス制御	適合
5.1.2	パスワード無効化	適合
5.1.3	ユーザー数	適合
5.1.4	パスワードポリシー	適合
5.1.5.1	パスワードによる認証レベル	適合
5.1.5.2	役割ベースアクセス制御	適合
5.1.6	セキュリティ機能	適合
5.1.7	パスワード表示	適合
5.1.8	アクセスタイムアウト	適合
5.2.1	アクセス記録	適合
5.2.2	記録容量	除外
5.2.3	記録内容	適合
5.2.4	アクセス記録に記録されるイベント	適合
5.3.1~5.3.6	スーパーバイザシステム監視と制御	除外
5.4.1	IEDの機能の侵害	適合
5.4.2	IPネットワークの暗号化機能	適合
5.4.3	暗号化技術	適合
5.4.4	シリアル通信の暗号化	適合
5.4.5	プロトコル固有のセキュリティ機能	適合
5.5.1	認証	適合
5.5.2	デジタル署名	適合
5.5.3	ID/パスワード制御	適合
5.5.4.1	設定データの表示	適合
5.5.4.2	設定データの変更	適合
5.6	通信ポートアクセス	適合
5.7	ファームウェア品質保証	除外

IEEE Std 1686-2013(Revision of IEEE Std 1686-2007)

記載のない項目については、規格で規定された要件の一つ以上を満たしていない。

(2) RBAC機能

MELPRO-iでは、正面パネル、PC-HMIのローカル接続をユーザーID／パスワードで保護する。さらに各ユーザーIDに権限を付与し、権限レベルに応じて各機能へのアクセス制限を設ける予定である。4レベルの権限を準備し、各権限レベルへの機能の割当ては固定である。各ユーザーIDへの権限レベルの割当てはユーザーで設定できるようとする予定で、異なるユーザーIDへの同一権限の割当てを可能とする予定である。

(3) 通信暗号化と通信ポートアクセス

IEEE 1686では、リモートアクセスでデータ転送、設定、ソフトウェアアップロードなどを行う場合、リモートアクセス可能な全ポートに対して、IEEE 1711に準拠したデータ暗号化を適用するよう規定されている。MELPRO-iの通信ポートとしてはIEC 61850通信用のEthernet^(注1)ポートを具備しており、暗号化に対応予定である。

また、IEEE 1686では、物理的か論理的にかかわらず、設定によって全通信ポートを有効／無効とする機能を持つよう規定されており、MELPRO-iでも設定を可能とする予定である。

(注1) Ethernetは、富士フィルムビジネスイノベーション(株)の登録商標である。

4. ユースケース

4.1 IEC 61850通信を応用したユースケース

(1) 配電制御⁽⁴⁾

配電線で事故が発生した場合、現在の配電線の運用方式は、配電用変電所の保護リレーの動作によって、一旦配電線全体を停電させた後、時限順送と呼ばれる方式で、事故区間を特定し、事故区間以外に再送電する方式となっており、停電復旧までには数分程度の時間を要する。

配電線にMELPRO-iを設置し、事故を検出するとともに、隣接するMELPRO-i間でIEC 61850のGoose通信によって、事故検出情報をやり取りすることによって、開閉器の遮断能力内であれば、配電線全体を停電させることなく、事故区間の特定と分離が可能になる。

(2) マイクログリッド

再生可能エネルギー・分散電源を活用した地域マイクログリッドの検討が各地で進んでいるが、電力会社との系統連系時とマイクログリッド運用時で、系統構成・規模が大きく変化することによって、事故の様相が変化する。このため、マイクログリッド運用に入る前に発電所及び各需要

家に設置されている保護リレーの整定値の変更が必要な場合がある。連系時からマイクログリッド運用時への切替えの停電時間を極力短くするためには、各保護リレーの整定値を通信で遠隔の拠点から変更する必要がある。MELPRO-iは、IEC 61850の遠隔整定機能をサポートしており、これらのニーズに対応可能である。

4.2 エッジAIのユースケース

エッジAIのユースケースとして、次の二つのケースの検討が進んでいる。

(1) 配電線事故予兆・原因推定⁽⁴⁾

配電線は、日本全国で数万kmにも及び、事故等による停電が発生した場合、事故区間の特定や事故原因の調査、復旧作業など電力会社の負担が大きく、これらの業務を省力化するニーズが大きい。

MELPRO-iのエッジAIでは、配電線の零相電流、零相電圧等の信号波形を記録・解析することで、配電線の事故の予兆検知や原因推定が可能である。

(2) 変電設備・受配電設備の異常兆候検知

各種電気設備の経年劣化や少子高齢化に伴う保守・保全業務の省力化・高度化(スマート化)のニーズが高まっており、遮断器、変圧器などの主要な設備に各種センサを取り付け、それらセンサデータを活用した設備の保守・保全の高度化が進んでいる。

MELPRO-iのエッジAIでは、零相電流、零相電圧だけでなく、センサの汎用インターフェースであるDC4-20mA入力信号を取り込み、信号波形を記録・解析することで、各種電気設備の異常の予兆検知や原因推定が可能である。

5. むすび

本稿では、MELPRO-iの開発の狙いと各開発要素の内容、ユースケースについて述べた。今後、通信インフラが整備されIEC 61850通信がより広範囲に適用されるようになることで、ユースケースの更なる拡大が期待できる。エッジAIについては、学習データ(事故・異常時のデータ、事故・異常が発生する直前のデータ)がまだまだ不足している状況であり、各ユースケースで、実証等を通じてデータを採取し、予兆・原因推定の高精度化に向けて改良を続けていく。

参考文献

- 平井規郎, ほか: 設備維持管理向けデータ分析技術, 三菱電機技報, 90, No.7, 416~420 (2016)
- 坂 泰孝, ほか: IEC 61131-3/IEC 61850準拠PLCによる保護制御機能の実装方法, 電気学会論文誌B, 140, No.5, 395~401 (2020)
- 竹村聰司, ほか: 需要家向けマルチファンクションリレーの開発, 電気学会保護リレーシステム研究会, PPR-17-014 (2017)
- 石本智之, ほか: 次世代配電系統での配電高度化技術, 三菱電機技報, 95, No.11, 682~685 (2021)

自励式HVDCシステムの検証

Verification of VSC Based HVDC System

貞國仁志*
Hitoshi Sadakuni
石黒純也*
Junya Ishiguro
久世裕子*
Hiroko Kuse

山中大輔*
Daisuke Yamanaka
菊地 健*
Takeshi Kikuchi

要旨

世界各国では再生可能エネルギーの導入拡大や地域間連系の拡大に伴い、電力系統を安定化させるパワーエレクトロニクス機器を活用した製品や、発電した電力を無駄なく需要地へ運ぶ送電システムを支援する技術の需要が拡大している。パワーエレクトロニクスを適用して再生可能エネルギー大量導入に伴う課題解決に寄与できる機器又は技術として、HVDC(高電圧直流送電)システムが着目されている。その中でも自励式HVDCシステムは従来の他励式と比較して交流系統への制約が少ないと、無効電力も積極的に制御可能なこと等の特長を持っている。自励式の中でも、モジュラーマルチレベル変換器(MMC)は高電圧化が容易であることから、HVDCに適しており、高調波

発生量が少なく、冗長性を確保できる。三菱電機は、自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムを開発し、当社系統変電システム製作所内に建設した容量50MWの直流送電システム検証設備で一連の検証を実施した。制御(通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタート、電力融通試験、無効電力出力試験)、長期安定性(ヒートラン試験)、保護(DC母線短絡試験)、実用性能(耐震評価(解析、固有振動測定)、ラジオノイズ試験)のデータを蓄積するとともに、製品として提供可能なことを確認できた。

この実績を基に、更に小型化、低損失化となる新たなHVDCシステムの開発に進めていく計画である。

●豊富な実績

- ・基本計画立案から実施設計まで対応できる系統解析技術を保有
- ・豊富な系統安定化システム納入実績



●総合的な技術・対応力

- ・キーデバイスとなる大容量パワー半導体の自社開発
- ・フルターンキー工事にも対応(電気・制御機器、現地工事)



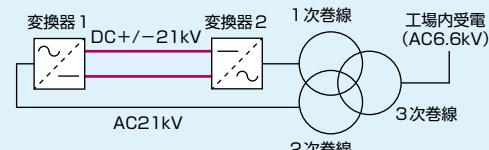
●HVDC検証設備



●検証内容

1. 制御検証
2. 長期安定性評価
3. 保護検証
4. 実用性能評価

有効電力50MW
DC電流+/-1,190A



HVDC検証設備

HVDC検証設備は兵庫県尼崎市の当社系統変電システム製作所内に建設し、2018年11月に運用を開始した。この検証設備の建設目的は、実機と同じ変換器や制御保護装置等を用いてMMCシステム全体での運転検証を実施しデータを蓄積することであり、一連の検証によって、制御、保護、長期安定性、実用性能のデータを蓄積するとともに、製品としての実証を行ってきた。現在は、社外の変換所対応の機器の検証等に活用している。

1. まえがき

自励式変換器は他励式変換器と比較して交流系統への制約が少ないとこと、無効電力も積極的に制御可能など特長を持っている。自励式の中でも、MMCは高電圧化が容易であることから、HVDCに適しており、高調波発生量が少ないとこと、冗長性を確保できることなど特長を持つ⁽¹⁾。近年、MMCを用いたHVDC(MMC-HVDC)の導入が進んでおり、当社でもその開発を進めてきた⁽²⁾。そして、当社のシステムであるHVDC-Diamondを検証するHVDC検証設備(図1)を建設し、一連の検証を実施した。今回はその検証結果概要を述べる。

2. HVDC検証設備

この検証設備は兵庫県尼崎市の当社系統変電システム製作所内に建設し、2018年11月に運用を開始した。この検証設備の建設目的は、実機と同じ変換器や制御保護装置等を用いてMMCシステム全体での運転検証を実施しデータを蓄積することにある。現在は当社内での検証を終えて、社外の変換所対応の機器の検証等に活用している。

図2に主回路の概略を、表1に定格事項を示す。このシステムは2台の変換器を接続した構成であり、主変圧器を介して交流系統と接続している。変圧器には3巻線変圧器を用いて、1次巻線と2次巻線の間で変換器電力を循環させることによって、工場内交流系統からHVDC検証設備



(a) 検証棟



(b) HVDCバルブ

図1. HVDC検証設備

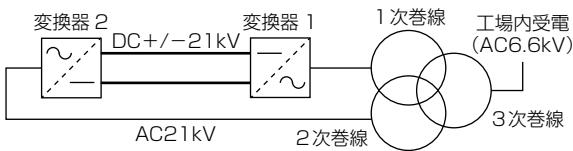


図2. 主回路構成

表1. システム定格事項

定格電力	50MW
工場内受電AC電圧	6.6kV
検証設備側AC電圧	21kV(60Hz)
定格DC電圧	$\pm 21kV$
定格DC電流	$\pm 1,190A$

