

論文

巻頭言：“人間の強みは何か？”が真に問われる時代の技術者教育金子 裕良 1

風力発電設備用雷電流計測装置における
洋上風車向け大口径ロゴスキーコイルの開発安岡 一晟・藤岡 博文・藤野 守也 2

安定した電力供給および電力品質の維持に貢献する高調波解析技術森 佑介 8

技術紹介

配電システムの再エネ電源拡大を見据えた系統用蓄電池の制御方式検討山下 裕輔 13

由来別電力管理機能を備えた
DERMS（分散型エネルギーリソースマネジメントシステム）の実証設備の構築宮本 卓也 18

深層学習による半導体パッケージ基板の外観検査実現に向けた AI 技術開発高田 晃平 22

電力システムのサイバーセキュリティを向上する
IEC 62351 に対応した SCADA の開発黒田 英次・益子 奈々海・荒井 俊成 28

最適なメンテナンスタイミングを提案する
センシング技術による配電盤内の環境評価と環境診断システムの開発折戸 由貴 32

製品紹介

電気自動車向け次世代超急速充電器「SERA-400」古家 成正・鈴木 剛志・鈴木 健司・中野 靖弘 37

微細バンプの高速・高精度検査を実現する
ウェーハバンプ検査装置（WVI-S10330-RA）大多和 洵・木納 良典 40

重要施設の電力安定供給に貢献する
スポットネットワーク受変電設備対応多回路総合計器用変流器多賀 真弓 42

継続的な安定供給を実現する新型 66/77 kV GIS 直結形油入 VCT松田 隆真・寶田 憲央・大塚 貴裕 44

自動検針システムのリニューアル
～大規模施設対応とセキュリティ強化～石田 利治・神林 優河・菅原 梨沙 46

島嶼の安定的な電力供給と業務効率化に資する「配電用開閉器無線制御システム
（無線方式対応センサ内蔵自動開閉器用遠方制御器）」板橋 成徳・村山 拓希 49

低騒音化・軽量化を実現した
電力インフラ設備のレジリエンス強化のための移動用変圧器車大山 修司 52

トップランナー制度に適合した「タカオカ 2026 トップランナーモールド変圧器」曾我部 吉生 54

環境配慮型変圧器のラインアップ拡充 ー菜種油を採用した変圧器ー土屋 龍平・八木澤 悠秀 56

トピックス

第2世代スマートメーターのサプライチェーン中核を担う「スマートメーターアセンブリセンター」操業開始57

スマートファクトリー化への取り組み 先進工場技術検証室の活動紹介58

次世代 EV 充電インフラの信頼性向上に貢献する SERA OCPP テストセンターの開設60

EV 用急速充電器「SERA-50」が初出荷から 5 年で累計出荷台数 2,000 台を突破62

オフグリッド型エネルギーマネジメントシステムの実装
ー母島の再エネ 100%電力供給と新島のレジリエンス強化ー64

エネルギー需要転換実証事業向け効率的なグリーン水素生産に貢献する EMS の開発事例66

ナイジェリアの経済・地域社会の発展に貢献する電力インフラ整備事業の完工68

“人間の強みは何か？”が 真に問われる時代の技術者教育



金子 裕良*
Yasuyoshi Kaneko

昨今、文書メディアやプログラムなどの自動生成で注目されている生成系 AI 技術を用いて、製造現場にもモノづくりの効率化・省人化を図るフィジカル AI 技術の導入が試みられています。人の作業に委ねていた工程の繊細な感覚や技能などをデータ化し、やわらかい動きや力加減で人の動きを再現するロボット開発はもちろん、作業環境下の様々な外乱に対応した動きを学習し、行動計画を柔軟に立案できる自律システムの研究開発が進んでいます。

私も 30 年程前に溶接ロボットの知能化に関わり始めて、最近ようやく実用化への道筋が見えてきたと感じています。この間、CPU やロボットアクチュエータ、カメラを含む各種センサの性能向上とコストダウンが進んだ結果もありますが、溶接中の熱源プラズマの電位分布や移動軌跡、温度分布、熱応力などを正確に解析できる数式モデルが確立され、シミュレーションによる可視化が容易になり、研究開発する人間が溶接現象を十分理解した上で、条件に適応したシステムが開発できるようになったことも大きな要因です。今後、熟練者の知識や技能を学習して材料の材質や形状に応じた最適な接合条件を導くのはもちろん、オンラインで製造環境に即した施工方法や条件を選択して作業できるロボットシステムが誕生するでしょう。

そこで問われるのは、“このような未来の製造現場で人間は何をすべきか”とすることです。世の中の多くの製造物が人の生活に関わるモノなので、多種多様でかつ時間的にも変化する人間の趣味嗜好やニーズに対応できる製品を作るために、製品提案や設計、デザインの面では相変わらず人間が関わると思います。また、“AI 技術で作られたシステムがどのような仕組みで最適解を出力できるのか”や“その解は本当に最適なのか”など、人間が本来持ち合わせている知識欲は未来でも失われず、新しい理論や技術、製品、理念などを生み出すきっかけになり続けます。このため、“現象をブラックボックス化せず、探究心を持って解析し中身を理解する姿勢”は大切で、これを常に持ち続けることが、未来の AI 全盛時代でも“人間の強み”だと考えています。

この考え方から、大学などの多くの技術者教育の現場では、探究心と問題解決力、さらには問題設定能力を鍛えることを第 1 の学習目的としています。現象を理解し常に探究心を持てるようにするために必要な基礎学力や専門知識を座学で身につけ、実験や実習、研究発表を経験することで問題解決力や問題設定能力を鍛えています。この学習と鍛錬は、社会人になっても継続することが望ましく、東光高岳様をはじめ、技術者育成に力を注いでいる多くの企業に今後も継続して頂くことを強く望んでおります。

その意味で、技術者が自ら開発した技術や製品について深掘りした内容を掲載した技報を、定期的に発刊していることは素晴らしく、分野の相違に関わらず多くの人に本誌を読んでもらいたいと思っております。そして、東光高岳技報が今後も継続して、読者の探究心を刺激し続けることを望みつつ、巻頭言とさせていただきます。

風力発電設備用雷電流計測装置における 洋上風車向け大口径ロゴウスキーコイルの開発

■ 安岡 一晟
Issei Yasuoka

■ 藤岡 博文
Hirofumi Fujioka

■ 藤野 守也
Moriya Fujino

近年、洋上風力発電の普及に伴い、発電容量の増加を背景に風力発電設備の大型化が進んでいる。その一方で、大型化により落雷によるブレード損傷や飛散などの被害が発生している。この対策として、風力発電設備に対して JIS C 1400-24:2023 に適合した落雷検出装置の設置を経済産業省が義務付けた。東光高岳の雷電流計測装置では、風車のタワー脚部にロゴウスキーコイルを設置することで落雷を検出する。風力発電設備の大型化に伴い、大口径ロゴウスキーコイルの需要が高まっている。しかし、大口径化を進めると高周波域特性の劣化が懸念される。本稿では、ロゴウスキーコイルの大口径化（25 m）を実現したので報告する。

1 はじめに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた再生可能エネルギーの導入拡大が求められている。その中で風力発電が注目を集めている。風力発電は年々導入が進んでおり、さらに近年では、陸上風力発電より発電容量の大きい洋上風力発電の導入が加速している⁽¹⁾。洋上風力発電の普及に伴い、発電容量の増加を背景に風力発電設備の大型化が進んでおり、落雷による風車ブレードの損傷や飛散、運用への支障などの被害が増加している。落雷による被害の対策として、経済産業省は風力発電設備へ JIS C 1400-24:2023⁽²⁾ に適合した落雷検出装置の設置を義務付けた⁽³⁾。

東光高岳の雷電流計測装置は、ロゴウスキーコイルを風車のタワー脚部に一周巻き付けて雷電流を測定することにより落雷を検出する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。風力発電設備の大型化によりタワーの径も大きくなっているため、それに合わせたロゴウスキーコイルの大口径化が求められている。しかし、ロゴウスキーコイルの大口径化により、高周波域特性の劣化が懸念される。

本稿では、この課題に対応した風車のタワー脚部に設置する洋上向け大口径ロゴウスキーコイル（コイル長：25 m）の開発および JIS C 1400-24:2023 への適合を証明するために規定された JEM 1515⁽⁶⁾ 型式試験の結果を報告する。

2 雷電流計測装置の仕様

2.1 JIS 規格と落雷検出装置

雷電流計測装置は、JIS C 1400-24:2023 の附属書 JA に規定されている落雷検出装置の要求性能を満足している。雷電流計測装置の電流計測性能仕様を表 1 に示す。

表 1 雷電流計測装置の計測仕様

項目	仕様
周波数帯域	0.1 Hz～300 kHz (−3 dB)
最大計測電流	100 kA, 200 kA (計測可能電流値 = 最大計測電流 × 1.2)
トリガレベル	最大計測電流 × 1%
電荷量演算範囲	0～9,999 C (分解能 1 C)
電流波高値計測精度	10 kA 以上：±10%以内 10 kA 未満：±1 kA 以内 (精度周波数範囲：1 Hz～100 kHz)
電荷量演算精度	10 C 以上：±15%以内 10 C 未満：±2 C 以内 (精度周波数範囲：1 Hz～10 kHz, 10 C 以上)
長時間雷撃電流波形	継続時間 1 s 未満 電流波高値 5 kA 程度 継続時間 1 s 以上 800 C 以下：−20%～+10% 1,000 C 以下：−20%～+40% 9,999 C 以下：−28%±15%以内
計測時間	1 s

2.2 計測原理⁽⁴⁾と周波数特性

ロゴウスキーコイルの計測原理と回路構成を図 1 に示す。ロゴウスキーコイルは、コイル内周を貫通する電流を検出し、その電流 $I(t)$ を電圧に変換して計測する。ロゴウスキーコイルで誘起される電圧 $e(t)$ は、式 (1) に示すように一次電流 $I(t)$ を微分した波形となる。これを積分し、式 (2) に示す一次電流に比例した電圧 $v(t)$ を出力する。また、低域補償回路と組み合わせることにより、低域周波数の電流も計測可能となる。

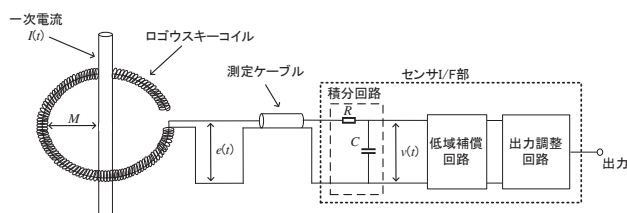


図 1 ロゴウスキーコイルの計測原理

$$e(t) = M \times \frac{dI(t)}{dt} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

$$v(t) = \frac{M}{RC} \times I(t) \quad [\text{V}] \quad (2)$$

M : 相互インダクタンス [H]

センサ I/F 部の特性は、図 2 に示すようにロゴウスキーコイルの微分特性と相対する積分特性になるように、低域補償回路と積分回路を加算し、フラットな周波数特性を実現している。

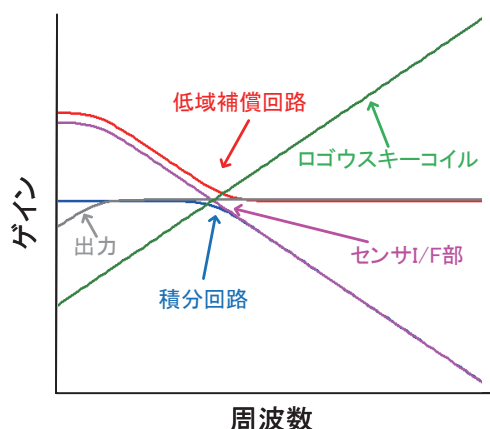


図 2 周波数特性の模式図

3 ログウスキーコイルの大口径化

3.1 大口径化の課題⁽⁷⁾

ロゴウスキーコイルを従来と同様の製作方法で大口径化した場合、式 (3) に示すようにコイル長 l に比べて、巻き数 N の 2 乗の増加による影響が大きく、自己インダクタンス L が増大する。図 3 に示す自己インダクタンス L (コイル: $L1$, コイルケーブル: $L2, L3$) と静電容量 C (コイル: $C1$, コイルケーブル: $C2$) によって共振が発生する。なお、コイルケーブル (同軸ケーブル) は 15 m 固定としている。共振周波数 f は式 (4) で決定されるため、 L の増大に伴い f は低下し、これに伴い、カットオフ周波数も低周波側に移動 (低下) するため、帯域が制限される。例えば、コイル長 25 m では、カットオフ周波数が約 290 kHz となり、仕様値の 300 kHz (−3 dB) を満足することができない。

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} \quad [\text{H}] \quad (3)$$

μ : 透磁率 [H/m] S : 断面積 [m^2]

N : 巻き数 l : コイルの長さ [m]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

f : 共振周波数 [Hz] L : 自己インダクタンス [H]

C : 静電容量 [F]

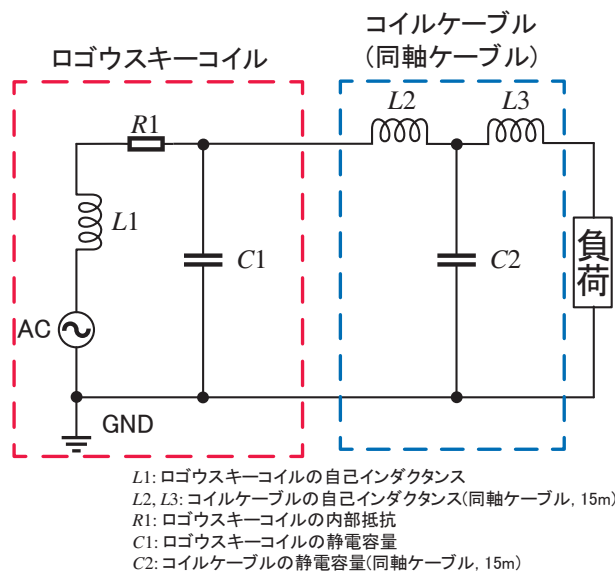


図 3 ログウスキーコイルとコイルケーブル (同軸ケーブル) の等価回路

3.2 大口径化の設計検討⁽⁷⁾

大口径のロゴウスキーコイルを従来の方法で製造した場合、共振周波数が低下する影響から仕様値を満足できない。そこで、仕様値を満足するための設計方法を検討した。まず、自己インダクタンス L の増加の影響が大きいため、巻き数を削減して自己インダクタンス L を低減させた。しかし、巻き数を減らすと式 (5) に示す相互インダクタンス M も低減してしまう。そのため、断面積を大きくすることで、相互インダクタンス M の低下を補填した。また、これらの設計変更に伴う出力電圧の変動に対しては、センサ I/F 部でのゲイン調整により装置仕様への適合を図った。設計変更したロゴウスキーコイルのシミュレーションを実施し、共振周波数が高周波側へ移り (図 4), カットオフ周波数 420 kHz と仕様値 300 kHz (−3 dB) を満足すること (図 5) を確認した。

$$M = \frac{\mu S N}{l} \quad [\text{H}] \quad (5)$$

μ : 透磁率 [H/m] S : 断面積 [m^2]

N : 巻き数 l : コイルの長さ [m]

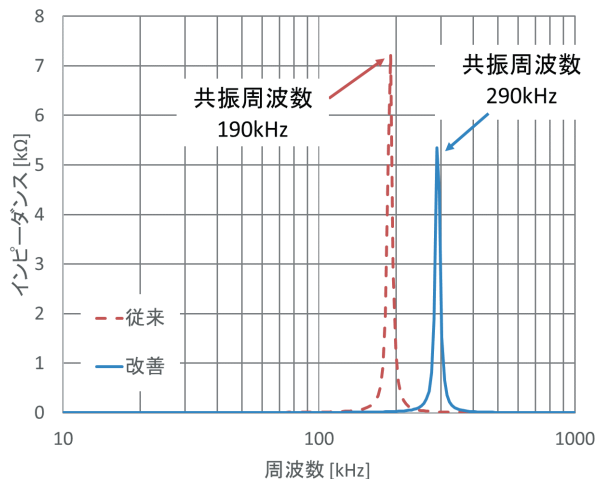


図4 ログウスキーコイルの共振周波数の比較
(シミュレーション結果)

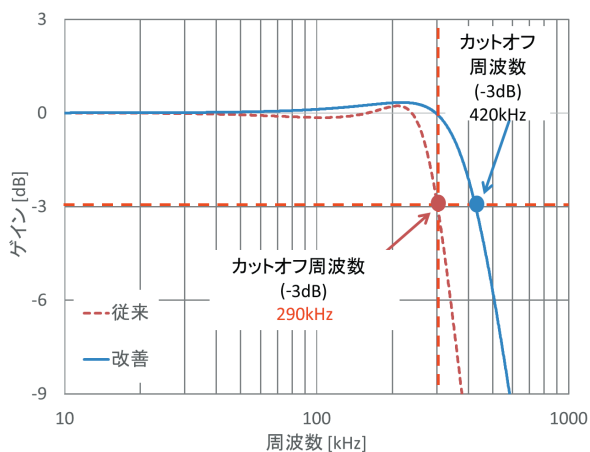


図5 ログウスキーコイルの高周波域特性
(シミュレーション結果)

4 電流計測性能試験方法

JIS C 1400-24:2023 の附属書 JA への適合を証明するためには、JEM 1515 に規定されている型式試験に合格しなければならない。以下に、型式試験の方法を述べる。

4.1 電流検出周波数帯域試験⁽⁷⁾

JEM 1515 の電流検出周波数帯域試験では、印加電流を電流センサに鎖交させたときの、センサ I/F 部の出力信号を測定し、周波数帯域を確認する。印加波形は正弦波または減衰振動波と規定されている⁽⁶⁾。

電流検出周波数帯域試験の回路構成を図 6 と図 7 に示す。本試験は、測定する周波数によって回路構成が異なる。発生電流は 4 A 一定とし、印加線とロゴウスキーコイルを相互に複数回（印加線：10 ターン，ロゴウスキーコイル：5 ターン）巻き付ける。正弦波電流を印加し、印加電流波形とセンサ I/F 部の出力電圧波形を

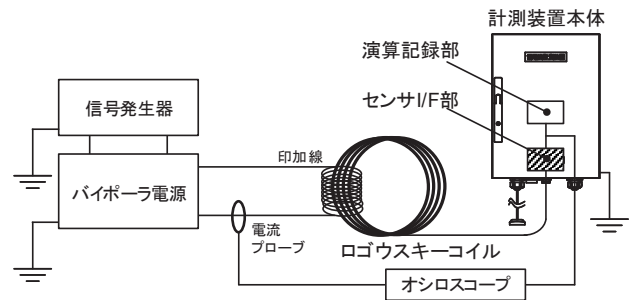


図6 電流検出周波数帯域試験回路構成
(測定周波数 20 kHz 以下)

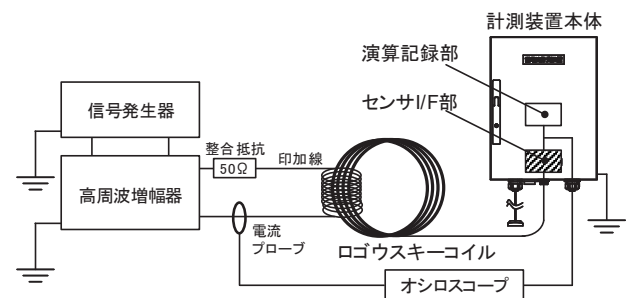


図7 電流検出周波数帯域試験回路構成
(測定周波数 20 kHz 以上)

周波数ごとに数値を読み取り、換算した電流波高値を比較した。

4.2 電流値検出試験

JEM 1515 の電流値検出試験は、10/350 μ s 電流インパルス波形を印加し、装置本体が検出した電流波高値の検出精度を確認する⁽⁶⁾。電流値検出試験の回路構成を図 8 に示す。印加線とロゴウスキーコイルを相互に複数回巻き付けることにより、等価的に電流波高値 200 kA 相当までを印加した。

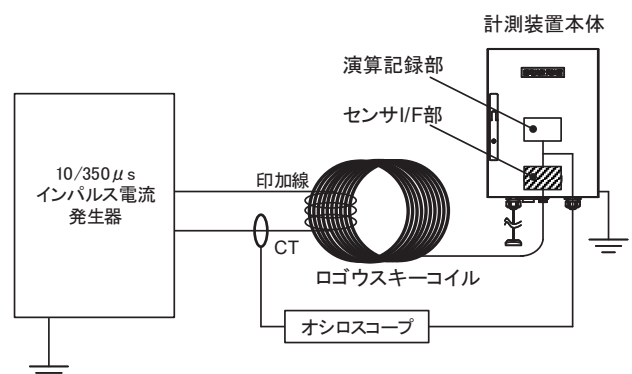


図8 電流値検出試験回路構成

4.3 電荷量値検出試験

JEM 1515 の電荷量^{注1)}値検出試験は、長時間雷撃電流波形または短時間雷撃電流波形で実施し、装置本体が検出した電荷量の検出精度を確認する⁽⁶⁾。本試験では、

矩形波電流発生装置を用いて、長時間雷撃電流波形を印加した⁽⁸⁾。電荷量値検出試験回路構成を図9に示す。印加線とロゴウスキーコイルを相互に複数回巻き付けることにより、発生電流約500 Aの継続時間を調整して、等価的な電荷量をロゴウスキーコイルに印加している。最大測定電荷量値検出試験では、計測時間1 sを超える継続時間1.1 sの矩形波を印加した。

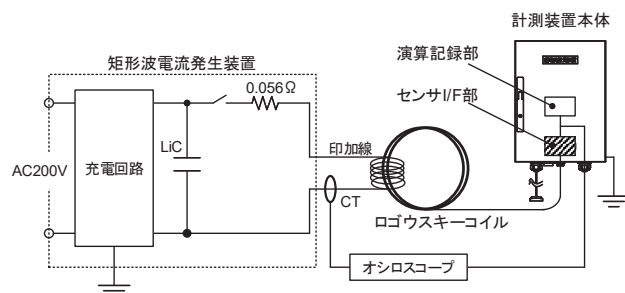


図9 電荷量値検出試験回路構成

5 電流計測性能試験結果

5.1 電流検出周波数帯域試験

電流検出周波数帯域試験は、最大計測電流100 kAおよび200 kAの装置で実施した。印加した電流波形とセンサI/F部の出力波形の例（300 kHz）を図10に示す。測定する周波数範囲で印加電流が200 Aになるように調整している。利得特性を図11および図12に示す。結果として0.1 Hz（−3 dB）および300 kHz（−3 dB）を満足していることを確認した。また、高周波域カットオフ周波数は430～440 kHz程度であることを確認した。

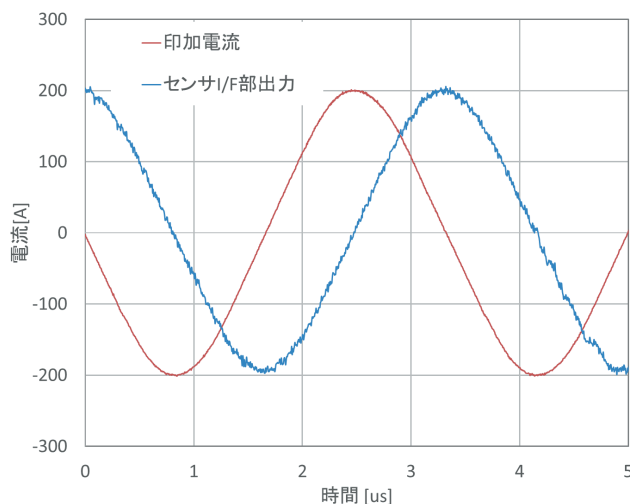


図10 印加電流波形とセンサI/F部出力波形の例

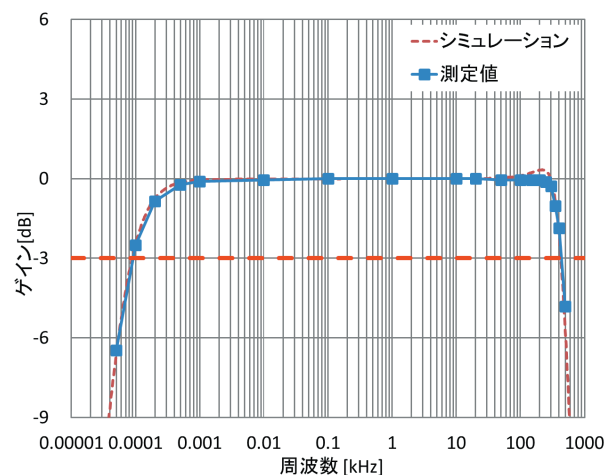


図11 電流検出周波数帯域試験の利得特性
(最大計測電流100 kA)

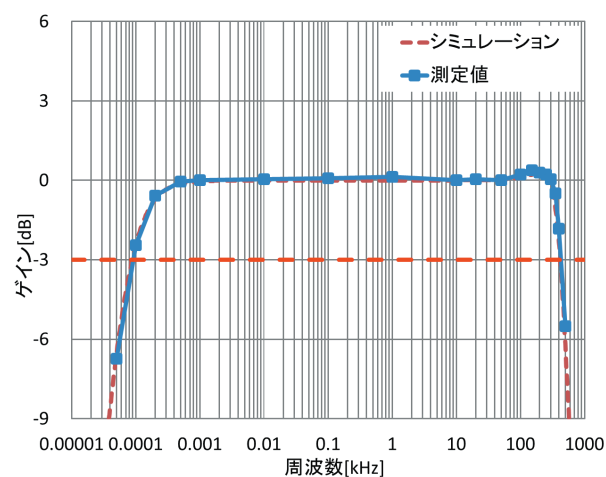


図12 電流検出周波数帯域試験の利得特性
(最大計測電流200 kA)

5.2 電流値検出試験

印加した電流波形とセンサI/F部の出力波形の例を図13に示す。電流値検出試験の結果を表2に示す。表1の計測精度（10 kA以上：±10%以内、10 kA未満：±1 kA以内）を満足していることを確認した。

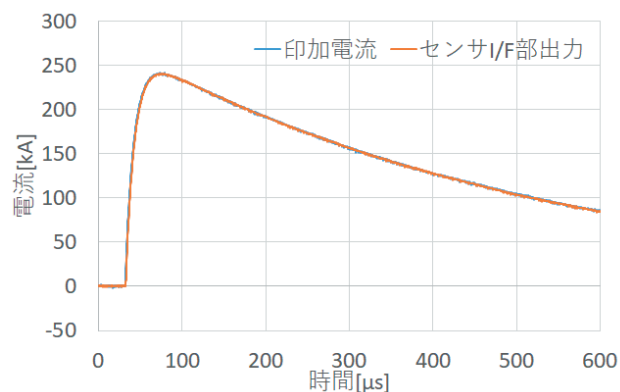


図13 印加電流波形とセンサI/F部出力波形の例

表 2 電流値検出試験結果

最大計測電流	印加電流	正極性		負極性	
		比誤差	電流差	比誤差	電流差
100 kA	1 kA	11.9%	0.13 kA	2.2%	0.02 kA
	60 kA	-2.4%	—	-1.1%	—
	100 kA	-2.4%	—	-1.4%	—
	120 kA	-2.8%	—	-1.4%	—
200 kA	2 kA	2.3%	0.05 kA	2.5%	0.05 kA
	120 kA	-0.6%	—	-0.3%	—
	200 kA	-0.1%	—	0.2%	—
	240 kA	-0.9%	—	-0.2%	—

5.3 電荷量値検出試験

継続時間 1 s 未満（電流波高値約 5 kA）の矩形波を印加した 100 C から 2,000 C までの電荷量誤差の測定結果を図 14 と図 15 に示す。表 1 の演算精度（800 C 以下：-20%～+10%，1,000 C 以下：-20%～+40%）を満足していることを確認した。

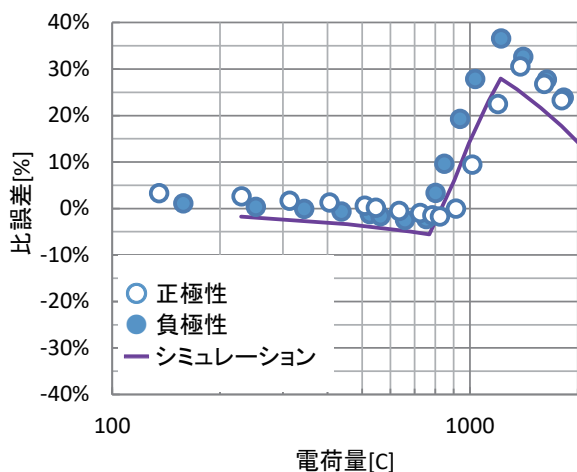


図 14 電荷量測定誤差（最大計測電流 100 kA）

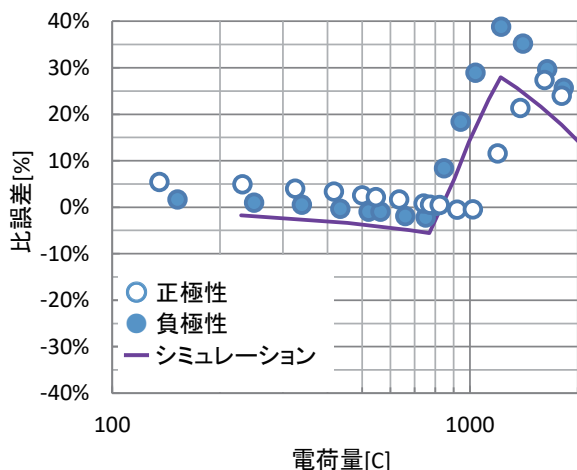


図 15 電荷量測定誤差（最大計測電流 200 kA）

印加した継続時間約 1.1 s（電流波高値約 10 kA）の矩形波（約 9,700 C，正極性）の電流波形とセンサ I/F 部の出力波形の例を図 16 に示す。この波形の電荷量誤差の測定結果は、-26.3%（負極性-27.8%）であり、表 1 の演算精度（9,999 C 以下：-28%±15%以内）を満足していることを確認した。

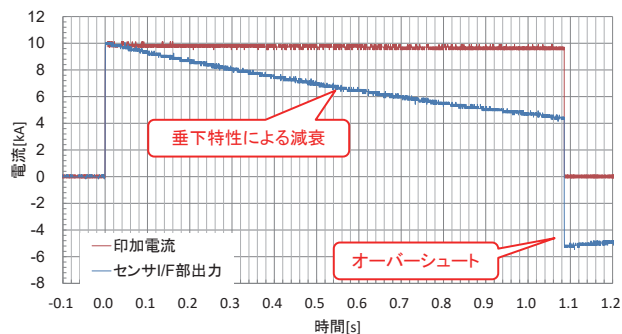


図 16 印加電流波形とセンサ I/F 部出力波形の例

周波数帯域下限（低周波域カットオフ周波数：-3 dB）に伴い直流成分を測定できないロゴウスキーコイル方式の雷電流計測装置では、図 16 に示すように、矩形波電流印加中（継続時間内）には「下垂特性による減衰^{注2)}」が発生し、印加終了後には「オーバーシュート」が発生するため、両者の影響（単独，相殺）により、電荷量の測定誤差が異なっている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

6 おわりに

本稿では、課題となっていた高周波域特性の劣化への対策を施した、大口径ロゴウスキーコイル（コイル長：25 m）の開発，および JIS C 1400-24:2023 に適合するための JEM 1515 に基づく型式試験の電流計測性能結果について報告した。

今後は、建設予定の 10 MW 以上の洋上風車向けに 25 m ロゴウスキーコイルの製品化を進め、洋上風力発電設備の安定運用に貢献していく予定である。

参考文献

- (1) 経済産業省：「洋上風力の産業競争強化に向けた官民協議会」
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/index.html
- (2) 日本産業標準調査会審議：「風力発電システム—第 24 部：雷保護 JIS C 1400-24:2023」，2023 年 1 月 20 日改正
- (3) 経済産業省：発電用風力設備の技術基準の解釈（令和 6 年 10 月 1 日施行），第 7 条
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/denjikokuji.html
- (4) 藤岡：「風力発電設備用雷電流計測装置の電流計測性能」，東光高岳技報 No.4 2017，p.39（2017）

https://www.tktk.co.jp/report/pdf/2017/giho2017_17.pdf

- (5) 酒井：「風力発電設備用雷電流計測装置」，東光高岳技報 No.6 2019，p.24（2019）
https://www.tktk.co.jp/report/pdf/2019/giho2019_10.pdf
- (6) 日本電機工業会規格：「JEM 1515 風車用雷電流検知形落雷検出装置の試験方法」，2024 年 12 月 20 日改正
- (7) 安岡一晟，藤野守也，藤岡博文：「風力発電設備用雷電流計測装置における大口径ロゴウスキーコイルの周波数帯域試験の最適化」，電気学会高電圧研究会，HV-25-099（2025）
- (8) 藤岡博文，安岡一晟，藤野守也，小槌淳：「矩形波電流発生装置による風力発電設備用雷電流計測装置の電荷量値検出試験結果」，電気学会高電圧研究会，HV-25-049（2025）

■ 語句説明

- 注 1) 電荷量：雷放電の継続時間全域における雷電流の時間積分値。
- 注 2) 垂下特性による減衰：直流電流成分を計測する際，電流センサの低周波特性の影響で出力波形が時間の経過とともに徐々に低下する現象。

安岡 一晟

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

藤岡 博文

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

藤野 守也

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

安定した電力供給および電力品質の維持に貢献する高調波解析技術

■ 森 佑介
Yusuke Mori

カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの導入が進められているなかでは、電力の安定供給や電力品質を維持するために様々な課題への対応が必要であり、対策を検討するにあたって電力系統解析は欠かすことができない。電力系統解析技術は多岐にわたるが、その一つである高調波解析技術は再生可能エネルギーの導入拡大において重要な役割を果たす。特に長距離ケーブルで系統連系する場合、系統のインピーダンスの変化にともない、高調波が共振して拡大する可能性があるため、本技術による検討が欠かせない。本稿では、電力系統解析ソフト PowerFactory を用いて、定量的に高調波電圧の拡大倍率や高調波共振対策の効果を解析した事例を紹介する。

1 はじめに

近年、世界的に環境意識が高まり、脱炭素化に向けた流れが強まっている。日本においても、2020 年に「2050 年カーボンニュートラル」が宣言された。その実現に向けた第 7 次エネルギー基本計画では、電源構成における再生可能エネルギー（以下、再エネ）の比率を 4～5 割程度に拡大する方針が示されている⁽¹⁾。このようにカーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの導入が進められていくなかで、以下のように様々な課題への対応が必要となる。

