

- 1 巻頭言
5 Grids の革新による未来社会
石井 英雄

論文

- 2 樹脂モールド構造における
機械的強度の解析・評価技術
森 佑介・滝澤 明広
- 6 シールド付連続円板巻線の油浸要素モデル
による雷インパルス絶縁特性
吉村 智萌・酒井 崇行・尾崎 卓也
- 10 2019 年度 VPP 実証への取り組み
(DR shifTer の改良)
細谷 雅樹・中山 匡・田中 晃司
- 15 次世代ナノ結晶軟磁性材料の
変圧器鉄心への適用
出井 和弘・栗原 二三夫・須永 善則

技術紹介

- 19 エポキシモールド機器のライフサイクル
全体にわたる環境配慮技術
大竹 美佳・山下 太郎
- 21 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
吉井 誠
- 24 仮想試験としての CAE 活用
—急速充電器の熱設計—
片柳 厚志・古家 成正

製品紹介

- 27 発電所用自立形ガス絶縁計器用変圧器
村上 政倫
- 28 屋外用分割形変流器のラインアップの拡充
小林 晃一
- 29 新形 6 kV 固体絶縁開閉装置 (スマート SIS) の開発
伊藤 忠慶・佐藤 裕康・佐々木 邦彦
- 33 6 kV 分路リアクトルの開発
都 基竣・仲山 雄貴
- 35 IEC61850 適用・デジタル変電所向け
監視制御システム (SAS+BCU+Ry)
成田 和彦
- 36 90 リレー内蔵 LR 連動制御装置
前澤 格・菅原 雅寛
- 38 IEC61850 対応配電用変電所遠方監視制御装置
佐藤 一男・川俣 陽輝
- 40 IP 化装置 (2 階層制御システム向けゲートウェイ)
藤澤 光剛・桑原 大輔
- 42 特高受変電設備監視システム MUDIC-Lite
窪田 直紀
- 43 東南アジア向けエネマネサービスパッケージ
近藤 大介・服部 美里・今井 直樹
- 45 国内初 CHAdeMO 規格 ver2.0 対応
電気自動車用急速充電器
古家 成正
- 47 広視野共焦点三次元計測センサ
SCS-10000R1-KN
石原 満宏・水野 佑樹
- 50 IEC61850 のデータ活用
ソリューション (IEC61850 for SQL)
小栗 伸吾
- 51 電力の遠隔検針用ソリューション
Cloud-TOSCAM
沢野 伸也・成松 正浩

トピックス

- 53 リソルの森における再エネを活用した
日本初の「地産地消システム」の開発
- 54 四国電力送配電株式会社
北海道電力ネットワーク株式会社への柱上変圧器納入開始
- 55 マイナス側インターロック適用
配電用遠方監視制御装置 (多機能形)
送電用変電所用 IP 対応インタフェース盤

5 Grids の革新による未来社会



石井 英雄*
Hideo Ishii

早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構（ACROSS）では、「脱炭素化（Decarbonization）」、「分散化（Decentralization）」、「デジタル化（Digitalization）」の3つのDを理念に据える活動ビジョン ACROSS 2020 を策定した。

「脱炭素化」は、FITによる再エネ拡大、各セクターにおける省エネ政策により進展しているが、2050年の温暖化ガス排出量80%削減は出口が見えず、強い意志のもと更なる推進が必要である。「分散化」は、太陽光発電など再エネ拡大のもと、自動車の電動化、蓄電池の低価格化をはじめ需要家側のエネルギー機器の革新により不可逆に進むもので、その特性を最大限に活かすことが必須である。「デジタル化」も同様に、ICTの浸透、AIの台頭などにより半ば自発的に進展し諸分野で大きな効用をもたらしているが、その進化は指数関数的であり、将来これを駆使することによる恩恵は計り知れない。