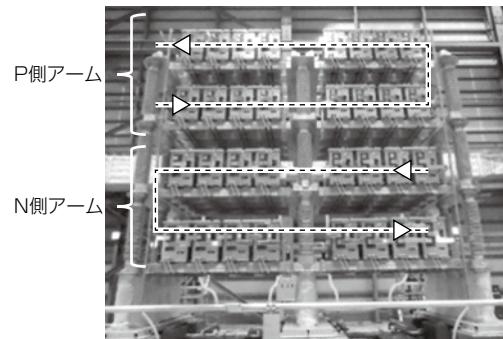


図3. 変換器

の運転損失分の電力を供給するだけで50MW送電試験を実施できる。

図3に変換器を示す。変換器は単位変換器であるサブモジュールを複数直列接続し構成される。スイッチング素子には当社製の高耐圧・大電流パワー半導体モジュール(IGBT)を採用し、サブモジュール数削減によって、変換所の小型化と低損失化を実現している。

制御保護装置は機器の操作や状態監視を行う共通HMI(操作卓)、変換器の制御を行う制御装置、保護を行う保護装置、変換器と各装置間の信号を中継する光中継装置から成る。

3. HVDCシステム検証

3.1 起動・停止試験⁽¹⁾

通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタートの四つの試験で問題なく動作することを確認した。

代表としてブラックスタート試験の結果を図4に示す。ここでは、まずブラックスタート側に見立てた変換器を変圧器から切り離し、健全系統側に見立てた変換器を交流側から充電、続いて①健全端変換器を制御して直流線路とブラックアウト側変換器を充電、②ブラックアウト側変換器の制御を開始、充電完了後に③ブラックアウト側変換器で交流電圧を発生、という手順でブラックスタートを模擬した。

3.2 電力融通試験⁽¹⁾

図5に有効電力を送電し、潮流反転した電力融通試験結果を示す。最大50MWの有効電力を、指令値どおりに安定して送電できることを確認した。

3.3 無効電力出力試験⁽¹⁾

STATCOM運転試験及び有効・無効電力同時出力試験を行い、指令値どおりに安定して運転できることを確認した。図6に、有効電力13MW・無効電力7Mvarの同時出力試験の結果を示す。

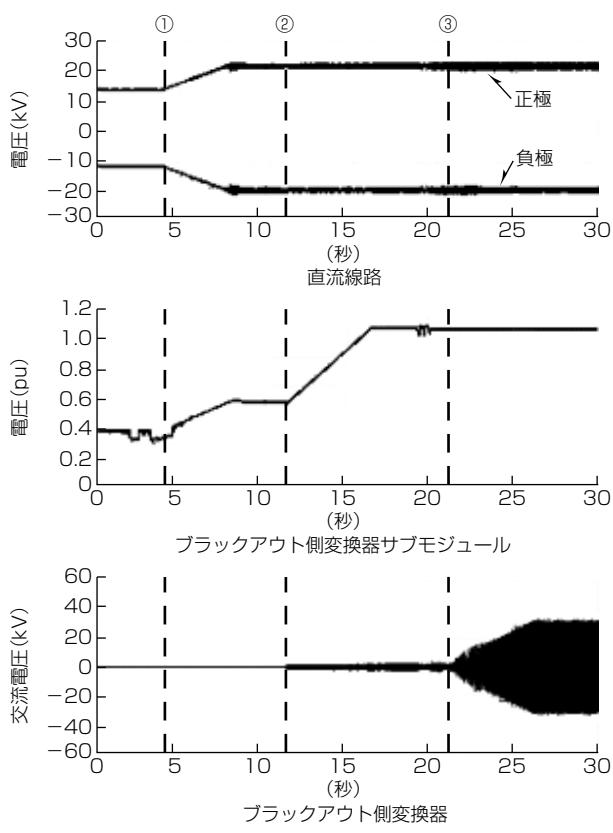


図4. ブラックスタート試験

3.4 長期安定性試験

機器温度が安定するまで定格出力で連続通電するヒートラン試験を行った。ヒートラン試験では、8時間にわたって有効電力50MW・無効電力0Mvarで連続通電し、機器の温度上昇が適正であること、局所加熱等の異常が発生しないことを確認した(図7)。

3.5 DC母線短絡試験

DC母線短絡事故時には、変換器のIGBTを全てゲートブロックしても上流の遮断器によって遮断するまでの間、IGBT素子と逆並列のダイオードを通して事故電流が流れ続ける。内蔵ダイオードを流れる電流は定格電流に対して極めて大きいため、短時間(1サイクル程度)にダイオードのジャンクション温度が所定値を超過し、ダイオードの破壊に至る。これに対して、図8のようにIGBT内蔵ダイオードに並列に過電流バイパス用ダイオード(Bypass Diode: BPD)を設け転流させることで短絡事故時の事故電流をBPDへ担わせることができ変換器の保護が可能になる。

この検証では検証設備でDC母線短絡事故を発生させ、BPDによる変換器保護動作確認を行った。図9に示すとおり、DC母線の短絡事故発生時にBPDに事故電流を転流させることで変換器への事故電流の流入を防ぎ、変換器のコンデンサに発生する過電圧も抑制され正常な保護動作が確認できた。

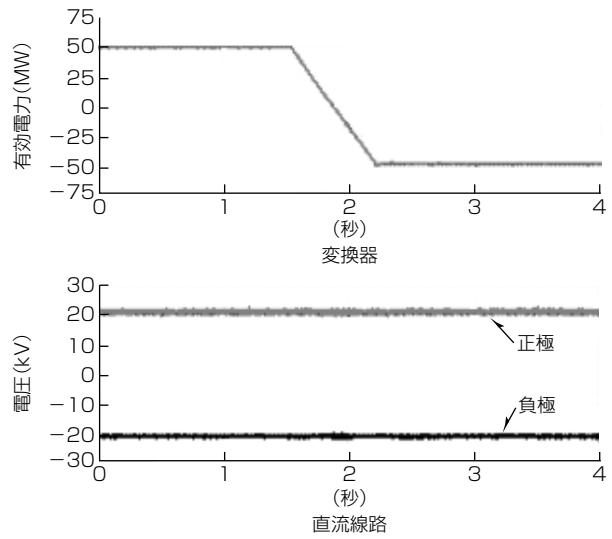


図5. 潮流反転試験

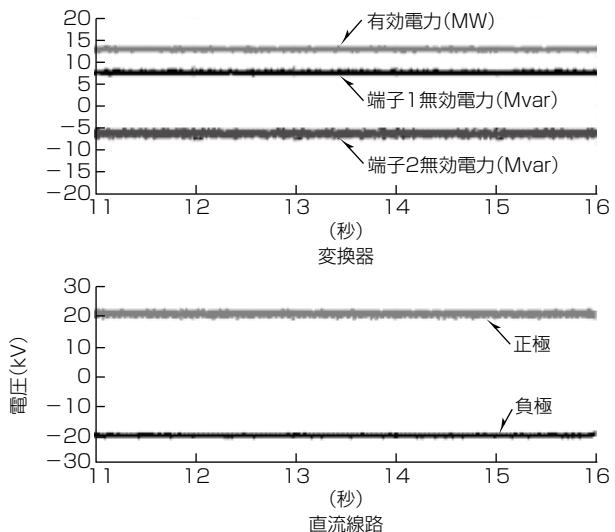


図6. 有効・無効電力同時出力試験

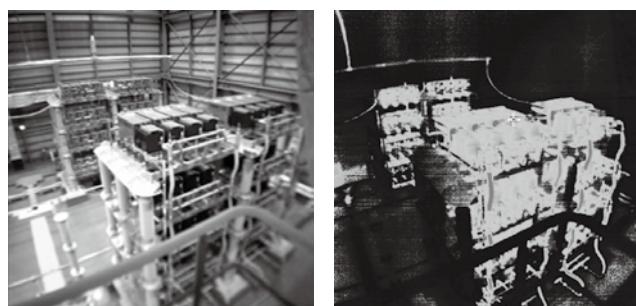


図7. ヒートラン試験での変換器サーモビュア画像

3.6 ラジオノイズ試験

変換器運転時に発生する電磁波ノイズは種々の周波数成分を含んでおり、変換所周辺の通信波に影響を及ぼすおそれがある。そのため、検証設備を用いて変換器運転時の電磁波ノイズをアンテナで測定を行った。図10に国内AMラジオの周波数帯での変換器の運転有・無での電磁波ノイ

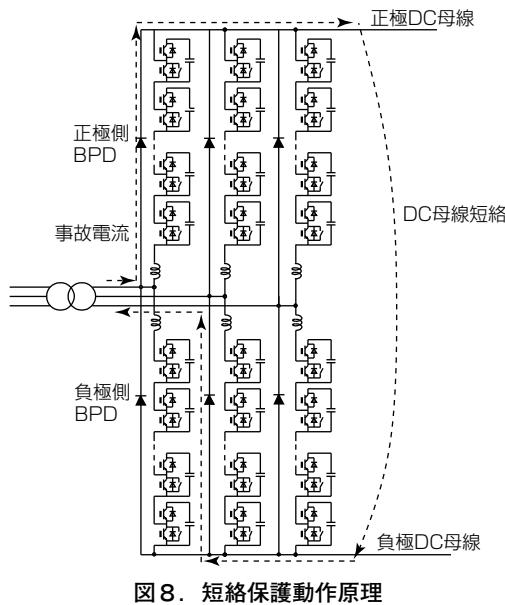


図8. 短絡保護動作原理

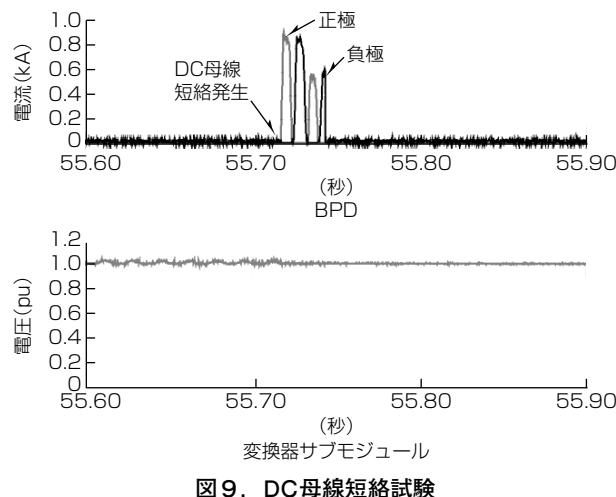


図9. DC母線短絡試験

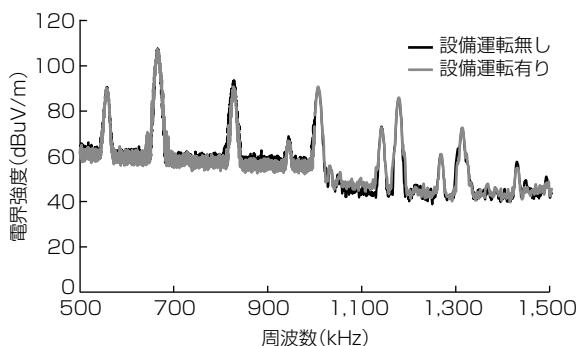


図10. ラジオノイズ試験

ズの測定結果を示す。この周波数帯では有害なレベルのノイズが発生していないことが確認できた。

3.7 耐震解析

HVDCシステムに適用する変換器は図3に示すように、サブモジュールを直列に接続することで高電圧化が図るこ

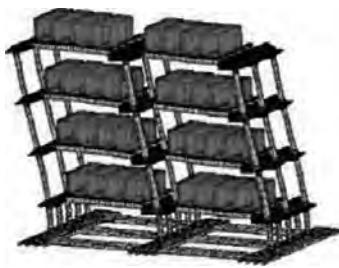
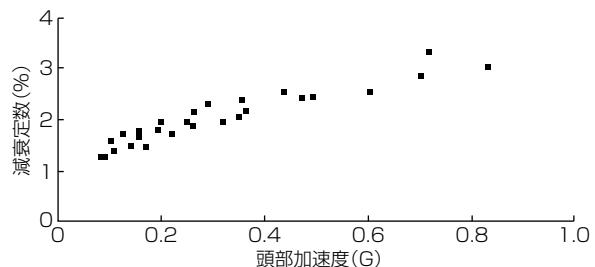