- (1) 送電可能容量のひっ迫
- (2) 電力系統事故時の安全確保や復旧対策の迅速化
- (3) 火力発電などの需給調整力・周波数維持能力の低下
- (4) 慣性力不足による周波数変動率の増加
- (5) 電圧変動の増大
- (6) 高調波や電圧フリッカなどによる電力品質への影響

これらの課題に対して、様々な対応策やルール制定の検討が進められているが、各検討過程において、電力系統解析技術の活用は欠かすことができない。また、上記課題に対して、必要となる電力系統解析技術は多岐にわたるため、技術者には幅広い知見や技術が要求される。これまでの東光高岳技報でも、再エネ設備を長距離ケーブルで系統連系する場合に必要な解析技術⁽²⁾、サージ^{注1)}などの瞬時値解析技術⁽³⁾、再エネ連系時の配電系統における電圧変動解析技術⁽⁴⁾について取り上げてきた。

本稿では、再エネ設備が電力系統に接続される際の高調波による電力品質への影響に着目する。電力系統の高調波が大きくなると、最悪の場合、電力設備の焼損事故・停電などにつながる。そのため、高調波に関わる現象を把握し、適切な設備構成や対策を講じることが重要である。そこで本稿では、高調波障害の防止に有効な解析技術として、定量的に高調波の拡大倍率や対策の効果を確認した高調波解析事例を紹介する。

2 高調波とは

電力系統における電力品質として、電圧の振幅・周波数が一定であること、三相の位相差が 120° で振幅が等しいことの他、一つの基本周波数成分（日本国内においては 50 Hz もしくは 60 Hz）のみを含むことが理想である。実際の電力系統では基本周波数以外の周波数成分を含むが、基本周波数の整数倍の周波数となる電流・電圧のことを高調波電流・電圧とよぶ。また、その整数倍のことを次数とよぶ。

本章では、高調波の発生要因、高調波共振現象、高調波による障害について述べ、再エネ設備の系統連系時における高調波解析技術の必要性について記載する。

(1) 高調波の発生要因

テレビやエアコンなどの家電機器、インバータ機器のようにダイオードなどのスイッチングデバイスが含まれる機器が接続されると、その入力電流波形はきれいな正弦波にならず、高調波を含んだ波形となる（高調波電流）。この高調波電流が電力系統に流れ込むと電圧ひずみが大きくなる。電力系統には不特定多数の高調波発生源が接続されており、それらが広範囲に分布するため、発生源の特定が困難なことも多い。太陽光発電や風力発電などの再エネ電源はインバータで直流を交流に変換してから電力系統に接続しているため、再エネ設備の導入が増加すると高調波の発生源も増えることになる（風力発電は交流で発電するが、一度直流に変換した後、再度安定した交流に変換している）。系統連系規程⁽⁵⁾では、インバータからの高調波流出電流について、総合電流ひずみ率を 5%、各次電流ひずみ率を 3% 以下にすることが望ましいと記載されている。なお、総合電流ひずみ率、各次電流ひずみ率は以下の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\text{総合電流ひずみ率} &= \frac{\text{高調波電流の実効値}}{\text{基本波電流の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \\ \text{各次電流ひずみ率} &= \frac{\text{各次高調波電流の実効値}}{\text{基本波電流の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{I_n}{I_1} \times 100\%\end{aligned}$$

ここで、 I は電流、下添え字は次数をあらわす。 I_1 は基本波電流である。

(2) 高調波共振現象

前述のとおり、電力系統には不特定多数の高調波発生源が接続されているため、高調波を完全になくすることはできない。電力品質の維持や高調波による障害を防止するため、「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」において、電力系統全体で維持すべき高調波環境目標レベルとして、配電系統は総合電圧ひずみ率5%、特別高圧系統は総合電圧ひずみ率3%と定められている⁽⁶⁾。なお、総合電圧ひずみ率は、以下のように前述の総合電流ひずみ率と同様の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\text{総合電圧ひずみ率} &= \frac{\text{高調波電圧の実効値}}{\text{基本波電圧の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1} \times 100\%\end{aligned}$$

この電力系統の高調波電圧について、いくつかの観測事例が報告されており⁽⁷⁾⁽⁸⁾、いずれの電圧階級においても、第5次高調波が最も大きく、次いで第7次高調波などが大きいことが知られている。再エネ設備を系統連系した際には、この電力系統に存在している高調波電圧ひずみを共振現象によって拡大させないことが重要である。本現象は、図1に示すように再エネ設備を電力系統に接続したことで、インピーダンスが変化することに起因する。同図は、高調波を含む電圧源、連系点から電力系統側をみたインピーダンス Z_{An} （背後電源インピーダンス）と連系点から再エネ設備側をみたインピーダンス Z_{Bn} にまとめている。3章で本現象の解析事例を記載しているが、そこでは第5次高調波(V_5)が1.0%、第7次高調波(V_7)が0.5%含まれるものとした。同図内の高調波拡大倍率 k の計算式にあるとおり、 Z_{An} と Z_{Bn} の和が極小になる周波数において高調波共振が発生し、連系点の高調波が拡大することになる。再エネ設備が系統連系する場所から離れており長距離ケーブルで連系する際には、インピーダンスが大きく変化するため、高調波共振現象の発生や次項に記載する高調波障害の発生リスクについてよく検討する必要がある。

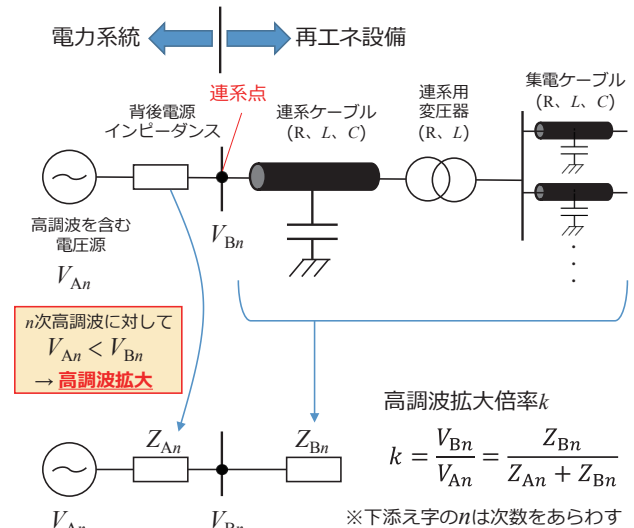


図1 高調波共振現象のイメージ図

(3) 高調波障害と系統解析の必要性

高調波障害としては、進相コンデンサ^{注2)}およびその直列リアクトル^{注3)}の発熱や異音が主であるが、最悪の場合は焼損に至り、重大事故や停電になる可能性がある。その他にも電力機器や家電機器などに、損失増加や誤作動といった様々な悪影響をおよぼすリスクもある。そのため、適切な高調波抑制対策を講じ、高調波を発生させない、共振拡大させないことが重要である。再エネに利用されるPCS（パワーコンディショナ）はPWM制御^{注4)}やフィルタにより、低次の高調波ひずみが少ない正弦波が出力されるため、本稿ではこれ以降、高調波共振現象に着目する。

高調波共振現象については、シンプルな構成であれば、高調波共振の発生リスクを概略的に計算することができる。しかし、実際の再エネ設備の系統連系において、詳細かつ効率的に共振周波数や高調波の拡大倍率、高調波対策の効果を把握するには電力系統解析ソフトを活用する必要がある。特に評価対象の規模が大きく、複雑な場合はその必要性が高い。また、連系ケーブルが長い場合に高次の高調波共振現象を精度良く計算したい際には、分布定数回路^{注5)}によるモデル化が必要となり、理論計算による検討が極めて困難なこともある。以上のことから、電力系統解析ソフトを有効に活用し、高調波による電力品質の低下を検討し、これにともなう電力機器や家電などに悪影響を生じないようにすることが大事である。

次章では、高調波共振現象による高調波電圧の拡大倍率やフィルタによる対策の効果を定量的に解析した事例を紹介する。

3 高調波共振現象の解析事例

3.1 解析モデル

(1) モデル概要および高調波電圧の目標値

総合電力系統解析ソフト PowerFactory⁽⁹⁾ を用いて、**図 2** に示すモデルで高調波共振解析を実施した。本モデルは同一変電所母線に二つの再エネ設備が連系されたモデルである。連系する系統は特別高圧系統を想定しており、総合電圧ひずみ率を 3% 以下にする必要がある。

(2) 電力系統側のモデル

実際の電力系統には様々な次数の高調波電圧を含むが、ここではわかりやすくするため、主要な第 5 次高調波、第 7 次高調波のみ含む電圧源としてモデル化した。本モデルでは、連系点の背後に第 5 次高調波 (V_5) が 1.0%、第 7 次高調波 (V_7) が 0.5% 含まれるものとした。また、系統連系する変電所の変圧器および背後電源インピーダンス (着目した点から上位系統に存在するインピーダンス) をモデル化した。

(3) 再エネ設備側のモデル

再エネ設備側は、連系用のケーブル、連系用変圧器、各発電機出力を集電するためのケーブルで構成した。連系用のケーブルについては、再エネ発電設備と系統連系点が離れており、長距離のケーブルで接続することを想定している。そのため、連系ケーブルは大きな静電容量を有しており、電力系統の背後電源インピーダンスや変圧器のインダクタンス成分と共振することで高調波を拡大させる可能性がある。また、**図 2** に示す連系 1 (青枠内) と連系 2 (黄枠内) は同様の構成であるが、連系 2 のほうが連系点と離れており、約 1.5 倍のケーブル長

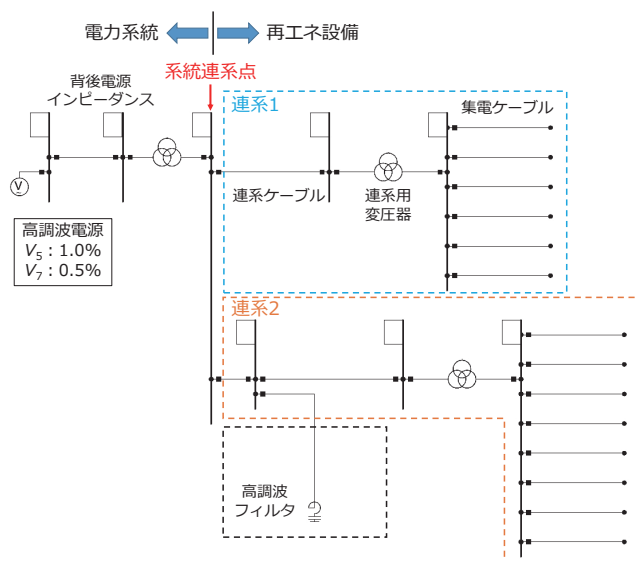


図 2 高調波共振解析モデル (PowerFactory)

を設定している。また、連系 2 では高調波対策用のフィルタの有無を切り替えられるようにし、その効果を確認できるようにしている。なお、この高調波フィルタは第 5 次高調波を対象とした単一同調フィルタ^{注 6)} のみで構成している。

(4) 解析パターン

同一系統に再エネ設備の連系が増えると、インピーダンスが変化し、共振周波数も変化する。また、再エネ設備内の事故や保守・点検作業にともない連系ケーブルを系統から切り離すことも考えられる。したがって、それぞれの連系状態において高調波共振のリスクを確認する必要がある。本稿では、**図 2** に示した解析モデルに対して、**表 1** の組合せで解析を実施した。

表 1 解析条件

No.	系統連系状態	高調波フィルタ有無
1	連系 1 のみ	なし
2	連系 2 のみ	なし
3	連系 1 + 連系 2	なし
4	連系 1 + 連系 2	あり

3.2 解析結果

高調波共振現象の解析結果を**図 3** に示す。同図は系統連系点の第 5 次高調波含有率 V_5 、第 7 次高調波含有率 V_7 、この二つの高調波から計算した総合電圧ひずみ率を示している。なお、同図内の系統背後の値は、系統連系前に存在する高調波含有率の設定値である。連系 1 (No.1) の状態になると、第 5 次高調波、第 7 次高調波はともに増加しているが、総合電圧ひずみ率は高調波環境目標レベルの 3% 以下である。連系 2 (No.2) の状態になると第 5 次高調波がさらに増加しているが、同じく高調波環境目標レベルの 3% 以下である。連系

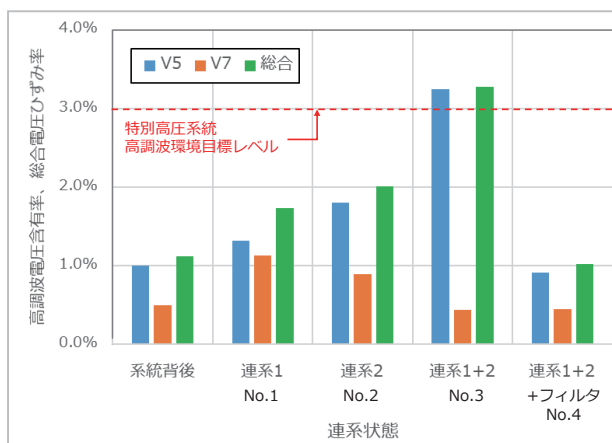
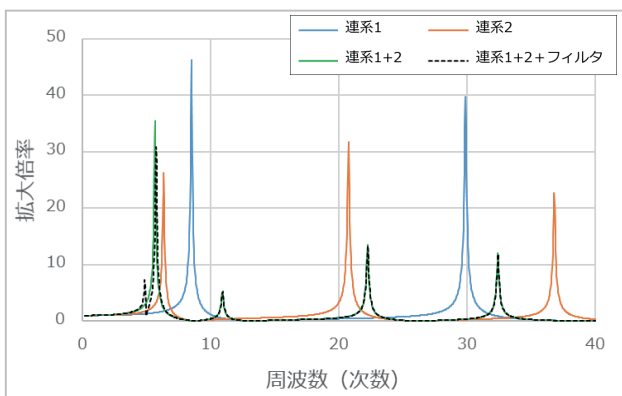


図 3 各条件の高調波含有率および総合電圧ひずみ率

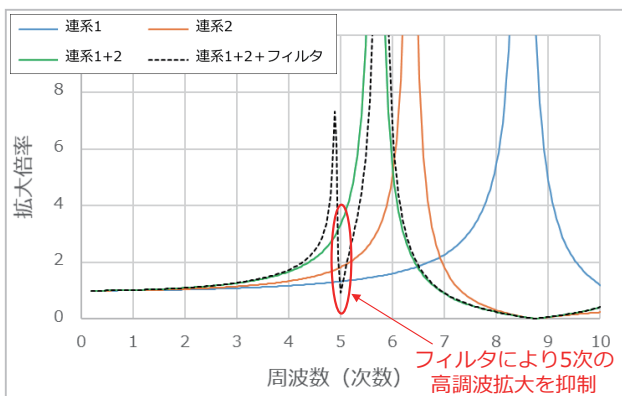
1+連系2 (No.3) の状態になると、第5次高調波が大きく増加したことで、総合電圧ひずみ率が高調波環境目標レベルの3%を超過しており、何らかの対策が必要であることがわかる。その対策としてフィルタを設置した場合 (No.4) は、第5次高調波を十分抑制でき、効果的に対策できていることがわかる。以上のように、電力系統解析技術を活用することで、高調波共振の対策の必要性や対策の効果を定量的に確認することができる。

本解析で用いた電力系統解析ソフト PowerFactory では、上記のように第5次高調波や第7次高調波が何倍に拡大するかだけでなく、各周波数に対するインピーダンスの変化を考慮し、周波数と拡大倍率の関係を求めることができる。この手法を「周波数掃引解析」という。

図4に周波数掃引解析の結果を示す。連系1の状態に比べて、連系2の状態のほうが、第1共振周波数（最も低い共振周波数）が若干低くなっていることがわかる。共振周波数はインダクタンスと静電容量の積が大きいほど低くなるため、連系1よりも連系ケーブルが長く、大きな静電容量とインダクタンスを有している連系2のほうが低くなったと考えられる。連系1+連系2になると、再エネ設備側の静電容量が合成されて大きくなるため、さらに第1共振周波数が低下している。図4(b)は第5次高調波付近を拡大表示したものである。



(a) 40次まで



(b) 10次まで拡大

図4 各条件の高調波拡大倍率

連系1+連系2の第1共振周波数は、第5次の周波数より若干高いものの、その近傍の周波数帯においても高い拡大倍率となっていることがわかる。その結果、図3で示したように連系1+連系2において、第5次高調波含有率および総合電圧ひずみ率が高い値になっている。対策としてフィルタを追加した場合には、第5次高調波付近の拡大倍率が低下していることがわかる。ここで設定したフィルタは、第5次高調波のみを対象とした単一同調フィルタのため、第5次高調波から離れた周波数帯の特性はフィルタがないときと同等である。このように周波数掃引解析により、各共振周波数や系統連系による高調波拡大倍率の変化を詳細に把握することができる。

図4に示したとおり、共振周波数においては、当該周波数成分の拡大倍率が大きくなり、高調波障害のリスクは非常に高くなる。したがって、高調波共振による高調波の拡大を防ぐためには、高調波（特に第5次や第7次）の周波数と共振周波数を一致させないことが最低限必要と考える。また、高調波の周波数と共振周波数が近い場合にも、高調波が環境目標レベル以上に拡大することがあることも本解析事例で示した。このような高調波拡大現象により、前述の高調波障害を発生させないためには、事前の十分な検討や本稿で紹介した解析技術による評価が重要だと考える。

4 おわりに

カーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの導入拡大および有効活用は非常に重要である。その一方で、電力の安定供給と電力品質を維持するためには、様々な課題に対応する必要がある。本稿では、そのなかでも高調波問題、特に高調波共振現象について着目し、定量的に高調波電圧の拡大倍率や高調波共振対策の効果を解析した例を紹介した。大規模な再エネ設備を電力系統に接続する場合には、本稿で紹介した高調波解析以外にも冒頭に記載したような様々な解析技術が必要である。それらの解析結果を総合的に評価したうえで、適切な電力設備構成や運用方法を決定することが重要だと考えている。今後も、本稿やこれまでの東光高岳技報で取り上げた電力系統解析技術だけでなく、様々な解析技術を活用し、再エネの導入拡大はもちろんのこと、高度化する電力系統の構築・運用にも貢献していきたい。

■参考文献

- (1) 資源エネルギー庁：「第7次エネルギー基本計画の概要」，(2025)
- (2) 森佑介，滝澤明広：「再生可能エネルギー導入拡大に向けた系統連系解析」，東光高岳技報，No.8 (2021)
- (3) 森佑介：「電力の安定供給を支える解析技術

PowerFactory における瞬時値解析機能の妥当性検証」,
東光高岳技報, No.11 (2024)

- (4) 森佑介:「電力の安定供給と高度利用へ貢献する
PowerFactory による電圧変動解析技術」, 東光高岳技
報, No.12 (2025)
- (5) 日本電気協会系統連系専門部会編:「系統連系規程
(JEAC9701-2024)」, (2024)
- (6) 経済産業省:「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高
調波抑制対策ガイドライン」, (2004)
- (7) 電気協同研究会高調波対策専門委員会編:「電力系統に
おける高調波とその対策」, 電気協同研究, 第 46 巻,
第 2 号 (1990)
- (8) 福田泰史:「電力系統における高調波の実態」, 平成 31
年電気学会全国大会 (2019)
- (9) 「系統解析ソフトウェア 独国 DIgSILENT 社製
PowerFactory」, 東光高岳技報, No.9 (2022)

■語句説明

- 注 1) サージ: 落雷時やスイッチのオン・オフによって瞬間
的に発生する過電圧や過電流のこと。
- 注 2) 進相コンデンサ: 電気の力率を改善することで電気の
利用効率を高めるための機器。
- 注 3) 直列リアクトル: ここでは進相コンデンサに直列に接
続されるリアクトルのことをさす。高調波に対して誘
導性となるように設定し, 同じく誘導性である電力系
統との共振を防ぐ。
- 注 4) PWM 制御: Pulse Width Modulation 制御。高速ス
イッチングにより, 出力波形を制御する方法。
- 注 5) 分布定数回路: 距離の概念を考慮した電気回路で同一
線路上でも位置によって電圧や電流が変化する回路。
- 注 6) 単一同調フィルタ: 特定の周波数に対してのみ低いイ
ンピーダンスとなるフィルタ。

森 佑介

戦略技術研究所 技術開発センター
解析・試験技術グループ 所属

配電系統の再エネ電源拡大を見据えた 系統用蓄電池の制御方式検討

■ 山下 裕輔

Yusuke Yamashita

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、太陽光発電（PV）は今後も導入が増える見通しである。特に郊外地域の亘長（こうちょう）が長い配電線では、電圧が規定の適正範囲から外れる電圧逸脱や、送電容量の空きがなくなる系統混雑が起きるおそれがある。これらの課題に対し、将来的な普及が見込まれる系統用蓄電池（BESS）の活用が注目されている。当社は PV ならびに BESS が普及した将来の配電系統の高度化に貢献する技術開発に取り組んでいる。本稿ではこの取り組みの一例として、電圧逸脱と系統混雑を解消しつつ、BESS の必要な調整容量の最小化を図る制御指令決定手法と数値シミュレーションによる評価を紹介する。

1 はじめに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、2025 年に策定された第 7 次エネルギー基本計画では再生可能エネルギー（以下、再エネ）主力電源化のため、2040 年に総発電量の 23～29% が太陽光発電（以下、PV）という電源構成となることが見込まれており、PV は今後も高い推移での導入が増える見通しである。一方で、発電出力が天候により大きく変動する PV の導入拡大にともない、周波数変動や電圧逸脱^{注1)}、系統混雑^{注2)}、余剰電力の発生といった悪影響を電力系統へ与える可能性がある。特に、線路亘長（こうちょう）^{注3)} が長くメガソーラーの連系が多い郊外地域の配電系統では電圧逸脱と系統混雑の発生が懸念されている。

電圧逸脱と系統混雑への対策として、配電線路の新設や電線の太線化といった期間とコストを要する設備増強が一般的に実施されるが、それに代わる対策の一つとして、系統用蓄電池（以下、BESS）の活用が考えられている^{注1)}。BESS は、日中の PV による余剰電力を充電し、電力需要の高い夜間に放電することが可能であり、再エネ電源比率の拡大のためにその必要性が高まっている。

図 1 に示すように、系統混雑には BESS の充電による有効電力（P）制御、電圧変動には無効電力（Q）制御が有効であると考えられている。しかし、配電線内に

複数連系される BESS と PV に対して P と Q の制御（以下、PQ 制御）を決定する方法は確立されていない。

当社は、系統運用者やアグリゲーターを通じて BESS と PV が集中的に制御される将来の配電系統を想定し、再エネ電源の拡大と制御の高度化に貢献する技術開発に取り組んでいる⁽²⁾⁽³⁾。本稿では、電圧逸脱と系統混雑を解消するために必要な BESS の調整容量^{注4)}を表す MWh 容量および MVA 容量を最小限とすることを目的とした制御手法を検討し、数値シミュレーションにより評価した結果を紹介する。

2 配電系統の系統制約課題を解決する蓄電池制御の活用

PV 出力による電圧逸脱と系統混雑を解消するために、PQ 制御を活用する際、配電系統に連系される BESS の調整容量確保に関して想定される課題を下記に示す。

①適切な BESS 調整容量の確保

BESS の PQ 制御による電圧逸脱・系統混雑解消のため、適切な BESS の調整容量の把握と確保が求められる。しかし、再エネ出力や負荷変動の予測誤差の存在や、BESS の SOC（充電率）の管理が不適切であると、事前に計画する調整容量からの不足や余剰が発生する。

② BESS および PV を含めた PQ 制御の配分

系統運用者やアグリゲーターが保有する BESS は、PV の導入設備容量や配電線上の連系位置といった系統構成の差によって、必要となる PQ 制御や、その制御配分が異なる運用ケースが想定される。

③ BESS 調整容量の最小化

再エネ導入量が多くなるほど必要な BESS の調整容量が増え、そのためのコストも増大する。特に、BESS の所有者は系統運用者に限らず、他の蓄電池事業者や再エネ事業者が保有していることから、すべての出力調整能力を系統制約解消のために自由に

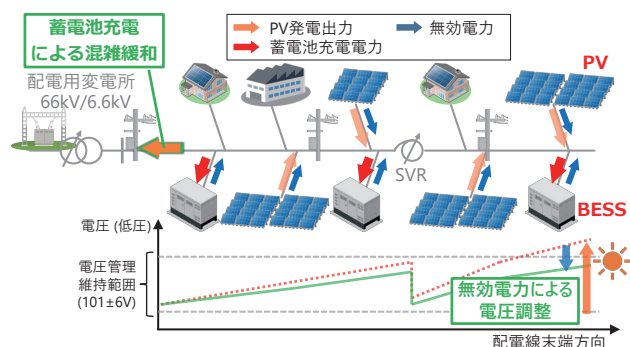


図 1 配電線の電圧上昇と系統混雑の抑制イメージ

利用することは難しく、系統制御のために利用可能な BESS の PQ 制御は限定される。したがって、BESS の調整容量は最小限にすることが望ましい。

本稿では上記課題のうち③に着目し、電圧逸脱および系統混雑の解消に必要な BESS 調整容量の最小化を目的とした制御手法を提案し、数値シミュレーションにより効果を比較評価する。

3 シミュレーション評価

3.1 BESS 調整容量低減のための制御手法

本節では、BESS と PV が普及拡大した将来の配電系統を想定し、電圧逸脱と系統混雑を解消するために必要な BESS の調整容量を最小限にする制御手法を提案する。

(1) 想定する制御システム

想定する制御システムを図 2 に示す。このシステムでは、配電線に連系している PV および BESS と制御サーバーとの間の通信において、双方向に計測値情報と制御指令を受け渡し可能なスマートインバータ・DERMS の仕組みを想定する⁽²⁾⁽³⁾。図 2 では、INV がスマートインバータ、制御サーバーが DERMS に対応する。また、制御サーバーは系統運用者やアグリゲーターが保有し、線路インピーダンスや PV・BESS の定格容量および連系箇所等の固有データは、制御サーバーが把握可能な基礎情報であることを前提とする。

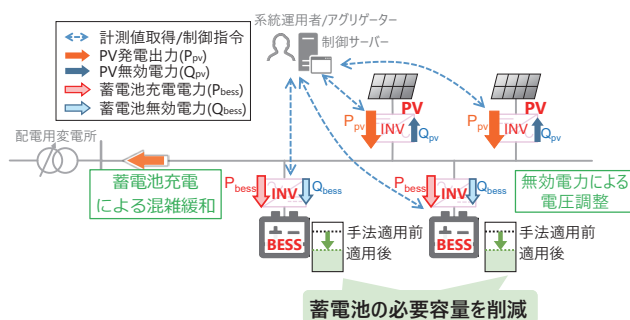


図 2 本検討で想定する制御システム

(2) 制御手法の処理手順

BESS の必要調整量低減のための制御手法について、一連の処理フローを図 3 に示す。本手法は、BESS の P 制御値 ΔP_{BESS} 、BESS・PV の Q 制御値 ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV} を変更した状態の潮流計算^{注 5)}により得られる配電線各所の電圧・電流値の推定結果に基づいて、出力制御指令を決定するものである。なお、 ΔP_{BESS} と ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV} の制御指令値は、制御対象とする複数の BESS および PV の合計値とする。

具体的な手順は以下のとおりである。

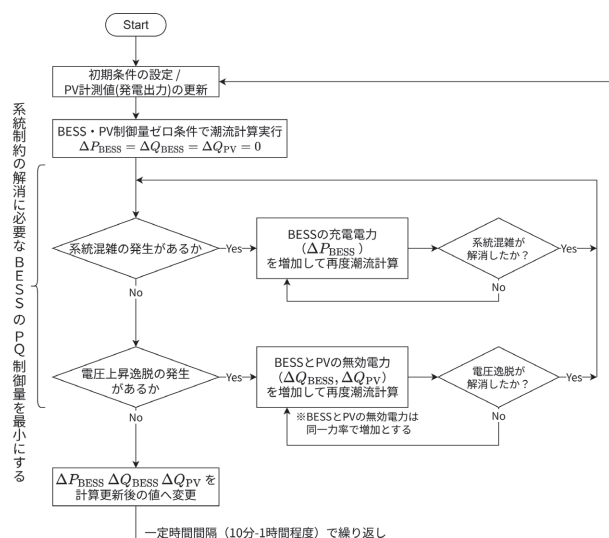


図 3 提案手法の処理フロー

- 初期条件（線路インピーダンス、PV の連系箇所と定格容量）の設定と、PV の発電出力計測値の定周期取得データを更新する。また、負荷が消費する電力に関しては、スマートメーターによる実測値もしくは過去実測に基づく推定値を用いる。
- 充電電力 ΔP_{BESS} と無効電力 ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV} を交互に変化させながら繰り返し計算し、系統混雑と電圧上昇逸脱の両方が解消するまで ΔP_{BESS} と ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV} を変更する。
- 最終的に系統混雑と電圧上昇の双方の逸脱が解消した後の ΔP_{BESS} と ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV} 、つまり必要な PQ 制御量の最小値として、制御指令値を更新する。
- 一定時間周期で上記の処理を繰り返す。

本手法の特徴は、P 制御 (ΔP_{BESS}) と Q 制御 (ΔQ_{BESS} 、 ΔQ_{PV}) を交互に変化させて潮流計算を繰り返すことで、系統混雑と電圧逸脱を解消するために必要な BESS の調整容量の最小化を図る点である。

3.2 シミュレーション条件

(1) 配電線モデル

本検討では、図 4 に示す 1 フィーダ^{注 6)}の配電線モデルにおいて、5 月の快晴日 (PV 出力が大きく、電力需要が少ない軽負荷期) を対象に、1 時間刻みの簡易な時系列シミュレーションを実施した。このモデルは、配電線の電圧および潮流の管理がともに過酷な、PV 連系量が拡大した郊外地域を想定したものである。幹線亘長は 12.0 km (AI-OC 240 mm²: 4 km + AI-OC 120 mm²: 8 km) とし、線路途中に SVR^{注 7)} (Step Voltage Regulator: ステップ式電圧調整器) が接続されている。各母線に負荷が均等に配置され、BESS と PV はそれぞれ高圧連系で、配電線の始端、中間、末端の 3 箇所接続されてい

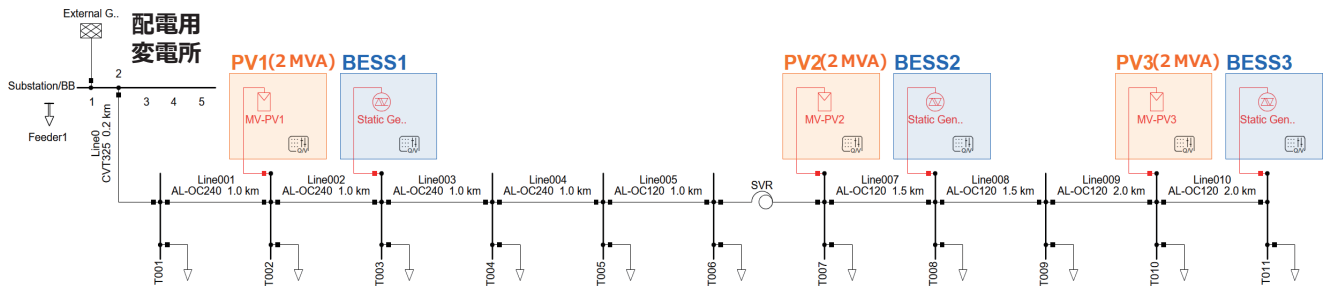


図4 配電線モデル

る。PVの連系容量はそれぞれ2.0 MVA、過積載率^{注8)}130%、SVRのタップ点数は9タップ、1タップあたり100 V、降圧3タップ、昇圧5タップの電圧調整幅とした。また、BESSとPVの3箇所それぞれのPQ制御値の配分は均等（BESS1～3の間とPV1～3の間のPQ出力値は同一）を前提とした。

(2) 評価ケース

本検討では、3.1節の提案制御手法の効果を確認するため、表1の評価ケースを設定した。Case 1：BESSの充電のみ（Q制御なし）制御、すなわちPV出力を単純にBESSで吸収することで電圧逸脱と系統混雑を解消する運用ケースと、Case 2：PとQ両方の制御を行う提案手法を比較する。Case 1の場合は、PV出力をすべてBESSの充電で吸収することで、電圧逸脱と系統混雑は解消するが、そのためにはkW容量・kWh容量ともに必要容量が増大しやすいと予想される。これに対するCase 2との比較により、BESS容量の削減を図る提案制御手法の効果を確認する。

なお、Case 0はBESSとPVの制御対策なしケースで、仮に何も対策を行わなかった場合に電圧逸脱および系統混雑がどの程度発生するか確認するためのケースである。また、提案制御手法を適用したCase 2では、BESSとPVのQ出力負担がBESSのみに偏らないよう電源種別間の公平性を考慮し、BESSとPVは同一力率を前提とした。

表1 シミュレーション評価ケース

	BESS1 (始端) BESS2 (中間) BESS3 (末端)	PV1 (始端) PV2 (中間) PV3 (末端)		
	P (充電) 制御	Q 制御	Q 制御	
Case 0 対策なし	なし	なし	なし	
Case 1 BESS 充電のみ	あり	なし	なし	
Case 2 提案制御手法	あり	あり	あり	
		BESSとPVは同一力率		

Case 1とCase 2においては、電圧変動の許容限界を $6,600 \pm 300$ Vとし、電圧逸脱の有無を判定する上限管理値をマージンを取って $6,600 + 200$ V、系統混雑の有無を判定する上限管理値を配電線の常時許容電流に対応する負荷率100%以下、計測値の更新取得から新たな指令値へ変更するまでの処理待ち時間を5分とした。

3.3 シミュレーション結果

Case 0, Case 1, Case 2の各ケースの時系列計算結果を図5～図7に示す。図5のCase 0（制御対策なし）は、(c)に示す負荷率が最大114%まで増加、(d)に示す電圧が7.15 kVまで上昇しており、赤色破線で示す制約範囲を超過している。一方、Case 1（図6：BESSのP制御のみ）とCase 2（図7：提案制御手法）