我々は、都市インフラである電気・ガス・水道・交通・通信の5つの網を“5 Grids”と称し、上記3Dの視点でのそれぞれの革新と相互の連携による価値創出を支援するとともに、脱炭素・少子高齢化対応を起点に効率化、災害時など有事の行動誘導など、さまざまな政策が求められる自治体行政を支援する観点から、研究開発を推進している。その鍵となるのは、5 Gridsが生み出すデータを統合し、予測やシミュレーションを組み合わせた分析を行い、効率的なインフラ整備・運用、災害時のレジリエンス確保・向上など、社会コストの低減、市民生活の安全・安心向上の基盤形成に結び付けていくことである。

一例として、我々はJSTの未来社会創造事業において、宇都宮市と連携し、グリッドデータバンクラボの協力を得て、スマートメーターの過去一年間のデータを解析し、太陽光発電の余剰の時空間分布を可視化した。このようなデータは、今後の電力系統対策や太陽光発電の適切な設置個所、さらには需要の誘致などに活用していける。また、電力消費データに加え、公共交通の運行などのデータ、スマートフォンの位置情報を統合し、シミュレーションモデルと組み合わせ、電力・交通・人流を統合的に分析・予測する「時空間マルチダイナミクス予測エンジン」の開発を進めている。再エネの最大活用による「CO₂排出のない都市」、公共交通のダイヤ運行最適化による「移動ストレスのない都市」に向けた政策立案を支援するツールになると期待している。

このような取り組みは、Society 5.0が謳う、分野を超えたビッグデータの活用による新たな価値創出の具現化であると考えており、これをさらに進めていくためには、低コストで有効なデータを取得するセンシング、データを統合させるプラットフォーム、分析のアルゴリズムなどの技術開発とともに、関係者がデータ活用の価値を認め、積極的にデータを共有していくマインドセットが重要である。本年、エネルギー供給強靱化の一環で電気事業法が改正され、託送料金制度、計量法の改革や配電ライセンス制導入など、新たな時代に対応した展開、また世界を席巻した新型コロナウイルス感染症拡大の経験からデータ活用の力の再認識など、次のステップへの前進が希求されている。さまざまな関連要素技術と多岐にわたる経験・実績を有する東光高岳が、牽引役の一翼を担うことを大いに期待する。

* 早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構・研究院教授 石井英雄

樹脂モールド構造における 機械的強度の解析・評価技術

■ 森 佑介
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広
Akihiro Takizawa

エポキシモールド製品は導体やコイル、ボルト座などさまざまな部品がモールドされている。通常、内部にモールドされた部品付近には残留応力が発生するため、想定以上の荷重や衝撃が加わった際に破壊の起点となることが多い。そのため、モールドした部品付近に発生する残留応力の把握と、その残留応力を考慮した機械的強度の解析・評価を行い、事前に開発品の性能を確認することが望ましい。しかし、一般的な線形応力解析から評価した機械的強度は、実際の機械的強度と大きな乖離が生じるといった課題がある。この課題を解決するために、成形プロセスで生じる残留応力の解析や評価方法の改善を行ってきた。

本稿では、これまで構築した技術を活用して、ボルト座が埋め込まれた実器に対して強度解析・評価を実施し、試験結果と比較検証した。その結果、従来からの課題であったエポキシモールド製品の強度解析・評価精度を改善し、効率的な製品設計・開発に活用できることを確認した。

1 はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械的強度が優れており、電力機器の絶縁材料として広く用いられている。東光高岳においても、エポキシモールド変成器だけでなく、さまざまな製品に使用している。エポキシ樹脂のような固体絶縁材料を使用する場合、絶縁耐力だけでなく、十分な機械的強度（以下、強度）を有することを確認する必要がある。東光高岳が取り扱うエポキシモールド製品は、コイルや導体、接続端子、ボルト締結するためのボルト座など、さまざまなものをモールドしている。このような樹脂モールド構造において、モールドした部品近傍には、成形プロセスで生じる残留応力（詳細は3章に記載）や外気温の変化による熱応力が生じやすい。さらに、残留応力や熱応力だけでなく、大電流通電により電磁力が発生する製品や外部から荷重が加わる可能性のある製品については、エポキシ樹脂が割れないための強度設計が重要となる。