図11. 変換器の耐震解析結果(固有振動評価)

図12. 変換器バルブの減衰定数⁽³⁾

とができる。変換器の据付面積を縮小するためにはサブモジュールを段積みすることになって重心が高くなり、耐震性能が課題となる。

耐震仕様は国内ではJEAG-5003(変電所等における電気設備の耐震設計指針)が要求される。動的な耐震解析での評価によって、この仕様を満足することが確認できた(図11)。変換器には絶縁支持部材としてFRP(Fiber Reinforced Plastics)を構造部材としたポリマがいしを適用している。このポリマがいしの減衰定数には実機相当の検証で得られたデータ⁽³⁾を適用した(図12)。また、変換器の固有周波数測定を実施し、解析精度が十分に高いことを確認した。

4. むすび

当社のHVDCシステムであるHVDC-Diamondを検証する検証設備を建設し、一連の検証によって、制御(通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタート、電力融通試験、無効電力出力試験)、長期安定性(ヒートラン試験)、保護(DC母線短絡試験)、実用性能(耐震評価(解析、固有振動測定)、ラジオノイズ試験)のデータを蓄積とともに、製品として問題なく提供できることを確認した。

この実績を基に、更に小型化、低損失化となる新たなHVDCシステムの開発に進めていく計画である。

参考文献

- (1) 高橋達也, ほか: 自励式HVDC検証設備の完成, 平成31年電気学会全国大会, 6-338 (2018)
- (2) 高橋達也, ほか: 自励式HVDC検証棟での運転試験, 平成31年電気学会全国大会, 6-339 (2018)
- (3) 吉田良男, ほか: 500kV大容量サイリスタバルブの耐震性評価手法の検討, 電気学会論文誌B, 115, No.11, 1358~1364 (1995)

電力系統網の安定稼働に貢献する異常兆候検知

野村明裕*
Akihiro Nomura
佐子朋生*
Tomo Sako

Detection of Abnormality Signs that Contribute to Stable Operation of Power Grids

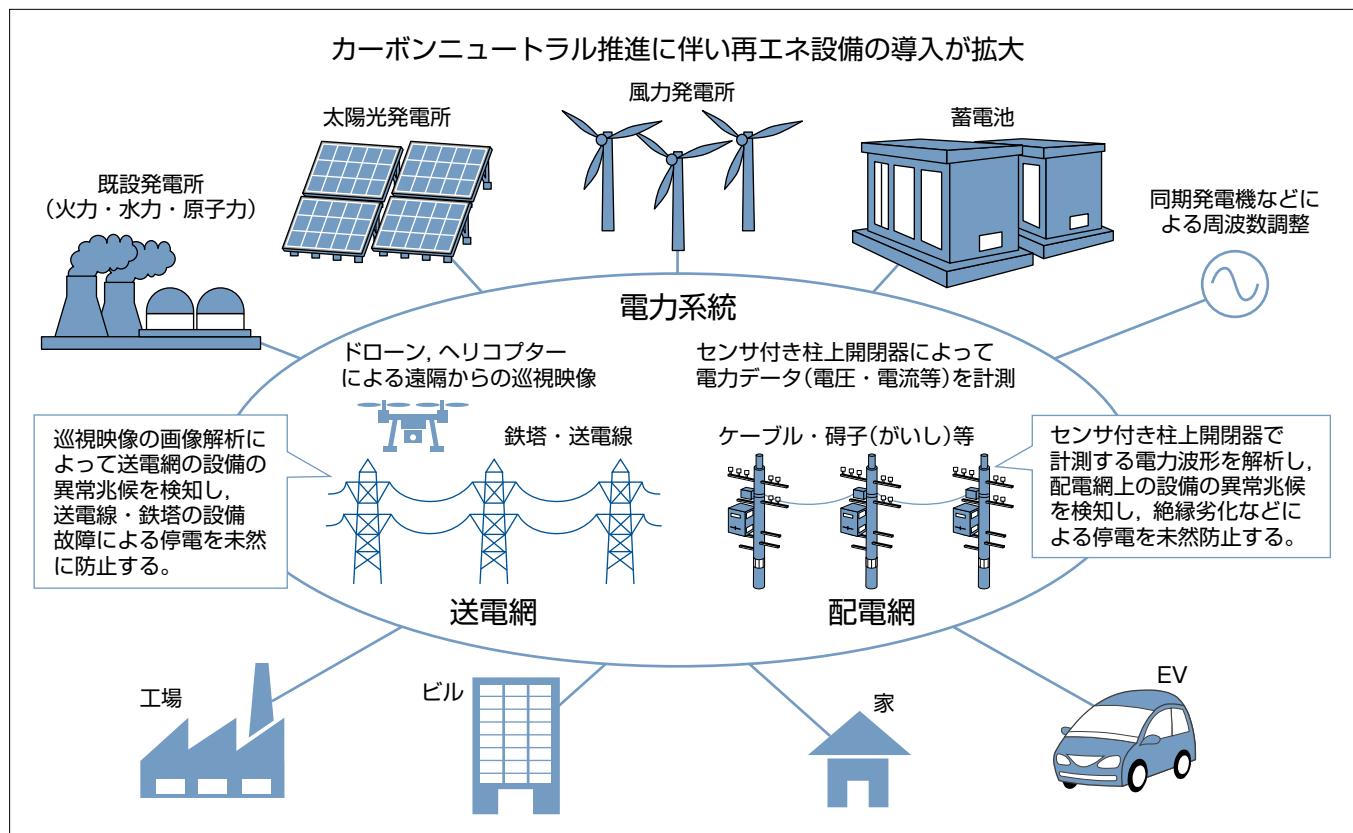
要旨

カーボンニュートラル実現に向けて太陽光発電、風力発電、蓄電池、EV(Electric Vehicle)等の再生可能エネルギー設備(以下、“再エネ設備”という。)の導入が様々な地域で進んでいる(太陽光発電は高圧送電線に近く日照量の多い平地、風力発電は一定の風速がある平地と山間部が多い)。再エネ設備を大量導入した後の系統を安定稼働させるためにはSVR(Step Voltage Regulator)、PCS(Power Conditioning System)や同期発電機の設備導入が必要である。この多種多様な設備増加に伴い停電につながる設備故障を防止することの重要性が高まっており、その解決策としてAIを活用した異常兆候検知技術を開発した。

設備故障の予兆はその破壊様相が小さいことからセンサ

で計測可能な変化は微小であるが、この異常兆候検知技術は配電系統の電圧・電流を監視することで絶縁劣化に伴う微小なパルス性電流を発見することや、ドローンの巡視映像から鉄塔・送電線のキズ、たわみなどの劣化を発見することなど、電力設備の異常兆候の検知が可能である。

AIは不確実性を含むその技術特性に起因する特有のリスクがあり品質保証の共通指針を確立する必要があった。三菱電機はAI製品の品質保証に関するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画し、AIプロダクト品質保証ガイドラインを策定した。今回開発したAIを活用した異常兆候検知技術では、このガイドラインを適用し品質確保を進めた。



電力系統網の安定稼働を支える異常兆候検知技術

電力系統網の安定稼働を支える異常兆候検知技術は、系統制御システムの設備保全情報、センサ付きの柱上開閉器で得られる電力計測情報、ドローンなどによって得られる映像情報を基に、電力設備の異常兆候を検知し停電につながる設備故障を未然防止する技術である。将来的には故障時期を予測する予知保全の技術を追加し電力設備のCBM(Condition Based Maintenance)を実現していく。

1. まえがき

近年、カーボンニュートラル実現に向けて太陽光発電や風力発電などの再エネ設備の導入拡大が進んでいるが、直流電源比率が増加すると擾乱(じょうらん)に弱くなるため電力系統の安定稼働の重要性が増している。一方で、日本の送配電設備は高度経済成長期の1960～1970年代に設置されたものが多く、高経年化に伴う不具合や事故の増加が懸念されており、効率的な建て替えや大規模の修繕が必要である。以上の背景を踏まえ、今後の電力保安レベルの維持・向上を実現するため、設備故障の予兆診断の技術開発が期待されている。

このような情勢を受け、当社は送配電設備に付加できるセンサ付き柱上開閉器で電圧・電流データを収集し、設備不具合の予兆を診断する技術(異常兆候検知技術)の開発に取り組んできた。この技術を活用すれば、電気設備の事故を予防し電力を安定供給することが可能になる。

この技術を開発するに当たりAIの品質保証の考え方を確立し実践していく必要があった。当社はAI製品の品質保証に関するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画しており、そこで検討したガイドラインを当社向けに整理した。この異常兆候検知技術で適用したAIの開発にはそのガイドラインを活用し開発を進めた。

2. 波形解析技術

2.1 市場動向

再エネ設備の比率が増加すると、同期電源が持つ慣性力や同期化力が減少したり、電力系統に電気が逆潮流した場合に電圧が上昇し適正電圧範囲を逸脱したりする。そのため同期発電機などの周波数調整設備の追加や、自動電圧調整器(SVR)などによって逆潮流を検知し電圧上昇を抑えることが必要となる⁽¹⁾。

電力系統の安定稼働のためには、これら追加設備と高経年化する既存設備の保全が課題であり、経済産業省の“スマート保全アクションプラン”では再エネ設備異常の早期発見による稼働率の向上、設備異常箇所の事前把握による現場復旧作業の迅速化、災害後の迅速な健全性把握のための遠隔常時監視、絶縁劣化の常時監視等の高度な監視技術を導入していく必要があるとしている⁽²⁾。