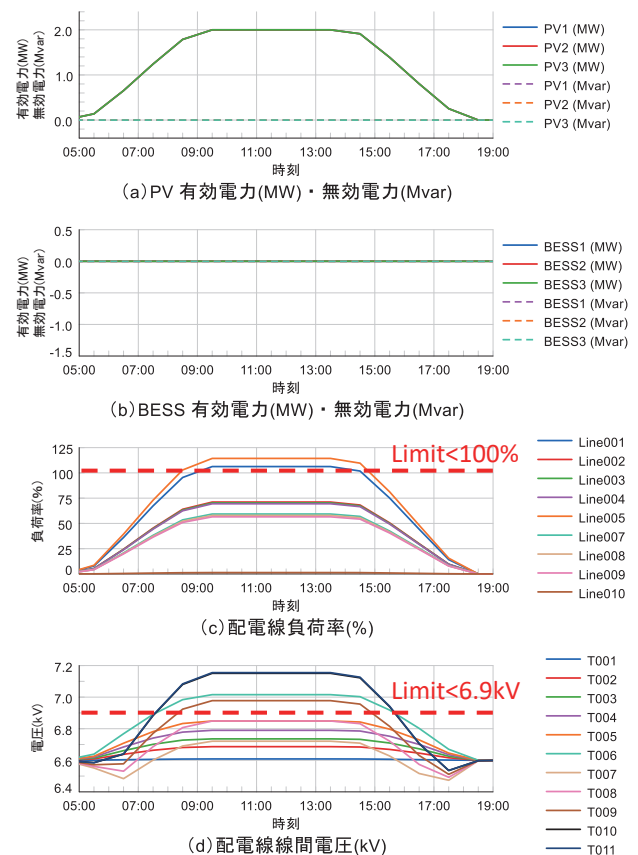


図5 Case 0の時系列計算結果
制御なし（BESSのPQ制御なし・PV力率1出力）

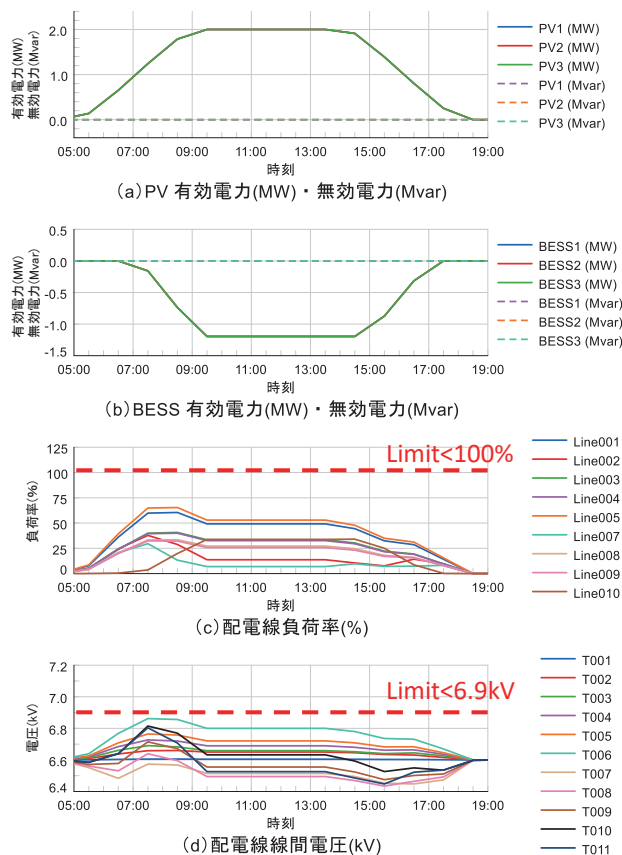


図6 Case 1 の時系列計算結果

BESS の P (充電) 制御のみ (Q 制御なし, PV 力率 1 出力)

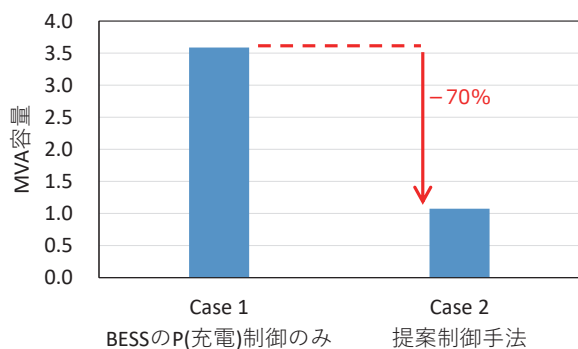


図8 Case 1, Case 2 の BESS 容量比較 (MVA 容量)

のいずれのケースも、電圧は赤色破線で示す 6.9 kV 以下に収まっている。配電線負荷率については、Case 2 (図 7 (c)) のみ 8:30 の時間断面で 100% を超える 107% となっている。これは、図 3 の処理フローで計測値取得から制御指令値の更新までのタイムラグの存在が原因であるが、常時許容電流に対する短時間～長時間 (数十分～数時間) 過負荷電流は約 1.1～1.5 倍であるため、許容範囲内と判断できる。

次に、図 6 と図 7 の (a) と (b) において、BESS および PV の有効電力 (実線) と無効電力 (破線) を比較すると、BESS の P (充電) 制御のみのケースである Case 1 はすべての時間にわたって 0 Mvar であるが、

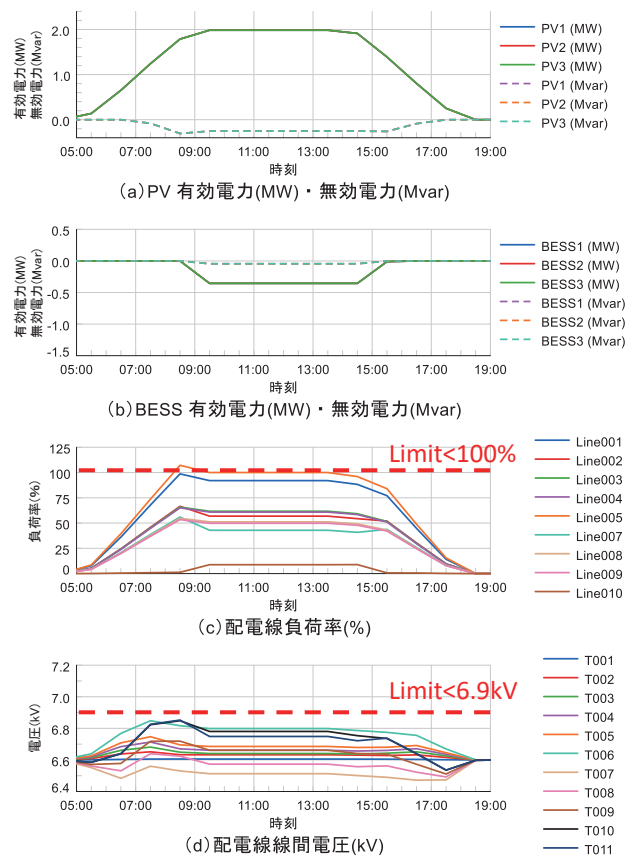


図7 Case 2 の時系列計算結果

提案制御手法適用 (BESS と PV の力率は同一)

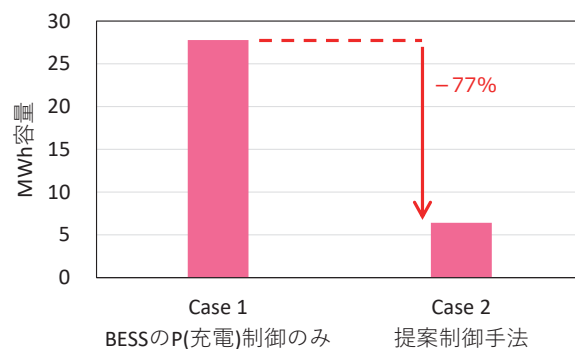


図9 Case 1, Case 2 の BESS 容量比較 (MWh 容量)

電圧逸脱と系統混雑の抑制のためには BESS の充電電力が Case 2 よりも増加することが確認できる。一方、提案制御手法 Case 2 では、P と Q の両方が制御されていることで、P 制御出力の大きさが抑制されていることが確認できる。

最後に、Case 1 と Case 2 の間の BESS 制御量の比較のため、時系列シミュレーション結果から算出した BESS の皮相電力最大値を MVA 容量 (MVA) として図 8、充電電力量 (MWh) を図 9 に示す。図 8 の MVA 容量は、3.6 MVA から 1.1 MVA へ約 70% 減、図 9 の MWh 容量は、27.8 MWh から 6.4 MWh へ約 77% 減という結果となり、必要な BESS 容量の削減効果を確認できた。

4 おわりに

本稿では、再エネ主力電源化後のPVならびにBESSの普及が進んだ将来の配電システムを想定し、BESSの調整力を活用した制御手法のシミュレーションを紹介した。PV出力による電圧逸脱と系統混雑の解消に必要なBESSの調整容量を最小限とすることに着目した制御手法を提案し、簡易配電線モデルを用いた数値シミュレーションにより制御手法の有効性を確認した。本検討で得た知見や提案手法の考え方は、異なる配電線モデルへの適用も可能であり、再エネ主力電源化に貢献可能な技術であると考えている。

■参考文献

- (1) 小林延久：「国内における配電系統運用への分散型電源からの調整力の活用の在り方」，電気学会誌，Vol.144，No.12，pp.761-764（2024）
- (2) 吉井誠：「スマートインバータの実証試験を配電ネットワーク試験場で開始」，東光高岳技報，Vol.7，pp.21-23（2020）
- (3) 宮本卓也：「PV向けスマートインバータの遠方監視制御に対応したDERMSの開発」，東光高岳技報，Vol.8，pp.20-21（2021）

■語句説明

注1) 電圧逸脱：電力系統において供給される電圧が定められた適正範囲から外れてしまう状態のことで、電気機器の故障や誤作動を引き起こす恐れがある。特に、太陽光発電などの分散型電源の大量導入に起因する電圧上昇方向の電圧逸脱を電圧上昇逸脱という。

- 注2) 系統混雑：変電所や送配電線などの系統設備に流れる電力がその設備の運用容量（電力を安定的に送電できる容量）を超過してしまうこと。
- 注3) 線路亘長（こうちょう）：電線を敷設する際の起点から終点までの2点間の距離のことで、単位はキロメートル（km）。
- 注4) 蓄電池（BESS）の調整容量：電力の需給バランスや電力品質維持のために制御される蓄電池の出力可能な調整能力を指す。本稿では、MVA容量とMWh容量の2つの数値で評価を行い、MVA容量は一度に流せる最大電力（有効電力と無効電力のベクトル合成値）、MWh容量は貯められる有効電力量（エネルギー量）を表す。
- 注5) 潮流計算：電力系統において発電機の出力や各所の電力需要が与えられた際、送配電線や変圧器を流れる電力の流れ（潮流）や各地点（ノード・母線）の電圧を求める計算。
- 注6) フィーダ：配電線変電所から各家庭や工場などに向けて電力を送り出す配電線の主要な幹線。
- 注7) SVR：高圧配電線の電圧変動対策として線路の途中に設置される自動電圧調整器で、変圧器のタップ（変圧比）を自動で切り替えて電圧を調整する。
- 注8) （太陽光発電の）過積載率：パワーコンディショナ（PCS）の定格電力よりも多くの太陽光パネルを接続し、ピーク時以外の発電量を増やす方法を過積載といい、PCSの定格出力容量に対する太陽電池モジュール（パネル）の合計容量の割合を過積載率という。

山下 裕輔

GXソリューション事業本部 事業開発推進室
事業開発推進グループ 所属

由来別電力管理機能を備えた DERMS (分散型エネルギーリソースマ ネジメントシステム) の実証設備の構築

■ 宮本 卓也

Takuya Miyamoto

近年、脱炭素・カーボンニュートラルの実現に向けて、太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大が進められている。一方で、電力会社では電力の需要と供給のバランスを保つため、需要が少ない時期に、再エネ電源の出力抑制を行う機会が増加している。そのため、更なる再エネの導入拡大に向けては、各需要家にて再エネを無駄なく効果的に使用することが求められる。当社は、蓄電池のマルチユース（受電点一定制御、デマンドレスポンス制御、自己託送制御など）を想定し、再エネの由来別電力を管理する技術である「電力カラーリング」機能も具備した分散型リソースマネジメントシステム（DERMS）を開発し、小山事業所にて実証設備を構築したので、その検証結果を紹介する。

1 はじめに

近年、脱炭素・カーボンニュートラルの実現に向けて、太陽光発電（以下、PV）をはじめとした再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大が進められている。一方で、電力会社では電力の需要と供給のバランスを保つため、需要が少ない時期に、再エネ電源の出力抑制を行う機会が増加している。しかし、出力抑制した分の再エネ電力はそのままでは無駄になってしまう。そこで、各需要家において再エネを無駄なく活用するために、再エネ電力をためる蓄電池や、電力の使用状況を可視化し管理するエネルギーマネジメントシステム（以下、EMS）が求められる。

このような背景から、当社は、受電点一定制御を用いたピークカット、デマンドレスポンス（以下、DR）制御、自己託送制御など、分散型エネルギーリソース（以下、DER）のマルチユース^{注1)}が可能な分散型エネルギーリソースマネジメントシステム（以下、DERMS）を開発し、小山事業所（栃木県小山市）にて実証設備

を構築した。本実証設備の特長は、PVや蓄電池などといったDERも対象に、需要家の電力利用状況の見える化を可能とするだけでなく、蓄電池に蓄えた自家発電電力を活用するために電力の由来を識別する「電力カラーリング」⁽¹⁾機能も具備していることである。

本稿では、実証設備の構成と、マルチユースの各目的に対して制御できているか、電力カラーリングが正しく行えるかの検証結果について紹介する。

2 電力カラーリング機能を備えたDERMS

2.1 実証設備の構成

図1に実証設備の構成を示す。次項で「電力系統の構成」と「実証設備の連携」の2つの観点から説明する。

(1) 電力系統の構成

実証設備の電力系統を図1（図中右）に示す。PV（出力100kW）、蓄電池（入出力500kW/容量1,100kWh）

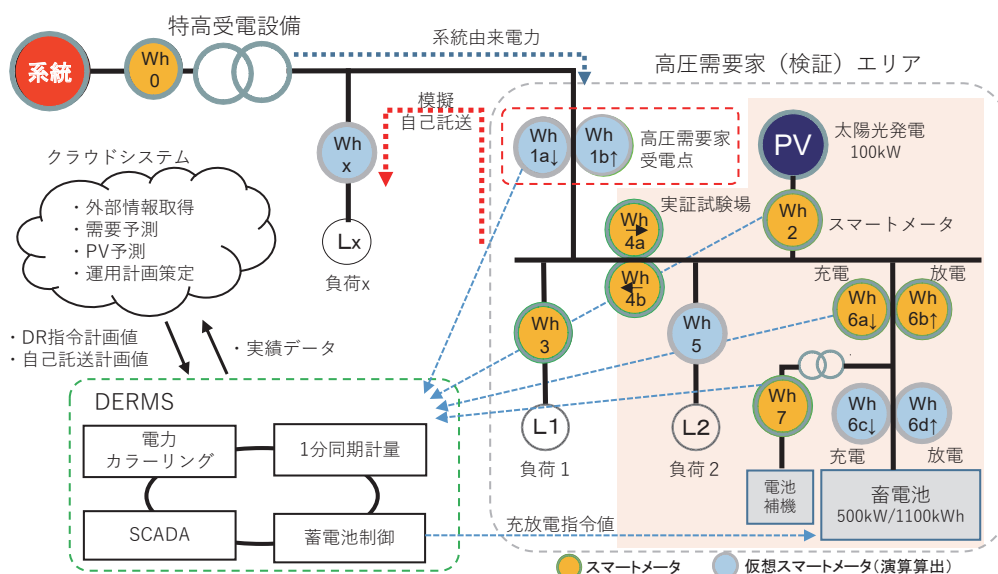


図1 実証設備の構成

および負荷 L2 を備えた実証試験場と、隣接する負荷 L1 を 1 箇所の高圧需要家エリアと見なし、エリア内の電力を一体的に管理する。また、離れた拠点の負荷 Lx を模擬的な自己託送先として設定している。各ポイントにはスマートメータ（実機および演算用の仮想スマートメータ）を配置している。

(2) 実証設備の連携

DERMS、スマートメータおよびクラウドシステムの連携を図 1（図中左）に示す。DERMS 内の SCADA は、電力カラーリングのために、スマートメータから得られる 1 分間隔の同期計量値を収集し、当社独自のアルゴリズムに則った演算を行う。一方、クラウドシステムは、外部情報（気象予報など）に基づき需要予測・PV 発電予測を行い、翌日の運用計画を策定する。DERMS の実績データとクラウドシステムが策定する運用計画（DR 指令計画値や自己託送計画値）が相互に連携する。そして、運用計画に基づき蓄電池の充放電制御（充放電指令値）をリアルタイムで実行する。

2.2 電力カラーリング

電力カラーリングは、電力の由来を識別するものである。例えば、ある PV（供給リソース）で発電した再エネが、需要家のどの設備（需要リソース）で消費されたかを識別できる。供給リソースや需要リソースに設置されたスマートメータの計量値をもとに DERMS が演算することで電力の由来を定量化できる。表 1 に実証試験場を対象としたカラーリング演算表を示す。供給リソースを各列に、需要リソースを各行に示し、行列の合計欄に計量値が入る。行と列が交差する箇所は、ある供給リソースからある需要リソースへの電力移動量を示す。本稿では、カラーリング演算表の電力移動量を、スマートメータの 1 分間隔の計量値（kWh）から算出する 1 分間の平均電力（kW）として表記している。表中の a について、その算出式を式（1）に示す。

$$a = \text{Wh4b} \times \frac{\text{Wh2}}{\text{Wh2} + \text{Wh4a} + \text{Wh6b}} \quad (1)$$

a は、「実証試験場から逆潮流する電力」（Wh4b）のうち、「PV 発電」（Wh2）から供給される平均電力を意味し、各供給リソースの出力に応じた按分にて算出する。Wh4b や Wh2 などは、各スマートメータの計量値によって算出される。

他の項目についても同様の考え方で算出する。表 1 において、需給のバランスが取れている場合、供給リソースと需要リソースの総合計は一致する。この技術は、由来別電力の管理方法として有用であると考えられる。例えば、自己託送の対象となる電力は、自己託送制度で自家発電の電力のみと定められている。蓄電池に充電された電力が自家発電の電力か、系統から調達した電力なのか識別できないため、自己託送では利用できない。電力カラーリングにて由来別電力を証明することで、蓄電池に蓄えた自家発電電力を自己託送に活用できる可能性がある。

2.3 制御機能

(1) 受電点一定制御

受電点一定制御は、負荷調整や蓄電池などを活用し、系統からの買電電力を一定にすることで、ピークカットを行い契約電力の超過を防ぐ機能である。

今回の実証では、図 1 の高圧需要家受電点の電力を一定に制御した。具体的には、受電点の 1 分計量値と目標値との差分から、次の 1 分間における蓄電池の充放電制御計画を策定し、実行する。

(2) デマンドレスポンス（DR）制御

DR とは、電力需給バランスを保つために、需要家側が、電力供給状況に応じて電力使用量を制御することである。

DR 制御は、一般的に節電などによる負荷の調整によって行われる。本検証では蓄電池を用いた充放電により仮想的に DR 制御をする。具体的には蓄電池を、供給力不足時には放電、供給力余剰時は充電することで実現する。本機能は、一般送配電業者からの需要抑制要請の対応や需給調整市場への活用も期待される。

表 1 電力カラーリング演算表

需要リソース	供給リソース（平均電力 kW）					合計（計量値）
	PV 発電	実証試験場 へ順潮流 (系統由来)	蓄電池放電			
			PV 由来	系統由来	合計	
実証試験場から逆潮流	a	b	c_1	c_2	c	Wh4b
実証試験場負荷	d	e	f_1	f_2	f	Wh5
真の蓄電池充電量	g	h	i_1	i_2	i	Wh6c
充電から蓄電池補機	j	k	l_1	l_2	l	Wh7
合計（計量値）	Wh2	Wh4a	—	—	Wh6b	総合計

(3) 自己託送制御

自己託送とは、需要家が所有する発電設備により発電された電力を、送配電事業者の電力系統を介して同じ需要家が所有する別の拠点などへ送電できる仕組みである。

自己託送を実現する制御は、図 1 に示した高压需要家エリアから、負荷 Lx を他拠点と見立てて検証を行った。具体的には、クラウドによる高压需要家エリアの需要予測および PV 発電予測から、自己託送可能と判断した場合に翌日計画値を生成し、受電点一定制御により逆潮流電力が一定になるように制御を実行する。

3 実証設備検証結果

3.1 電力カラーリングの検証

ある日の単位時間における蓄電池充電時の結果を表 2 に示す。算出式 (1) を参考に、供給リソースである「PV 発電」電力のうち、需要リソースの一つである蓄電池へ充電された電力「真の蓄電池充電量^{注2)}」を算出した結果 34.64 kW となった。それ以外にも系統から供給される「実証試験場へ順潮流（系統由来）」についても同様に算出した結果 38.92 kW となり、合計 73.56 kW が蓄電池に充電されている算出結果を得た。

同様に蓄電池放電時の結果を表 3 に示す。算定式 (1) を参考に、「実証試験場から逆潮流」する電力 84 kW のうち、「PV」が供給する電力を算出した結果 24.76 kW

となった。それ以外にも蓄電池の「PV 由来電力」から供給する電力を算出した結果 4.28 kW となり、合計 29.04 kW が PV 由来電力と算定される結果となった。

表 2、表 3 とともに各列、各行の合算値と、計量値が一致しており、由来別電力演算が整合していることを確認した。

3.2 受電点一定制御および DR 制御の検証

受電点一定制御および DR 制御の検証を行った。前提条件として蓄電池は 100 kW の固定放電状態でいき、10 時から受電点一定制御 100 kW で運転し、11 時から DR 制御 60 kW、11 時 30 分から DR 制御 30 kW を実行した。需要家負荷、蓄電池出力、PV 出力と受電点実績の傾向を図 2 に示す。

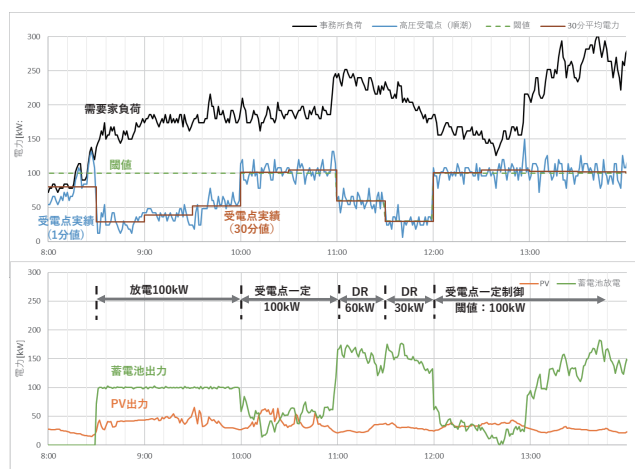


図 2 受電点一定制御および DR 制御の結果

受電点一定制御は指令値に従い 1 分毎に更新される受電点計量値に応じて蓄電池出力が変動したこと、DR 制御は 30 分毎に更新される DR 指令計画値に従い蓄電池出力が変動したことが確認できる。30 分平均電力にて評価した最大誤差は 4.4%であることを確認した。

3.3 需給調整市場三次調整力②による評価

DR 制御の活用として、需給調整市場三次調整力②^{注3)}への参入を想定し、表 4 に示す条件にて検証・評価した。三次調整力②は、30 分/1 コマ単位で入札量

表 2 蓄電池充電時の電力カラーリング結果

需要 リソース	供給リソース（平均電力 kW）					合計 （計量値）
	PV 発電	実証試験場へ 順潮流 （系統由来）	蓄電池放電			
			PV 由来	系統由来	合計	
実証試験場 から逆潮流	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
実証試験場 負荷	2.63	2.95	0.00	0.00	0.00	5.58
真の蓄電池 充電量	34.64	38.92	0.00	0.00	0.00	73.56
充電から 蓄電池補機	0.11	0.13	0.00	0.00	0.00	0.24
合計 （計量値）	37.38	42.00	—	—	0.00	79.38

表 3 蓄電池放電時の電力カラーリング結果

需要 リソース	供給リソース (平均電力 kW)					合計 (計量値)
	PV 発電	実証試験場へ 順潮流 (系統由来)	蓄電池放電			
			PV 由来	系統由来	合計	
実証試験場 から逆潮流	24.76	0.00	4.28	54.96	59.24	84.00
実証試験場 負荷	0.32	0.00	0.06	0.71	0.76	1.08
真の蓄電池 充電量	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
充電から 蓄電池補機	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合計 (計量値)	25.08	0.00	—	—	60.24	85.08

表 4 三次調整力②の評価条件

条件項目	内容
参入地点	高压受電点参入 (蓄電池によるネガワット生成)
入札量	200 kW × 4 コマ (30 分 / コマ)
ベース ライン	High 4 of 5 準拠
DR 成功 判定法	受電電力実績 (30 分) が目標上下限範囲内であること ※ 上下限範囲 = 指令値 ± 入札量 (ΔkW) × 10%

に応じた DR が成功しているかを判定する。DR の判定基準は、受電電力実績（30 分平均）が、目標上下限範囲内にあることである。10 時～12 時までの 4 コマを対象に DR 入札量 200 kW を提供することを想定した結果を図 3 に示す。DR を実施した 4 コマにて、受電電力実績が目標上下限範囲内であり、DR が成功と判断できる。

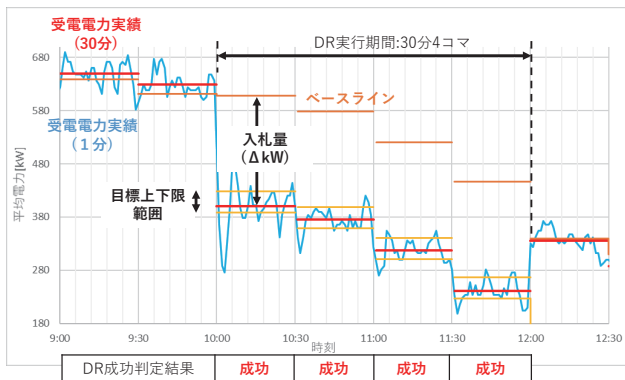


図 3 三次調整力②の検証結果

3.4 自己託送制御の検証

自己託送制御の検証を表 5 に示す条件にて実施し、結果を図 4 に示す。自己託送する際には、前日までに自己託送計画を立案し、計画通りに電力を供給する必要がある。計画通りに供給できなかった電力量（インバランス電力量）に対して、ペナルティとしてインバランス料金が課せられる。検証した 8 回のうち、6 回はインバランス電力量 10 kWh 以下であることを確認できたが、他 2 回は、前日の需要予測よりも需要実績が大きく、蓄電池 SOC が不足し、計画通りに供給できない時間が発生したケースである。特に「日 2」ケースは、インバランス料金単価が高い時間帯であったため、インバランス料金が高くなった。本検証では、汎用的な需要予測を用いたが、より高精度の予測手法を運用することでインバランスを避けられる可能性がある。

表 5 自己託送制御の条件

条件項目	内容
試験日	軽負荷期：2 月の土曜日、日曜日
託送時間	① 10 時～12 時（30 分 × 4 コマ） ② 13 時～16 時（30 分 × 6 コマ）
蓄電池による供給量	① 10 時～12 時：SOC 30%（150 kW/1 コマ） ② 13 時～16 時：SOC 30%（100 kW/1 コマ）
託送料金単価	東京電力 PG：高圧従量接続サービス 12.55 円 / kWh
インバランス料金単価	インバランス料金情報公表ウェブサイト： 東京エリアを参照
電気料金単価	東京電力 EP：高圧季節別時間帯別電力 （契約電力 500 kW 以上）を参照

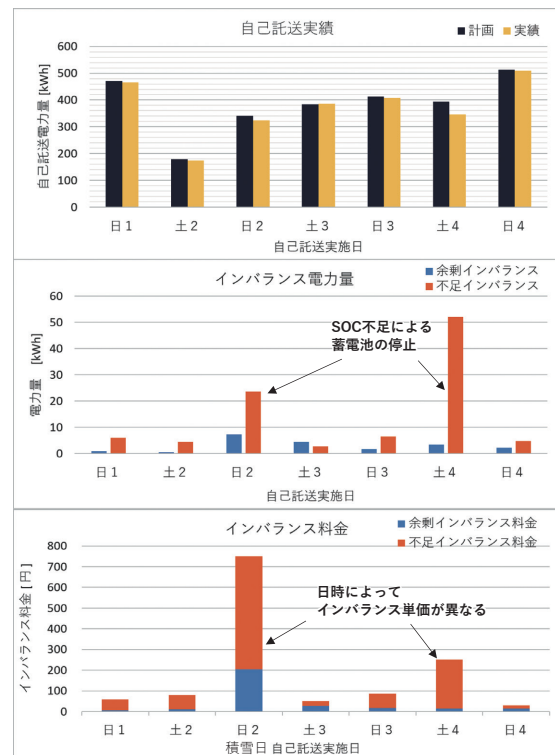


図 4 自己託送制御の結果

4 おわりに

当社では、高圧需要家エリア内の由来別電力を管理し、分散型電源を制御するシステムを小山事業所内に構築した。その結果、電力カラーリング、受電点一定制御、DR 制御、自己託送制御の有効性を確認することができた。

今後、本実証設備を継続運用し、お客様への PR とニーズ発掘を進め、ニーズに合わせて本システムをアップデートしていく予定である。

参考文献

(1) 原正典，草川慎一：特許第 6781103 号，(2020)

■ 語句説明

注 1) マルチユース：1 つの分散型電源を複数の目的や用途で活用する運用方式。本稿では、蓄電池のマルチユース（受電点一定制御、DR 制御、自己託送制御）を指す。
注 2) 真の蓄電池充電量：蓄電池を充電した際に、実際に蓄電池に充電された電力量（Wh6c）のことを指す。

$$\begin{aligned} \text{真の蓄電池充電量 (Wh6c)} \\ &= \text{スマートメータ計量値 (Wh6a)} \\ &\quad - \text{電池補機電力量 (Wh7)} \end{aligned}$$

注 3) 需給調整市場三次調整力②：電力の需給バランスを維持するために必要な「調整力」を取引する需給調整市場にて、再エネの予測誤差に対応するための商品。

宮本 卓也

戦略技術研究所 技術開発センター
解析・試験技術グループ 所属

深層学習による半導体パッケージ基板の外観検査実現に向けた AI 技術開発

■ 高田 晃平
Kohei Takada

現代社会の基盤である集積回路は、性能向上と低消費電力化を両立させるため、年々微細化が進められている。東光高岳のバンパ検査装置は、独自の高速・高精度な三次元計測技術により、微細化に伴い複雑度が増す集積回路の製造工程を支えてきた。しかしながら、外観検査などのより複雑な検査については、従来のバンパ検査で取っているアプローチの延長線上では限界があった。これに対し、近年の深層学習をはじめとする AI 技術の進歩にともない、より高度な画像認識が可能になりつつある。本稿では、深層学習を活用することで外観検査を実現するための技術開発について述べる。

1 はじめに

集積回路は、家電製品やスマートフォンなどの身近な製品から、航空機、鉄道、自動車といった社会インフラを支えるあらゆる分野で利用されており、現代社会において不可欠な基盤となっている。図 1 に集積回路の構造を示す。性能向上と低消費電力を両立させるため、計算などの処理を行うシリコンダイ上に、より多くの演算素子を集積するための微細化が年々進められている。これに伴い、シリコンダイと半導体パッケージ基板を接続する電極であるバンパも微細化・高密度化が進んでおり、1つの半導体パッケージ基板に対して数万個以上のバンパがマイクロメートルレベルの精度で実装されている。

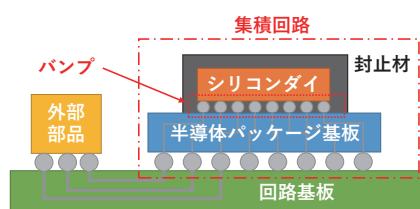


図 1 集積回路の構造

東光高岳では、半導体パッケージ基板のバンパ検査装置を開発・製造・販売している。独自の高速・高精度な三次元計測技術および計算処理⁽¹⁾により、バンパの高さ、直径、位置、平面度などのバンパ検査を実現してきた。しかしながら、傷や異物などの外観検査については、従来の計算処理の延長線上では限界があった。

一方、近年は深層学習をはじめとする AI 技術の発展により、高度な画像認識が可能になりつつある。AI 技術に関しては、東光高岳においても、製品・サービスへの活用に向けた技術開発を継続して進めてきた⁽²⁾⁽³⁾。本稿では、独自の三次元計測技術と深層学習による画像異常検知を組み合わせることで外観検査を実現する技術開発について紹介する。

2 要素技術

2.1 深層学習と画像認識

近年、深層学習は ChatGPT^{注1)}などの生成 AI の普及によって AI 技術の代名詞となったが、初期段階で深層学習の高い可能性を示したのは AlexNet⁽⁴⁾による画像分類であった。深層学習による高い精度での画像分類が可能であることが示されたことで、分類以外の画像認識全般への応用が試みられてきた。画像異常検知もそのひとつである。

2.2 特徴量抽出器

図 2 に深層学習による画像分類モデル^{注2)}の構造を示す。画像分類モデルの前段は画像から特徴量^{注3)}を抽出し、後段はその特徴量をもとに分類を実行する。多様な画像をうまく分類できるように学習^{注4)}した画像分類モデルから前段部分を取り出すことで、画像から汎用的な特徴量を抽出する部品を手に入れることができる。この部品のことを特徴量抽出器とよぶ。

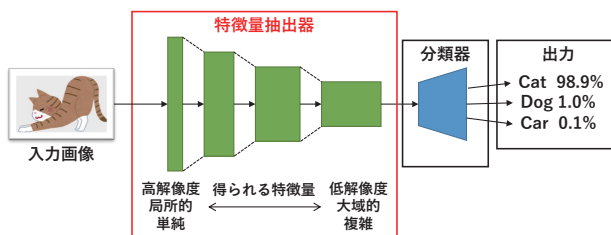


図 2 深層学習による画像分類モデルおよび特徴量抽出器

特徴量抽出器の出力を利用して様々な処理を実現することは、深層学習による画像認識で幅広く行われる。特徴量抽出器は階層的な構造をもつことが一般的であり、浅い層では高解像度で局所的かつ単純な特徴を捉え、深い層に進むにしたがって低解像度で大域的かつ複雑な特徴を捉える。

2.3 深層学習による画像異常検知

画像異常検知には、目的や手法が複数存在する。目的としては画像レベル（この画像が異常・この画像は正常）を判定するか、画素レベル（画像のこの部分が異常・この部分は正常）を判定するかがある。手法としてはどのような観点で見えるかによるが、以下のように分類できる。