エポキシモールド製品において、形状変更をする場合には金型修正によるコストや期間が相当必要になることから、解析・評価技術による強度設計の妥当性確認、手戻り抑制の効果は非常に大きいと考えられる。しかし、前述の残留応力や寸法効果なども考慮する必要があるため、エポキシモールド製品の強度を予測することは容易ではない。さらに、従来の一般的な線形応力解析や評価方法では、実際の強度と大きな乖離を生じることがあり、製品開発を効率化するうえで課題となっていた。そこで筆者らは、残留応力や寸法効果を考慮した解析技術を構築し、エポキシモールド製品の強度を精度良く評価できるようにしてきた^{(1)~(6)}。本稿では、これまで構築した解析・評価技術を実器に適用し、比較検証した事例を紹介する。

2 実験方法

前述のとおり、エポキシモールド製品はさまざまなものをモールドする。そのなかでもボルト座をモールドした場合、ボルト座周辺は残留応力や熱応力が比較的大きくなりやすいだけでなく、ほかの部品との締結時の締め付け力や衝撃の伝搬などにより応力が集中しやすい。そのため、強度を評価することが特に重要な部位といえる。

図1はボルト座を埋め込んだテストピースの例である。このようなボルト座を埋め込んだ構造のテストピースに対して、図2のようにボルトを挿入し、そのボルトをつかんで破壊するまで引っ張ることで破壊荷重値を把握することができる。しかし、すべての製品に対して同様の試験を行うことは、製品形状やサイズ、試験機などの制約から容易でないこともあり、解析により評価できることが望ましい。このニーズに対応できるように、これまではいくつかのテストピースを用いて、強度解析・評価にかかわる要素技術の基礎検証を進めてきた^{(1)~(6)}。本稿では、これまで検証を進めてきた技術を実器に適用し、強度試験結果と比較することで、本解析・評価技術の有用性を確認した。