当社はこのような電力設備保全に求められる異常兆候検知技術を開発しており、ドローンやヘリコプターによる巡視点検画像から劣化を検出して送電線・鉄塔の遠隔監視を可能にする技術や、センサ付き柱上開閉器の計測波形を解

析して異常予兆となる波形を検出し配電線の絶縁劣化などの常時監視を可能にする技術を開発している。次節以降では波形解析による異常兆候検知の当社技術について述べる。

2.2 波形解析技術を活用した配電線の異常兆候検知手法

配電線の事故(停電)時には、電圧・電流の異常な変動が発生する。その波及を防止するためFCB(Feeder Circuit Breaker)が作動する⁽³⁾。事故前には、予兆としてFCBが作動しないレベルの小さな電圧・電流変動(異常兆候)が発生しているが、変動が小さいことから異常箇所の破壊様相が小さく、目視の巡視点検によっても発見できないことがある。

この異常兆候の検出及び異常区間の特定ができれば、高度な経験が必要な広域の巡視点検作業を効率化し、非熟練保全員でも高水準の保安レベルを維持できる。さらに、経路切離し等によって事故(停電)を未然に防止できる。

異常兆候は事故要因ごとに特徴が異なり、例えば電力ケーブルに発生する異常は絶縁破壊に至る過程で微小なパルス性電流や超音波振動などを伴う部分放電が発生することが知られている⁽⁴⁾。この特徴的な異常波形を電圧・電流の立ち上がり、立ち下がりの特徴量から検出する手法や、ニューラルネットワークを用いた教師あり学習から検出する手法など、異常波形の特徴を記憶し合致するものを検出する手法がこれまで考案されている。詳細は2.3節に述べるが、当社は正常波形をベースに異常波形を検出する技術と過検知を除去する技術を持っており、他社に比べ検知できる波形(事故要因)のバリエーションとその精度が優れている。さらに、これを電圧・電流の通常と異なる機微な変化を検出することに特化させ、配電線の異常兆候検知技術を確立し、サンプル事故データによる異常兆候検出を確認した。

2.3 当社の波形解析技術

当社の波形解析技術はコンパクトかつ高精度でありセンサ付き柱上開閉器とセンターの両方に搭載可能である。配電線近傍のセンサ付き柱上開閉器ではリアルタイムで計測する電圧・電流測定データによって事故の予兆を推論する。センターでは学習を行う。具体的には、センサ付き柱上開閉器から収集した大量なデータから、正常時の電圧・電流測定データの形状的な特徴を抽出し、学習済みモデルを作成する。学習済みモデルはセンサ付き柱上開閉器に配置され、推論時に利用する(図1)。

センサ付き柱上開閉器で行う推論では、単位区間ごとに電圧・電流測定データを切り出し、別の単位区間と比較して、通常時と類似の波形か稀(まれ)な波形かを判別している。これによって異常兆候を検知できる(図2)。

異常兆候の検知の最終的な結果は、データ入力、前処理、検知を行った後、検知結果の選定(過剰な検知の除去)を経て出力される(図3)。動作頻度が少ない設備による電圧・電流値の変動は、学習データのパターンが少ないため過剰に検知してしまうことが多い。そのため検知結果をチェックし過剰な検知を除去する機能を備えている。例えばSVR動作などに伴う電圧・電流値の変動を正常と判定するために、設備やシステム運用のノウハウ、統計分析手

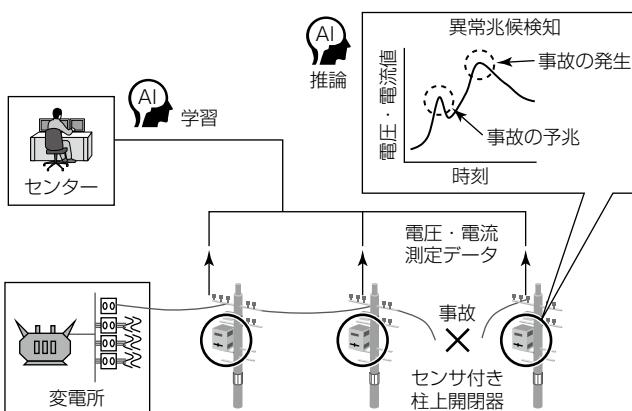


図1. 波形解析技術のイメージ

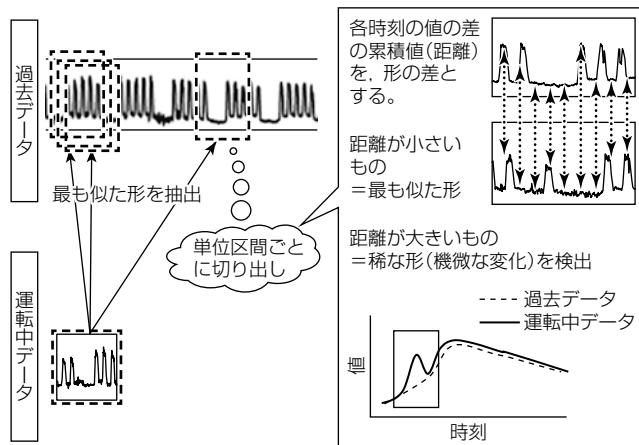


図2. 検知技術

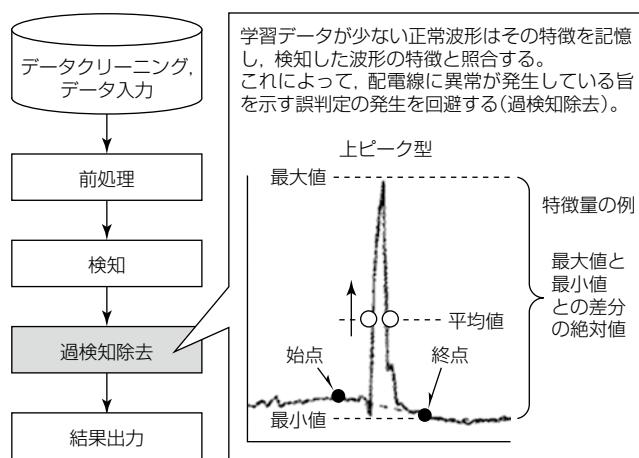


図3. 異常兆候検知フローと過検知除去技術

法などを活用している。学習データの数が少ないパターンを自動で抽出し、6種類に分類した上で、その正常波形条件を記憶する。異常兆候を検知した場合には検知波形と正常波形条件を照合した結果に基づいて過剰な検知を除去し、配電線に異常があるか否かを判定する⁽⁵⁾。

2.4 AI製品の品質保証

この技術の開発課題にAIの品質保証の考え方の確立と実践があった。AIは精度が100%にはならないことなど不確実性を含む技術特性を持っており、AIが期待どおりの品質を果たすこと(信頼性)について適切な検証を行う必要があった。製品開発の構想時点ではAIについては信頼性評価の共通指針が確立されておらず、特に安全性が重要視される電力分野で導入が進まない大きな原因の一つとなっていた。

そこで、当社はAIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)に参画し、そこで検討した“AIプロダクト品質保証ガイドライン”を当社向けに整理し、社内用の“AI品質保証ガイドライン”をまとめた。この配電線の異常兆候検知技術の製品化に当たってもこのガイドラインに従って開発を進めている。

3. AIの品質保証に関するガイドライン

国内でAI品質保証のガイドライン化が進んでいる。品質保証の検討を進めている主な団体を表1に示す。

AIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)によるガイドラインの特徴は表2に示すようにAIプロダクト品質保証のための五つの軸を提唱した点である。当社では、このガイドラインの項目を当社製品開発用に工夫を図った上で、確認フェーズを具体化した。

表1. AI製品の品質保証に関する団体

No	団体	ガイドライン	初出
1	AIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)	AIプロダクト品質保証ガイドライン	2019/5/17
2	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	機械学習品質マネジメントガイドライン	2020/6/30
3	(株)三菱総合研究所・ 経済産業省・ 厚生労働省	プラント保安分野AI 信頼性評価ガイドライン	2020/11/17
4	SQuBOK策定部会	SQuBOK Guide V3	2020/11/19

表2. AIプロダクト品質保証のための五つの軸⁽⁶⁾

Data Integrity (データの完全性)	学習データの量が十分確保されていること
Model Robustness (モデル頑健性)	モデルの精度が高く頑健性が確保されていること
System Quality (システム品質)	システム全体での完成度が高いこと
Process Agility (プロセス機動性)	開発者が臨機応変に対応できる環境であること
Customer Expectation (顧客期待度)	精度・価値に対する顧客期待度に対しケアがなされていること

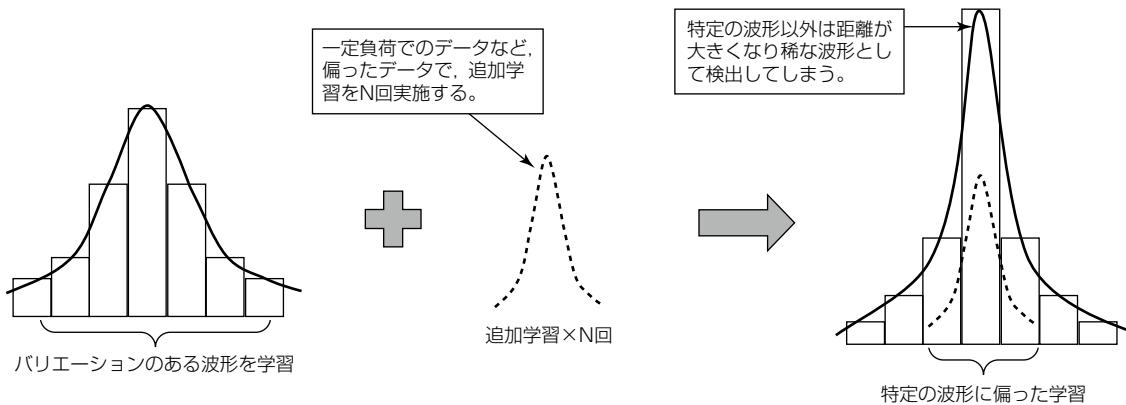


図4. 学習データの偏り

4. 運用結果・課題

この章ではAI品質保証ガイドラインの適用を通じて得た課題のうち、モデル頑健性に関する具体的な二つの課題について述べる。

4.1 モデルの陳腐化

AIを搭載したシステムの運用中は、学習済みモデルの性能が開発完了時に評価した性能から変化していないことを監視し続ける必要がある。一つ目は運用中のモデルの陳腐化(実データに対する予測品質の劣化)に関する課題である。