(1) 教師あり学習・教師なし学習

モデルを学習する手法として、教師（正常・異常のラベル）を利用するかしないかという観点での分類である。画像異常検知では異常画像が入手困難であるという前提の上で、教師なし手法を適用するケースが多い。

(2) 異常検知手法

どのような手法で正常・異常を捉えるかという観点での分類である。深層学習を利用する場合は (a) 再構成ベース、(b) 密度推定ベース、(c) 距離ベースなどの手法がある。以下に各手法の特徴を説明する。

(a) 再構成ベース

入力画像を特徴量に変換し、それを再変換して入力画像に戻す再構成を利用する手法。

学習段階で正常画像を再構成できるようにしておき、予測対象画像を再構成したときの入出力間の誤差を評価することで、画像異常検知を実現する。

長所：可視化が容易（誤差をそのまま画像化すればよい）。
短所：正常に近い異常の場合、再構成時の誤差が小さくなり、正常と判定されてしまう場合がある。

(b) 密度推定ベース

密度推定^{注5)}を応用した、入力画像の特徴量がどのような分布をもつのかを推定する手法。

正常画像の特徴量に対する密度推定を学習し、それに対する予測対象画像の特徴量の乖離度を評価することで異常検知を実現する。

長所：結果の確率論的解釈が可能。

短所：正常とまったく異なる異常との乖離度が小さくなり、正常と判定されてしまう場合がある。

(c) 距離ベース

クラスタリング^{注6)}を応用した、あらかじめ抽出・保存しておいた正常画像の特徴量と、新たに入力された画像の特徴量の距離を測定する手法。距離がどれくらい離れているかを評価することで、異常検知を実現する。

長所：結果の解釈性が高い（類似画像の例示が可能）。
短所：保存しておく正常データが増えるほど予測精度が上がるが、予測時のメモリ消費量と計算量が増える。

手法である正規化フローによる画像異常検知を適用した。適用した理由は、2章で述べたとおり結果の確率論的解釈が可能であるので拡張の余地が広いと考えられることと、比較的高速な処理が期待できるモデルである Fastflow^{注5)}などが提案されており、バンプ高さ検査装置の高速な検査能力を生かせると考えたためである。

以下で正規化フローに関して述べた上で、今回適用した画像異常検知モデルである Fastflow⁽⁵⁾、U-Flow⁽⁶⁾およびそれらの基礎となる CFLOW-AD⁽⁷⁾について述べる。

3.1 正規化フロー⁽⁸⁾

正規化フローは複雑な分布をもつ入力データ x を、基底分布^{注7)}に従う特徴量 z へ変換する、複数段の可逆変換^{注8)} f を学習する深層学習モデルである。図 3 に、正規化フローによる可逆変換の概要を示す。本モデルは可逆であるので、特徴量 z から入力データ x を生成できる特徴をもつ。

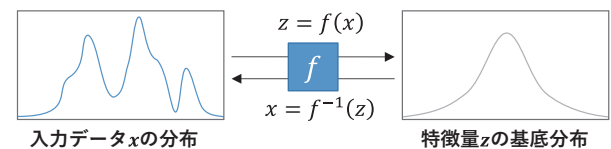


図 3 正規化フローによる可逆変換の概要

3.2 正規化フローによる画像異常検知

(1) CFLOW-AD

正規化フローを画像異常検知に適用する手法を確立した代表的なモデルである。図 4 にアーキテクチャの概要を示す。画像から特徴量抽出器で抽出した中間特徴量 h を 1 次元化したものと、1 次元化により失われる画素の位置情報を PE (Positional Encoding)^{注9)}したものを正規化フローに入力する。

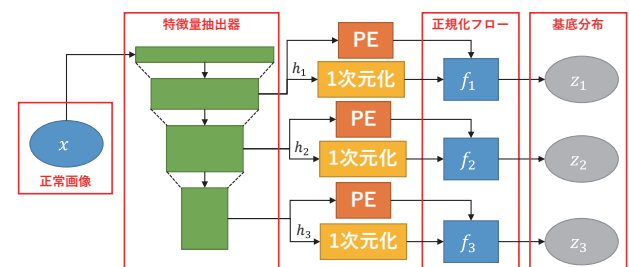


図 4 CFLOW-AD のアーキテクチャ概要

正常画像の中間特徴量 h から、基底分布に従う特徴量 z を得られるように正規化フローを学習しておく。予測時に異常画像が入力されると特徴量 z が基底分布から乖離するため、それを利用して画像異常検知を実現する。

(2) Fastflow

CFLOW-AD をベースに、処理の高速化を目指したモ

3 適用手法

本開発では、2章で示した密度推定ベースの異常検知

デルである。図 5 にアーキテクチャの概要を示す。正規化フローの内部演算を 2 次元畳み込み^{注 10)}に変更することで PE を排除している。

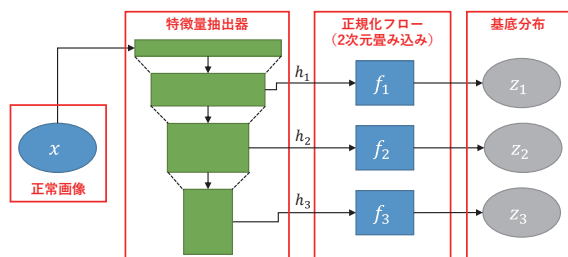


図 5 Fastflow のアーキテクチャ概要

(3) U-Flow

Fastflow をベースに、特徴量抽出器の各層から得られる階層的な中間特徴量 \$h\$ を利用できるようにすることを図ったモデルである。図 6 にアーキテクチャの概要を示す。Fastflow では特徴量抽出器の各層にそれぞれ独立した正規化フローが接続されている。U-Flow では各層に接続された正規化フローの間を接続することで、低解像度で大域的かつ複雑な特徴と、高解像度で局所的かつ単純な特徴を統合している。

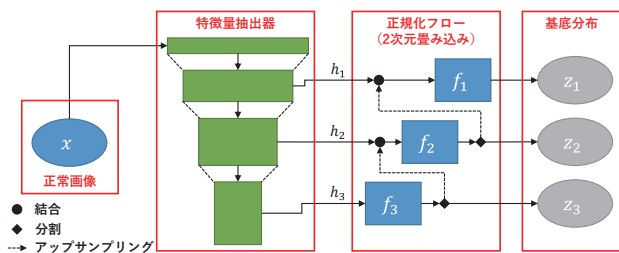


図 6 U-Flow のアーキテクチャ概要

4 精度評価および注意点

深層学習では、学習後のモデルを比較して最適なものを選択するために、定量的な精度評価が重要である。一方で、画像異常検知における定量的な精度評価は難しい。なぜならば、一般的に異常数が正常数に比べて極端に少ない不均衡データであるためである。ひとつの精度評価指標だけでは不均衡データの影響を強く受けるため、複数の指標を併用した多面的な評価が重要になる。

4.1 精度評価指標

画像異常検知は分類問題^{注 11)}の一種である。分類問題で利用される定量的な精度評価指標について以下に示す。

(1) 混同行列

表 1 に、分類問題における精度評価指標の基本となる

混同行列を示す。実際の値に対して予測結果の値が合致しているかを数え上げたものである。

表 1 混同行列

混同行列		予測結果の値	
		Positive	Negative
実際の値	Positive (異常)	TP (True Positive)	FN (False Negative)
	Negative (正常)	FP (False Positive)	TN (True Negative)

異常検知では異常を Positive、正常を Negative とする。すなわち、TP は「異常を正しく異常と予測した数」、TN は「正常を正しく正常と予測した数」、FN は「異常を正常と誤って予測した数」、FP は「正常を誤って異常と予測した数」である。

(2) Accuracy (正解率)

全ての予測結果に対する TP と TN の比率であり、高いほどよい。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$$

異常検知では \$TN \gg TP\$ の関係が成立しやすく Accuracy が機能しにくい。これは、常に正常と予測すれば TN が稼げてしまい、Accuracy が高くなるためである。

(3) Precision (適合率)

Positive と予測した数に対して、実際に Positive だった数の比率であり、高いほどよい。

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

(4) Recall (再現率, 真陽性率)

実際に Positive であるものを正しく Positive と予測した比率であり、高いほどよい。

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

(5) TNR: True Negative Rate (真陰性率)

実際に Negative であるものを正しく Negative と予測した比率であり、高いほどよい。

$$TNR = \frac{TN}{FP + TN}$$

(6) FNR: False Negative Rate (偽陰性率)

実際には Positive であるものを誤って Negative と予測した比率であり、低いほどよい。

$$FNR = \frac{FN}{TP + FN}$$

(7) FPR: False Positive Rate (偽陽性率)

実際には Negative であるものを誤って Positive と予測した比率であり、低いほどよい。

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$

4.2 精度評価指標のトレードオフ

モデルの出力は確率値であり、これに対して閾値を適用することで分類を実現する。これにより、閾値を上げれば FN が増加し、下げれば FP が増加する。この閾値の変化が精度評価指標に対して与える影響を、表 2 に示す。

表 2 精度評価指標のトレードオフ

閾値	Precision, TNR, FPR	Recall, FNR
上げる	改善	悪化
下げる	悪化	改善

4.3 精度評価曲線

精度評価指標を定性的に理解できるようにするため、トレードオフの関係にある精度評価指標をそれぞれの軸に取った精度評価曲線のグラフが存在する。

精度評価曲線によって画像レベル、画素レベルまたはその双方の評価が可能なのかが異なる。ROC 曲線と PR 曲線は双方、PRO 曲線は画素レベルのみの評価になる。また、曲線下側の面積 (AUC: Area-Under the Curve) はそれぞれ AUROC, AUPR, AUPRO とよばれる精度評価指標であり、これらの値が大きいほど精度がよい (いずれも最大値は 1.0)。以下に各精度評価曲線の特徴を説明する。

(1) ROC 曲線

FPR と Recall をそれぞれ横軸と縦軸にとったグラフである。画像異常検知において、とくに画素レベルで評価した場合、画像の大部分は TN (真に正常) であるため FPR が悪化しにくく、過剰により評価をされやすい。

(2) PR 曲線

Precision と Recall をそれぞれ横軸と縦軸にとったグラフである。Precision と Recall はともに TN を含まないため、ROC 曲線ほど偏ったスコアにはなりにくい。逆に言

えば、PR 曲線だけでは TN (真に正常) を評価できない。

(3) PRO 曲線

画素レベルの画像異常検知に着目し、実際に異常がある部位をどれだけ正しく異常ありと予測できているかを評価するために考案された⁽⁹⁾。FPR と PRO (Per-region Overlap) をそれぞれ横軸と縦軸にとったグラフである。

PRO の計算方法に関して、図 7 に模式図を示す。FPR がある程度高くなると False Positive が増えすぎて精度評価指標として意味をなさないため、0.3 程度を上限とする。

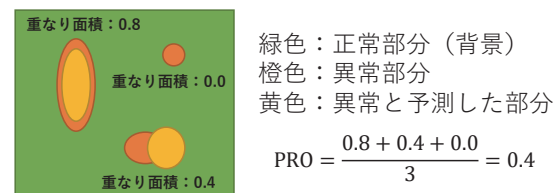


図 7 PRO の模式図

5 精度評価結果および考察

Fastflow および U-Flow の高速な処理能力を生かすため、特徴量抽出器として処理が高速な EfficientNet-B1⁽¹⁰⁾ を利用して各画像異常検知モデルを実装した。その後、異常部分を含まないバンプ検査画像でモデルを学習したうえで、異常部分を含むバンプ検査画像で定性的・定量的両面からの評価を行った。

5.1 可視化結果

定性的評価として、異常部分を含むバンプ検査画像の例を図 8 に、バンプ検査画像に対して各画像異常検知モデルの出力値を合成した可視化結果を図 9 に示す。

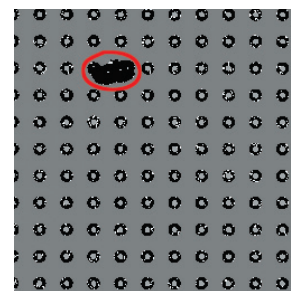


図 8 バンプ検査画像の例 (赤丸内が異常部分)

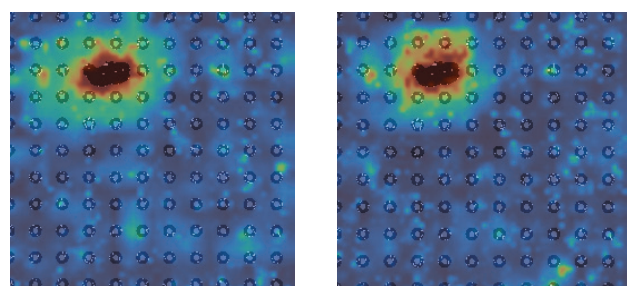


図 9 可視化結果：Fastflow (左) / U-Flow (右)

可視化結果はヒートマップ形式で表示しており、青色から緑、黄色を経て赤色へと変化するグラデーションにより、異常の度合いを表現している。青色に近いほど正常と判定された領域であり、赤色に近づくほど異常の疑いが強いことを示している。各画像異常検知モデルが異常を正しく検知できており、深層学習による半導体パッケージ基板の外観検査の実現可能性があることが示されている。

5.2 精度評価結果

5.1 節の結果を踏まえ、精度評価曲線による精度評価を行った。各画像異常検知モデルについて、図 10、図 11 および図 12 に各精度評価曲線を示す。また、表 3

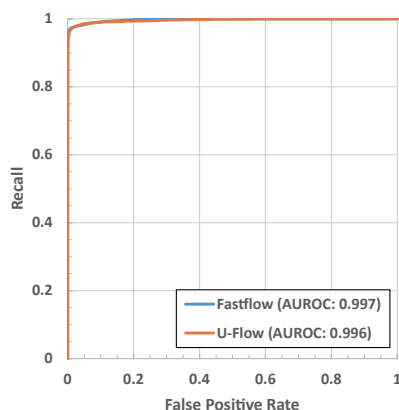


図 10 ROC 曲線

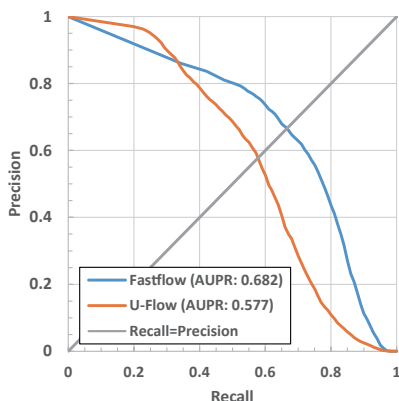


図 11 PR 曲線

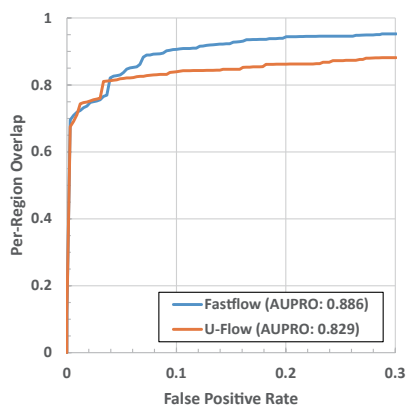


図 12 PRO 曲線

表 3 Fastflow / U-Flow の精度評価指標比較

画像異常検知モデル	精度評価指標		
	AUROC	AUPR	AUPRO
Fastflow	0.997	0.682	0.886
U-Flow	0.996	0.577	0.829

に精度評価指標比較の一覧を示す。

評価結果の各精度評価曲線および精度評価指標から、以下のことがいえる。

(1) ROC 曲線 / AUROC

上限値に近い値をとっている。画像異常検知は不均衡データを扱うため、ROC だけでは過剰に良い評価になることが示されている。

(2) PR 曲線 / AUPR

Precision=Recall の直線に対して Fastflow は PR 曲線が左右対称になっているが、U-Flow は非対称になっている。Fastflow は閾値に対して Precision-Recall が線形に変化するが、U-Flow は非線形に変化する特性があるといえる。5.1 節の可視化例からも、Fastflow は異常部分周囲の異常度が中程度の領域が広く、U-Flow はこの領域が狭いことから、この特性が読み取れる。これは異常部分を明確に区別できる一方で、Recall が一定値を超えると急激に Precision が悪化する特性をもつといえる。

(3) PRO 曲線 / AUPRO

FPR が 0.1 に到達したあたりで PRO の上昇が緩くなっている。これは、必要以上に多くの False Positive を許容しても PRO は改善しないことを示している。

精度評価指標の面では、AUROC はほぼ上限に飽和している一方で、AUPR や AUPRO は改善の余地がある。総括として、画像異常検知のような不均衡データを扱う問題の場合は、4 章で述べたように単一の精度評価手法では評価が困難なことが本結果からも示されている。画像異常検知においては、複数の精度評価手法を組み合わせた多面的な評価が重要であるといえる。

6 まとめ

本稿では、AI 技術を活用した深層学習による画像異常検知モデルの適用により、半導体パッケージ基板の異常部分を正しく検知できることを明らかにした。また、その検知精度の正しい評価に必要な複数の精度評価手法について考察した。

今後は、この画像異常検知モデルによる半導体パッ

パッケージ基板の外観検査機能の実用化に向け、バンパ検査装置への実装・運用において必要な検知精度と処理速度の両立に取り組んでいく。

■参考文献

- (1) 水野祐樹ほか：「先端半導体向け超微細バンパ高さ計測センサの開発」, 東光高岳技報, No.12 (2025)
- (2) 高田晃平, 高野裕基：「AI を活用した画像認識技術への取り組み」, 東光高岳技報, No.6 (2019)
- (3) 北治夫, 佐藤祥輝：「AI を用いた太陽光発電量予測手法の検討」, 東光高岳技報, No.9 (2022)
- (4) Alex Krizhevsky, *et al.* : “ImageNet Classification with Deep Convolutional”, NeurIPS 2012 (2012)
- (5) Jiawei Yu, *et al.* : “FastFlow: Unsupervised Anomaly Detection and Localization via 2D Normalizing Flows”, arXiv:2111.07677 (2021)
- (6) Matias Tailanian, *et al.* : “U-Flow: A U-Shaped Normalizing Flow for Anomaly Detection with Unsupervised Threshold”, JMIV (Springer Nature), Vol.66 (2024)
- (7) Denis Gudovskiy, *et al.* : “CFLOW-AD: Real-Time Unsupervised Anomaly Detection with Localization via Conditional Normalizing Flows”, WACV 2022 (2022)
- (8) David Foster : 『生成 Deep Learning 第 2 版』, オライリー・ジャパン (2024)
- (9) Paul Bergmann, *et al.* : “MVTecAD - A Comprehensive Real-World Dataset for Unsupervised Anomaly Detection”, CVPR 2019 (2019)
- (10) Mingxing Tan and Quoc V. Le : “EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks”, ICML 2019 (2019)

■語句説明

- 注 1) ChatGPT：米国 OpenAI Group PBC が提供する生成 AI サービスの名称および同社の商標。
- 注 2) モデル：深層学習を含む機械学習において、目的に応じたアルゴリズムのこと。
- 注 3) 特徴量：生のデータに内包されている特徴を抽出し、他の処理で使いやすくしたもの。
- 注 4) 学習：モデルに含まれる演算のパラメーターを調整し、目標に向けた最適化をすること。
- 注 5) 密度推定：データがどのような確率分布をもつかを示す確率密度関数を推定すること。
- 注 6) クラスタリング：データを類似した特徴をもつグループ（クラスター）に分けること。
- 注 7) 基底分布：数学的に扱いやすい何らかの単純な分布。正規分布（ガウス分布）がよく利用される。
- 注 8) 可逆変換：入力から出力への変換と、出力から入力への逆変換の双方ができること。一般的な深層学習モデルでは入力から出力への一方向の変換しかできない。
- 注 9) PE (Positional Encoding)：位置情報を数値へ変換してモデルに与えること。文章生成モデルにおいて各単語の位置情報を表現するために利用される。
- 注 10) 2 次元畳み込み：近傍のデータを利用した畳み込み演算。深層学習による画像認識でよく使われる。
- 注 11) 分類問題：図 2 の画像分類のように、入力データが所属するカテゴリを予測する問題。異常検知の場合は正常・異常の 2 分類問題になる。

高田 晃平

戦略技術研究所 技術開発センター
ICT 技術グループ 所属

電力システムのサイバーセキュリティを向上する IEC 62351 に対応した SCADA の開発

■ 黒田 英次
Eiji Kuroda

■ 益子 奈々海
Nanami Mashiko

■ 荒井 俊成
Toshinari Arai

近年、電気事業法に基づく技術基準および関連ガイドラインの整備が進んでおり、電力分野におけるサイバーセキュリティ対策の要件が体系的に確立されつつある。これにより、電力システムにおいては、従来の安定供給に加え、通信および制御に関するセキュリティ確保の重要性が一層高まっている。

こうした状況を踏まえ、株式会社ミントウェーブでは、国際規格 IEC 62351 に基づく認証および暗号化技術を、IEC 61850 に対応した SCADA へ適用する取り組みを進めている。本取り組みでは、認証・認可に基づくセキュアなアクセス制御の実現を目的とし、実機およびシミュレータ環境を用いて検証を実施した。本稿では、その実装方式および検証結果について報告する。

1 はじめに

IoT をはじめとするデジタル技術の進展に伴い、電力分野においてもシステムの高度化が進んでいる。一方、国内では、電気事業法に基づく技術基準や関連ガイドラインが整備されており、電力分野において求められるサイバーセキュリティ対策の要件が体系的に整理されている。

このうち、「電力制御システムセキュリティガイドライン」⁽¹⁾ が運用面での指針を示す一方、IEC 62351 は認証や暗号化通信などの技術的な実装方法を規定している。

しかし、これらの指針や規格を実際の変電所システムへ適用する際には、既存システムや運用との整合性が課題となっており、具体的な実装手法は十分に整理されていないのが実情である。

こうした中、電力制御通信に関する規格 IEC 61850 の国内での適用拡大に伴い、認証・認可に基づく安全性の高いアクセス制御技術の重要性が増している。そこで本稿では、電力システムを取り巻くサイバーリスクに対処することを目指し、IEC 62351 の SCADA^{注1)} への適用に着目し、IEC 62351-3⁽²⁾ および IEC 62351-8⁽³⁾ を対象としたセキュリティ機能の検証を行ったので紹介する。なお、本研究開発は、電気学会でも報告をしており、今後の技術応用や実用化に貢献することを目的としている⁽⁴⁾。

2 IEC 62351 に基づくセキュリティ機能の構成

電力システムにおける通信ネットワークおよびセキュリティに関する国際規格として、IEC 62351 が策定されている。本規格は、IEC 61850 通信をはじめとする電力制御通信に対し、改ざん検知、不正アクセス防止、暗号化ならびに認証・認可といった各種セキュリティ機能

を規定している。図 1 に、認証局サーバ、SCADA、および IED・PLC の構成イメージを示す。本規格の適用により構成されるシステムは、大きく「通信を担う機器 (SCADA, IED^{注2)}・PLC^{注3)})」と、それらの認証および管理を行う「認証基盤 (認証局サーバ)」の二つに分類される。以下に、各構成要素を説明する。

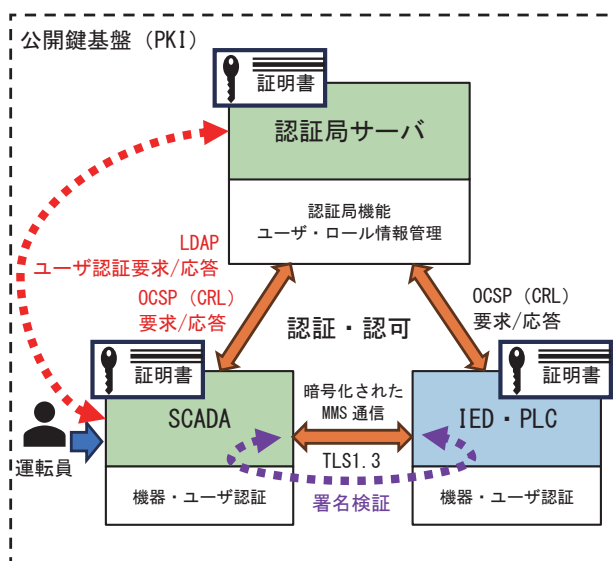


図 1 認証局サーバ構成イメージ

(1) 認証基盤 (認証局サーバ)

認証局サーバは、公開鍵基盤 (PKI: Public Key Infrastructure) の役割を担い、SCADA および IED・PLC に対して証明書の発行および管理を行うことで、機器認証および暗号化通信の基盤を提供する (認証局機能)。各機器に配布された証明書は、通信確立時の認証処理に利用される。また、認証局サーバは IEC 62351-8 に示される RBAC^{注4)} (ロールベースのアクセス制御) の考え方に基づき、LDAP^{注5)} (階層構造で管理する通信プロトコル) を用いて SCADA のユーザ情報およびロール情報 (役割情報・権限情報) を一元的に管理する。

SCADA からの認証要求に対しては、ユーザ証明書および LDAP による資格情報の検証を行い、認証結果とともにロール情報を送信する。SCADA はこれに基づき操作権限を制御し、RBAC に基づく運用を実現する。

(2) 通信を担う機器 (SCADA, IED・PLC)

SCADA および IED・PLC では、IEC 62351-3 に規定される通信セキュリティの考え方に基づき、暗号化通信 (TLS^{注6)}) 確立時に自装置および相手側の証明書に対して署名の検証を行うとともに、証明書チェーン^{注7)}を遡って信頼できる認証局により発行されたものであることを確認する。さらに、有効期間の確認に加え、OCSP^{注8)} または CRL^{注9)} (ルールや失効一覧表) を用いた失効確認を実施し、証明書の有効性を総合的に検証する。これにより、有効期限切れや失効済み証明書による通信を排除し、通信相手の正当性を担保する。

3 セキュリティ機能の実装・検証

(1) 検証システムの構成

本検証システムは、セキュリティ機能の検証を目的として、IEC 62351 に基づく認証および暗号化通信機能を実装した MintSCADA (株式会社ミントウェブ製 SCADA)、暗号化通信の検証が可能な IED シミュレータ (同社開発品)、ワゴジャパン株式会社 (以下、WAGO 社) 製 PLC (750 シリーズ)、ならびに証明書管理を担う認証局サーバにより構成される (図 2)。認証局サーバは、コスト面を考慮し、Linux をベースとしたオープンソースソフトウェアで構築している。また、暗号化通信 (TLS) に対応した IED 機器が市場において限定的であることから、IED シミュレータを使用している。

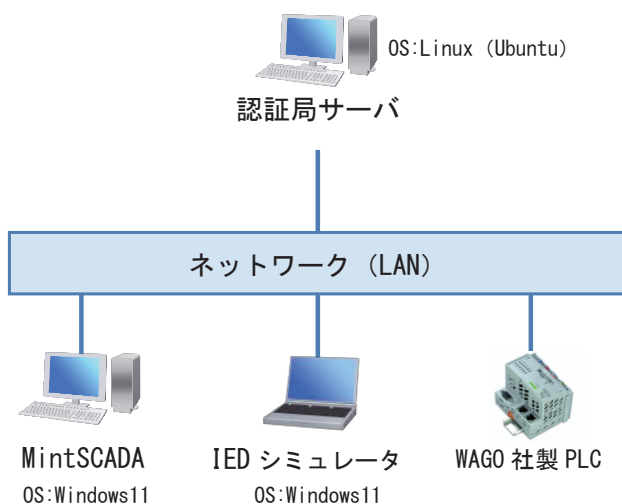


図 2 システム構成図

(2) セキュリティ機能の実装

認証局サーバは、公開鍵基盤 (PKI) に基づき、MintSCADA および IED シミュレータ、WAGO 社製 PLC に対して証明書の発行・管理を行い、機器認証および暗号化通信の基盤として構築した。発行した証明書は、USB メモリなどの外部媒体を用いて各機器に配布し、通信確立時の機器認証に利用することで、信頼できる機器間通信の確立を可能としている。さらに、認証局サーバは IEC 62351-8 に基づき、LDAP を用いてユーザ認証ならびにユーザ情報 (識別情報・認証情報) およびロール情報 (役割情報・権限情報) を一元管理する。この構成により、MintSCADA のユーザは付与された役割に応じて利用可能な機能が制御され、システム運用におけるアクセス制御の厳格化が図られる。

一方、MintSCADA では、既存の IEC 61850 通信機能を拡張する形で IEC 62351-3 に基づく TLS を実装し、MintSCADA と IED シミュレータ、WAGO 社製 PLC 間における証明書検証および暗号化通信を実現する。図 3 に、MintSCADA と IED シミュレータ、WAGO 社製 PLC 間における TLS セッション確立の処理フローを示す。TLS ハンドシェイク^{注10)}においては、SCADA と IED・PLC 双方が証明書を用いた相互認証 (Certificate) を実施し、正当な機器であることを確認した上で TLS セッションを確立する。さらに、セッション確立後は、暗号化された通信路上で IEC 61850 通信を行うことにより、通信内容の機密性および完全性を確保する。

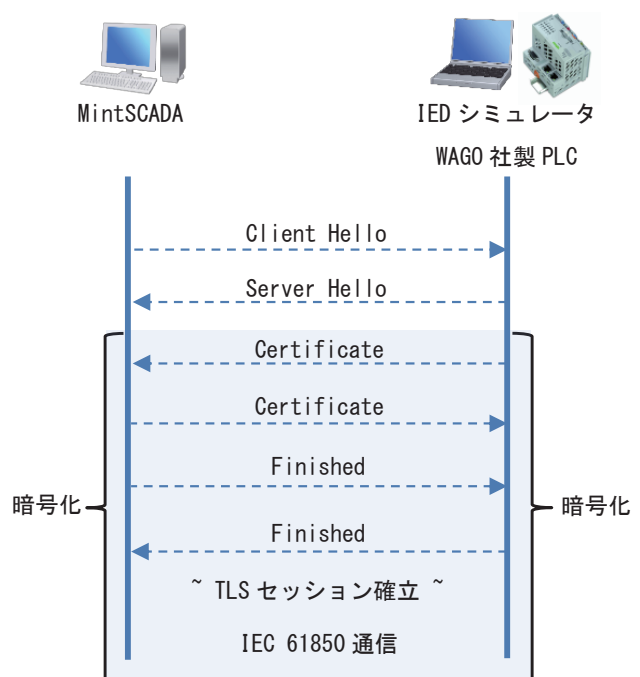


図 3 TLS セッション確立の流れ (TLS ハンドシェイク)

(3) セキュリティ機能の検証

MintSCADA と IED シミュレータ・WAGO 社製 PLC との間において、パケットキャプチャを接続することで通信データを可視化し、TLS セッション確立後、相互認証ならびに暗号化通信が可能であることを確認した。

図 4 に TLS 通信を実装した MintSCADA の平文通信および暗号化通信の様子を示す。

正当な証明書を持っていない IED・PLC からの接続要求については、TLS セッション確立時に認証エラーとして処理され、通信が開始されないことを確認している。さらに、有効期限の検証に加えて、OCSP および CRL を用いた証明書失効確認機能を適用した結果、失効済み証明書を用いた接続要求についても、同様に TLS セッション確立時に認証エラーとなり、通信が開始されないことを確認した。図 5 に、MintSCADA に表示される有効期限の検証時および認証エラー時のメッセージ画面を示す。

RBAC に基づく認可制御については、ユーザのロールに応じて利用可能な機能が適切に制限されることを確認している。具体的には、ユーザの登録、削除、変更といった管理操作機能は、RBAC 管理者のみが実行可能であり、オペレータ (OPERATOR) および閲覧者 (VIEWER) では、これらの管理操作機能を実行できないことを確認した。図 6 に、管理操作機能のユーザ登録およびロール変更の画面を示す。

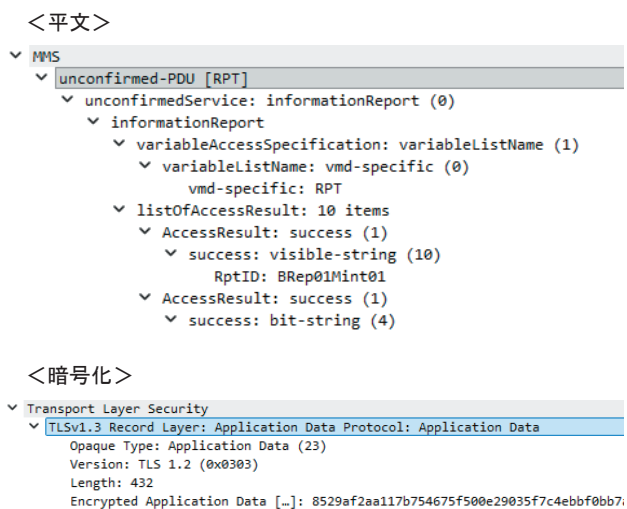


図 4 パケットキャプチャによる IEC 61850 通信

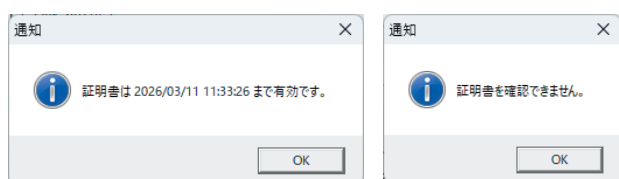


図 5 有効期限・認証エラー時のメッセージ画面

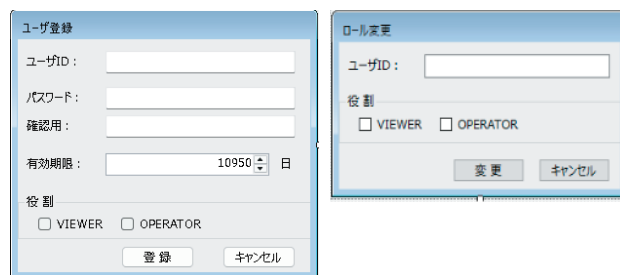


図 6 ユーザ登録およびロール変更の画面

4 検証結果から見た課題

本検証では、認証局サーバから各機器への証明書配布を USB メモリによる手動方式としたが、機器数の増加に伴う作業負担の増大や人的ミスのリスクが懸念される。実運用においては証明書配布の自動化が不可欠である。

また、監視データ点数の増加に伴い、SCADA の応答時間が増加する傾向が確認された。この要因として、暗号化・復号処理に起因する処理負荷が影響していると考えられる。リアルタイム性を維持するためには、暗号化・復号処理の効率化および高速化も不可欠である。