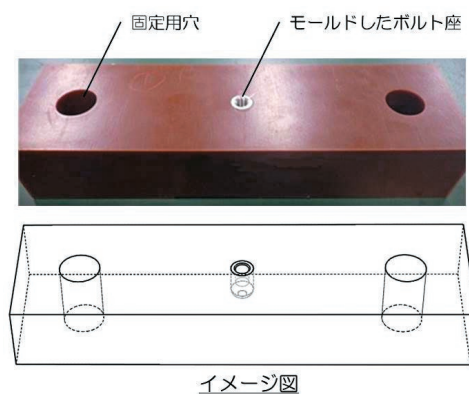


図1 ボルト座をモールドしたテストピース

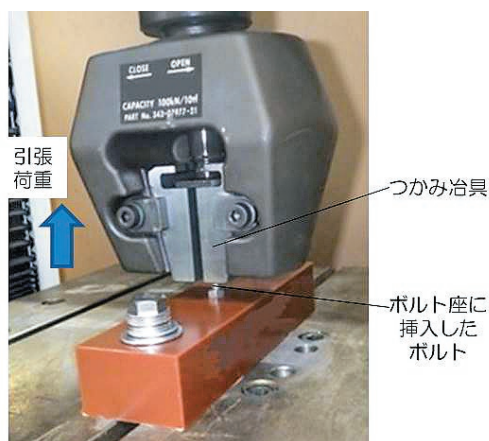


図2 強度試験

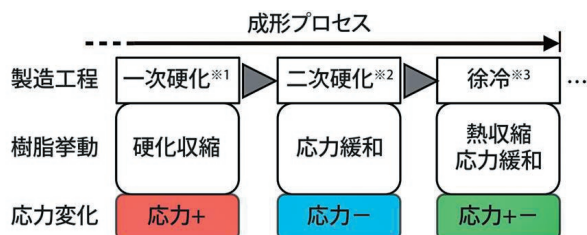
3 解析方法

3.1 成形プロセスにおける樹脂の挙動と応力の変化

前述のとおり、エポキシモールド製品の強度を評価するためには、残留応力を把握する必要がある。残留応力を解析するうえでは、成形プロセスにおける樹脂の挙動を考慮することが重要である。図3は一般的なエポキシモールド製品の成形プロセスと残留応力の変化につながる樹脂挙動を示したものである。一次硬化から徐冷のプロセスにおいて、硬化収縮や応力緩和、熱収縮といった現象が生じ、時々刻々と残留応力が変化する。硬化収縮はエポキシ樹脂の硬化反応に伴い発生するため、樹脂の硬化反応と体積変化の関係を把握しておく必要がある。また、応力緩和は樹脂の粘弾性特性^{注1)}に起因するが、本特性はきわめて強い温度依存性を示す。したがって、各成形プロセスの温度変化を考慮した粘弾性特性が必要となる。熱収縮を決定するエポキシ樹脂の線膨張係数についても温度依存性がある。これらの非線形性を考慮した解析を実施することで残留応力を把握することができる⁽⁵⁾。

3.2 機械的強度の解析・評価手順

本稿で実施した強度の解析・強度評価手順を図4に示す。3.1節に記載したとおり、各成形プロセスにおける残留応力の変化を解析する(図4(1)~(3))。残留応力は各プロセスで時々刻々と変化するが、最終的にエポ



※1 一次硬化：離型できる程度まで硬化を進める工程。

※2 二次硬化：残りの硬化を進めつつ、内部応力を緩和する工程。

※3 徐冷：内部応力を緩和しつつ、温度を下げる工程。

図3 エポキシモールド機器の成形プロセスと応力変化

キシモールド製品に生じる残留応力のなかでも、「(3) 徐冷時に生じる残留応力」が支配的である⁽⁵⁾。次に、残留応力を考慮した状態で荷重をかけ、応力解析を実施する(図4(4))。このとき、荷重をパラメータとして複数の解析を実施する。最終的に得られた解析結果から強度評価を実施するが、脆性的な破壊を示す対象によく適用される最大主応力説(最も強い最大主応力値と材料強度を比較する方法)では、強度を精度良く評価することは困難である。本稿では、最大主応力説ではなく、強い最大主応力が発生している範囲も考慮して破壊確率を算出し、強度評価を実施する(図4(5))⁽⁴⁾。

3.3 徐冷時の残留応力解析方法、破壊確率計算方法

本節では、強度評価を実施するうえで特に重要となる徐冷時の残留応力解析、応力分布を考慮した破壊確率計算について記載する。これ以外の計算方法については前報⁽⁶⁾を参照されたい。

● 徐冷時の残留応力解析

徐冷時の応力解析は、図3で示したように、成形品の温度低下による熱収縮と応力緩和を考慮する必要がある。

熱収縮量の計算には線膨張係数が必要となるが、徐冷プロセスにおける温度範囲において樹脂の線膨張係数も変化する。本解析では、線膨張係数の温度依存性も考慮している。

応力緩和については、一般化 Maxwell モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾とよばれる次式で計算する。

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{t}{a_T(T)\tau_i}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $G(t)$ ：緩和弾性率、 t ：緩和時間、 G_{∞} ： $t = \infty$ に

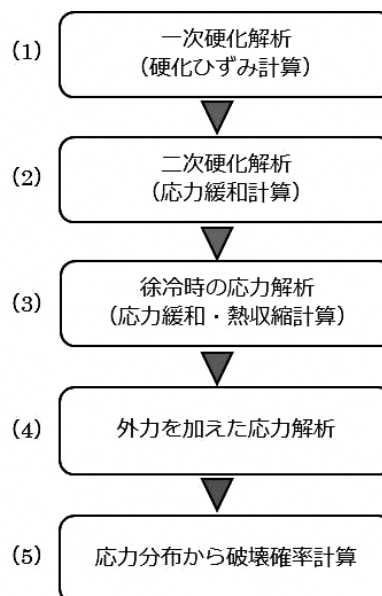


図4 強度の解析・評価手順

における弾性率, G_i : 各項の弾性率, τ_i : 各項の緩和時間, $a_T(T)$: シフトファクター, T : 樹脂温度, n : Maxwell モデルの項数