この技術を適用したシステムでは、運用中に最新データを追加・削除することで継続的にモデルを改善するための追加学習機能を備えており、ユーザー側による監視・評価を可能にしていた。この機能は運用前にユーザー評価を実施していたが、新しいシステムのためユーザーにはっきりした知識がない状態であり、システムの使用方法を正確に伝えることが難しかった。

この異常兆候検知技術は正常データを基に異常データを検出する仕組みであることから、異常に近い正常データから真に正常のデータまで、正常データのバリエーションを保たせる必要があるが、使い方によっては学習データに偏りが出てしまうという。ユーザーはデータが累積しさえすれば精度が上がると思っており、類似データを繰り返し追加学習させていた。学習データが偏ったことで、正常から少しでも外れたデータを異常兆候と判断するモデルとなった(図4)。

これについては次の2点の改善を実施した。

①ユーザーに仕組みが正しく伝わっていないことが問題であり、事前に使ってもらうなど仕様説明の方法を工夫する。

②学習データが偏らないようにする処理の追加及び見える化の対応を実施する。

4.2 データの取得、運用中のモデル切替え

学習済みモデルは数理的多様性、意味的多様性などを考慮し十分に多様なデータで検証を行う必要があり、二つ目はモデルの多様性評価に関する課題である。

送電線の異常兆候検知では当初はサンプルデータも少なく、一つのモデルで推論する方針であったが、数多くの電圧・電流測定データを分析すると系統の運用状態によって細かく変化していることが判明した。そのため精度を更に向上させるために複数の学習済みモデルを保持し、運用状態(一定のルール)によって動作を切り替えることにした。

5. むすび

本稿では、送配電設備保全に関する課題と当社の送配電設備の異常兆候検知技術について述べた。また、AIを利用した製品の品質保証プロセスと具体例について述べた。

異常兆候検知技術は、今後の再エネ設備の増加や人材不足の環境下での設備保安レベルの維持・向上に必要となる技術である。今後は、当社神戸地区に構築した実証実験施設や現地実証を通じてこの技術の効果の確認とより一層の高度化を進めていく。

参考文献

- (1) 経済産業省：同期電源の減少に起因する技術的課題 (2021)
- (2) 経済産業省：スマート保安アクションプラン (2021)
- (3) 電気協同研究会：配電自動化技術の高度化, 72, No.3 (2016)
- (4) 大久保 仁：高電界現象論, 281~282, オーム社 (2011)
- (5) 特許第6827608号
- (6) QA4AI AIプロダクト品質保証ガイドライン2021.09版

カーボンニュートラルを目指したマルチリージョンEMS

千貫智幸*
Tomoyuki Chinuki
杉山瑛美*
Emi Sugiyama

Energy Management System for Multi-region Digital Power Supply targeting to Carbon Neutrality

1. まえがき

昨今、世界全体で脱炭素・カーボンニュートラルを表明する国・企業が続々と増えている。グローバルな取引ではサプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まっており、製品の購入契約の条件に製造企業での脱炭素の取組みを課す事例も出てきている。

また、SBT(Science Based Targets)⁽¹⁾やRE100(Renewable Energy 100%)のように各企業の脱炭素に対する取組みを評価する国際的なプロジェクトも存在する。これらプロジェクトへの参加は企業にとっての脱炭素達成のモチベーションになるほか、投資家にとっての参考情報になる。

このような背景の中、多くの企業が工場や建物ごとに脱炭素目標を設定し、再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)電力の調達を加速させている。再エネ電力の調達手段としては、拠点内の敷地に再エネ発電を導入して自家消費する方法があるが、拠点内に必ずしも十分な再エネ設置スペースがあるとは限らない。特に国土が限られている日本で大量の再エネを導入できる箇所は限定されており、大規模工場がある拠点内に需要を賄うだけの再エネを導入することは難しい。また、太陽光発電・風力発電などの再エネの発電量は天候・時間帯によって発電量が大きく変わるために、需要に見合うだけの電力を常時安定的に供給できな

いという課題もある。三菱電機はこの“再エネ電源の時間的・空間的偏在性”という課題に注目し、解決策としてマルチリージョンEMS(Energy Management System)を開発している。

マルチリージョンEMSは、各拠点の再エネを含む分散型電源・蓄電池・需要家機器を制御し、再エネの電力を複数の拠点間で融通し合うことで脱炭素目標の達成と経済的な需給運用の実現を両立するためのクラウドサービスである。拠点間の再エネ電力の融通は“自己託送”という国内制度に準拠して行われる。自己託送とは、電力会社が持つ送配電系統網を利用して、自家発電設備による発電電力を自社内の別の需要地点に送電するサービスである。自己託送を行う場合、再エネの出力変動も含めて30分単位の電力の計画を毎日作成・提出し、実需給断面での同時同量監視・制御を24時間実施するなどの業務が発生するが、マルチリージョンEMSはBLEnDer^(注1)電力需給管理パッケージ⁽²⁾を用いてこれらの運用を総合的にサポートする(図1)。

本稿では、マルチリージョンEMSの概要について述べる。また、マルチリージョンEMSのコア技術になる当社が開発した最適化技術についても述べる。

(注1) 電力小売自由化に合わせて当社が開発し、2001年に商標登録、販売を開始した電力市場向けのパッケージ型ソフトウェア製品の総称。

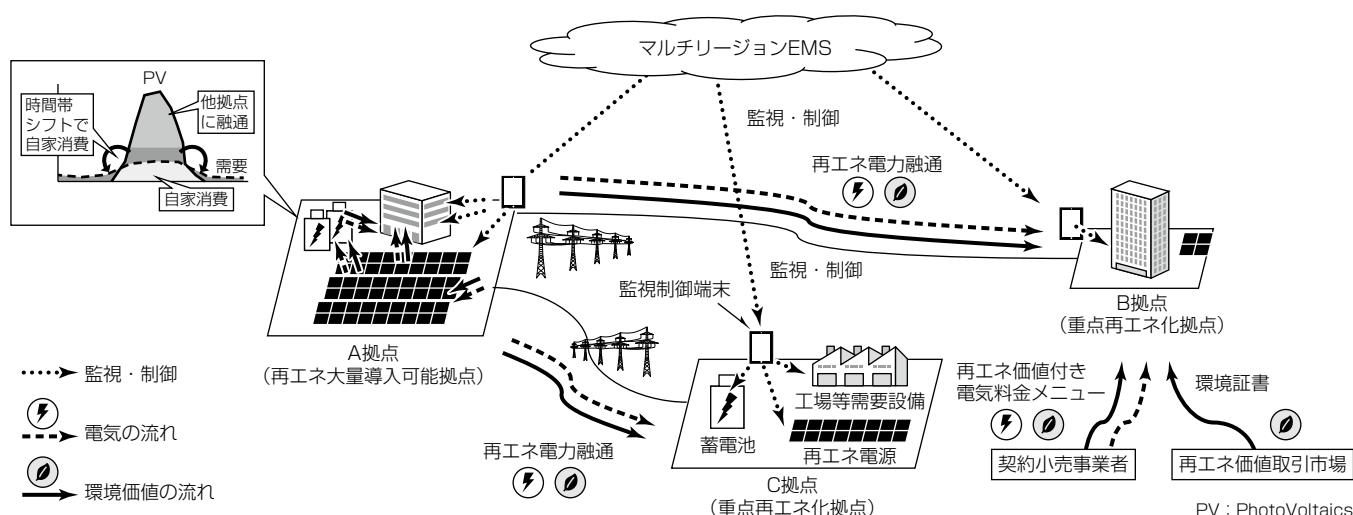


図1. マルチリージョンEMSの概念図

2. マルチリージョンEMS

2.1 システム概要

マルチリージョンEMSは、ある拠点に導入された再エネの発電電力を既存の電力網を通じて別の拠点に融通することで、拠点ごとの脱炭素目標の達成と経済的な需給運用の実現を両立するためのクラウドサービスである。特徴は、電力の需給バランスと環境価値をそれぞれ管理することである。

電力に関しては、将来の再エネ発電量及び需要を予測し、拠点間の電力融通も考慮した上で各拠点の需給バランスを各30分単位で一致させる計画を策定する。30分単位の電力の計画は日々作成し、電力広域的運営推進機関(Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators: OCCTO)に提出する。実需給断面では、発電設備・蓄電池・需要家機器を制御することで同時同量監視制御などの運用業務を24時間実施する。

環境価値に関しては、自己託送による拠点間の再エネ発電電力融通のほか、再エネ価値付き電気メニューの契約や、環境価値取引市場や相対取引からの調達によって得た再エネ価値も活用し脱炭素目標の達成を実現する。また、国際的に認められているRE100、SBT/CDP(Carbon Disclosure Project)、及び日本独自の地球温暖化対策推進法(温対法)、エネルギー供給構造高度化法(高度化法)にも準拠しこれら報告の支援も行う。

表1. マルチリージョンEMSを構成するパッケージ一覧

パッケージ名称	概要
CM : Contract Manager	マスター管理：需給運用・環境価値管理に必要な各種契約情報、各拠点の発電機・蓄電池、需要等の諸元データを管理する。
LF : Load Forecast	需要予測・再エネ予測：気象情報及び需要家ごとの実績を管理し、拠点ごとの需要負荷の予測及び再エネ発電出力の予測を行う。
PM : Portfolio Manager	需給計画：30分マニア位の同時同量制約、拠点ごとの脱炭素目標制約、その他各設備の制約条件などを考慮し、コスト最小になる需給計画を策定する。
BP : Business Protocol	計画提出：ビジネスプロトコルに従って発電・販売計画などをOCCTOに提出する。
BM : Balance Manager	同時同量監視制御：需要実績・発電実績を収集し、計画値同時同量の監視・制御を行う。
RE : Renewable Energy	再エネ管理：再エネや蓄電池システムの監視制御・需給制御を行う。
AC : Aggregation Coordinate	分散リソースの集約：複数の分散電源リソースの集約的な制御・監視・管理を行う。
CN : Carbon Neutral for Business	需要家向けカーボンニュートラル：拠点ごとの脱炭素目標を管理し、目標達成を支援する。
DEP : Digital Energy Platform	デジタルエネジープラットフォーム：プラットフォーム基盤と分散電源用端末から構成される。多数の分散電源の管理・通信連携などを行う。

2.2 システム構成

マルチリージョンEMSは、当社開発のBLEnDer電力需給管理システムパッケージによって構成される。構成要素となるパッケージ一覧を表1に示す。各拠点の分散電源や蓄電池などの情報はBLEnDer DEPのプラットフォーム上で管理し、各アプリケーションにデータを連携する。各拠点の機器の監視・制御は拠点内の監視制御端末がBLEnDer DEPと連携して実施する。