さらに、RBAC は IEC 62351-8 で示されている考え方ではあるが、IEC 62351-8 上で SCADA におけるユーザやロールの変更を IED や PLC へ通知する明確な手段は規定されていない。このため、RBAC 管理者が変更したユーザおよびロール情報を各機器へ一貫して反映するための仕組みを確立することが、今後の重要な課題である。

5 まとめ

本検証では、MintSCADA に対して IEC 62351 に基づく通信セキュリティおよび認証・認可機能の検証を行った。具体的には、TLS による MintSCADA と IED シミュレータ・WAGO 社製 PLC 間の暗号化および相互認証、PKI に基づく証明書管理、ならびに IEC 62351-8 に準拠した RBAC の概念に基づくユーザ認証・認可機能を実装し、その有効性を検証した。電力システムにおけるサイバーリスクの高まりを背景に、SCADA および IED・PLC のセキュリティ強化は今後一層重要となる。

本検証で得られた知見、および明確になった課題 (証明書配布の自動化や処理の高速化など) への対策を深めるとともに、電力システムの安全性向上に寄与し、より高度で信頼性の高い監視制御システムの提供を目指していく。

■参考文献

- (1) JEAG I111-2024 「電力制御システムセキュリティガイドライン」一般社団法人日本電気協会 (令和 7 年 5 月 30 日発刊)

- (2) IEC 62351-3:2023, Power systems management and associated information exchange–Data and communications security–Part 3: Communication network and system security–Profiles including TCP/IP
- (3) IEC 62351-8:2020, Power systems management and associated information exchange - Data and communications security - Part 8: Role-based access control for power system management
- (4) 黒田英次他：「IEC 62351 に基づく認証・暗号化に対応した SCADA の開発」, 電気学会保護リレーシステム研究会 PPR-26-009 (2026)

■語句説明

- 注1) SCADA : 「Supervisory Control And Data Acquisition」の略称。コンピュータによる監視制御システム。
- 注2) IED : 「Intelligent Electronic Device」の略称。電力設備において保護・制御・監視機能を担う装置。
- 注3) PLC : 「Programmable Logic Controller」の略称。工場や設備の制御を行うための装置。
- 注4) RBAC : 「Role-Based Access Control」の略称。役割に応じて操作権限を管理するアクセス制御方式
- 注5) LDAP : 「Lightweight Directory Access Protocol」の略称。ユーザ情報や組織情報などを階層構造で管理する通信プロトコル
- 注6) TLS : 「Transport Layer Security」の略称。データの盗聴や改ざんを防ぐための通信プロトコル
- 注7) 証明書チェーン : 証明の根拠を段階的につなぐ仕組み
- 注8) OCSP : 「Online Certificate Status Protocol」の略称。証明書が失効していないかを確認する通信プロトコル
- 注9) CRL : 「Certificate Revocation List」の略称。認証局が発行した証明書の失効一覧をまとめたリスト
- 注10) TLS ハンドシェイク : 通信を担う機器間での安全な通信路を確立するための初期交渉プロセス

黒田 英次

株式会社ミントウエーブ
技術開発部 ソフト設計グループ 所属

益子 奈々海

株式会社ミントウエーブ
電力システムソリューション事業部 所属

荒井 俊成

株式会社ミントウエーブ
電力システムソリューション事業部 所属

最適なメンテナンスタイミングを提案する センシング技術による配電盤内の環境評価と 環境診断システムの開発

■折戸 由貴
Yuki Orito

東光高岳では受変電設備管理者の負担軽減に貢献すべく、スマート保安の考え方に則ったセンシング技術による配電盤内の環境診断技術の開発を進めている。現在は環境センサによる検証で得られた絶縁物の汚損に関する各種知見を活用して配電盤内環境の遠隔診断手法を構築しており、インターネット環境があれば端末を問わず手で状況を確認できるシステムを開発中である。本システムにて盤内環境の把握が容易になれば、個々の設置環境や機器の状態を鑑みてメンテナンス周期を最適化することができ、設備保守にかかる負担軽減に貢献できる。今回は選定した環境センサによる検証と、開発中の配電盤内環境診断システムについて紹介する。

1 はじめに

受変電設備の保守において、近年では設備の高経年化や労働人口の減少、それに伴う技術継承力の低下などによって、設備管理者側の負担が大きくなっている。また、昨今では台風など自然災害の激甚化を受けてBCP（事業継続計画）対策にも注目が集まり、レジリエンスの強化が喫緊の課題となっている。こうした流れを受け、設備管理者の負担軽減や設備保安力の向上のため、官民の協力によるIoTやAIなどのデジタル技術を活用した「スマート保安」^{注1)}の動きが加速している。

この動きは変電所の監視だけでなく、所内機器の状態診断についても適用され、当社でも配電盤内（以下、盤内）の環境診断技術や油入変圧器の状態診断技術について開発を進めている。

盤内機器に起こりうるリスクの一つとして、絶縁物表面への塵埃の堆積による絶縁性能低下がある。盤内には真空遮断器（VCB）などの機器が収められており、VCBの絶縁フレームには主に不飽和ポリエステル系繊維強化プラスチック（以下、FRP）などの樹脂絶縁材料が用いられている。こうした樹脂絶縁材料には高い絶縁性能が求められるが、経年に伴って塵埃や海塩粒子などの汚れが樹脂表面に堆積していき、これに降雨時などの高温状態が重なることで樹脂表面の絶縁性能が低下してしまうことが一般に知られている（図1）。

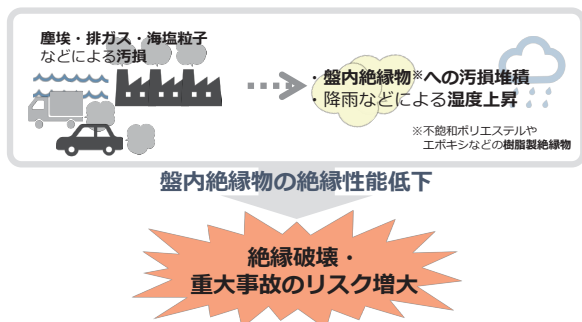


図1 絶縁物の汚れと絶縁破壊リスクのイメージ

多くの配電盤は半密閉筐体であるため堆積した汚損物質が風雨で除去されにくく、特に塩害地域や工業地帯では汚れによる絶縁破壊のリスクが大きい⁽¹⁾。よって、予防保全の観点において清掃などのメンテナンスは不可欠であり、個々の設置条件に合わせたメンテナンスの実施には盤内の汚損状態の把握が重要である。しかし、盤内に付着した汚損量の把握やその成分の分析には、専門の分析装置や分析技術が必要になる。

当社ではこのような課題に対し、図2に示すような、センシング技術による盤内の環境診断技術と、蓄積データの遠隔可視化技術を組み合わせた環境診断システムを構築することで、盤内の汚損状態の把握を支援し、スマート保安の考え方に基づく配電盤メンテナンスの負担軽減を目指している。

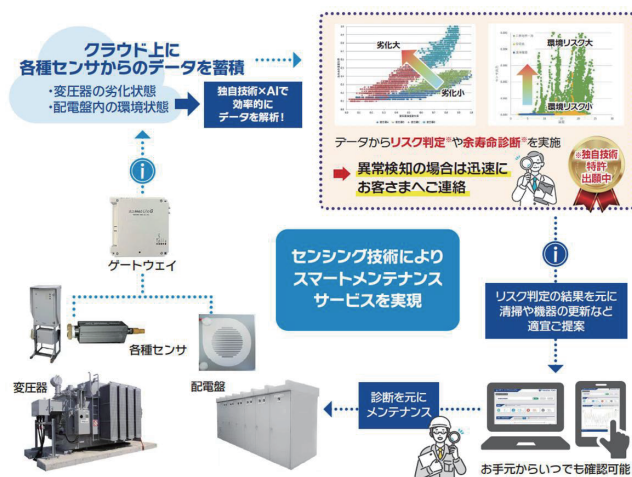


図2 センシング技術を活用した診断システムの構成

今回は環境センサとして選定した大気腐食モニタリング（Atmospheric Corrosion Monitor）センサ（以下、ACM^{注2)}センサ）の特徴および各種環境でのモニタリング検証の結果と、現在開発中の盤内の環境診断システム（以下、本システム）について紹介する。

2 ACM センサの原理と特徴

次章にて紹介する検証では、汚損検知用センサとして JIS Z 2384:2019 に規定された ACM センサを採用した。ACM センサは積層型ガルバニック対と呼ばれる構造を有しており、図 3 のように異なる種類の金属が電解質を通して接触した際に腐食が進行する、異種金属接触腐食反応^{注3)}を利用して大気環境の腐食性をモニタリングするセンサである。用途としては、主に鉄塔や橋梁の腐食監視に利用されている。

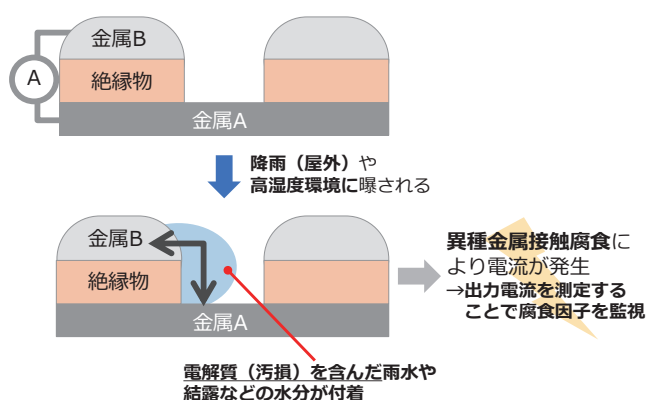


図 3 ACM センサの概略図

図 4 に ACM センサの特徴を示す。本センサの特徴は、腐食性をモニタリングするため、塩化物、硫化物、硝酸化合物などの陰イオンを含む塵埃・雰囲気や、湿気（水分）などの腐食を促進させる因子をセンサ単体で総合的に捉えることが可能になる点である。

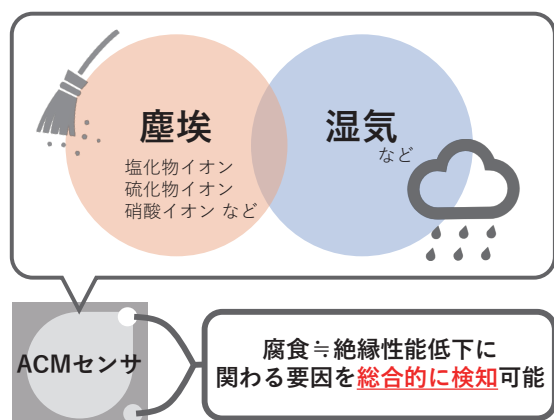


図 4 ACM センサの特徴

また、当社既報⁽²⁾により、これらの腐食因子は塵埃などの形で樹脂絶縁材料の一つである FRP 表面に付着すると、湿度が上昇した際に FRP の表面抵抗が低下することが判明している。

3 検証

3.1 実器環境における検証

選定した ACM センサにて盤内の汚損を検知可能を確認するため、実際に使用されている配電盤にて実施した検証内容について紹介する。表 1 に各検証先の塩害区分と検証期間を示す。

実器環境での検証では、需要家変電所の盤内にこの ACM センサと温湿度センサを設置した。これらを設置から一定期間経過後に回収し、ACM センサ表面の付着物（以下、汚損）についてイオンクロマトグラフ^{注4)}による陰イオン分析を行った。

表 1 検証先諸元

検証先	塩害区分	周辺状況等	検証期間
A	岩礁隣接地域	海、工業地帯	10 か月
B	塩害地域	住宅街	10 か月
C	非塩害地域	住宅街、線路沿い	10 か月
D	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃少	4 か月
E	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃多	3 か月
F	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃少	3 か月
G	非塩害地域	暴露試験場	3 か月
H	岩礁隣接地域	暴露試験場	6 か月

3.2 暴露試験場における検証

暴露試験場（表 1 内 G, H）での検証では、配電盤を模擬した小型キャビネットを設置した。キャビネット内には ACM センサおよび温湿度センサと FRP 板を設置し、一定期間経過後に回収して分析を実施した。FRP 板に対しては ACM センサと同様に汚損分析を行ったほか、絶縁特性把握のため、印加電圧 100 V、室内高湿度条件（20～25℃、80% RH 以上にて 1 時間静置）にて表面抵抗測定（1 分値）を行った。

4 結果と考察

図 5 に検証後の ACM センサ表面 1 cm² あたりの陰イオン性汚損付着量を示す。なお、検証の都合により試験場 H の汚損付着量については検証 3 か月経過時点で回収した FRP 板表面の汚損付着量にて代替した。図 5 より検証期間 10 か月のグループでは検証先 A, B, C の順にセンサ表面の汚損付着量が多く、検証 3～4 か月のグループでは検証先 E の汚損付着量が特に多い結果

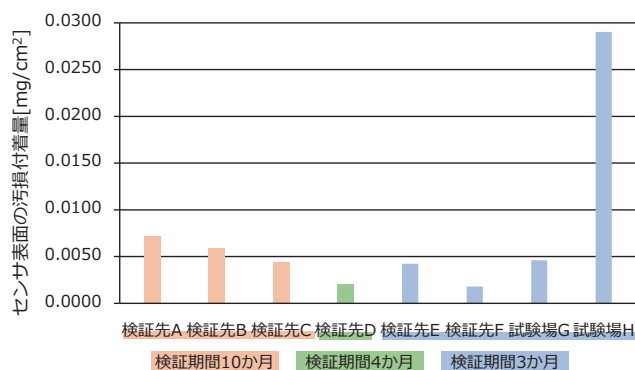


図5 各検証先より回収したセンサ表面の陰イオン性汚損付着量

となった。また、暴露試験場である試験場 G, H では検証先 E よりも汚損付着量が多い結果であった。

図6に試験場 G, H から1か月毎に回収したFRP板の表面抵抗を示す。FRP板の表面抵抗は設置期間の経過に伴って次第に低下していき、ばらつきも増大した。この表面抵抗低下とばらつきの増大は、時間経過でFRP板表面の汚損付着量が増加したことによるものと推測する。

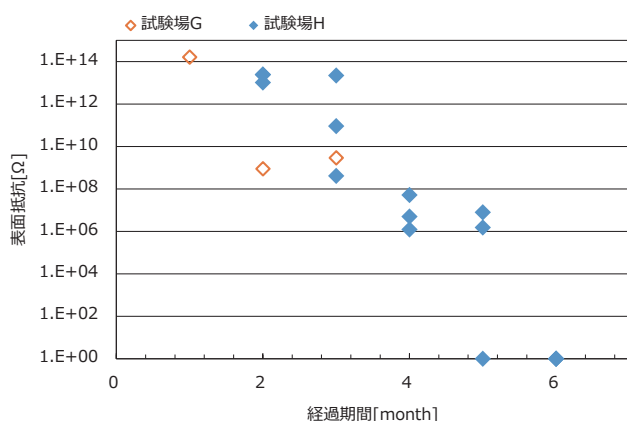


図6 暴露試験場より回収したFRP板の表面抵抗

また、回収したFRP板の中には設置後3か月で表面抵抗が約 $10^8 \Omega$ まで低下し、5か月で測定エラー（導通状態： 10Ω 未満）になる試料が確認された。エラー手前のサンプルの表面抵抗は $10^6 \sim 10^7 \Omega$ であったことから、不飽和ポリエステル系FRP板の場合は表面抵抗が $10^6 \sim 10^7 \Omega$ まで低下するほど表面へ汚損が付着すると、以降は部分放電や絶縁破壊の恐れがあることがわかった。一般に絶縁材料の表面抵抗は $10^7 \sim 10^{18} \Omega$ の値をとるとされる⁽³⁾ ため、この絶縁材料としての下限値は上記の結果とも合致している。

図7に取得したACMセンサ出力と容積絶対湿度^{注5)}の関係（抜粋）を示す。図中には今回の検証先6か所と暴露試験場のうち、図5に示す検証先で特徴的な岩礁隣接地域の検証先A、塩害地域の検証先B、非塩害地

域で塵埃が少なかった検証先D、非塩害地域で塵埃が多かった検証先Eをプロットしている。

検証先ごとのプロットの分布傾向を見ると、盤内の汚損が少なかった検証先Dでは低出力域にプロットが集中し、一方で汚損が多かった検証先A, Eでは高出力域までプロットが広がった。また、両者の中間程度の汚損付着量であった検証先Bは中間程度の位置にとどまった。

以上から、盤内に汚損の多い環境や塩害を受ける環境ではセンサ出力が増加するという想定とおおむね一致する結果が得られた。

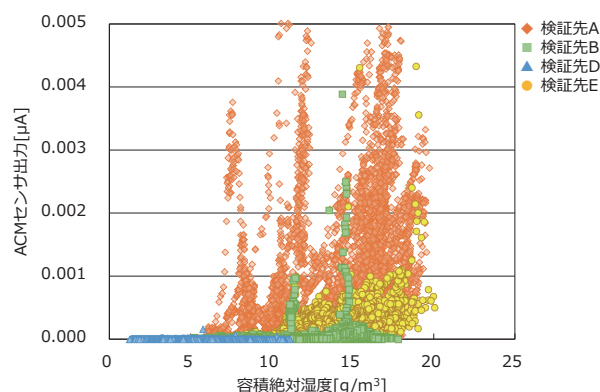


図7 ACMセンサ出力と容積絶対湿度の関係（抜粋）

ACMセンサは2章にて述べた通り腐食の原理を利用しており、センサ表面の反応部に陰イオン成分など腐食因子となる汚損が堆積した状態で高湿度環境に曝されると、表面に電池が形成され、微小電流を出力する。これに対し、不飽和ポリエステル系FRPの表面抵抗は図6および既報⁽³⁾の通り、表面への汚損付着と高湿度環境が重なることで低下するため、ACMセンサの出力原理とFRPの表面抵抗低下の条件は近いと推測される。よって、ACMセンサの出力を参照することで汚損による絶縁性能低下のリスクを把握できると考えられる。

5 ACMセンサを活用した盤内環境診断システム

5.1 盤内の環境リスク診断方法

盤内環境の診断法として、図7の関係に対してまず縦軸のセンサ出力と横軸の容積絶対湿度のそれぞれに閾値を設け、図8のように低リスク領域と高リスク領域をエリア①～④までレベル分けした。

4つのエリアのうち、ACMセンサ出力の高いエリア③、④は分布が集中すると絶縁破壊のリスクが高い、高リスクエリアとしている。次に、このレベル分けしたグラフ上のプロット分布状況を算出することで、環境リスクが判定できるかについて検討した。プロット全体における高

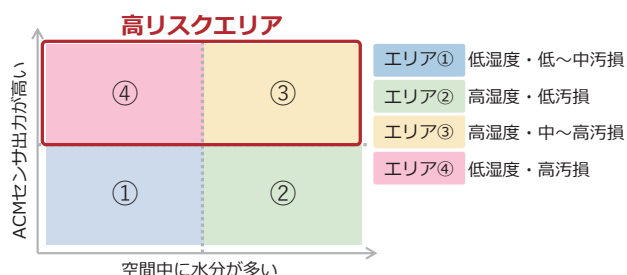


図8 リスク診断方法のエリア分けの考え方

リスクエリアのプロット分布を表したものが図9である。

図9のうち高リスクエリアに着目すると、A～Cの10か月検証のグループでは検証先Aが、D～Fの3～4か月検証のグループでは検証先Eが高くなっていた。この傾向は、表1にまとめた各検証先の環境および図5に示す汚損付着量とも相関性がみられた。よって、ACMセンサ出力と容積絶対湿度との関係を参照することで、対象盤内の環境リスクの診断が可能であることが確認できた。

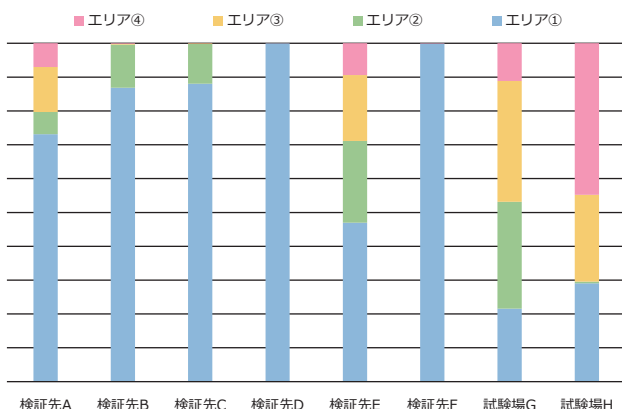


図9 検証先ごとのリスク評価結果

5.2 環境診断システム

本システムは、センサヘッドと計測器本体（図10）を盤内に設置し、モバイルネットワークを介して蓄積したセンサのデータをクラウドサーバ上で処理することで、盤内の環境を常時遠隔で見える化できる。

センサヘッドは磁石による取り付け方式を採用しており、DINレール不要で盤内の壁へ直接取り付けられるため、設置場所の自由度が高くなっている。計測器のサンプリング周期は1分であり、昨今増加傾向にあるゲリラ豪雨（局所的な短時間豪雨）などの急な降雨とその後の湿度上昇によるリスク増加についてもレスポンス良く捉えることが可能である。

本システムはクラウドサーバに蓄積された各種情報をweb画面で閲覧する形式のため、既存設備へのソフトウェアインストールは不要であり、インターネットブラウザがあればパソコン、スマートフォンなど端末を問わず遠隔で状況を確認できる。

図11に端末からの遠隔監視を可能とする開発中の



図10 センサヘッドおよび計測器外観（開発中）



図11 本システムのweb画面イメージ

web 画面イメージを示す。端末からの遠隔監視画面では、盤内の温湿度と環境レベル（清掃推奨度として表示）、センサ測定値の経時変化といった盤内の汚損検知、環境リスクで重要となる情報をビジュアル的に分かりやすく表示している。

これらの情報をユーザーに活用いただくことで、盤内環境の把握だけでなく、汚損堆積による盤内機器トラブル予防のための効率的なメンテナンス計画の立案にも貢献できる。

6 おわりに

センシング技術を用いた盤内の環境診断システム開発にあたり、実環境および屋外暴露試験場にて ACM センサによるモニタリング検証を実施した。検証結果より、取得した ACM センサ出力と湿度の関係から盤内の環境評価が可能であることを明らかとした。併せて、盤内で主要な絶縁材料である不飽和ポリエステル系 FRP 表面への汚損物付着と表面抵抗低下の関係を取得し、絶縁破壊リスクに関わる知見も得た。

現在は上記の診断技術を搭載した本システムを開発中であり、インターネット環境があれば端末を問わず盤内の状態を簡便に常時遠隔監視できる。

本システムにより盤内環境の把握が容易になることで、盤内設備の安心・安全な稼働の実現とメンテナンス時期の最適化ができ、設備保守にかかる負担の軽減に貢献できる。当社では今後も配電盤メンテナンスのスマート化サービス構築に向け、環境診断システムの開発を進めていく。

■参考文献

- (1) 電気協同研究会編：「電気協同研究第 50 巻 2 号変電設備保安の高度化・効率化」，電気協同研究会，p.142（1994）

- (2) 折戸由貴，栗原二三夫：「配電盤スマートメンテナンス化へ向けた盤内絶縁物の絶縁性低下評価と劣化診断技術」，東光高岳技報，No.6，pp.4-7（2019）
- (3) 電気学会直流機長寿命化技術調査専門委員会編：「経年使用直流機の長寿命化技術について」，電気学会直流機長寿命化技術調査専門委員会，p.37（2004）

■語句説明

- 注 1) スマート保安：技術革新や少子高齢化に伴う労働人口の減少といった社会構造の変化に対応すべく，メンテナンスの省人化・効率化など保安力向上を目的として国と民間が協力して行っている取り組みのこと。
- 注 2) ACM：Atmospheric Corrosion Monitor の略であり，ACM センサは大気環境の腐食性を評価するモニタリングセンサの一種である。本稿の検証に使用した ACM センサは JIS Z 2384:2019 に規定されたものである。
- 注 3) 異種金属接触腐食反応，積層型ガルバニック対：異なる種類の 2 つの金属が塩分などの電解質を含む液体，つまり電解液を通して接触した際に片方の金属の腐食が促進される現象を異種金属接触腐食，またはガルバニック腐食という。本稿の検証で使用した ACM センサに用いられる積層型ガルバニック対は鉄鋼の上に絶縁層を挟んで銀が塗布された層状の構造をしており，この鉄と銀の対の間に水分を含んだ汚損が接触することでガルバニック腐食が発生し，同時に微小電流が発生する。
- 注 4) イオンクロマトグラフ：イオンクロマトグラフィーという分析手法に用いる装置のこと。溶液に含まれるイオンの定性分析および定量分析が可能であり，本稿では溶液中の陰イオン（塩化物イオン，硝酸イオン，硫酸イオン）の定量分析に用いた。
- 注 5) 容積絶対湿度：空間中に存在する水蒸気量を示す単位のこと。

折戸 由貴

戦略技術研究所
技術開発センター 材料技術グループ 所属

製品紹介

電気自動車向け
次世代超急速充電器「SERA-400」

■ 古家 成正

Shigemasa Furuie

■ 鈴木 剛志

Takeshi Suzuki

■ 鈴木 健司

Takeshi Suzuki

■ 中野 靖弘

Yasuhiro Nakano

1 はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、電気自動車（以下、EV）の普及が求められており、同様に充電インフラの拡充が必要とされている。経済産業省が策定した「充電インフラ整備促進に向けた指針」⁽¹⁾には、「車両の電池容量と充電性能を踏まえ、また、利便性向上と費用負担を考慮し、高速道路など充電ニーズが高い場所においては、1口90kW以上の高出力の急速充電器を基本とし、特に需要の多い場所においては150kWの急速充電器も設置する。」とあり、より高出力に対応した充電器のニーズは高まる傾向にある。また、同指針には、「欧米における350kW充電への拡張可能性や、DC 800V対応車両の普及可能性を考慮した議論もあることから、超急速充電（350kW等）やさらなる高電圧化への対応」との記載があり、今後、急速充電器の大容量化、高電圧化の対応が一段と進むと思われる。

そこで、東光高岳は株式会社 e-Mobility Power と次世代超急速充電器「SERA-400」（以下、本器）（最大出力350kW、最大電圧1,000V）を共同開発し、SERAシリーズとしてラインアップに加えたので紹介する。

2 仕様と主な特長

2.1 仕様

本器の外観を図1、標準仕様を表1に示す。



図1 「SERA-400」外観

表1 標準仕様

品名	SERA-400	
型式	HFR1-400B13	
入力	三相 3 線 AC 400 V, 50/60 Hz	
出力	1 口定格出力容量	200 kW
	1 口最大出力容量	350 kW
	2 口合計出力容量	400 kW (200 kW × 2 口)
	直流出力電圧	DC 150 V～1,000 V
	最大出力電流	350 A
	連続定格電流	200 A
効率	94%以上 (定格入出力時)	
充電ケーブル	70 mm ² タイプ	
保護等級	IP44	
周囲温度	-10～ + 40℃	
周囲湿度	30～90% (結露なきこと)	
充電方式	CHAdeMO ^{注1)} Ver2.0.2	
通信方式	OCPP 2.0.1 ^{注2)}	
課金認証	あり (時間課金／従量課金)	
外形寸法	W 800 mm × H 2,655 mm × D 1,050 mm (突起物含まず)	
重量	約 950 kg	

2.2 開発コンセプト

(1) より早く充電できる

- ・CHAdeMO規格一口最大350kW出力（世界初：当社調べ）
- ・10分の充電で、約400km相当の走行が可能^{注3)}
- ・車両性能の進化（バッテリーの大容量化、高電圧化）を見据えた次世代対応の充電スペック
- ・「電気設備に関する技術基準の解釈」電圧に関する内容の追加（第199条の2 3項）を踏まえ、1,000V仕様とすることで、高電圧バッテリー搭載車両および電動船舶への超急速充電の実現

(2) 誰でも楽に操作できる

- ・新型充電コネクタの採用により現行製品比で約30%軽量化
- ・新型充電ケーブルの採用により現行製品比で約10%細く、約20%軽量化
- ・改良したケーブルマネジメントシステム（図2）の導入により、充電コネクタケーブルを楽に操作可能。また、ケーブルが地面に接することがないため、エンドユーザーは服を汚すことなく充電ができ、充電ケーブルも傷つきにくい
- ・プラグ&チャージ^{注4)}にも対応可能



図2 ケーブルマネジメントシステム

(3) 分かりやすい情報提供と柔軟なサービス

- ・高輝度で視認性が良く、エンドユーザーが欲しい情報や事業者からの重要告知をわかりやすく表示できる大型液晶画面
- ・時間課金（分課金）と従量課金（kWh 課金）のどちらにも対応可能
- ・充電終了後の放置車両対策（ペナルティ課金）にも対応可能
- ・再エネの有効活用を促進するダイナミックプライシング（日・時間帯別料金）の導入も対応可能

(4) 視認性が高く、スタイリッシュなデザイン

- ・インダストリアルデザイナーにご協力いただき、充電器のユーザビリティを追求
- ・あらゆるエンドユーザーにとって使いやすいユニバーサルデザイン^{注5)}
- ・視認性が高く、遠くからでも充電ステーションの存在が一目で把握できる未来的な外形とライティング

2.3 出力電圧による充電性能比較

出力電圧を高電圧化することにより、同じ電流でもより大きな電力を供給可能となり、充電時間の短縮に寄与する。従来充電器（450 V）と本器（1,000 V）で比較すると図3のようになる。従来充電器では、電流

350 A、電圧 450 V で充電をするため最大 157 kW の充電範囲（出力）となる。しかし、本器では電流は同じ 350 A であるが、電圧が 1,000 V であるため最大 350 kW の出力が可能となる。

2.4 ディスプレイの大型化

「SERA-120」では、4.3 インチのディスプレイを採用しているのに対し、本器では、15.6 インチのディスプレイを採用して視認性を向上させた（図4）。

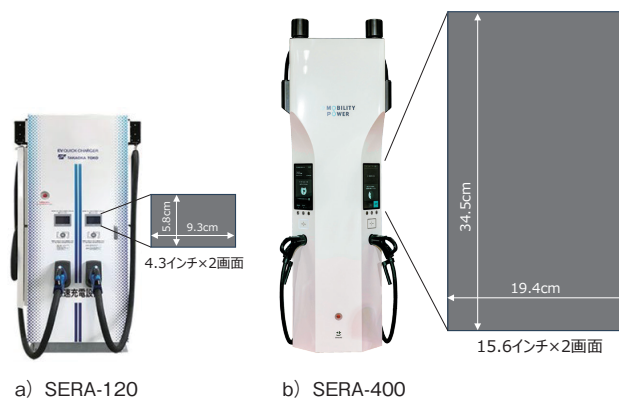


図4 ディスプレイサイズ比較

3 おわりに

本稿は大容量・高電圧化対応に向けた 400 kW 出力の急速充電器「SERA-400」について紹介した。本器の開発により、東光高岳では普通充電から急速充電まで 3～400 kW の出力に対応できる 6 機種をラインアップした。これにより、お客様の様々な充電シーンに応えることができる。

今後も充電インフラの整備促進に向けて、ラインアップをさらに拡充していきたい。

■参考文献

- (1)「充電インフラ整備促進に向けた指針」経済産業省（2023 年）

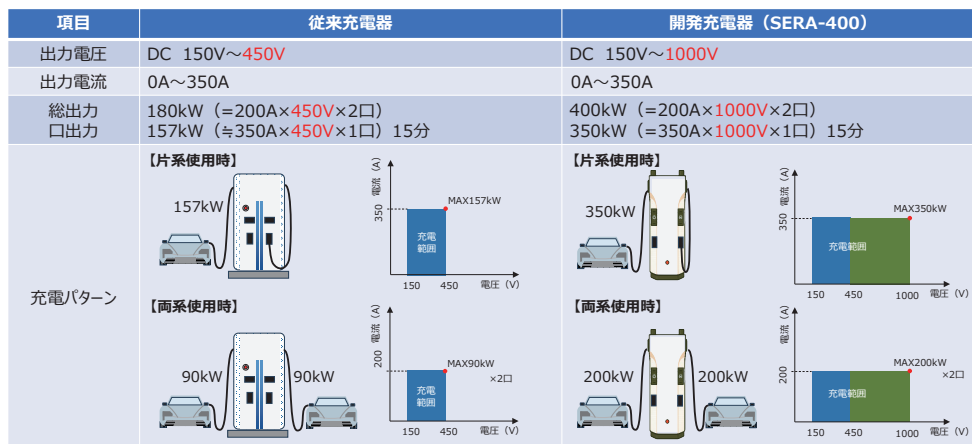


図3 出力電圧による充電性能比較

■語句説明

- 注 1) CHAdeMO：2010 年に日本が主導して規格化を実現した EV の急速充電方式であり、2014 年には IEC（国際電気標準会議）にて国際標準として承認された。「CHArge de MOve＝動く、進むためのチャージ」、「de＝電気」、「充電中にお茶でも」の 3 つの意味を含んでいる。
- 注 2) OCPP 2.0.1：OCPP（Open Charge Point Protocol）は、電気自動車用急速充電器を管理する国際標準通信プロトコルの名称である。現在 OCPP 1.6 が主流であり、OCPP 2.0.1 にシフトが進んでいる。OCPP 2.0.1 では、電力需要の状況に応じた最適な充電制御を実現するスマート充電機能等に対応している。
- 注 3) 車両が高電圧での急速充電に対応している場合の理論値。実際の充電電力量は、車載電池の残容量や温度、外気温等の条件により変動する。高電圧での急速充電に対応した車両が 350 kW 出力で 10 分充電した場合、最大で 58.3 kWh 充電することができ、車両電費が 7 km/kWh の場合、約 400 km の走行が可能となる。
- 注 4) プラグ & チャージ：EV に充電プラグを接続するだけで、充電と決済をおこなえる機能。

- 注 5) ユニバーサルデザイン：あらゆる人にとって使いやすいデザイン。一般的には年齢や性別、障がいの有無や言語の違いにかかわらず、はじめから幅広い利用者を対象に製品や機器、サービス、環境をデザインすることを指す。

古家 成正

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

鈴木 剛志

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

鈴木 健司

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

中野 靖弘

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

製品紹介

微細バンパの高速・高精度検査を実現する ウェーハバンパ検査装置 (WVI-S10330-RA)

■ 大多和 洵
Jun Otawa

■ 木納 良典
Yoshinori Kino

1 はじめに

昨今の AI 技術を主軸としたデジタル社会の進展は、半導体デバイスのさらなる性能向上を促し、製造技術に劇的な変革をもたらした。特に、近年注目を集める「チップレット」化技術は、パッケージ内の複数のチップ^{注1)}を「インターポーザ」と呼ばれる中間基板を介して高密度に接続することで、高帯域・低遅延・低消費電力なデータ伝送を可能にし、大幅な高性能化を実現する技術である。