一般化 Maxwell モデルは高分子材料に顕著にみられる粘弾性特性を表すモデルであり, 時間の経過とともに緩和弾性率 $G(t)$ が低下することで応力緩和を表現する。緩和弾性率の変化は, G_∞ , G_i , τ_i , $a_T(T)$ の各係数によって決まる。本解析では, 動的粘弾性測定^{注2)}より得られた結果から各係数を求めている。

● 応力分布から破壊確率計算

最大主応力説とは異なり, ある特定の点における応力値だけで評価するのではなく, 最大主応力の分布から, 最弱リンクモデルにもとづき破壊確率を計算する。最弱リンクモデルとは, 複数の輪で構成される鎖の強度は最も強度の低い輪が決定づけるという考え方であり, 輪の数が多いほど鎖の破壊確率は高くなる。脆性材料の破壊を表現するモデルとして知られており, ワイブル分布⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾にしたがう。本評価方法では, 輪の数を評価対象の体積に置き換え, 寸法効果を考慮した強度評価を行っている。具体的な強度評価手順を以下に示す。

- (i) 最大主応力分布から, 各要素を代表する応力値 σ_i を求める。下添え字の i は要素番号を表す。
- (ii) 各要素の信頼度 R_i を次式より求める。

$$R_i(\sigma_i, V_i) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{V_i}{V_0}\left(\frac{\sigma_i - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\}, & (\sigma_i - \sigma_u > 0) \\ 1, & (\sigma_i - \sigma_u \leq 0) \end{cases} \dots\dots(2)$$

ここで, V_i は各要素の体積, V_0 は基準体積, m , σ_u , σ_0 はワイブルパラメータとよばれ, それぞれ形状パラメータ, 位置パラメータ, 尺度パラメータである。

- (iii) すべての要素が健全である確率 R_{tot} から, 解析対象の累積破壊確率 F を求める。

$$F = 1 - R_{\text{tot}} = 1 - \prod_i^n R_i \dots\dots(3)$$

ここで, n は解析対象の要素数である。

以上のように, 本解析・評価方法は, エポキシ樹脂の非線形性を考慮して正確な残留応力を求め, 最終的に得られた応力分布から寸法効果を考慮して破壊確率を求める方法である。本解析・評価方法を実器に適用し, 妥当性を検証した結果を次章で紹介する。

4 実器への適用結果

4.1 評価対象および解析モデル

強度評価の対象とする実器のうち, 特に強度評価で重要となる部位を抽出し, 図5のようにモデル化した。な

お, 対称性があるため 1/2 モデルとした。前述のように, 残留応力を解析した後に, ボルト座に引張荷重をかけた応力解析を実施している。また, 引張荷重値をパラメータとして, 各荷重値に対する破壊確率を求めている。

4.2 従来の解析・評価技術の問題点

図5に示したモデルに対して, 従来の解析・評価技術, すなわち, 線形熱応力解析で残留応力を求め, 最大主応力説で評価する方法を用いた場合, 実際の 50% 破壊荷重値と 2 倍の相違が生じるという問題があった。

4.3 本解析・評価技術の妥当性および有用性

図6に, 徐冷時における残留応力の解析結果を示す。同図には徐冷時の温度変化を併記しているが, 温度は線形的に低下しているのに対して, エポキシ樹脂の残留応力は線形的には変化しない。これは粘弾性特性に起因する応力緩和が生じるためであり, 徐冷することで 6 時間程度まで残留応力の増加を抑制している。このような残留応力の挙動は, 一般的な線形熱応力解析で把握することはできない。

図7に, 残留応力を考慮した状態で引張荷重をかけた応力分布の解析例を示す。なお, エポキシ樹脂の応力分布がわかるようにボルト座は非表示にしている。はじめに述べたように, ボルト座近傍に応力集中していることがわかる。各引張荷重値に対して図7のような応力分布