3. マルチリージョンEMSの最適化技術

この章では、マルチリージョンEMSのために当社が開発した“マルチリージョン型デジタル電力最適化技術”について述べる。この最適化技術では、複数拠点間での再エネ由来の電力の融通、各拠点の分散型電源・蓄電池の運用及び環境価値証書の購入に関する計画を最適化する。マルチリージョンEMSの制御方式には、中央集中制御方式と自律分散制御方式の二つがあり、最適化問題の定式化が異なる。中央集中制御方式は、自社内の複数拠点を一括管理して需給運用や脱炭素目標策定を行う場合に適用される。自律分散制御方式は、採算が独立した自社内の拠点間で電力融通を行う場合に適用される。

3.1 中央集中制御方式での最適化

この制御方式では、各拠点の設備情報や脱炭素目標を考慮した上で、全拠点の合計コストが最小となるように拠点間融通計画、各発電設備・各蓄電池の出力計画、及び需要予測計画などを策定する。各拠点はマルチリージョンEMSが策定した計画に基づいて需給運用を行う。環境価値取引市場や相対取引を通じた環境証書の売買は運用者が一括集約して行った上で、各拠点に証書を配分する。中央集中制御方式の概念図を図2に示す。

この制御方式での最適化問題の目的関数は、発電機コスト、自己託送にかかる託送料金、小売事業者からの購入電力料金、再エネ価値市場等からの環境証書購入コストの全拠点合算値である。目的関数を式(1)に示す。

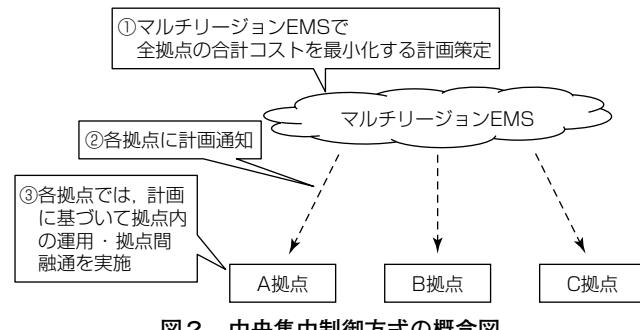


図2. 中央集中制御方式の概念図

なお、マルチリージョンEMSでは蓄電池に貯められている再エネ電源由来の電力量と非再エネ電源由来の電力量を分けて管理し、蓄電池内の再エネ価値の保持・移転も計画や実績に反映する。

ある拠点での環境価値目標に関する制約は式(2)によって表される。式(2)左辺によって表される環境価値の取得量が、式(2)右辺によって表される対象期間中(通常は年間)の需要に再エネ目標比率を掛けた値を上回ることが条件となる。式(2)左辺は、自拠点内の再エネ発電によって得られる環境価値、環境価値付き電力の蓄電池充放電による得失、他拠点からの融通によって得た(又は他拠点に受け渡した)環境価値、小売事業者からの電気料金メニューから得た環境価値の和から成る。

その他の制約条件としては、拠点ごと・30分コマごとの需給バランス制約、発電機の運用制約、蓄電池の運用制約・容量制約などが挙げられる。

式(1)、式(2)での各変数の説明は次のとおりである。なお、電力量はどれも30分コマ単位の量である。

N_{site} : マルチリージョンEMSの管理対象拠点の数

t_{end} : 演算対象時間の30分コマ数

N_{gen}/N_{bat} : 拠点内の発電機数/蓄電池数

N_{CER} : マルチリージョンEMSで扱う環境証書の種別数

minimize 全拠点の合計コスト

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{s=1}^{N_{site}} \left\{ \sum_{t=1}^{t_{end}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{gen,s}} \left(\text{発電単価}_{i,t,s} \cdot \text{発電電力量}_{i,t,s} \right) \right. \right. \\
 &+ \text{託送料金}_t \cdot \text{他拠点からの融通電力量}_{t,s} \\
 &+ \text{購入電力料金単価}_{t,s} \cdot \text{購入電力量}_{t,s} \left. \right\} \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{CER,s}} \left(\text{環境証書単価}_j \cdot (\text{環境証書の購入量}_{j,s} \right. \\
 &\left. \left. - \text{環境証書の売却量}_{j,s} \right) \right\} \dots \dots \dots \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{t=1}^{t_{end}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{gen}} \left(\text{発電電力中の再エネ比率}_{i,t} \cdot \text{発電電力量}_{i,t} \right) \right. \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{bats}} \left(\text{放電電力量のうち再エネ発電由来分}_{j,t} \right) \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{route}} \left(-\text{充電電力量のうち再エネ発電由来分}_{j,t} \right) \\
 &+ \text{他拠点からの融通電力量のうち再エネ発電由来分}_t \\
 &- \text{他拠点への融通電力量のうち再エネ発電由来分}_t \\
 &+ \text{購入電力中の再エネ比率}_t \cdot \text{購入電力量}_t \left. \right\} \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{CER}} \left(\text{環境証書の購入量}_j - \text{環境証書の売却量}_j \right) \\
 &\geq \text{再エネ目標比率} \cdot \sum_{t=1}^{t_{end}} (\text{需要予測値}_t) \dots \dots \dots \quad (2)
 \end{aligned}$$

3.2 自律分散制御方式での最適化

この制御方式では、拠点内の電力及び環境価値の調達コストが最小化になるような計画を拠点ごとに策定する。具体的には、拠点内の発電設備・蓄電池の出力計画、及び需要予測計画を策定するとともに、他拠点への融通希望量(又は他拠点からの融通希望量)、融通希望単価、融通希望時間帯を算出する。次に、マルチリージョンEMSは各拠点からの融通希望情報を突き合わせ、融通を送る拠点と融通を受ける拠点のニーズがマッチングした場合には、拠点間の融通計画を策定し各拠点に通知する。各拠点では融通計画を踏まえて拠点内の需給計画を修正する。環境価値取引市場や相対取引を通じた環境証書の売買は各拠点で行う。自律分散制御方式の概念図を図3に示す。

各拠点は融通希望のマッチング前後で、それぞれ拠点内のコストを最小化する計画を策定する。ある拠点での約定結果通知後の計画策定での目的関数は式(3)のとおりである。

中央集中制御方式での目的関数との違いとして、各拠点が他拠点との電力融通費用を考慮してコストを最小化する

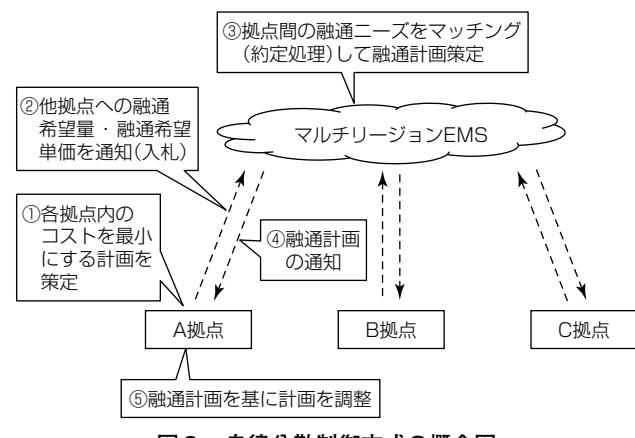


図3. 自律分散制御方式の概念図

minimize 拠点内のコスト

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{t=1}^{t_{end}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{gen}} \left(\text{発電単価}_{i,t} \cdot \text{発電電力量}_{i,t} \right) \right. \\
 &+ \text{託送料金}_t \cdot \text{他拠点からの融通電力量}_t \\
 &+ \sum_{r=1}^{N_{route}} \left\{ \text{再エネ電力融通単価}_{r,t} \cdot \right. \\
 &\left. \text{他拠点との再エネ電力融通量}_{r,t} \right. \\
 &+ \text{非再エネ電力融通単価}_{r,t} \cdot \\
 &\left. \text{他拠点との非再エネ電力融通量}_{r,t} \right\} \\
 &+ \text{購入電力料金単価}_t \cdot \text{購入電力量}_t \left. \right\} \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{CER}} \left(\text{環境証書単価}_j \cdot (\text{環境証書の購入量}_j \right. \\
 &\left. - \text{環境証書の売却量}_j) \right) \dots \dots \dots \quad (3)
 \end{aligned}$$

計画を策定することが挙げられる。なお、マルチリージョンEMSが策定する拠点間融通計画では、再エネ電力の融通と非再エネ電力の融通とで異なる融通単価が設定されることを想定している。

制約条件及び変数の定義は、中央集約制御方式と同等である。なお、 N_{route} は他拠点への融通経路の数を示す。

4. マルチリージョンEMSでの環境価値管理業務

この章では、企業内の各拠点の脱炭素目標達成のためにマルチリージョンEMSを活用した場合の環境価値管理業務フローについて述べる。制御方式としては、3.1節の中央集中制御方式を適用することを想定する。

環境価値管理の業務フローを図4に示す。環境価値目標は現行制度では年間単位で管理するため、業務を年度開始前、年度中、年度終了後に分けている。

(1) 対象年度開始前

企業の環境価値担当者は、まず年度単位の脱炭素目標を設定してマルチリージョンEMSに登録する。目標には、年間の総需要電力量のうち再エネ電力量の割合を示す“再エネ比率目標”と、消費電力をCO₂に換算したときの“前年度からのCO₂排出量削減目標”の2種類があり、それぞれ設定可能である。

その後、各拠点の脱炭素目標を考慮して、マルチリージョンEMSが年間単位のコストを最小化する需給計画を策定する(3.1節)。なお、策定した各拠点の需給計画は30分ごとの同時同量制約を満たす。

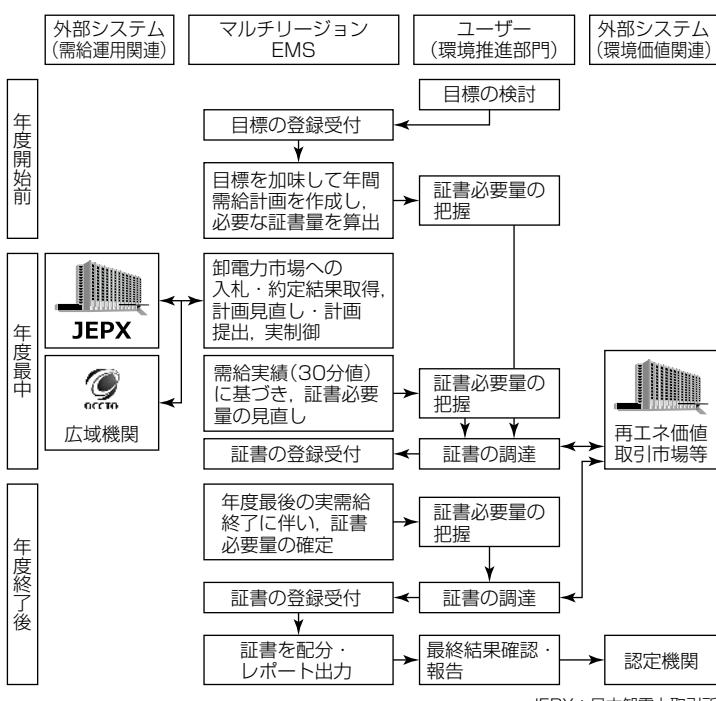


図4. 環境価値管理の業務フロー

次に、需給計画を基に環境価値証書の購入計画を決定する。購入対象の証書は、国内で扱われている非化石証書、Jクレジット、グリーン電力証書の3種類である。なお、これらの計画策定業務は年度開始後も最新の実績データを基に繰り返し計画策定を実施する。