この技術の中核を担うインターポーザは、主にウェーハプロセス^{注2)}を経て製造され、その表面には膨大な数のバンパ（突起状の接続端子）が形成される。複数のチップを集積するチップレット構造のパッケージは、極めて付加価値の高いデバイスであり、製造コストも非常に高いため、バンパ接合には極めて高い品質が要求される。そこで、高い品質を担保し、かつ早期に不良を検知して製造上のロスを最小限に抑える高精度なバンパ検査は不可欠なプロセスとなっている。

こうした背景から、主にインターポーザ用のバンパ検査を対象とした新たなウェーハバンパ検査装置「WVI-S10330-RA」（以下、本装置）を開発した。以下にその概要を報告する。

2 製品ラインアップ

当社では、半導体製造の各工程における多様なニーズに応えるため、検査対象物や対象工程に最適化したバンパ検査装置を展開している。**表1**に、当社の製品ラインアップとそれぞれが対象とする検査対象物および半導体の製造工程を示す。本装置は「WVIシリーズ」に該当し、特に微細化が進む前工程および中工程のウェーハ検査を担う製品である。

表1 東光高岳のバンパ検査装置ラインアップ⁽¹⁾

対象工程	主な工程内容	検査対象物	対応製品
前工程	回路形成 配線形成	ウェーハ	WVI シリーズ
中工程	インターポーザ 製造等	ウェーハ パネル	WVI / SVI シリーズ
後工程	パッケージング 最終試験	パネル 基板	SVI / TVI・ EVI シリーズ

3 仕様

本装置の外観を**図1**に、仕様を**表2**に示す。

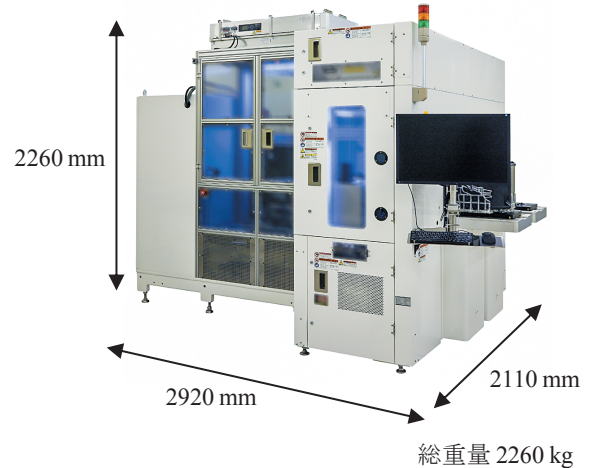


図1 外観

表2 仕様

クリーンクラス ^{注3)}	クリーンクラス 100 (ISO 14644-1 Class 5 相当)
ロードポート数 ^{注4)}	2 または 3 (3 はオプション対応)
対応ウェーハサイズ (mm)	300
3D センサ型式	SCS-10330R1 ⁽²⁾
視野サイズ (mm)	13.0 × 13.0
XY 画素分解能 (μm)	1.67
高さ検査範囲 (μm)	最大 300
検査速度 (WPH ^{注5)})	10 (検査範囲 60 μm 時)
検査項目	バンパ高さ コプラナリティ ^{注6)} バンパ径など
バンパ高さ繰返し精度 (μm)	3σ AVE ≤ 0.15
バンパ最小ピッチ (μm)	15
ウェーハ毎最大バンパ数 (個)	5 億
SEMI ^{注7)}	S2/S8 準拠

4 特長

(1) クリーンクラス 100 対応

発塵の少ない部材を選定し、かつ外部からの空気の侵入を抑えた構造設計により、米国連邦規格によるクリーンクラス 100 を実現した。

(2) 安全規格 SEMI S2/S8 対応

前工程の半導体製造装置に求められる国際標準である SEMI 規格のうち、S2 (安全) および S8 (人間工学) に準拠した。本装置では第三者認証機関による SEMI S2/S8 認証を取得している。

(3) 自動化および無人化の規格に対応

GEM300^{注8)}に対応した装置制御および上位 (HOST) 連携機能に加えて、SEMI E84 により標準化された OHT インタフェース^{注9)}による自動搬送システムに対応した。これにより、量産ラインの高度な自動化・無人化運用を実現した。

(4) 効率的な検査

ロードポートを2つ用意したことで検査中にもう一方の FOUP^{注10)} 交換を可能とし、連続した検査を実現したことで検査速度 10 WPH を達成した。

(5) 高速処理と大規模バンプ対応

パッケージ基板とウェーハでは搭載されるバンプの数が圧倒的に異なり、検査時の結果を全て PC 内のメモリに保持し続けると、メモリのスワップ^{注11)}を招き、検査処理が遅延する課題があった。そのため本装置では検査が完了したチップからメモリを解放し、使用するメモリを最適化することで、処理遅延を抑えつつ最大バンプ数 5 億個のバンプ検査を可能にした。

(6) 高速・高精度計測

超微細バンプ検査用に開発した最新の 3D センサ SCS-10330R1⁽²⁾ を搭載することで高速かつ高精度な計測を実現した。図 2 に 300 mm ウェーハ (バンプピッチ 40 μm 、バンプ数約 18 万 / チップ、チップ数 61) を検査したときのバンプ高さ計測の繰り返し精度 (1 チップ分) を示す。

バンプ毎に計測値のバラつきを表す 3σ 値を算出すると、各バンプの繰り返し精度の平均 ($3\sigma\text{AVE}$) は 0.10 μm であり、高精度に計測できていることがわかる (表 2 参照: $3\sigma\text{AVE} \leq 0.15$ を満たす)。このときの検査速度は 11 WPH であり (表 2 参照: 10 WPH を満たす)、高速計測が実現できている。

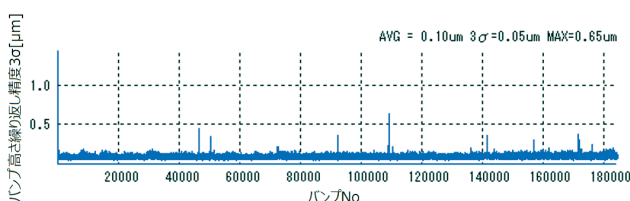


図 2 バンプ高さ計測繰り返し精度の例

5 おわりに

半導体製造の前工程に対応した高速・高精度なウェーハバンプ検査装置 (WVI-S10330-RA) を製品化した。今後も高速・高精度な計測技術を追求し、お客様にご満足頂ける製品を提供する所存である。

■参考文献

- (1) 荒浪太一 「半導体業界のニーズに応える高速・高精度インラインバンプ検査装置 TVI-S10210」 東光高岳技報 No.10 (2023)
- (2) 水野祐樹, 石原満宏, 日名子達也 「先端半導体向け超微細バンプ高さ検査センサの開発」 東光高岳技報 No.12 (2025)

■語句説明

- 注 1) チップ: 電子回路が作りこまれた小さな半導体部品のこと。
- 注 2) ウェーハプロセス: 半導体の材料であるウェーハ (シリコンなどの薄い円盤状の板) の上に、微細な電子回路を形成する製造工程のこと。
- 注 3) クリーンクラス: 空気中の塵 (粒子) の数で分類する清浄度を表す指標。国際規格 (ISO 14644-1) などで定義される。
- 注 4) ロードポート: FOUP^{注10)} (ケース) からウェーハを取り出して搬送ロボットに受け渡す台のこと。
- 注 5) WPH: 1 時間あたりに処理できるウェーハ枚数のことで、今回はウェーハサイズ 300 mm、ウェーハ内のチップの、サイズ 28 × 34 mm、数 58 チップとし、検査範囲は 60 μm とした。
- 注 6) コプラナリティ: パッケージ内のバンプの高さが同一平面上にあるかを示す指標。
- 注 7) SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International): 半導体や電子部品産業の国際的な業界団体のことで半導体業界のルールづくりや標準化を行う組織。
- 注 8) GEM300: 300 mm ウェーハ用半導体工場で使われる装置の通信・自動化の標準規格群のことで、半導体装置同士を自動で連帯させるための共有ルール。
- 注 9) OHT インタフェース: 自走式の搬送ロボット (OHT: Overhead Hoist Transport) が製造・検査装置に安全にかつ確実にウェーハを搬送するためのインタフェース (データのやり取り、モノの受け渡し) のこと。
- 注 10) FOUP (Front Opening Unified Pod): 300 mm ウェーハを清潔な状態で保管・搬送するための専用ケースのこと。
- 注 11) メモリのスワップ: コンピュータの RAM (物理メモリ) が不足したとき、一時的にストレージ (HDD/SSD) の一部をメモリの代わりに使う技術。

大多和 洵

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 設計グループ 所属

木納 良典

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 所属

製品紹介

重要施設の電力安定供給に貢献する スポットネットワーク受変電設備対応 多回路総合計器用変流器

■ 多賀 真弓
Mayumi Taga

1 はじめに

低圧スポットネットワーク配電方式は複数の回路から受電し、一部の回路が停止しても電力供給を継続できる方式である。そのため、都市部の重要施設（オフィスビル・病院・データセンターなど）で採用されている。

低圧スポットネットワーク配電方式の構成要素である多回路総合計器用変流器（以下、本器）は、主変流器と合成変流器の2機種で構成される。本器は、取引用の多回路計器と組み合わせて使用することで、複数の回路であってもお客様の設備の電力使用量を計測でき、公平な電力の取引に貢献できる。

重要施設を運用するお客様にとって、スポットネットワーク方式の構成機器を安定調達することは、電力の安定供給を継続するための重要課題である。当社は、こうした市場のニーズに応え、機器を市場へ継続的に安定供給する役割を担うため、本器を開発したので紹介する。

2 概要

図1に本器を2回路で使用する場合の構成イメージを示す。主変流器は、両回路のUVW相の母線に取り付け、電流を計器で計測できるレベルまで変流する。合成変流器は、同相の両回路に設置された主変流器の出力電流を合算する。各相の合成変流器からの出力電流を多回路計器で計測することで、両回路の電流監視ができる。回路が3回路になった場合も、各回路のUVW相に主変流器を取り付け、相ごとに合成変流器で電流値を合算する構成は同じである。

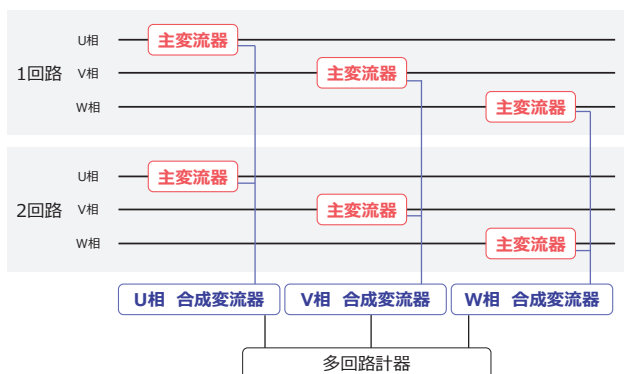


図1 本器の構成イメージ

2.1 主変流器

主変流器（図2）は、鉄心およびコイルをエポキシ樹脂で絶縁した構造である。分割貫通型^{注1)}であるため、既設の導体を切断することなく、後付けでの設置が可能である。

また、導体貫通窓の寸法は、JIS C 1736-1:2021「計器用変成器（電力需給用）－第1部：一般仕様」の附属書C（C.4.2）に記載された寸法に準拠している。

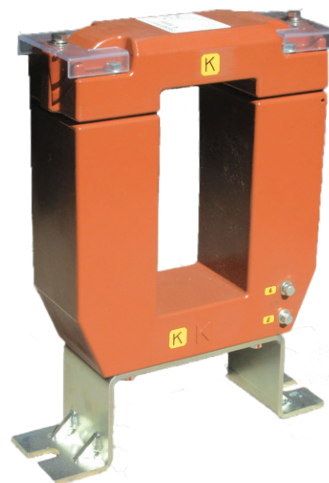


図2 多回路総合計器用変流器（主変流器 4000 A 品）

2.2 合成変流器

合成変流器（図3）は、コイルを金属製の外箱に収納した乾式構造である。2回路および3回路の両用構造であり、前述した主変流器の二次側に接続することで、複数回路の電流をまとめて5Aに変流し出力する。

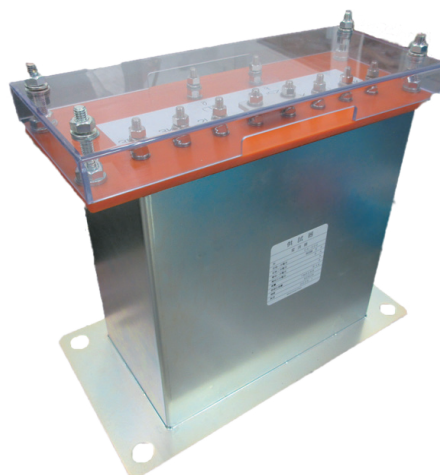


図3 多回路総合計器用変流器外観（合成変流器）

3 仕様

本器の仕様を表 1、表 2 に示す。

表 1 主変流器の仕様

定格周波数	50/60 Hz				
最高電圧	0.46 kV				
定格一次電流	1000 A	1500 A	2000 A	3000 A	4000 A
定格二次電流	5 A				
定格負担	25 VA				
定格過電流	30 kA1s	40 kA1s	50 kA1s	70 kA1s	80 kA1s
確度階級	0.5 W ^{注2)} (主変流器単独で適合)				

表 2 合成変流器の仕様

定格周波数	50/60 Hz				
最高電圧	0.23 kV				
定格一次電流	5 A (2 回路・3 回路, 各回路ともに)				
定格二次電流	5 A				
定格負担	10 VA				
確度階級	0.5 W ^{注2)} (主変流器と組み合わせた状態で適合)				

4 今後の予定

本器は、2026 年度から納入開始予定である。当社は、長年培ってきた計測・絶縁技術を活かし、これからも信頼性の高い製品を提供し続けることで、電力インフラの持続的な発展と社会の安心に貢献していく。

■ 語句説明

- 注 1) 分割貫通型：環状の構造が 2 つに分かれるタイプ。一次導体を外さずに挟み込むように設置できる。
- 注 2) 確度階級 0.5 W：JIS C 1736-1:2021 で規定された誤差 0.5% 以内の高精度な計測を保証する等級。本器は主変流器単体、および合成後のシステム全体の双方でこの高い精度を維持している。

多賀 真弓

計量事業本部
モールド変成器製造部 設計グループ 所属

継続的な安定供給を実現する 新型 66/77 kV GIS 直結形油入 VCT

■ 松田 隆真
Ryuma Matsuda

■ 寶田 憲央
Norio Takarada

■ 大塚 貴裕
Takahiro Otsuka

1 はじめに

電力取引を行うためには、電力使用量や最大電力などを正確に測定することが必要である。油入式特別高压計器用変圧変流器（以下、油入 VCT）は、電力の使用量などを測定する際に、計量器が測定可能な電圧・電流に変換するために必要な機器であり、特別高压受電する工場などの変電設備にて使用されている。

現在、GIS（ガス絶縁開閉装置）と油入 VCT の接続部には樹脂で成型された「レジンブッシング」が使用されている。しかし、この主要部材が 2027 年度に生産終了となることが決定している。これに伴い、従来構造のままでは油入 VCT の継続的な提供が困難になるという課題が生じている。

そこで当社は、従来のレジンブッシングに代わる新構造として、「モールド絶縁スペーサ」に導体を組み合わせたブッシング構造を開発した（図 1）。本開発には、タカオカ化成工業（株）製のモールド絶縁スペーサ技術を応用している。さらに、導体についてはガス VCT や

別型式の油入 VCT と共通化することで、調達リードタイムの短縮を実現した。本開発により、部材の調達安定性を確保し、将来にわたって油入 VCT を安定供給できる体制を整えた。本稿ではこの新型油入 VCT（MOG2-66/77）の仕様と特徴について紹介する。

2 仕様

図 1 に外観と接続部の構造を、表 1 に定格仕様（代表仕様）を示す。ブッシングの構造は絶縁スペーサおよび導体を組み合わせた構造に変更し、その他の仕様は従来型の油入 VCT を踏襲している。

表 1 定格仕様（代表仕様）

ブッシング種別	66/77 kV ガス - 油用（絶縁スペーサ）
適用規格	JIS C 1736-1:2021 JIS C 1736-2:2021
周波数	60 Hz
確度階級	0.3 W
商用周波耐電圧	160 kV
雷インパルス耐電圧	400 kV
一次電圧	77 kV
二次電圧	110 V
一次電流	800-400 A
二次電流	5 A
負担	VT : 2 × 50 VA CT : 2 × 25 VA
過電流強度	40 倍

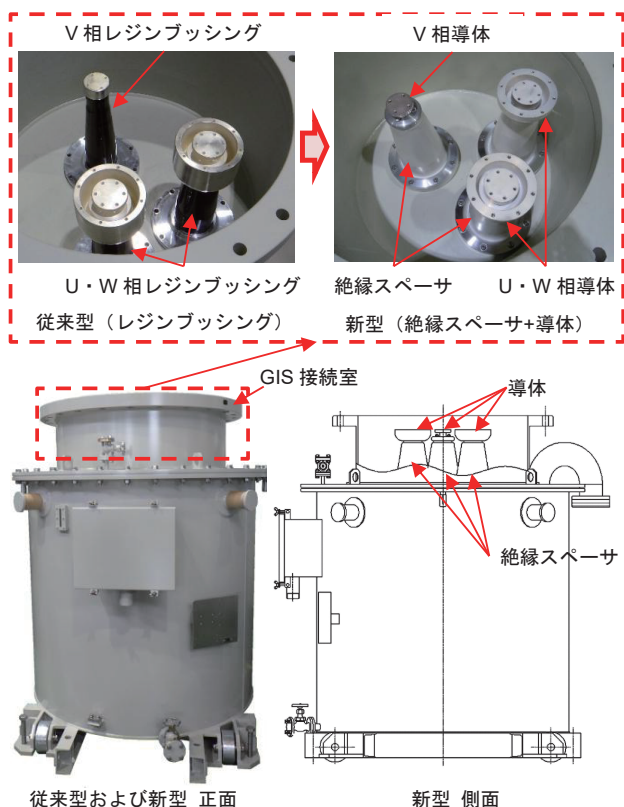


図 1 従来型と新型の外観と接続部の構造比較

3 特長

変流器（以下、CT）の場合、電流が入る端子（図 2 K（入））と出る端子（図 2 L（出））が必要となる。そこで、CT の絶縁スペーサを端子（K（入））から機器へ入った電流が端子（L（出））側に戻る往復導体構造とすることにより、CT 1 相分を単一絶縁スペーサにて対応できる構造とした。これにより、GIS 接続部の構造を

従来品と同様とすることが可能となり，従来型 VCT との互換性を確保し，置き換えが容易となった。

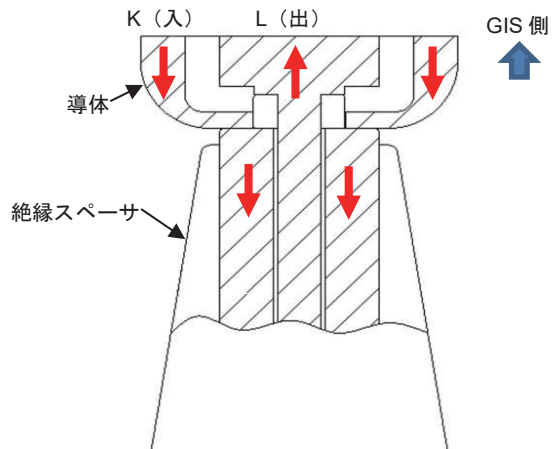


図2 CT用ブッシング（往復導体構造）

4 おわりに

絶縁スペーサと導体を組み合わせたブッシングを適用することで，電力取引のために必要な油入 VCT を継続的に供給することが可能となった。ブッシングの調達安定化は別型式の油入 VCT でも共通の課題であるため，絶縁スペーサを適用した別型式の油入 VCT の開発を進め，電力機器の安定供給へ貢献していく。

松田 隆真

計量事業本部
油・ガス変成器製造部 設計グループ 所属

寶田 憲央

計量事業本部
油・ガス変成器製造部 設計グループ 所属

大塚 貴裕

計量事業本部
油・ガス変成器製造部 設計グループ 所属

自動検針システムのリニューアル ～大規模施設対応とセキュリティ強化～

■ 石田 利治
Toshiharu Ishida

■ 神林 優河
Yuga Kambayashi

■ 菅原 梨沙
Risa Sugawara

1 はじめに

当社は、一括受電^{注1)}を行うマンションや商業施設向けに自動検針システムを展開し、マンションや商業施設の管理者が各家庭やテナントの電気使用量を把握できるよう貢献してきた。民間向けのスマートメータ^{注2)}と電力線搬送通信（以下、PLC）^{注3)}を用いた自動検針システムとして、日本国内で多くのお客様に導入いただいている。

2020年度には、ハードウェアを一新した自動検針用コンセントレータ^{注4)}（以下、コンセントレータ）を組み込んだ自動検針システムの販売を開始した。近年では、大規模なビルや商業施設への納入も増えてきており、検針対象スマートメータ数の増加対応など、システム仕様の改修が必要となる事例が増えてきている。

また、昨今の情報セキュリティ対策の重要性の高まりに伴い、お客様からセキュリティに関する問い合わせも増加している。

このたび、上記の課題に対応した次世代のコンセントレータ（以下、本機）を開発したので、その概要を紹介する。

画に設置された電力メータ、水道メータ、ガスメータ、熱量メータなどから、通信により検針データを取得し、コンセントレータ内部に蓄積する。なお、水道メータ、ガスメータ、熱量メータはコンセントレータと直接通信することができないため、物件の仕様に依拠して、通信機能を有する「電力メータ（スマートメータ）」または「RS-485 共同検針子機」を経由して通信する。

また、ネットワークを介してブラウザからコンセントレータにアクセスすることで、蓄積された検針データを閲覧可能である。さらに、検針データを自動検針クラウドなどの上位サーバへ転送する機能を備えており、システム構成によっては、クラウド側で検針データを確認する運用も可能である。

コンセントレータと各メータ間の通信方式は、PLC および RS-485 通信に対応する。既存物件などで新たな配線敷設が困難な場合は、電力線を通信に利用できる PLC を提案する。一方、新築などで配線敷設が可能な物件では、専用通信ケーブルを利用する RS-485、または RS-485 と PLC の併用による提案が可能となる。

2 自動検針システムの概要

2.1 システム構成例

図 1 に自動検針システムのイメージを示す。コンセントレータは、マンションの各住戸、またはテナント区

2.2 機能一覧

表 1 に本機の機能一覧を記載する。

自動検針システムは、検針データの収集に加えて、メータに対する各種設定、メータ状態の確認、ならびにコンセントレータ本体の設定機能を備える。

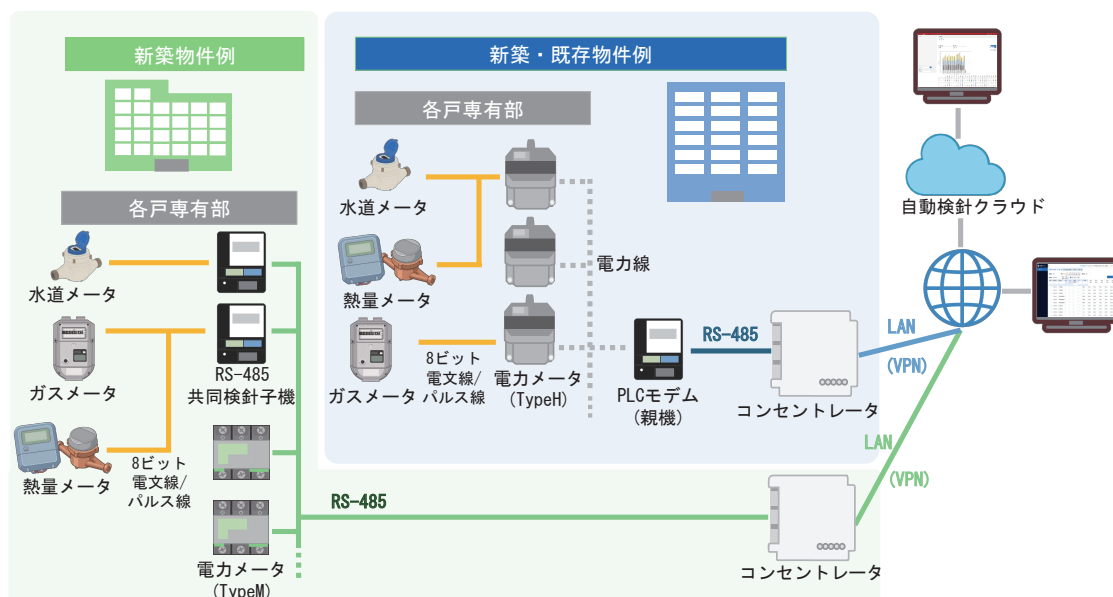


図 1 自動検針システムのイメージ

表 1 本機の機能一覧

機能分類	機能概要
本体 (コンセントレータ)	定時検針
	30 分値, 日次値, 月次値取得
	検針補助・設定
	再検針, 時刻設定, 自動 PLC リピータ設定・手動 PLC リピータ ^{注5)} 補正
	上位通信
機能	ネットワーク初期化
	ファイル転送 (FTP サーバ), 検針データ毎時転送 (SFTP 転送), Web サーバ (Web 画面, REST API), 自動時刻設定
	USB メモリ保存
	検針ファイル・ログを USB メモリに圧縮保存
	システム管理
Web 機能	ログ機能 (内部動作ログ・Web 操作ログ)
	検針データ確認
	検針値確認 (電文取得・パルス取得), 30 分値, 1 時間値, 日次値, 月次値
	メータ操作
	時刻設定, 負荷制限設定, 開閉器操作, 現在指針値取得, パルスプリセット設定, 日次検針時刻設定, 月次検針日設定
	PLC 操作
機能	PLC リピータ設定確認・PLC 信号品質確認, ノード ID 設定確認, 通信機器確認, 幹線誤接続検出確認
	本体機器操作
	再起動, 本体時刻設定, 自動検針停止・開始, 本体設定変更, メータ登録, ネットワーク設定, 検針開始日時設定
	メータ保持情報取得
機能	電圧電流値取得, 30 分値取得, 結線確認取得, 専用電文通信回数確認
	記録確認
機能	WEB 操作記録確認, 通信状態確認, 自動検針ログ確認

3 特徴

本機の開発では、ハードウェアは現行のコンセントレータ（以下、現行機）と同じものを使用し、ソフトウェアのみを開発対象とした。

以下に、機能の一部を紹介する。

3.1 管理メータ数の増加 (200～300 台⇒ 600 台)

対象施設の大型化に対応するため、コンセントレータ単体でより多くのメータを管理できる高い処理性能が必要となった。現行機では管理メータ数の実力値が概ね 200～300 台であるのに対し、本機では 600 台の管理を実現している。

現行機では使用可能な RS-485 通信ポートが 1 ポートだった。本機では 2 ポート対応とし、これらを並列駆動することで、2 ポート間に処理負荷を均等に分散する構成とした。その結果、現行機に対して最大 2 倍の処理効率を実現している。

また、コンセントレータは、通信エラーなどにより欠損した検針値を再検針する機能を備えている。本機では、再検針情報の分析に基づいて処理順を最適化することで、再検針実施時間を短縮した。同一欠損数であっても、条件によっては現行機比で最大 6 倍の効率化に成功した。

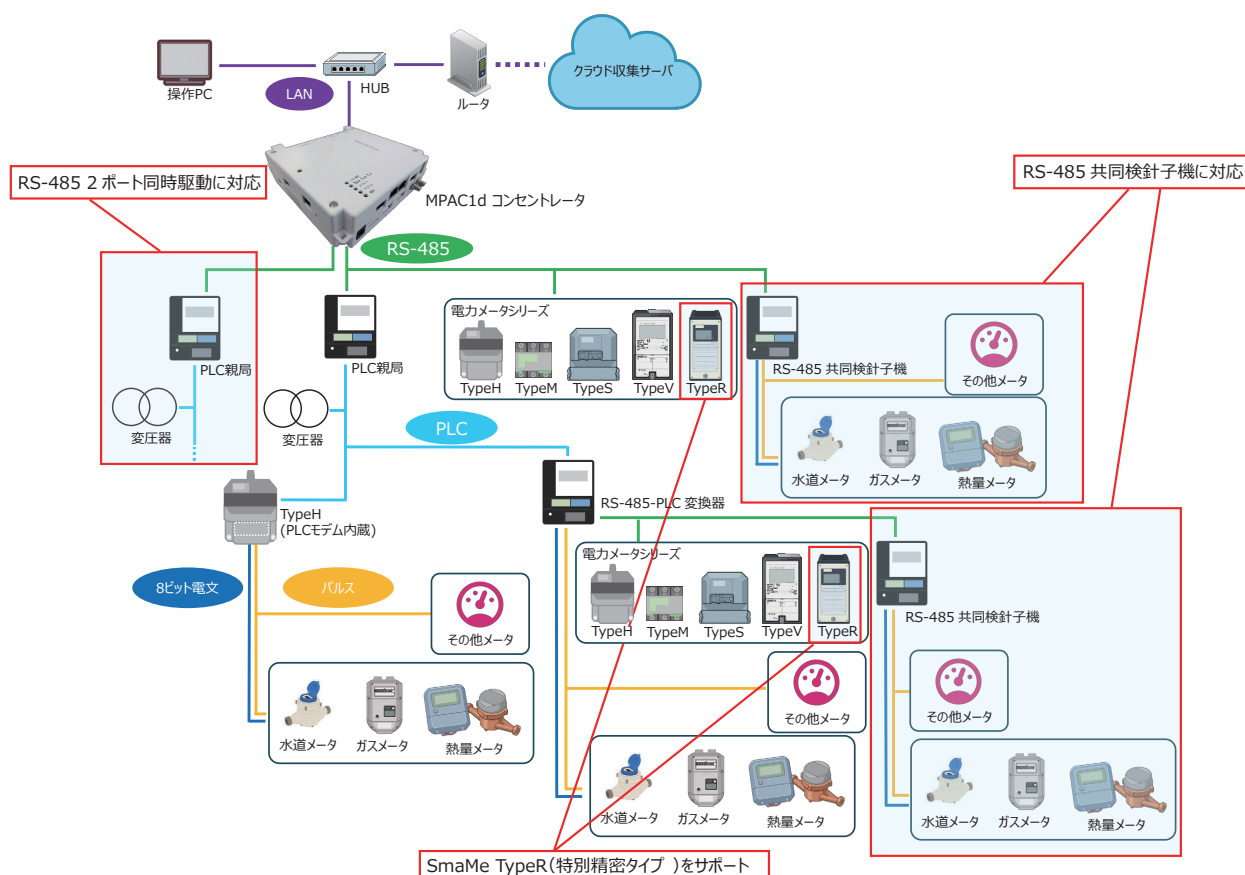


図 2 接続構成図

3.2 接続構成の拡張

導入対象の施設条件に応じて、RS-485 接続および PLC 接続を組み合わせたフレキシブルなシステム設計が求められる。そのため、本機では、対応する接続構成を拡張した。

具体的には、図 2 の赤枠で示す接続に対応した。RS-485 共同検針子機を接続可能としたことで、水道メータ、ガスメータ、熱量メータに対して RS-485 接続による検針値取得が可能となった。加えて、特別精密タイプの SmaMe^{注6)} TypeR における検針要求にも対応した。SmaMe TypeR は、10,000 kW 以上の電力計測にも対応可能である。

3.3 セキュリティ面の強化

近年、IoT 機器に対する情報セキュリティ対策の重要度が高まっている。現行機はシステム全体でセキュリティを担保する設計であったが、本機では、コンセントレータ単体においてもセキュリティ仕様を検討し、開発を進めた。

自動検針システムはスマートメータを用いた電力計量・通信・制御に関わるシステムとなるため「スマートメータシステムセキュリティガイドライン 2019」^{注7)} の要求事項に則る設計とした。

具体的には、暗号化通信に対応した REST API^{注8)} による新たな上位連携手段を追加した。新規のお客様に対しては、セキュリティ強度の低い従来の連携方式を無効化し、REST API 連携を推奨することで、よりセキュアなシステム構築が可能となる。

また、ファイアウォールにより不要なアクセスを遮断するとともに、プログラムやデータの改ざんを検出する仕組みを備え、機器の信頼性を向上させた。

以上のように、本機ではコンセントレータ単体でのセキュリティ機能強化を実現している。

3.4 マスコットキャラクターの活用

自動検針システムに親しみを持っていただけるよう、新規にマスコットキャラクター（図 3）を作成した。主にコンセントレータの Web 画面やアイコンとして使用する。



図 3 自動検針マスコットキャラクター「ハリ坊」

4 おわりに

本稿では、自動検針システム用コンセントレータのリニューアルとして、管理メータ数の増加に向けた処理能力の強化、導入施設の多様な条件に対応する接続構成の拡張、ならびに機器単体でのセキュリティ機能強化について述べた。これらは本機の特長の一部であり、他にも本稿で紹介しきれないお客様のご要望に応じた改善を多数施している。

本機については、今後の導入案件に順次適用していく予定である。本機は現行機に比べてより幅広いお客様に対応できるため、これまで対応が難しかった用途や環境でもご活用いただけると考える。今後も引き続き、安心してご利用いただける自動検針サービスの提供に努めていく。

■ 語句説明

- 注 1) 一括受電：管理者が電力会社と一括契約して電気を購入し、入居者（各家庭やテナントなど）へ配分する形態。通常は電力会社が入居者へ直接請求するが、この形態では、管理者が電力メータを入居者の受電点に設置して電力の一括管理や請求に使用する。
- 注 2) スマートメータ：通信機能などを有する高性能な計量機器（メータ）。電子回路で計測を行う。電気だけでなく、ガスや水道のスマートメータもあるが、本稿では、電気のスマートメータを単にスマートメータと表記している。
- 注 3) 電力線搬送通信（PLC：Power Line Communication）：電力線に、通信用の信号を重畳させることで通信を行う方式。電力線を通信に利用するので、新規に通信線の敷設が必要ない。
- 注 4) コンセントレータ（集線装置）：複数の通信回線やデータを 1 つにまとめて整理し、効率よく次の場所へ送るための機器や仕組みのこと。
- 注 5) PLC リピータ：PLC 通信を中継してさらに遠方の PLC モデムへ到達させる機能。
- 注 6) SmaMe：東光東芝メーターシステムズ株式会社の登録商標（第 5542012 号）。
- 注 7) スマートメータシステムセキュリティガイドライン 2019：スマートメータシステムのセキュリティ確保を目的として、実施すべきセキュリティ対策について規定したガイドライン。
- 注 8) REST API（Representational State Transfer Application Programming Interface）：Web システムの標準的な通信ルールに基づき、異なるプログラム同士を連携させるための接続口。汎用性が高く、安全なデータの受け渡しに適している。