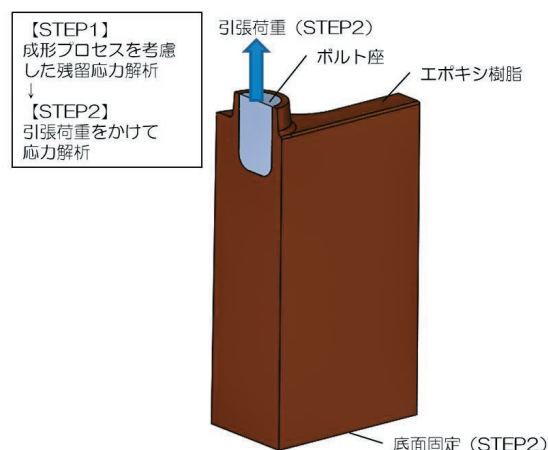


図5 解析モデル (1/2 モデル)

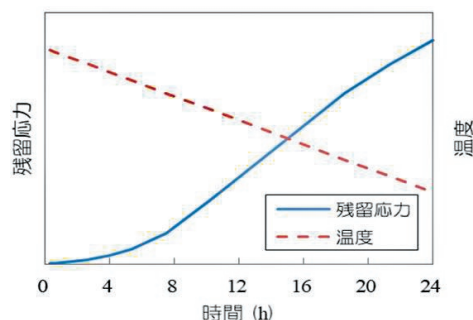


図6 徐冷時における残留応力の変化

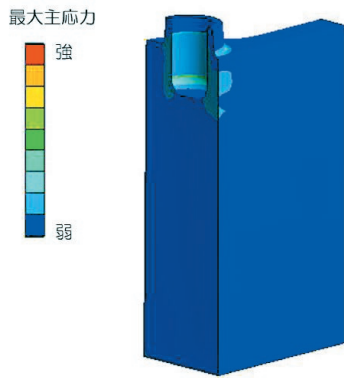


図7 残留応力 + 引張荷重の応力分布

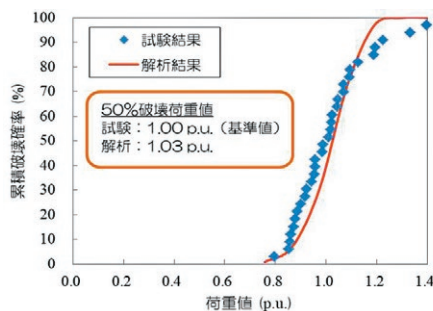


図8 実器の強度評価結果

を求め、その応力分布と体積から破壊確率を計算した結果が図8である。図8には、評価対象である実器の強度試験結果を併記している。同図より、高荷重側の破壊確率分布に多少の相違はあるものの、50%破壊荷重値や大まかな傾きなどは試験結果とよく一致しており、精度の良い解析・評価ができていると判断する。

以上のように、従来の課題であったエポキシモールド製品の機械的強度の解析・評価技術を改善したことで、実器の設計・開発に十分活用できる解析・評価技術を構築できた。

5 おわりに

本解析・評価技術の特長は、エポキシモールド製品の成形プロセスを加味した残留応力を求めていること、残留応力を考慮した状態で外部荷重をかけて、その応力分布から破壊確率を計算しているところにある。これまで、それぞれの要素技術について基礎検証を実施してきたが、本稿では、各要素技術を組み合わせて実器に適用した。また、強度試験結果と比較し、本解析・評価技術の妥当性を検証した。その結果、従来の課題であったエポキシモールド製品の強度評価を精度良く行うことができ、効率的な製品設計に資する技術であることを確認できた。

本技術をエポキシモールド製品開発の初期段階から利用することで、適切なモールド製品形状や製造プロセスの導出に活用できる。これにより、設計変更や試作回数

などが抑制されるのはもちろんのこと、金型修正に要するコストや期間などの抑制にもつながると考えている。

本稿ではエポキシモールド製品の機械的強度に焦点をあてたが、お客様の要求に応える製品をスピーディに提供するためには、開発品に要求されるさまざまな性能を試作前に解析・評価することが重要である。今後も効率的な製品開発に必要な解析・評価技術を構築し、設計・製造プロセスの改善に貢献できるよう努めていきたい。