(2) 対象年度中

脱炭素目標を設定した対象年度が始まると、卸電力市場への入札、計画提出、監視・制御などの需給運用業務をマルチリージョンEMSを通じて行う。

実績データの値によっては当初の計画よりも需要や再エネの発電量が増減し、これによって環境証書の必要量も変化する可能性がある。マルチリージョンEMSでは、計画と実績の際に起因した環境証書必要量の変化を監視し、変化量があらかじめ決めたしきい値を超えた場合にはアラートを上げ、企業の運用者に環境証書の追加購入や売却を促す。環境証書の調達状況や残りの購入必要量はシステムを通じて確認できる。

(3) 対象年度終了後

対象年度の実績データが全て集まった後は、各拠点の目標達成計画を画面で確認できる。マルチリージョンEMSは年度の結果を踏まえて各拠点に証書を配分する。また、各種制度の報告に活用可能なレポートを出力する。

5. むすび

本稿では、当社が開発しているマルチリージョンEMS及びそのコア技術になる“マルチリージョン型デジタル電力最適化技術”について報告した。マルチリージョンEMSは、脱炭素化の社会的ニーズと“再エネ電源の時間的・空間的偏在性”という課題に対するソリューションである。拠点間での再エネ電力融通によって脱炭素目標の達成と経済的な需給運用の実現を両立する。また、マルチリージョンEMSによる拠点間の再エネ融通は、自社内の拠点間の電力・環境価値融通だけでなく企業間の融通にも適用できる。

脱炭素化に向けた世界的なニーズが日々高まり、実事業や企業評価にも影響が拡大しつつある中で、この概念及びこのシステムが各企業の脱炭素化の取組みの一助となると当社は考える。

参考文献

- From Ambition to Impact: How Companies are Reducing Emissions at Scale with Science-Based Targets (Science Based Targets initiative Annual Progress Report 2020) (2021)
- Power systems ICT solution "BLEnDer", Mitsubishi Electric Corporation
<https://www.MitsubishiElectric.co.jp/ictpowersystem/business/solution1.html>

風力系統への適用を想定した C-GIS用Cable Switch

Cable Switching Breaker for C-GIS Dedicated to Wind Power System Application

松永敏宏*
Toshihiro Matsunaga

吉岡純生†
Yoshiki Yoshioka

香川耕一*
Koichi Kagawa

大西健司†
Kenji Onishi

要旨

再生可能エネルギーとして風力発電の導入が世界的に拡大する状況下で、三菱電機では風車への搭載に特化したキュービクル形ガス絶縁開閉装置(Cubicle-Type Gas Insulated Switchgear : C-GIS)を開発し、海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS“HG-VG-A”(以下“HG-VG-A形C-GIS”という。)として製品化した。

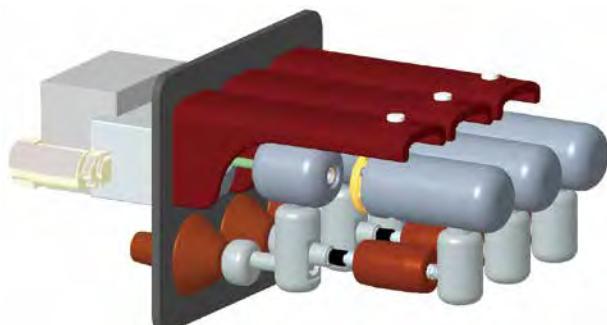
HG-VG-A形C-GISに集約された開閉器の中で、風車と連系回路の接続部を担う断路器(DS)はケーブル充電電流開閉能力を持たないため、風車と連系回路の接続・断路を行う際には洋上変電所の遮断器(CB)を開極して連系回路上の全ての風車も停止し、海底ケーブルの残留電圧が放電するのを待ってDSの開閉を行う必要があった。

こうした発電機の損失を最小限に抑えて大規模洋上風力発電所の発電効率を最大化し、安定的な電力供給を実現するため、DSにケーブル充電電流開閉能力を付与し、より柔軟な系統運用を可能とするCable Switch(CS)を開発した。

CSは、HG-VG-A形C-GISの風車内搭載を可能とする厳しい寸法制約への影響を避けるため、従来のDSを基にして、ラッチ式速動機構、可動シールド、端子支持構造の強化、開極時電流に対する電気的インタロックなどの技術を採用することで、HG-VG-A形C-GISの外形寸法を変更することなくケーブル充電電流開閉能力を付与したCSを開発、適用できた。



HG-VG-A形C-GIS



HG-VG-A用CSの構造

洋上風力発電向け風車への搭載に特化した72.5kV C-GIS“HG-VG-A”と新たに開発したCS

風車の運用に必要なCB、DSを集約して風車内に搭載可能な外形寸法を達成したHG-VG-A形C-GISに対し、DSにケーブル充電電流開閉能力を付与したCSを開発、適用した。

1. まえがき

再生可能エネルギーの導入拡大によって、風力発電の分野では大規模な洋上風力発電所の建設が2010年前後から欧州を中心に本格化しており、今後は北米やアジア圏も加わって風力発電の導入が更に加速する見込みである。

大規模洋上風力発電所の建設では、据付の完了した風車から順次運用を開始し、発電機会を逃さず効率を最大化することが求められる。また、点検などに伴う風車停止、すなわち発電機会の損失を最小化することも重要視される。

こうした柔軟な風力発電系統の運用を実現するため、三菱電機では従来のDSにケーブル充電電流開閉能力を付与したCSを開発し、HG-VG-A形C-GIS⁽¹⁾に適用した。

本稿では、CSの概要及び採用技術について述べる。

2. HG-VG-A形C-GIS用CSの概要

2.1 大規模洋上風力発電所とC-GISの役割

図1に大規模洋上風力発電所全体の電力系統模式図を示す。10台程度の風車が海底ケーブルによって直列に接続されて連系回路を成し、さらに複数の連系回路が洋上変電所に集電・高電圧化されて陸上変電所へと送電されるツリーライクの電力系統を持つのが大規模洋上風力発電所の特徴である。

図2に示すように、それぞれの風車で発電された電力は発電機直下の変圧器で72.5kVまで昇圧された後、事故時の短絡(地絡)電流を遮断して風車を保護するCBや、風車と連系回路の接続及び断路を行うDSを通じて海底ケーブルへと送電される。HG-VG-A形C-GISは風車の運用に必要なCBやDSを集約し、スペースの限られた風車内に搭載されて図2の破線で囲われた部位を担う。

風車の新設時では、DSを閉じて連系回路との接続を確保した後、CBを閉極して風車からの送電を開始する。また、風車からの送電を停止して点検等を行う場合には、CBを開極してDSを切り、連系回路との断路を行う。

2.2 ケーブル充電電流開閉能力を持つCS

DS自体は高電圧印加中で電流を開閉する能力を持たないため、先に述べた風車と連系回路の接続・断路を行う場合は連系回路上のほか全ての風車もC-GIS内のCBを開極して発電機を連系回路から切り離し、また、洋上変電所内の連系回路に直結されたCBも開極して当該の風車を含む連系回路全体も電力系統から切り離さなければならぬ。さらに、風車同士は海底ケーブルによって接続されて

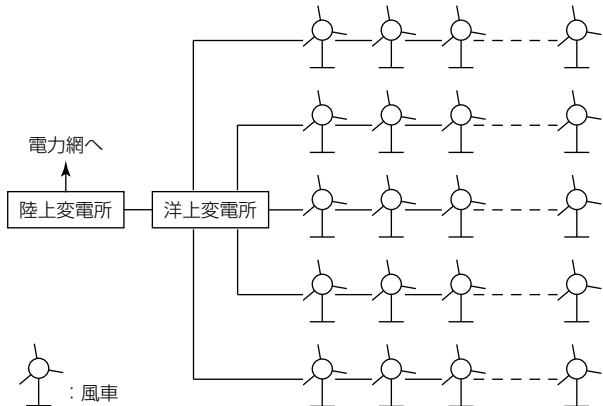
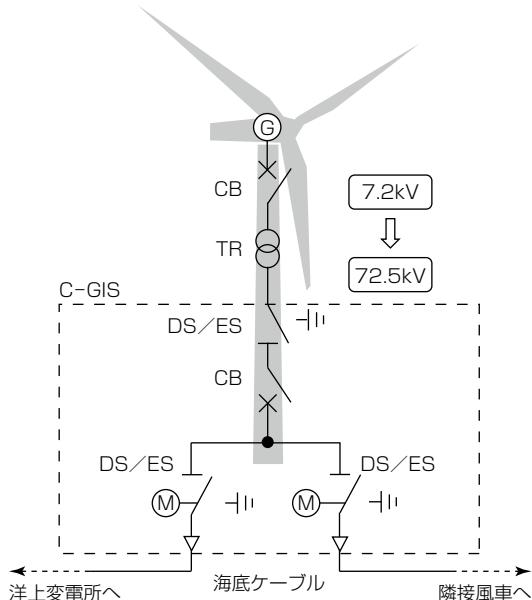


図1. 大規模洋上風力発電所全体の電力系統模式図



G: 発電機, TR: 変圧器, ES: 接地開閉器

図2. 風車内の回路構成

いるため、送電停止後もケーブルの静電容量に応じた残留電圧によって充電電流を生じるのでDSを即座に開閉できず、残留電圧の放電を待ってからDSを開閉する必要がある。これは広範囲かつ長時間にわたるため、連系回路の開閉は風車の発電機会を損失することを意味する(図3(a))。

発電効率を最大化し、安定的な電力供給を実現するためには、より柔軟な系統運用を可能とする機器が求められることから、今回、DSにケーブル充電電流開閉能力を付与したCSを開発した(表1)。なお、風車内搭載のため制約が厳しいC-GIS外形寸法への影響を避けるため、CSの構造は従来のDSを基に機能を追加する開発で対応することにした。

従来のDSをCSに置き換えることで、ケーブル残留電圧の放電を待つ必要がなくなるだけでなく、洋上変電所のCB開極も不要となり、連系回路上の上流側の風車を停止するだけで風車と連系回路の接続・断路が可能になる(図3(b))。