石田 利治

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

神林 優河

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

菅原 梨沙

GX ソリューション事業本部
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

島嶼の安定的な電力供給と業務効率化に資する 「配電用開閉器無線制御システム（無線方式対応 センサ内蔵自動開閉器用遠方制御器）」

■ 板橋 成徳
Naruto Itabashi

■ 村山 拓希
Hiroki Murayama

1 はじめに

東京電力パワーグリッド（株）が管轄する島嶼地域では、限られた要員体制のもとで設備の保守運用を行っており、設備トラブル発生時の迅速な対応や日常業務での開閉器操作の効率化が課題となっている。これらの課題解決に向けて、配電機器を遠方から監視・制御するシステムの導入が強く求められていた。しかし、現行の配電自動化システムを適用して導入するには、島嶼までの通信網の敷設を含めたシステム構築に多大なコストが発生することがネックとなっていた。

そこで当社は、無線通信技術を活用した新たな「配電用開閉器無線制御システム（以下、本システム）」を開発し、島嶼地域における電力供給の業務効率化を実現することを目指した。

2 本システムの構成・機能

本システムは、遠隔監視・制御を統括する「親局」と、「無線方式対応センサ内蔵自動開閉器用遠方制御器（以下、子局）」で構成される（図1）。各島に設置される親局と子局は、無線通信を介して情報のやり取りを行える。親局から子局へ開閉器の制御指令を出せるほか、電力系統事故や開閉器の故障などを子局から親局へ発呼（情報を通知）できる。各装置の外観を図2、図3に示す。また、本システムの機能を表1に示す。



図2 遠隔監視・制御を統括する「親局」



図3 無線方式対応センサ内蔵自動開閉器用遠方制御器「子局」

表1 本システムの機能

機能	説明
計測機能	子局から取得した最新の情報（配電線の電圧・電流値）を表示する。
監視機能	対象の子局を選択し、最新の監視結果（開閉器の状態）を表示する。
入・切制御機能	対象の子局を選択し、開閉器の入切制御を行う。制御が完了すると、オペレータに制御完了のメッセージを通知する。
波形取得機能	子局リストから対象の子局を選択し、計測波形および事故波形を取得する。
事故ログ機能	子局の事故発呼および故障発呼を取得し、オペレータに通知する。
整定値・設定値設定機能	子局に設定されている整定値および設定値の表示と更新した設定を反映する。
島嶼間連携機能	島嶼事務所で本システムが利用不能になった場合、他の島嶼事務所から一時的な代替操作を可能にする

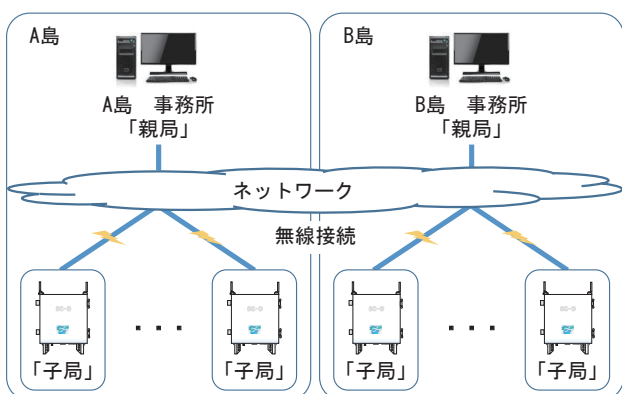


図1 本システムの構成概要

3 子局の特長

子局は高圧架空配電線柱上のセンサ内蔵自動開閉器と組み合わせて使用する。開閉器内のセンサ信号を用いた計測機能・開閉器制御機能・配電線事故検出機能等を有しており、遠方からの制御・監視にも対応している。子局の現地設置の様子を図4に示す。



図4 現地設置の様子

3.1 従来と今回の子局の通信方式の違い

子局の概要・イメージについて、従来の子局を図5に、今回開発した子局を図6に示す。従来の通信方式

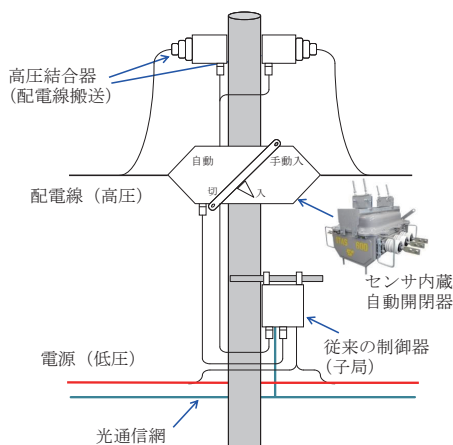


図5 従来の子局の概要・イメージ

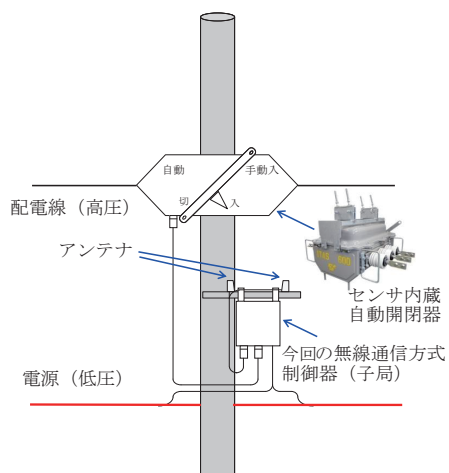


図6 今回開発した子局の概要・イメージ

は、配電線搬送方式（電力線搬送方式）、および光伝送方式の2種が可能であった。この2つの方式とは異なる方式の無線通信方式を開発した。

3.2 子局の特長

今回島嶼への遠方制御を可能とするため、無線通信が可能なユニットを開発して子局へ搭載した。子局の特長を紹介する。

(1) 無線ユニット

子局内の無線ユニット搭載位置を図7に示す。無線ユニットは、子局に内蔵されており、親局と子局との双方向での通信を可能とするものである。無線ユニットの内部構成を図8に示す。

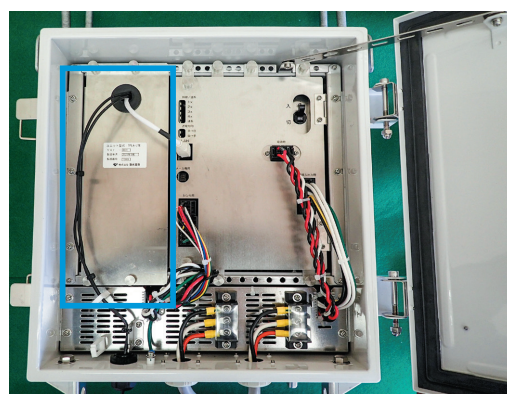


図7 無線ユニットの搭載位置（子局内部）

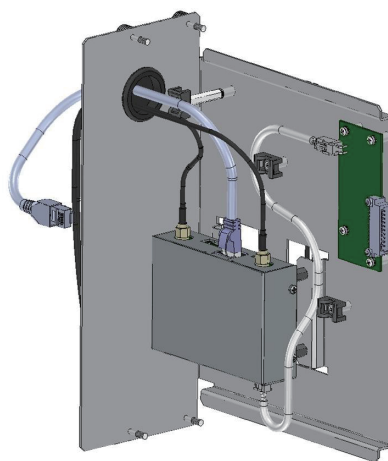


図8 無線ユニットの内部構成

(2) アンテナ

アンテナ構成と取付形態を図9に示す。アンテナを保護するレドーム^{注1)}は対候性に優れた樹脂で開発した。アンテナの固定は、子局を電柱へ設置する（以下、装柱）際の軽腕金に固定できる方式とし、固定板を製作し、ステンレスバンド等で設置可能な構造とした。

また、アンテナ本体からのケーブルの引き出し部が強

風等で振れることによる断線を防止するため、ケーブルクランプを設けるなど工夫を施した。

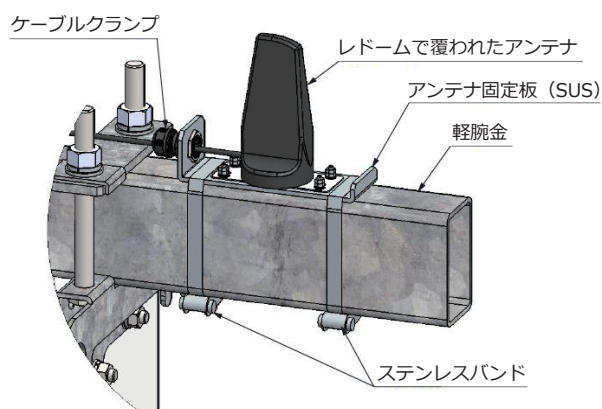


図9 アンテナ構成と取付形態

(3) 装柱方法

子局本体の装柱金具を図10に示す。耐塩性能向上のために子局の軽腕金固定部の装柱金具には溶融亜鉛アルミニウム合金めっきを施した。

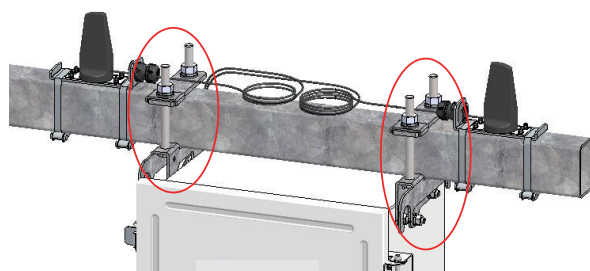


図10 子局の装柱金具

(4) バックアップ電源

バックアップ電源を搭載することで、配電線事故発生時でも子局の電源が喪失することなく、親局へ事故を通知することを可能とした。

4 おわりに

無線通信技術を活用した本システムを導入することにより、島嶼地域においても、リアルタイムに配電用開閉器の遠隔監視・制御ができるようになった。これは、日常業務での開閉器操作の効率化に寄与するものである。また、配電線事故が発生した場合でも、原因の切り分けが容易となり、迅速な復旧対応が可能になった。

今後も、本システムの更なる発展と普及により、地域社会の電力インフラ維持に寄与する所存である。

■語句説明

注1) レドーム：アンテナを雨・風・雪・砂・日射などの自然環境・物理的衝撃から保護する、ドーム状のカバーのこと。

板橋 成徳

電力機器事業本部
配電機器製造部 設計グループ 所属

村山 拓希

電力プラント事業本部
第二設計部 監視制御システム設計グループ 所属

製品紹介

低騒音化・軽量化を実現した 電力インフラ設備のレジリエンス強化の ための移動用変圧器車

■ 大山 修司
Shuji Oyama

1 はじめに

電力インフラ設備の高経年化による変電設備更新や、設備事故による復旧までの送配電維持のため、移動用機器は代替機器として重要な役割を担っている。当社でも変圧器をトラックの荷台に搭載する移動用変圧器車を開発し、主に電力会社に納入してきた。

近年、厳しい排ガス規制に対応するためトラックの重量は増加傾向にあり、従来の変圧器の設計では 20 トンを超える重量となるため、特殊車両通行許可申請^{注1)}（以下、申請）が必要となる。しかし、申請の許可が下りるまで一般道の走行ができないため、非常時に早急な対応が難しいという課題がある。また、都心部の配電用変電所は狭隘な場所にあり周囲環境にも配慮することが必要なため、低騒音化が求められている。これらの課題を解決するため、搭載する機器の小型軽量化に加えて、低騒音化を実現した移動用変圧器車（以下、本器）を開発したので紹介する。

2 開発コンセプト

本器は、非常時に出勤して速やかに応急対応を行える必要があるが、そのためには申請が不要となる車両制限令⁽¹⁾により定められた制限値を満足する必要がある。制限値について表 1 に示す。

そのために、使用材料の見直しおよび、トラックの仕様変更など創意工夫を図りあらゆる点から軽量化を行った。また、周囲環境への配慮の目的から低騒音化も合わせて実施した。

表 1 一般的な制限値

車両寸法	長さ	12 m 以下
	幅	2.5 m 以下
	高さ	3.8 m 以下
総重量		20 t 以下
最大安定傾斜角度		30° 以上

補足：最大安定傾斜角度は、道路運送車両の保安基準⁽²⁾による。

3 仕様

図 1 に本器外観を示す。本器は主に変圧器本体と冷

却器、操作配電盤ならびに車両から構成される。現行器と本器の仕様比較を表 2 に示す。



図 1 外観

表 2 仕様（現行器との比較）

項目		現行器	本器
定格容量		10 MVA	
定格周波数		50 Hz	
電圧	一次	64.5 ± 7.5 kV	
	二次	6.9 kV	
結線	一次	Y	
	二次	Y	
	安定	(△)	
短絡インピーダンス		12%	16%
騒音		60 dB	55 dB 以下
温度上昇 限度	巻線	70 K	95 K
	油	60 K	
冷却方式		導油風冷式 (ODAF)	
引出方式	一次側	気中 ブッシング	ケーブル ヘッド
	二次側	気中ブッシング	

4 特長および実証

4.1 機器の低騒音化・軽量化などへの取り組み

(1) 低騒音化

本器の主たる騒音は変圧器本体と冷却器である。鉄心の低磁束密度化と磁歪の小さい珪素鋼板を採用することで、変圧器本体の低騒音化を図った。また、現行器では1台であった冷却器を2台に分割し、冷却器に内蔵する冷却ファンの回転速度を抑えることで、冷却性能を確保しながら、発生騒音の低減と低重心化を両立する冷却器を実現した。変圧器と冷却器の低騒音化を両立させることにより、60 dB（裕度+3 dB）から55 dB以下への低騒音化を実現した。

(2) 変圧器の軽量化

変圧器の軽量化のために、巻線に高直列容量巻線（ハイセルキャップ巻線）を適用することで電位振動を抑制し、絶縁設計の最適化による軽量化を図った。また、巻線絶縁紙にアラミド紙、内部の絶縁物に耐熱性の高い材料を採用することで、巻線の温度上昇限度に IEC-60076-14-2013 を適用し 95 K を採用した。なお、巻線の温度上昇限度は現行器と比較して高いが、油温度上昇限度は現行器と同一とすることで、変圧器上部に配置するコンサベータのゴムセルやフランジのガスケットの寿命を損なうことなく、現行器から約15%の軽量化を実現した。

(3) トラックの軽量化

変圧器本体以外でも軽量化を実施している。トラック固定方法の変更（アウトリガーの代わりに位置固定用ジャッキを採用）や、燃料タンク、バッテリーサイズの最適化、サイドガードの材質変更など、トラックメーカーと共同で検討した軽量化施策を採用することで最新の排出ガス規制^{注2)}に適合しつつ、車両重量の5%の軽量化を実現した。

(4) 接続時の作業性向上

設備更新や復旧までの代替機器として使用されるため、他機器との接続のしやすさなどお客様ニーズを踏まえ T 形ケーブルヘッドを採用した。これにより、変圧器の小型化や油量削減による軽量化にも繋がった。

4.2 実運用に向けて

当社小山事業所構内での走行確認試験にて安全性を確認したのち、実運用時と同様に公道での走行試験を実施した。

そのほか、国土交通省が定めた保安基準に則り、最大安定傾斜角度試験^{注3)}を専門機関にて実施し、公道を走行するにあたり問題ないことを確認した。

図2に最大安定傾斜角度試験の様子を示す。



図2 最大安定傾斜角度試験

5 おわりに

低騒音化・軽量化を実現した本器は、都市部の狭隘な変電所でも安心して使用できるだけでなく、特殊車両通行許可申請を不要とするため、緊急時に直ちに駆け付けることができる。

2026年度にもお客様へ納入をしており、本器の普及により、電力の安定供給・レジリエンス強化の一助となるよう取り組んでいく。

■参考文献

- (1) 車両制限令（昭和36年政令第265号）、第3条
- (2) 道路運送車両の保安基準（昭和26年運輸省令第67号）、第5条

■語句説明

- 注1) 特殊車両通行許可申請：道路法に基づき車両制限令で定める長さや重量等の制限を超える車両が公道を適法に走行するために不可欠な手続きのこと。
- 注2) 最新の排出ガス規制：環境省が定める排出ガス許容限度を、国土交通省が保安基準として適用する規制。本稿では通称「平成28年排出ガス規制」を指し、浄化装置の強化に伴う車両重量増加の主な要因となっている。
- 注3) 最大安定傾斜角度試験：道路運送車両の保安基準において、傾斜角度測定機その他適切な方法により基準に適合することとされており、車両を左右に傾けた際に転覆しないか確認する試験をいう。

大山 修司

電力プラント事業本部
第一設計部 大型変圧器設計グループ 所属

製品紹介

トッランナー制度に適合した 「タカオカ 2026 トッランナー モールド変圧器」

■ 曾我部 吉生
Yoshiki Sogabe

1 はじめに

「エネルギーの使用の合理化及び非化石エネルギーへの転換等に関する法律（省エネ法）」では、エネルギー消費機器の効率向上を促進するため、トッランナー制度を導入している。本制度は、市場で最も高効率な製品を基準として将来の省エネ目標を設定することで、継続的な技術革新を促す役割を担っている⁽¹⁾。

変圧器は電力供給設備の中核を成し、24時間連続稼働するため、わずかな効率の差であっても累積するエネルギー損失の影響は大きい。したがって、変圧器の高効率化は、エネルギー消費量およびCO₂排出量の削減に直結し、エネルギー政策上の重要性が高い。この背景から、配電用変圧器がトッランナー制度の対象に選定されており、エネルギー消費効率の向上が求められている。

モールド変圧器を製造・販売するタカオカ化成工業（株）では、主力製品の一つとして「タカオカ 2026 トッランナーモールド変圧器」（以下、本器）を開発し、2026年4月より製造・販売を開始した。本器は、トッランナー変圧器の第三次判断基準に適合している。

配電用モールド変圧器のトッランナー制度の変遷を表1に示す。

表1 配電用モールド変圧器のトッランナー制度の変遷

種別	判断基準	呼称	開始年度	改善率
モールド	第一次	トッランナー変圧器	2007年	—
	第二次	トッランナー変圧器 2014	2014年	第一次判断基準比 約11～28%
	第三次	2026 トッランナー変圧器	2026年	第二次判断基準比 約7～21%

トッランナー変圧器の判断基準には、エネルギー消費効率が用いられる。この効率は、無負荷損^{注1)}と基準負荷率^{注2)}時の負荷損^{注3)}を合算した次式⁽²⁾で算出される。

$$P_m = P_i + (m/100)^2 \times P_{R\theta\theta}$$

P_m : エネルギー消費効率 (W)

P_i : 無負荷損 (W)

m : 基準負荷率 (%) 500 kVA 以下の場合 40%
500 kVA 超過の場合 50%

$P_{R\theta\theta}$: 基準巻線温度に補正した定格容量に対する負荷損 (W)

一例として、第一次～第三次判断基準における単相 50 Hz の基準エネルギー消費効率の比較を図1に示す。判断基準の改定に伴って、より環境負荷が少なくなるようにエネルギー消費効率の基準は段階的に引き下げられてきた。

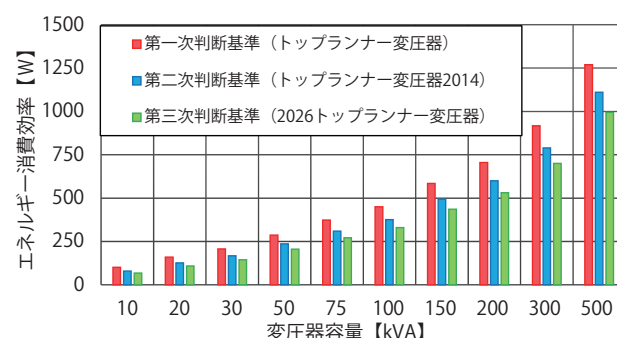


図1 単相 50 Hz の基準エネルギー消費効率比較

2026 トッランナー変圧器については、2026年4月以降に出荷される製品から、第三次判断基準への適合が義務化される。適合品であることを明確にするため、識別用ロゴマークを変圧器本体およびカタログへ表示することが求められており、そのロゴマークを図2に示す。



図2 識別用ロゴマーク

2 特長

2.1 本器の概要

タカオカ化成工業（株）製のモールド変圧器には、同社独自の樹脂配合技術により開発した高耐熱・高強度のエポキシモールド樹脂を主絶縁材料として使用している。巻線部は、このエポキシモールド樹脂を用いた真空注型法による固体絶縁構造で形成されており、絶縁信頼性および機械的強度に優れる。また、モールド変圧器は、難燃性・自己消火性を備え、防災性が高いことに加え、絶縁油を使用しないため保守が容易である。

第三次判断基準に適合したモールド変圧器は、これらの優れた特性を基盤とし、以下のコンセプトで開発した。

- ①エネルギー消費効率の向上
 - ②外形寸法の抑制
 - ③耐震性の向上
- 本器の外観を図3に示す。



図3 タカオカ 2026 トッランナーモールド変圧器
三相 500 kVA 6600 V / 210 V

2.2 エネルギー消費効率の向上

エネルギー消費効率の向上にあたっては、鉄心に使用する電磁鋼板の特性、鉄心断面積、巻線導体断面積など、損失に影響する各パラメータを最適化することで、無負荷損および負荷損の低減を図った。

第三次判断基準への適合に向けて、前モデル（トッランナー変圧器 2014）から損失低減に直結する次の項目について改良した。

- ①ハイグレードな方向性電磁鋼板の採用
- ②鉄心の低磁束密度化
- ③巻線構造の最適化による負荷損の低減

2.3 外形寸法の抑制

一般的に、鉄心や巻線断面積を大きくすると損失を低減できるが、変圧器の外形寸法も大きくなる。つまり、低損失化と変圧器外形の縮小は相反する関係にある。そこで本器では、損失特性に優れた鉄心の採用や、最適な巻線設計などにより、鉄心と一次・二次モールドコイルを組み合わせた際の外形寸法を最適化した。

ただし、前モデル（トッランナー変圧器 2014）と比較すると、低損失化の代わりに据付面積および総質量が増大する。このため、リプレイス案件や既設設備との整合が求められる場合には、個別設計による最適化を検討する。

2.4 耐震性の向上

近年、インフラ設備に対してより高い耐震性能を求める社会的需要が高まっている。そこで、一般的な耐震計算による検証に加え、東北地方太平洋沖地震の振動を模擬した加振試験を外部委託試験機関で実施した。その結果、本器は過酷な振動条件下においても構造性能が所定

の強度を満足し、かつ絶縁性能を維持することを確認した。加振試験の試験状況を図4に示す。

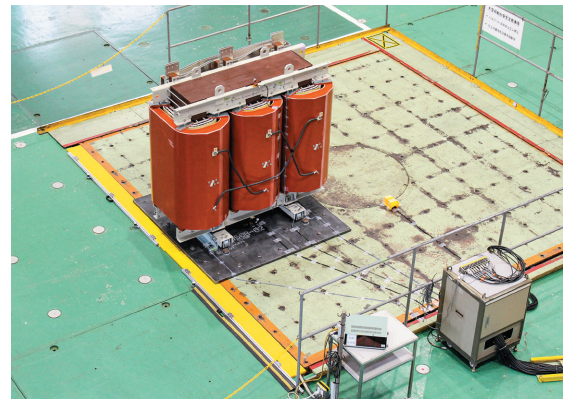


図4 加振試験状況

3 おわりに

本稿では、2026 トッランナー変圧器の概要と、第三次判断基準に適合したタカオカ化成工業（株）製「タカオカ 2026 トッランナーモールド変圧器」の特長を紹介した。

従来機種と比較して、本器はエネルギー消費量の削減およびCO₂排出量の削減にさらに寄与する。

省エネへの関心は環境負荷などの観点から今後も高まり、市場では低損失化・小型化の要求が一段と強まっていくと考えられる。今後とも、これらのニーズに応える技術開発・製品開発を進めることで、持続可能な社会の実現に貢献するモールド変圧器の提供を目指す。

■参考文献

- (1) 一般社団法人日本電機工業会：「2026 トッランナー変圧器第三次判断基準の適用に関して」、https://www.jema-net.or.jp/engineering/transformer/evefa20000001a7s-att/seminarhandout_20250522.pdf（2026年5月21日閲覧）
- (2) 日本産業標準調査会：JIS C4306:2005, 2013, 2024, 配電用 6 kV モールド変圧器

■語句説明

- 注1) 無負荷損：負荷が接続されていない状態でも発生する損失。
- 注2) 基準負荷率：定格容量に対する利用率。基準負荷率の値は、使用実態に即し、実際に使用される負荷が変動した際にも十分な省エネ効果を発揮することに配慮し、省エネ法における変圧器判断基準に定められた値。
- 注3) 負荷損：負荷が接続され、電流が流れることで発生する損失。

曾我部 吉生

タカオカ化成工業株式会社
開発・設計部 電源装置開発グループ 所属

製品紹介

環境配慮型変圧器のラインアップ拡充
―菜種油を採用した変圧器―■ 土屋 龍平
Ryohei Tsuchiya■ 八木澤 悠秀
Yuho Yagisawa

1 はじめに

当社は、環境負荷に配慮した変電設備のニーズに応え、これまで絶縁油として植物由来のパームヤシ脂肪酸エステルを採用した環境配慮型変圧器を多数納入してきた。今回新たに菜種油を採用した環境配慮型変圧器（以下、菜種油入変圧器）を開発し、その初号器を東日本旅客鉄道株式会社南与野変電所に納入したため紹介する。

2 特長

菜種油入変圧器の主な特長は次の通りである。

2.1 環境負荷への配慮

菜種油はパームヤシ脂肪酸エステルと同様に、事故や自然災害などにより万が一自然環境に流出しても微生物により分解されることから、生態系への影響を最小限に抑えられる。そのため、水力発電所や風力発電所など環境に配慮が求められる場所への設置に適している。また、原料となるアブラナは成長過程で大気中の CO₂ を吸収するため、カーボンニュートラルの実現に貢献できる。

2.2 優れた防火性

表 1 の通り、菜種油の引火点は 300℃ 以上と高く難燃性を有していることから、屋内や地下など高い防火性が求められる場所への設置に適している。また、消防法上の危険物ではなく指定可燃物に分類され、総務省消防庁より、特定の要件を満たしていれば特殊消火設備^{注1)}に代えて大型消火器の設置でも差し支えないとの通知⁽¹⁾が発行されており、設備簡素化のメリットも期待できる。

3 仕様

今回納入した変圧器の外観を図 1、仕様を表 2 に示す。

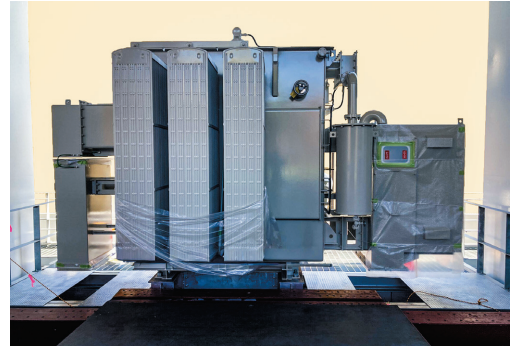


図 1 外観

表 2 仕様

定格	50 Hz 3 MVA 66/6.9 kV
騒音	45 dB (A) 以下
タップ切換方式	無電圧タップ切換
冷却方式	油入自冷式

4 おわりに

今回、新たに菜種油入変圧器を開発した。菜種油およびパームヤシ脂肪酸エステルにはそれぞれ異なる特長があるため、当社はお客様の多様なニーズや設置環境に応じた最適な環境配慮型変圧器を提案していく。

■参考文献

- (1) 総務省消防庁：「消防用設備等に係る執務資料の送付について（通知）」、消防予第 205 号（2023）

■語句説明

注 1) 特殊消火設備：不活性ガス消火設備、ハロゲン化物消火設備または粉末消火設備のこと。

土屋 龍平

電力プラント事業本部
第一設計部 大型変圧器設計グループ 所属

八木澤 悠秀

電力プラント事業本部
第一設計部 大型変圧器設計グループ 所属

表 1 油種ごとの特長および引火点と法令上の取り扱い

油種	菜種油	パームヤシ脂肪酸エステル	鉱油
特長	引火点が高く難燃性のため、防火性に優れる	動粘度が低く放熱性が高いため、変圧器のコンパクト化が図れる	—
引火点	300℃以上	186℃	144℃
消防法上の取り扱い	指定可燃物（引火点 250℃以上）	危険物第 4 類 第 3 石油類	

第2世代スマートメーターのサプライチェーン中核を担う「スマートメーターアセンブリセンター」操業開始

1 背景

電力計測用スマートメーター（以下、SM）の本格導入が2014年度から始まり、電力量の遠隔自動検針が可能となった。その後、電力量検針の自動化に留まらず、データを活用した電力ネットワークの運用の高度化、電力分野以外への電力データの利用拡大、需要側電源リソースの拡大に伴う取引ニーズの多様化への対応など、SMの新たなニーズが生じている。

そのような背景を受け、2020年9月に第2世代SMの開発と普及を使命として経済産業省主導のもと「次世代スマートメーター制度検討会」が発足した。この検討会では、2025年度に第2世代SMを本格導入することを目指し、一般送配電事業者10社が共通して使えるようにSMの仕様統一を図った。この仕様統一化をきっかけとして、東光高岳では従来電力量計メーカーが行っていたSMの組み立て、動作試験から電力会社への納品までを一貫して担うことができる「スマートメーターアセンブリセンター」の操業を開始したので、本稿にて紹介する。

2 概要

当社の蓮田事業所（埼玉県蓮田市）に建設した「スマートメーターアセンブリセンター」（図1）は第2世代SMのサプライチェーンのうち、計器メーカーから入荷されるユニット^{注1}）を完成品にまで組み立て、保管、出荷する一連の業務を担う。年間360万台の組み立て能力を保有し、自動倉庫や、パレットから荷物を自動で降ろす「自動デパレタイズ装置」、自動組み立てラインなどの導入により省人化・効率化・高品質化を実現している（自動化率：85%）。また、環境負荷低減のため当社の照明・空調の省エネ制御システムを導入した。

主なオペレーション（工程）は以下となる。

- (1) ユニットの受け入れ・自動倉庫保管
- (2) 通信部へセキュリティ情報の登録
- (3) 第2世代SMの自動ラインによる組み立て
- (4) 計量部と通信部の同期・紐付け（ペアリング）
- (5) 完成品の在庫管理・発送

3 今後の展望

当社は第2世代SMの生産や取り付け工事の計画からユニット製造、組み立て、物流・配送、取り付け工事、データ高度利用に至るまで、第2世代SMのサプライチェーン全体に関与していく。これにより、電力会社に安定的にSMを提供し、関連事業の持続的な成長を目指す。



図1 スマートメーターアセンブリセンター外観

■語句説明

注1) ユニット：第2世代SMの構造は計量部、通信部、ベース、ケースといったユニットで構成され、異なるメーカーや提供元の製品を組み合わせることで組み立てることができる。

計量事業本部

スマートファクトリー化への取り組み 先進工場技術検証室の活動紹介

1 はじめに

当社では、デジタルトランスフォーメーション（DX）戦略の一環として、工場のスマートファクトリー化の実現を推進している。必要な技術を調査・検証する場として、先進工場技術検証室（通称スマラボ）を立ち上げた。

昨年紹介した5つの技術検証カテゴリーに加え、現場のニーズをより幅広く汲み取るために2つの新カテゴリーを追加した（図1）。各カテゴリーの詳細は2章で説明する。併せて、現場とスマラボ間の対話体制を構築し、継続的に工場をカイゼンし続けられる仕組みづくりをした。2025年度には、計52件のテーマについて技術検証を実施した。本稿では主な取り組みについて紹介する。

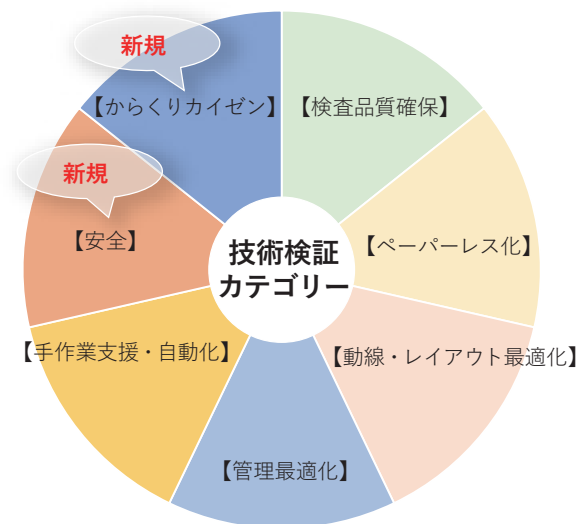


図1 スマートファクトリー化に向けた技術検証カテゴリー

2 技術検証活動の紹介

2.1 検査品質確保カテゴリー

(1) 画像センサーを活用した外観検査の自動化

当社では製品の外観検査工程の大半を現場の検査員が目視で行っている。スマラボでは、判定ミスリスクを無くすことを目的として、外観検査の自動判定技術を検証している。

2025年度には、傷の有無、寸法測定、表示文字記号の照合、部品の取り付け状態の確認、ねじの締付確認など、多様な検査項目に対応した画像センサーの調査・検証を行った。実製品を対象とした評価試験の結果、良好な判定性能が得られることを確認した。この検証結果を活用し、画像センサー5台を用いた自動画像検査装置を製作した（図2）。本装置は製品の検査システムと連

携することにより、検査条件の自動設定および検査成績書の自動発行が可能となる。

2026年度には、傷の有無、寸法測定、表示文字記号の照合について、自動検査装置の現場導入を計画している。



図2 画像センサー5台による自動外観検査装置

2.2 ペーパーレス化カテゴリー

(1) OCR（光学文字認識）の比較調査・試行検証

製品の組立工程において、使用部品の管理番号を目視で読み取り、手書きで記録している。読み間違いや書き間違いのリスクを排除することを目的として、文字をデジタルデータとして読み取るOCR技術を検証している。

2025年度には、複数メーカーのOCRリーダーを用いて製品トレーサビリティ（生産履歴の追跡可能性）対象品の文字読み取りテストを実施し、各メーカーのOCRリーダーの特徴を把握することができた。その結果、読み取り対象の難易度に合わせて、適切なOCRリーダーを選定することが可能となった。これにより、当初想定したリスクを排除でき、製造現場で導入・活用している。