■参考文献

- (1) 滝澤明広, 森佑介, 大竹美佳:「エポキシモールド機器の最適設計に向けた硬化ひずみ解析」, 東光高岳技報, No.1 (2014)
- (2) 森佑介, 滝澤明広, 吉谷彰倫:「エポキシモールド機器における硬化条件の最適化」, 東光高岳技報, No.2 (2015)
- (3) 滝澤明広, 森佑介:「エポキシモールド機器の最適設計に向けた応力緩和解析」, 東光高岳技報, No.3 (2016)
- (4) 森佑介, 滝澤明広:「エポキシモールド機器の構造最適設計に向けた機械的強度の評価方法」, 東光高岳技報, No.4 (2017)
- (5) 滝澤明広, 森佑介:「エポキシモールド機器の最適設計に向けた残留応力解析の検証」, 東光高岳技報, No.5 (2018)
- (6) 森佑介, 滝澤明広:「エポキシモールド機器の構造および成形プロセスの最適化に向けた解析評価技術」, 東光高岳技報, No.6 (2019)
- (7) 株式会社メカニカルデザイン:「粘弾性解析における諸問題(その1 Maxwellモデルの基本的な性質)」, Mech D&A News, vol.2005-2 (2005)
- (8) 株式会社メカニカルデザイン:「粘弾性解析における諸問題(その3 一般化Maxwellモデルの同定)」, Mech D&A News, vol.2005-4 (2005)
- (9) W. Weibull:「A Statistical Distribution Function of Wide Applicability」J. Appl. Mech., Vol.18 (1951)
- (10) 坂田勝:「ぜい性材料の破壊の統計的扱い」, 精機学会誌, Vol.39, No.11 (1973)

■語句説明

注1) 粘弾性特性: 力を加えると瞬時に変形する弾性体としての性質と時間をかけて変形する粘性体としての性質を合わせた特性

注2) 動的粘弾性測定: 試料に正弦波を与えた際の応答の遅れを測定するもの

森 佑介

技術開発本部技術研究所解析・試験技術グループ所属

滝澤 明広

技術開発本部技術研究所解析・試験技術グループ所属

シールド付連続円板巻線の油浸要素モデルによる雷インパルス絶縁特性

■ 吉村 智萌

Tomoaki Yoshimura

■ 酒井 崇行

Takayuki Sakai

■ 尾崎 卓也

Takuya Ozaki

前報⁽¹⁾では、油入変圧器巻線における主要構成要素であるターン間およびセクション間の絶縁特性について、一般的な連続円板巻線を対象に電界を用いた評価を報告した。今回は耐サージ性を高めたシールド付連続円板巻線を対象に評価を実施した。この巻線は、連続円板巻線にシールド用の電線をいっしょに巻き込んだ構造である。この巻線の絶縁特性を評価するためには、要素モデル試験やシミュレーションなどによって、電位分布の把握および電界評価が必要である。そこでまず、電位分布解析を実施して巻線内の電位分布を把握した。そして、そこで得られた電位分布にもとづき要素モデル試験を実施し、絶縁特性の電界評価を実施した。その結果、放電特性は主電線とシールド用の電線間および主電線とプレスボードスペーサ間に形成されるくさび状ギャップ^{注1)}の電界に着目することで評価ができることを確認した。

1 はじめに

前報⁽¹⁾では、油入変圧器巻線における主要構成要素であるターン間およびセクション間の絶縁特性について、一般的な連続円板巻線を対象に電界を用いた評価を報告した。

今回は耐サージ性を高めたシールド付連続円板巻線（以下、シールド巻線）を対象に評価を実施した。この巻線はシールド用の電線（以下、シールド電線）を挿入することで巻線内の直列静電容量を大きくし、その効果で巻線内に侵入したサージの振動を抑制し、耐サージ性を高めている。この巻線の絶縁特性を評価するためには挿入したシールド電線を加味した絶縁特性を評価する必要がある。そこでまず、電位分布の解析に必要な等価回路および回路定数の算定方法を検討し、電位分布解析の精緻化を図った。そして、そこで得られた電位分布にもとづいた要素モデルにて雷インパルス試験を実施し、絶縁特性の電界評価を実施した。本稿ではこの一連の検証について報告する。