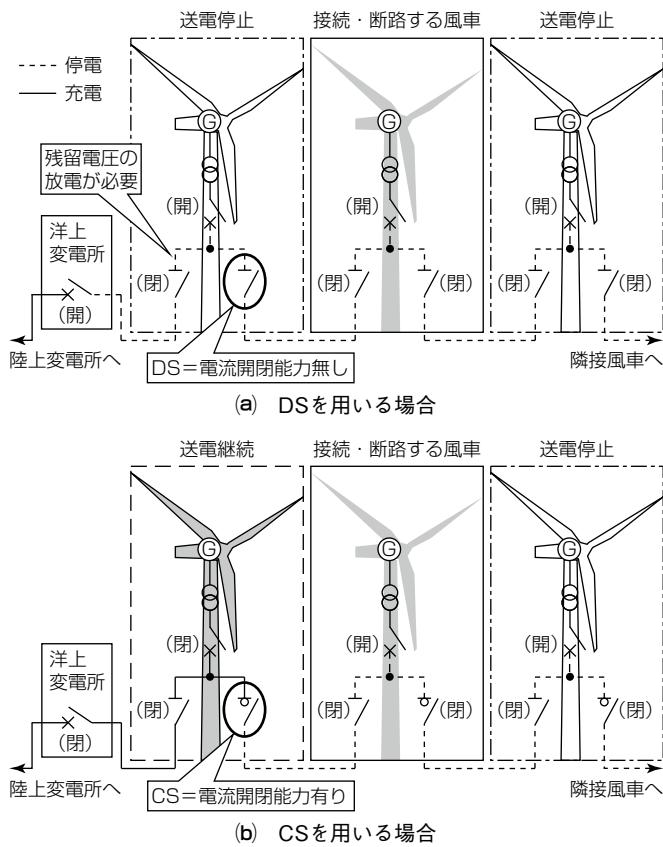


図3. 風車と連系回路の接続・断路

表1. CSの定格

項目	仕様
準拠規格	IEC 62271-104 : 2020
定格電圧	72.5kV
定格電流	1,250A
定格周波数	50Hz
定格雷インパルス耐電圧	350kV
ケーブル充電電流	遮断電流: 40A(遮断クラスC1) 投入電流: 700Apeak
封入ガス	SF ₆ (六フッ化硫黄)
定格ガス圧力	0.05MPa-G(at 20°C)

3. HG-VG-A形C-GIS用CSの採用技術

ケーブル充電電流開閉で特に技術的な難易度が高いのは開極であり、これは容量性負荷の進み小電流遮断にほかならない。進み小電流遮断は、遮断電流こそ短絡時の事故電流と比べればはるかに小さいものの、小電流であるがゆえに容易に電流が遮断され、回復電圧が瞬時に立ち上がり約半サイクル後(50Hzの場合、約10ms後)にピークを迎えることから、開極時には短時間で十分な絶縁距離を確保できなければ端子間で再点弧が発生し、それによって引き起こされる過電圧によって機器の健全性を脅かす危険がある。よって、CSにはケーブル充電電流の無再点弧遮断が要求される。

次に、CSによる進み小電流遮断能力の確保のため、採用した技術を述べる。

3.1 ラッチ式速動機構

図4にHG-VG-A形C-GISに内蔵されている従来のDSユニットの開極動作を示す。DSは、操作機構から伝わる回転運動を円筒形の可動子内部に設けられた台形ねじで直線運動へと変換して、可動子を入側端子から切側端子へ向けて左進させ、端子間の断路を行っている。

この駆動方式は小型の操作機構で長尺の移動距離を得られる利点があるが、モータの回転に依存するため可動子の駆動速度が比較的遅く、回復電圧に対して短時間で必要な絶縁距離を確保できない。

そこでCSでは、図5に示すとおり切側端子と対向する入側端子内に主通電を担う可動子とは別の速動可動子と駆動用のねねを追加し、DSのように可動子が端子間を接続した際、可動子と速動可動子がラッチで係合する機構を設けた。開極の際は、可動子が左進して速動可動子を引き出しながらねねを蓄勢する。速動可動子が切側端子へ到達した位置でラッチが開放され、蓄勢されたねねの駆動力によって速動可動子が急速に右進し、短時間内に必要な絶縁距離を確保して電流の遮断を完了する。

3.2 可動シールド

電流遮断に必要な絶縁距離は電界強度に左右される。速動可動子は直径が細いため先端の電界強度が高くなることから、いち早く速動可動子を直径の大きい入側端子内に収納して電界強度を下げることで、電流遮断に必要な絶縁距離を短くできる。

しかしCSはDS同様、端子間に断路極間としての耐電圧性能が要求されるため、開極位置では電流遮断時以上に大きな絶縁距離を確保しておく必要があり、入側端子を切側端子へ接近させることができなかった。

この課題を解決するため、CSでは速動可動子と連動す

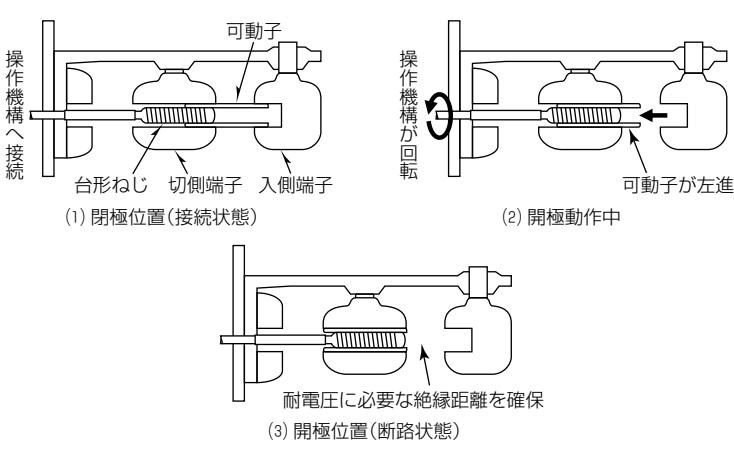


図4. DSユニットの開極動作

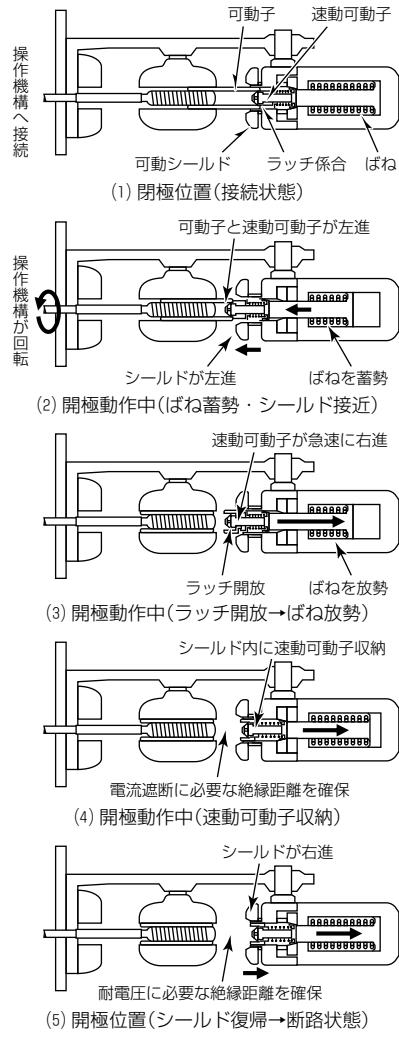


図5. CSユニットの開極動作

る可動シールドを入側端子に設けた(図5)。通常、シールドは切側端子から大きく離れているが、開極の際は可動子と連動して左進し、切側端子へ近付く。ラッチが解放され速動可動子が右進して入側端子内に収納されると、シールドも右進して通常の位置へ復帰し断路状態となり、開極位置の耐電圧性能に必要な絶縁距離を確保する。

3.3 端子支持構造の強化

駆動速度の遅いDSに比べ、CSは開極の際に速動可動子の動作方向へ大きな衝撃負荷を伴う。絶縁支持材で入側端子の上側1点を固定していたDSに対し、CSでは絶縁支持材を入側端子の下側にも追加して剛性を強化した(図6)。

3.4 電気的インタロック

風車からの送電中は、発電機の容量に応じた負荷電流がCSを通じて連系回路へと流れる。その最大値はHG-VG-A形C-GISの定格電流と同様1,250Aであるが、CSに負荷電流開閉能力まで付与すれば非常に大型化することが想定された。そのため、CSは上流側の風車が送電停止された

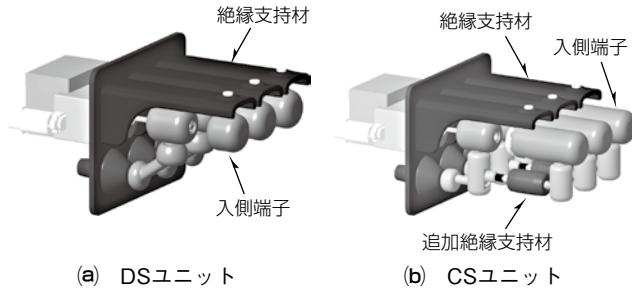


図6. DSユニットとCSユニットの端子支持構造

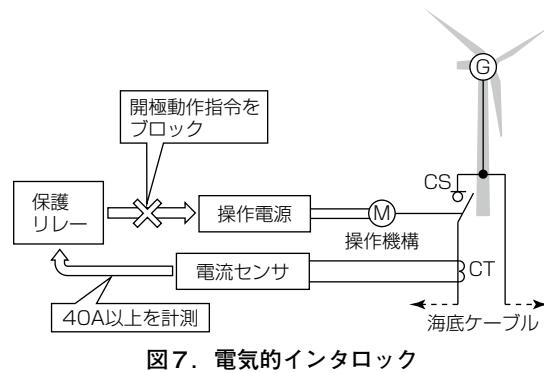


図7. 電気的インタロック

条件でケーブル充電電流を開閉する運用を前提にした。

よって、CSが遮断可能なのはあくまでケーブル充電電流(最大40A)だけであり、短絡時の事故電流遮断はもちろん、定常時に連系回路を流れる負荷電流であっても表1の遮断電流を超える電流を遮断することは不可能である。

そこで、ケーブルに小型の変流器(CT)と電流センサを組み合わせた電気的インタロックを設け、CTが遮断電流を超える電流を計測している場合は、動作指令をブロックしてCSを開極動作できない構成にした(図7)。

なお、ケーブル充電電流の投入に対しては、可動子、速動可動子それぞれの先端部に耐アーキ性材料を適用した。

4. むすび

本稿では、海外洋上風力発電向けのHG-VG-A形C-GISに適用するCSの開発について述べた。

従来のDSを基に、ラッチ式速動機構などを採用することで、風車内搭載のため寸法制約が厳しいHG-VG-A形C-GISで外形寸法に影響を及ぼすことなく、IEC 62271-104規格に準拠したケーブル充電電流開閉能力を満足するCSを開発、適用できた。

CSの適用によって、大規模洋上風力発電所の発電効率を最大化し、発電機損失を最小限に抑えた柔軟な系統の運用を実現するため、今後も適用の拡大を進めていく。

参考文献

- 香川耕一, ほか: 海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS "HG-VG-A", 三菱電機技報, 94, No.11, 618~622 (2020)