2.3 手作業支援・自動化カテゴリー

(1) ロボットによる組立作業の自動化

製品の製造工程において、組立工程の大半を手作業で行っている。作業員の安全確保、組立品質の向上、安定生産を目的として、様々な組立工程の自動化を検証している。

2025年度には、人と並んで作業ができる協働ロボットを用いたリベット打ち・ねじ締結など、組立の基本要素に関する位置ずれの許容幅を検証し、実力を把握することができた。

今後は画像センサーによる位置補正を導入し、搬送、組立、検査、および検査成績書の自動発行までを対象と

した検証設備を構築していく。本検証で得られた検証結果は、設備構築および製品設計の基礎データとして活用する。

(2) ロボットによる配膳作業の自動化

製品の組立工程において、部品配膳を手作業で行っている。部品の取り間違いおよび数え間違いのリスクを排除することを目的として、配膳作業自動化の検証用設備の製作を開始した。

2025 年度には、産業用ロボットを使用し、簡易的なロボットハンドを 3D プリンターで試作することで、多様な製品に対応可能な部品配膳作業の検証環境を構築した（図 3）。

今後は配膳作業の自動化に加えて、配膳部品の検品工程も画像センサーを用いて同時に自動化できるかの検証を実施していく。



図 3 ロボットによる部品配膳自動化検証

(3) 作業検査カメラの調査・検証

セル生産工程（一人または少人数で製品を完成させる方式）における手作業では、不良品の流出防止のために目視確認を実施している。作業ミスの防止を目的として、実製品を対象に作業をリアルタイムにチェックする仕組みが機能するか検証した。

組立手順表示による組立品質確保に加え、電動ドライバーの作業履歴との連携によるポカヨケ（作業ミスの防止）、作業結果ログの出力による見える化など、多岐にわたる活用が可能であることを確認した。

2.4 管理最適化カテゴリ

(1) 劣化検知・予知保全センサーの調査・検証

生産設備の保全のため定期点検を実施しているが、それだけでは故障停止を防げないリスクが残っている。そこで、故障の兆候を事前に検知し、生産停止を未然に防止することを目的として、各メーカーの劣化検知・予知保全センサーの比較調査および検証を実施した。以下に検証内容を示す。

老朽化したモーターなど対象機器に対して約 1 年間劣化検知検証を実施した。振動センサーにより、リアルタイムで状態をモニタリングし、総じて異常判断が可能になったことが確認できた。

今後は検証を継続し、データを蓄積することで劣化検知の検出精度の向上を図る。

2.5 動線・レイアウト最適化カテゴリ

(1) 動線シミュレーターの試行検証

工場のレイアウト検討では、多数の設備、工程、物流動線が絡み合う中で全体最適化する必要がある。レイアウトの最適化による生産性の向上を目的として、動線シミュレーターを用いたレイアウトの仮想検証をした。

2025 年度には、3D モデルでの仮想生産ラインの動画化を実現し、生産設備の関係者とも、レイアウトの最適化の意図を共有しやすくなった。

2.6 安全カテゴリ

2026 年度より、安全に関するカテゴリを追加した。本カテゴリでは、一人作業時における安全（熱中症対策も含む）を確保するため、AI カメラによる転倒検知および進入検知システムの導入検討など、安全に関する先進技術を検証していく。

2.7 からくりカイゼンカテゴリ

2026 年度より、からくりカイゼン（電気などの動力を使わず、機構の工夫で動かすカイゼン）に関するカテゴリを追加した。現場主体のカイゼン活動の推進を目的として、導入ハードルの低いからくりカイゼン機器についても調査・検証を進める。

3 おわりに

2025 年度は、スマートファクトリー化への各技術検証カテゴリにおいて、これまでに紹介したような検証を行い、一部導入に至った。

2026 年度は、現場ニーズの継続的かつ精緻な把握を目的とし、製造現場との対話体制を一層強化していく。先進的な技術に限定せず、導入ハードルが低く、現場ニーズに合った技術についても積極的に取り入れていきたい。

これらの活動を通して、当社のスマートファクトリー化、および安全・品質・生産性の向上を推進する。これにより電力の安定供給や高度利用を支え、安全で豊かな暮らしや社会・経済活動の発展に貢献していく所存である。

DX カイゼン推進本部

次世代 EV 充電インフラの信頼性向上に貢献する SERA OCPP テストセンターの開設

1 はじめに

2025 年 9 月 16 日、東光高岳の蓮田事業所（埼玉県蓮田市）内に「SERA OCPP テストセンター」（以下、本センター）を新設した。

本センターは、電気自動車（以下、EV）充電インフラの国際標準プロトコルである OCPP（Open Charge Point Protocol）に準拠した製品・サービスの検証を目的としている。図 1 に、本センターで検証を行う OCPP 接続のイメージ図を示す。OCPP に準拠した東光高岳製 EV 急速充電器『SERA^{注1)}』シリーズと CPO^{注2)} 各社のバックエンドシステムを連携させ、次世代 EV 充電インフラサービスの実現に向けた技術開発を加速させる拠点となる。

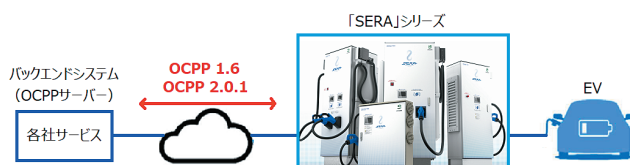


図 1 OCPP による接続と次世代 EV 充電インフラサービスの検証イメージ

2 OCPP とは

OCPP とは、EV 充電器と CSMS^{注3)} 間の通信を標準化するためのプロトコルである。現在は、OCPP 1.6 が主流であるが、世界的に OCPP 2.0.1 への移行が進んでいる。

OCPP 2.0.1 は、OCPP 1.6 と比較してセキュリティが強化されている。また、電力需給に応じた最適な充電抑制を実現する「スマート充電機能」、ISO/IEC 15118 規格に基づく「プラグ & チャージ」（EV に充電プラグを接続するだけで、ユーザーの認証と充電料金の決済を完了する機能）などに対応しており、EV ユーザーの利便性と EV 充電インフラの信頼性を飛躍的に向上させるものである。

3 本センターの開設背景と目的

近年、自動車メーカー各社やインフラ事業者、エネルギー事業者といった CPO による充電インフラ整備が加速している。その普及が進む中で、バスなどの大型車両においては、充電集中による電力ピークに伴う電気料金の高騰や、運行管理システムとの連携といった課題が顕在化している。こうした中、車両と接続する急速充電器と、EMS（エネルギーマネジメントシステム）や運行・

充電管理システムなどのバックエンドシステム（OCPP サーバー）との間の、相互接続性および通信安定性の検証が不可欠となっている。

本センターは、各社サービス（バックエンドシステム）と東光高岳の『SERA』シリーズを用いた検証を通じて、EV 充電インフラの信頼性の向上に貢献することを目的として開設された。

4 本センターにおける具体的な検証内容 と価値提供

本センターでは、CPO 各社や EV メーカーに対し、主に以下の検証環境を提供している。

4.1 CSMS とのデータ送受信テスト

EV 急速充電器は、IC カードの認証や充電データのやり取りを CSMS（クラウドシステム）と行っている。本センターでは、「IC カードの読み取り時、各社バックエンドシステムから正しく認証されるか」といった挙動を、『SERA』シリーズを用いて確認できる。また、充電開始から終了までのデータ（積算電力量や現在のステータスなど）が、各社バックエンドシステムと正常に連携できるかを検証することで、導入後のシステムトラブルによるリスクを最小化する。

4.2 実車両との相互接続性試験

EV はメーカーや車種ごとに仕様が異なり、急速充電器との相性問題が発生する場合がある。街中の充電スタンドで特定の車両でエラーにより充電が停止するなどのトラブルが生じた際、当該車両を本センターに持ち込み、『SERA』シリーズと接続して原因究明を行うことが可能である。自動車メーカーと合同で実車両との相互接続性まで踏み込んだ検証を行うことで、原因究明を迅速化し EV 充電インフラの信頼性を向上させる。

4.3 次世代製品への先行投資と水平展開

本センターで蓄積された多種多様な接続実績や知見は、今後の次世代急速充電器や OCPP 対応製品の開発に展開していく。これにより、信頼性の高い新製品を速やかに市場に投入できる体制を整えている。

5 おわりに

現在、様々な充電ネットワークが乱立する中で、自動

車メーカーや CPO 各社のバックエンドシステムと急速充電器の接続試験は必須のプロセスとなっている。

現在は『SERA』シリーズの主要機種のみを配備しているが、今後は全ラインアップを揃え、本センターの機能をさらに充実させていく。本センターでの精密な試験を通じて、『SERA』ブランドの品質を高め、顧客の期待に応える次世代 EV 充電インフラサービスを提供し続けていく。

■語句説明

- 注 1) SERA：東光高岳の EV 用急速充電器のブランド名。
デザイン文字：東光高岳の登録商標第 6821584 号。
ロゴマーク：東光高岳の登録商標第 6824520 号。



- 注 2) CPO (Charge Point Operator)：主に充電器の運営、管理などを行う企業。
注 3) CSMS (Charging Station Management System)：充電器を管理・監視する中央システム。

GX ソリューション事業本部

EV 用急速充電器「SERA-50」が 初出荷から 5 年で累計出荷台数 2,000 台を突破

1 はじめに

東光高岳が開発・製造を行う EV 用急速充電器「SERA-50」が、2025 年 10 月 7 日をもって、累計出荷台数 2,000 台を突破した。

「SERA-50」は、2020 年 10 月の初出荷以来、EV インフラの整備・拡充に貢献する製品として、高速道路の SA・PA や自動車ディーラー、コンビニエンスストア、公共施設、商業施設、企業のフリート^{注1)}向けなど、幅広い分野で導入実績を積み重ねてきた。

「SERA-50」の基本仕様を表 1、外観を図 1 に示す。「SERA-50」は、シンプルで使いやすいスタンダードな当社主力モデルである。以下に「SERA-50」の特長を挙げる。

- ・最も選ばれている 50 kW の標準出力容量、コンパクトなデザイン
- ・カラーディスプレイに操作ガイダンスを表示、初めての利用でも迷わず簡単
- ・インバーターをユニット化し、万が一の故障時にも残りのユニットだけで充電が可能

表 1 基本仕様

最大出力	50 kW
入力電圧	三相 3 線式 AC 200 V (50/60 Hz)
外形寸法	W 665 H 1,734 D 407 (mm)
質量	約 270 kg
認証・課金機能	OCPP



図 1 「SERA-50」外観

2 2,000 台突破の背景と今後の期待

近年の EV 用急速充電器市場では、車両バッテリーの大容量化や国による補助金要件の変化に伴い、さらなる高出力化が進む傾向にある。しかし、大容量の急速充電器は、受変電設備の増強工事による初期費用の発生や、運用費用である電力基本料金の上昇を招く場合があり、これらが設置の障壁となるケースも少なくない。

「SERA-50」は、入力容量を 50 kW 以下に抑えることで低圧契約の範囲内での運用を可能にしている。これにより、大規模な電気設備改修を伴わずに導入でき、初期費用および運用費用を大幅に抑制できるという利点がある。

こうした経済性に加え、限られたスペースにも設置可能なコンパクトなデザインや、視認性を高めたカラーディスプレイの採用によるユーザビリティの向上などが高く評価され、累計出荷台数 2,000 台という節目を迎えるに至った。

各自動車メーカーが展開する EV のラインアップには軽自動車も多い。軽自動車に大容量バッテリーが搭載されることは少ないため、「SERA-50」の充電能力がマッチすると考えられる。今後も改良を重ねながら、出荷台数を伸ばす見込みである。

3 今後の『SERA』シリーズの展開

東光高岳では、「SERA-50」を引き続き市場へ展開していきたいと考えている一方で、国からの指針でも示されているように、急速充電器の大容量化や高電圧化も求められている。こうしたニーズに応えるべく、CHAdeMO 規格対応器としては世界初（自社調べ）となる一口最大出力 350 kW（総出力 400 kW）の次世代超急速充電器を、EV 充電サービス事業者である株式会社 e-Mobility Power と共同で開発し、2025 年 5 月に製品発表会を行った。2026 年夏～秋ごろに東名高速道路海老名サービスエリア上下線ともに設置を予定している。

当社は、導入面と運用面に優れた「SERA-50」を筆頭に、図 2 のように設置環境や利用ニーズに合わせた最適なラインアップを展開^{注2)}し、EV の導入拡大に貢献していく。

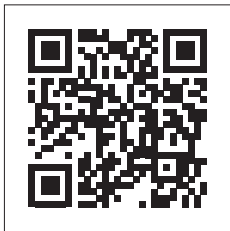


図 2 SERA シリーズ ラインアップ

■ 語句説明

注 1) フリート：法人が事業で使用する車両群

注 2) ラインアップを展開：詳細は以下をご覧ください。

SERA | EV 急速充電器国内 No.1 の累計販売台数を誇る
東光高岳

GX ソリューション事業本部

オフグリッド型エネルギーマネジメントシステムの実装 —母島の再エネ 100%電力供給と新島のレジリエンス強化—

1 はじめに

本土電力系統と切り離されたエリアにおいて、そのエリア単独で電力供給を行う仕組みをオフグリッドと呼ぶ。

当社は、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の普及拡大に向け、オフグリッド地域において、再エネ 100%で電力供給を可能とするよう、「オフグリッド型エネルギーマネジメントシステム」（以下、本 EMS）の開発を進めてきた。

本稿では、東京電力パワーグリッド株式会社（以下、東電 PG）が管轄する小笠原諸島・母島（オフグリッド）において、本 EMS の制御技術を用いた再エネ 100%での電力供給を達成した事例を紹介する。また、伊豆諸島・新島（オフグリッド内のさらに規模の小さいマイクログリッド）において、本 EMS を導入したレジリエンス強化の取り組みについても一部紹介する。

2 本 EMS の概要

母島や新島では、これまでディーゼル発電機（以下、DG）が主な電源であった。今回、東電 PG は、再エネ 100%での電力供給を実現するため、本 EMS に合わせて、仮想同期発電機（VSG）機能付き蓄電池用インバータをパワーコンディショナ製造業者と開発・導入した。

オフグリッドの電力供給には、発電機の慣性力が電圧や周波数の安定に不可欠である。今回の取り組みでは、VSG がこの慣性力を疑似的に作り出すことで、発電電力が不安定な再エネ 100%による電力供給を行っても安定した電力供給を実現している。

本 EMS は、昼間は再エネである太陽光発電（以下、PV）から負荷に電力を供給しながら余剰分を蓄電池に充電する。そして、夜間は蓄電池から再エネ由来の電力を供給する方法で再エネ 100%運転を実現する。なお、PV は気象条件の影響を受けて発電電力が変動するため、蓄電池の充電電力が不足する場合があります。その時は DG を制御して不足電力を補い安定供給を継続する。

母島にて構築した本 EMS の概要を図 1 に示す。なお、各機能の詳細は次章で紹介する。本 EMS は、PV 発電量予測、電力需要予測に基づき、電力系統の電力需要に対して供給をしつつ、蓄電池を充電するための各種発電設備の運転計画を作成する「UC/EDC サーバ」と、変化する系統周波数および電圧を制御する「LFC 用 PLC^{注1)}（制御装置）」で構成されている。具体的には、需給バランスを維持する計画機能で作成した運転計画に従い運転す

る各種発電設備に対し、時々刻々と変化する周波数や電圧を一定の値に維持するための制御を実施する。

また、本 EMS では再エネの利用状況を住民の方々に通知するための「デジタルサイネージ^{注2)}（電子看板）」を役場に設置し、取り組みの見える化も行っている。

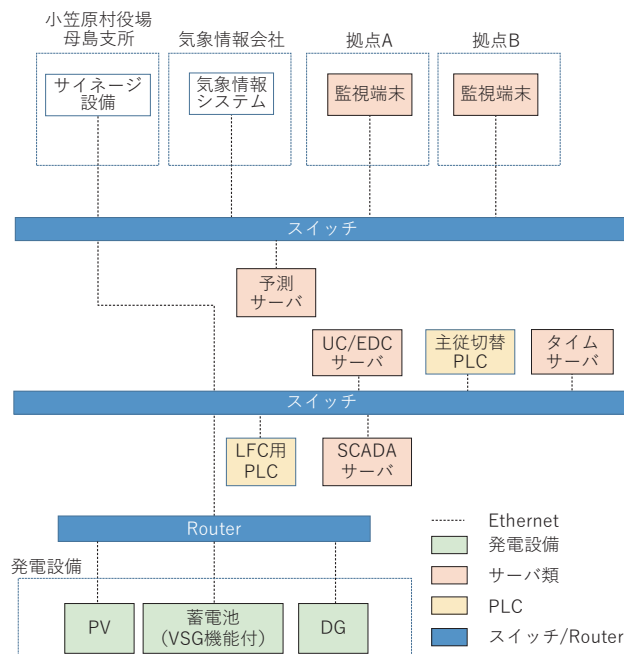


図 1 母島 EMS の概要図

3 本 EMS の主な機能

本 EMS の主な 7 つの機能について紹介する。

3.1 予測機能

「予測サーバ」にて、気象情報（外部気象関連会社から入手）に基づき、PV 発電量ならびに電力需要を予測し、制御に用いるデータを作成する。

3.2 監視制御と計測

情報監視計測システム（以下、SCADA）にて、電力系統の周波数や電圧、各発電設備の有効電力や電圧などの計測情報、発電機特性や蓄電池の充放電時間など各種パラメータ値などを設定／表示する。

また、SCADA 情報は、遠隔地から監視端末にて確認することができる。

3.3 発電設備起動停止計画（UC）

3.1 節で作成された予測データに基づき、需給バランスを考慮した発電設備の起動停止計画を作成する。

3.4 発電機出力計画 (EDC)

作成された起動停止計画に従った個々の発電設備に対して SCADA で設定した各種パラメータに基づき、需給バランスを考慮した出力計画を作成する。

3.5 負荷周波数制御 (LFC)

系統周波数を計測し、定められた目標値内に周波数を保つよう制御指令値を計算し、各発電設備に制御指令を送信する。周波数は電力の需要と供給のバランスの上に成り立つものであり、電力の安定供給を維持するための重要な品質要素で、その制御は必須の機能である。

3.6 系統電圧制御

系統電圧を計測し、定められた目標値内に電圧を保つよう制御指令値を計算し、各発電設備に制御指令を送信する。電力系統の電圧を適正に維持することは、周波数を維持することと合わせて電力品質の維持に必須の機能である。

3.7 ブラックスタート^{注3)} 機能

万一、島内が全停電となった場合、他装置からのブラックスタート開始指令を受け付けることで、SCADA で設定した優先順位に従い、対象となる VSG を電圧制御しながら起動させ、自動で停電復旧を行う。

4 オフグリッド地域における再エネ率 100%運転での電力供給

4.1 母島における再エネ率 100%運転での電力供給

本 EMS は、母島において再エネ率 100%の運転を目指した長期の実証運転を行っており、現在 (2026 年 6 月時点) も連続で運転している。その中で、2025 年 7 月 30 日の運転実績として、再エネ率 100%の電力供給を実施している期間の PV 運転状況並びに周波数制御状況を図 2、3 に示す。

図 2、3 からわかるとおり、天候により PV 出力が変動する条件下でも、周波数を標準周波数内に制御できている。

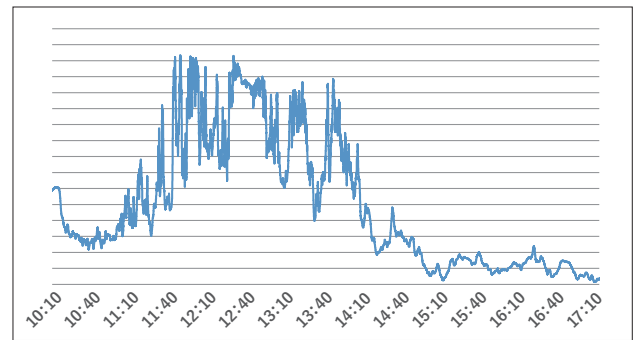


図 2 2025 年 7 月 30 日 PV 発電状況

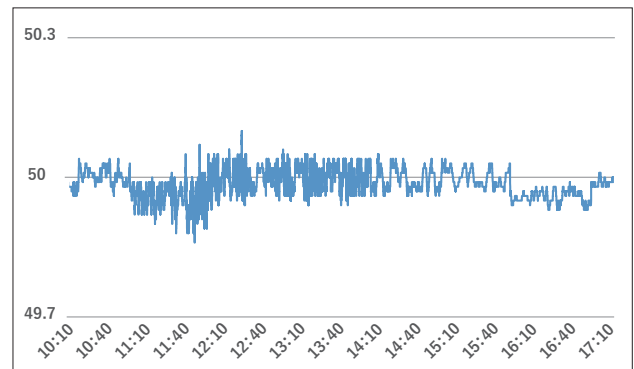


図 3 2025 年 7 月 30 日系統周波数状況

4.2 新島におけるマイクログリッド運転

新島では、DG を主体として電力供給を行っているが、レジリエンス強化を目的に PV および VSG 機能付き蓄電池が設置されている。これらを活用し、DG を除いた PV と蓄電池によるマイクログリッドを構築するにあたり、本 EMS を導入してマイクログリッドの試験を実施した。その結果、所望の性能を確認することができた。

5 おわりに

本取り組みを通じて母島での再エネ 100%による電力供給および、新島マイクログリッドでのレジリエンス強化を実フィールドで実現できた。

今後は本土系統においても、再エネと蓄電池等および本 EMS を活用した電力レジリエンス強化に取り組んでいく。

■ 語句説明

- 注 1) PLC : Programmable Logic Controller の略。シーケンス処理を得意とする制御装置。
- 注 2) デジタルサイネージ : 液晶ディスプレイなどを用いた電子掲示板。
- 注 3) ブラックスタート : 系統電力が停止した状態から発電設備を自力で立ち上げ発電・送電を再開。

エネルギー需要転換実証事業向け 効率的なグリーン水素生産に貢献する EMS の開発事例

1 はじめに

2025 年 10 月、山梨県並びに技術開発に参画する 10 社が、「サントリー天然水 南アルプス白州工場」および「サントリー白州蒸溜所」へのグリーン水素導入に向けた大規模な P2G^{注1)} システムの運用を開始した。これは、再生可能エネルギーをグリーン水素へ転換して活用することで化石燃料から非化石燃料への需要転換を促すための技術を実証するものである。本件は、燃料の脱炭素化とエネルギー自給率の向上に資する国内最大かつ最先端のプロジェクトであり、グリーンイノベーション基金事業の第一号採択案件^{注2)} として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受けて推進している事業（以下「本事業」）である。

当社は、本事業のコンソーシアムにおいて熱需要の転換技術開発を担う東京電力ホールディングス株式会社の分担のうち、表題のとおり、P2G-EMS（以下、本 EMS）を同社との連携により構築した。本 EMS は、工場における水素需要と再生可能エネルギーを効率的に利用するために電力卸売市場の市況を参考に立案される需給計画に基づき、P2G システムを統合的かつ自律的に制御し、かつ遠隔地からの監視までをサポートするエネルギーマネジメントシステムである。

本稿では、本 EMS の機能について紹介する。

2 本 EMS の概要

本 EMS の全体構成図を図 1 に示す。本 EMS は、EPJ システム（コンソーシアムメンバーである東京電力

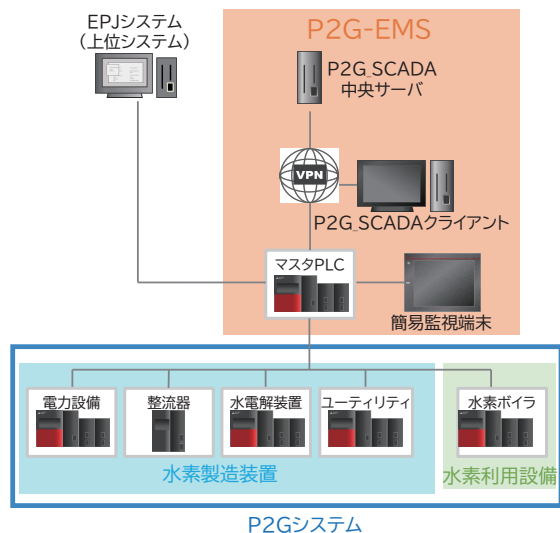


図 1 P2G-EMS 全体構成図

エナジーパートナー株式会社と当社が業務提携するエナジープールジャパン株式会社（EPJ）が運営する上位システム）と、水電解装置などの P2G システム構成機器間を結ぶための相互通信機能を有している。

本 EMS は EPJ システムからの運用指令値を受信し、構成各機器の状態を把握した上で状況に応じて的確に水素生成の指標である電解出力を調整する。個別の機器が一体の水素製造プラントとして働くよう統合的にコントロールするまさにプラントの頭脳を提供するものである。

水電解プラントの商業運転に繋がるよう、システム全体として安全性を確保しつつ効率的な水素製造を実現するための機能を有しており、以下にシステムの概要を紹介する。

2.1 P2G-EMS

本 EMS は、リアルタイム制御を行うマスタ PLC^{注3)}、遠隔監視および操作を行う P2G-SCADA^{注4)}、P2G-SCADA 通信断や停電時におけるバックアップ用の簡易監視端末により構成されており、図 1 に示すように、上位システムおよび P2G システムと接続される。

2.2 EPJ システム

電力卸売市場、電力需給調整市場と本 EMS との間における運用データの生成を行い、毎日の計画値およびリアルタイムでの指示値の両方を本 EMS に伝送する。

2.3 P2G システム

P2G システムは電力設備、整流器、水電解装置、冷却系・純水系装置等のユーティリティ設備からなる水素製造装置と、製造した水素を燃料として利用する水素ボイラで構成されている。

3 本 EMS の主な機能

本 EMS の主な 4 つの機能を紹介する。

3.1 電力卸売市場との連携機能

30 分毎に設定された運転計画に基づき、起動停止指令および電力指令値を自動的に P2G システムに送信する機能である。また、運用者が P2G システムの起動および停止を手動で設定することで、稼働状態に応じて起動停止を行うとともに、整流器へ供給する交流電力の指令値を設定することで、設定内容に基づき台数ごとに指令値を送信することも可能である。

3.2 電力需給調整市場との連携機能

一次調整力は電力系統の安定を目的とし、瞬間的な需給バランスの乱れ（周波数等に影響）を補正するために必要な仕組みである。上位システムから周波数変動に応じた指令値を受信し、水電解装置の出力をリアルタイムに変化させ調整する。

3.3 データ計測、収集、保存、表示機能

P2G-SCADA を用いて P2G システムの状態・計測値を定期的に収集・計測し表示するとともに、これらのデータの保存を行う機能である。また、お客様のニーズに合わせてカスタマイズが可能である。

3.4 遠隔監視制御機能

P2G-SCADA を用いて遠隔地から P2G システムの運転状態、計測値、警報情報等を確認でき、必要に応じて自動で各種機能を用いて制御を行う。

4 おわりに

本稿では、P2G システムに向けて開発した本 EMS の概要と主な機能について紹介した。

再生可能エネルギーを有効活用することで、グリーン水素の普及拡大が予想される。当社としても、本 EMS の技術を生かし、さらなる機能拡充を図りながら、カーボンニュートラル実現に向け貢献する所存である。

山梨県および東京電力ホールディングス（株）をはじめとしてプロジェクト関係者の皆様に、この場を借りて謝意を表します。

■語句説明

- 注 1) P2G : Power to Gas の略称。再生可能エネルギー由来の電力を用いて、水の電気分解により水素や酸素を製造する技術。
- 注 2) グリーンイノベーション基金事業第一号採択案件：NEDO の支援は、「サントリー天然水 南アルプス白州工場」へのグリーン水素導入を対象としたものである。
- 注 3) PLC : Programmable Logic Controller の略称。シーケンス処理を得意とする制御装置。
- 注 4) SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition の略称。複数個所の情報を一個所に集約し、統合的に監視・制御するシステムのこと。

GX ソリューション事業本部

ナイジェリアの経済・地域社会の発展に貢献する 電力インフラ整備事業の完工

1 背景

ナイジェリア連邦共和国（以下、ナイジェリア）は、アフリカ大陸の西部に位置し、アフリカ最大の人口（約2億4千万人）を抱えるギニア湾に面した経済大国である。ポルトガル語の「ラグーン（潟）」に由来するラゴス州は、全国人口の10%を占め、急速に経済成長を遂げている。

ラゴス州に電力供給するアパパロード変電所の電力需要は年々増加を続け、ピーク時の電力負荷が同変電所の供給可能容量を超過している。加えて、脆弱な送電系統に起因する不安定な電力供給の常態化が課題となっていた。

そこで、日本政府無償資金協力「ラゴス変電設備緊急復旧・増強計画」（以下、本プロジェクト）が実施され、タカオカエンジニアリング株式会社と豊田通商株式会社のコンソーシアムが施工を担当した。

本プロジェクトは、アパパロード変電所の変電設備を増強することにより、同国最大の港湾であるラゴス港を含む港湾施設および周辺産業地域への電力供給の安定性や信頼性の向上を図り、質の高い経済成長のための基盤づくりに寄与する。さらに、現地で操業する日系企業を含めた周辺地域の持続的な経済活動の促進に貢献し、市民生活の向上や地域社会の発展に資することが期待される。



図1 ラゴス（変電所）の位置図

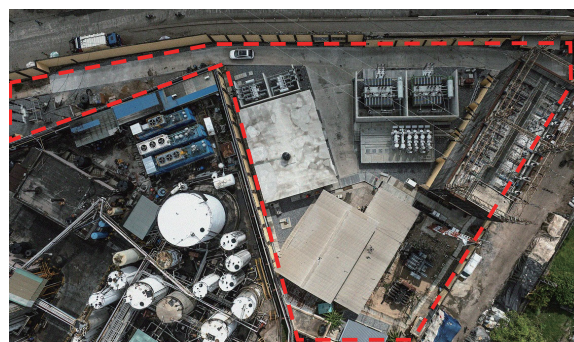


図2 アパパロード変電所の空撮（赤の破線内）

2 プロジェクトの概要

- (1) 施 主：ナイジェリア連邦共和国・連邦電力省
- (2) 契 約 者：タカオカエンジニアリング株式会社と豊田通商株式会社のコンソーシアム
- (3) 案 件 名：ラゴス変電設備緊急復旧・増強計画
- (4) 資 金：日本政府無償資金協力（ODA）
- (5) 工 期：2023年3月（契約）～2026年5月（完工）
- (6) 業務範囲：ラゴス州アパパロード変電所（図1、図2）の復旧・増強工事に関するエンジニアリング、土木・建築工事、資機材の調達・輸送・据付業務、機器の操作ならびにメンテナンスに関する現地スタッフへの技術指導の一括担当
- (7) 業務内容：
 - ・土木工事・制御室建屋の建設
 - ・下記電力設備等の供給・据付
 - ① 132 kV 送電線の引き込み機器
 - ② 132 kV GIS, 33 kV GIS
 - ③ 制御・保護装置

3 本プロジェクトにおける挑戦

本プロジェクトの実行に際して、下記の課題に真摯に取り組んだ。設置した機器や据付の様子を図3、図4に示す。

- (1) 本プロジェクトは、ナイジェリアにおいて初めての受注した案件である。現地工事会社とも初めての協働であり、企業風土や商習慣の違いもあったが、新たな協働関係を構築した。
- (2) 変電所の敷地が非常に狭い変形地であり、資機材の保管・輸送体制の構築、据付作業の手順・スケジュール管理に腐心した。特に、複数の作業が重なり合うことによる事故や工程遅延を防ぐため、細心の注意を払った。
- (3) 本プロジェクトの実施機関は、送電・変電設備を所轄するナイジェリア送電公社（以下、TCN）である。一方、アパパロード変電所内にはエコ配電会社（EKEDC）の所轄する配電設備も混在している。既設設備と関連する工事の設計・施工に際しては、

両社との協議・調整に多大な時間と労力を要した。

- (4) TCN が主要変圧器の供給・据付・試験を担当した。TCN が手配した現地の施工会社と作業・試験内容、工事日程を直接確認しながら進める必要があった。また、仕様変更や工程変更に対応して、完工に至った。
- (5) ゼロ災害は、プロジェクト履行の最重点目標であった。特に、既設変電設備の操業を継続しながら工事を実行する必要がある、安全面に細心の注意を払った（区画フェンスの設置、立入禁止表示など）。また、安全行動を促す啓発看板（図 5）を掲示して安全管理を促した。
- (6) プロジェクト実施を通じて、施工管理、安全衛生管理、保守運転を含め、ナイジェリア関係者への技術移転と経験共有に配慮した。



図 3 132 kV GIS（据付作業中）



図 4 33 kV GIS（外観）



図 5 掲示板を活用した安全管理の指導

4 今後の展望

タカオカエンジニアリング株式会社は、これまで 50 か国、150 か所を超えるプロジェクト現場で電力インフラ整備事業に取り組んできた。アフリカ地域における契約実績（図 6）は 10 か国となった（原稿執筆時点で、レソトおよびシエラレオネでも契約を履行中である）。

これまでの経験と協働企業とのネットワークを活かして、より多くの発展途上国・新興国の経済発展と市民生活の向上に貢献していきたい。

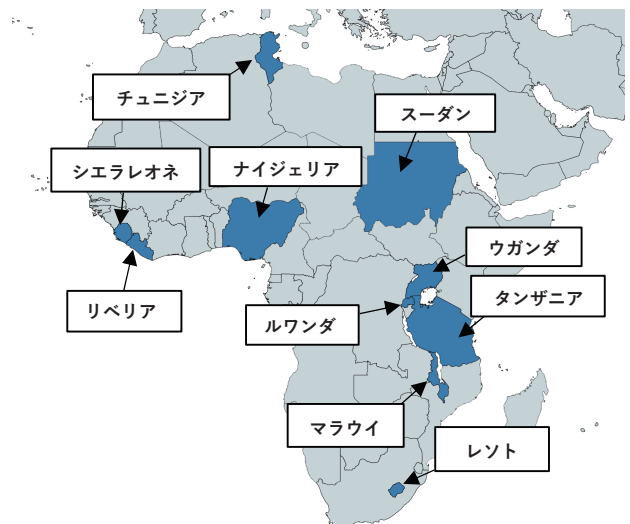


図 6 アフリカ地域における契約実績国（執筆時）

タカオカエンジニアリング株式会社