2 電位分布

通常運転時の変圧器巻線において、印加端から終端まで均一に電圧分担されている。そこに雷サージのような急峻な高電圧が侵入すると、印加初期は巻線の印加側で電圧分担が大きくなり、振動しながら減衰し、通常運転時の均一な電圧分担に戻る。

電位振動を抑制するためには、巻線内の静電容量を大きくすることが有効である。電位振動が特に大きくなる印加側を部分的に改善できるコンデンサ・カップリング・シールド⁽²⁾と呼ばれるシールド巻線方式がある。今回検討したシールド巻線は、この巻線方式をさらに簡素化し、2セクションごとにシールド電線を挿入する巻線方式とした。図1にシールド巻線の断面図を示す。図1中の○印が主電線で、□印がシールド電線である。

径方向に巻回した電線のブロックをセクションと呼び、これを上下に重ねたときの電線間がセクション間である。図1のように主電線間にシールド電線を挿入することで主電線とシールド電線の静電容量が加わり、巻線内の静電容量を大きくでき、振動抑制効果を得ている。

この巻線の絶縁特性を評価するためには、主電線およびシールド電線に発生する電位を把握する必要がある。一般的に電位分布の解析モデルは2セクションを1ブロックとすることで要素数を抑えている⁽³⁾。この方法では各電線の電位が得られず、シールド電線の電位を把握することができない。そこで、各電線を解析するために、回路定数の算定方法、等価回路を検討し、電位分布解析にてシールド電線の電位を把握する。

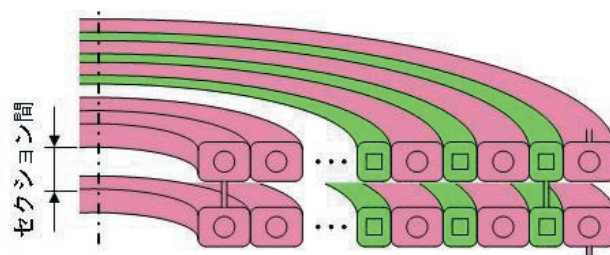


図1 シールド巻線断面

2.1 回路定数の妥当性評価

回路定数の妥当性は、設計寸法から理論計算にて算出した計算値と、巻線インピーダンスの周波数特性を用いた実測値を比較することで評価した。なお、高周波領域（数 MHz 以上）での抵抗成分は、インダクタンス成分に比べてごくわずかなため無視した。

計算値と実測値を比較した結果を表1に示す。L はインダクタンス、Cp は巻線と対地間の並列静電容量、Cs は巻線内の直列静電容量（径方向および軸方向の各電線間の直列静電容量の合成静電容量）である。表1より各回路定数の計算値に対する実測値の差は10%以下であり、回路定数の算出方法の妥当性を確認した。

表 1 回路定数の計算値と実測値の比較

	L	Cp	Cs
計算値／実測値の比率	104%	91%	90%

2.2 等価回路の妥当性評価

等価回路の妥当性は、電位振動の解析波形と実測波形を比較することで評価した。解析波形は、2.1 節で検討した回路定数と今回検討した等価回路を用いて電位振動解析した波形である。実測波形は、実規模のシールド巻線を用いて測定した波形である。

(1) 検証に使用した実規模シールド巻線

図 2 に検証に使用した実規模シールド巻線を示す。実規模シールド巻線の構成は、検証対象の実規模シールド巻線と内径側に金属製シリンドラを配置し、内径側巻線との静電容量を模擬した。図 2 中の巻線上部口出し線に標準雷インパルス波形 (1.2/50 μ s) を印加する構造とし、金属製シリンドラおよび巻線下部口出し線を接地する構造とした。

(2) 等価回路

図 3 に図 2 の実規模シールド巻線の印加端 2 セクション分の等価回路を示す。この 2 セクション分を積み重ねて巻線全体の等価回路を構成した。図 3 より、隣り合った電線は静電容量で結合し、巻回している電線は自己インダクタンスで結合した。シールド巻線と金属製シリンドラ、シールド巻線と対地は静電容量で結合し

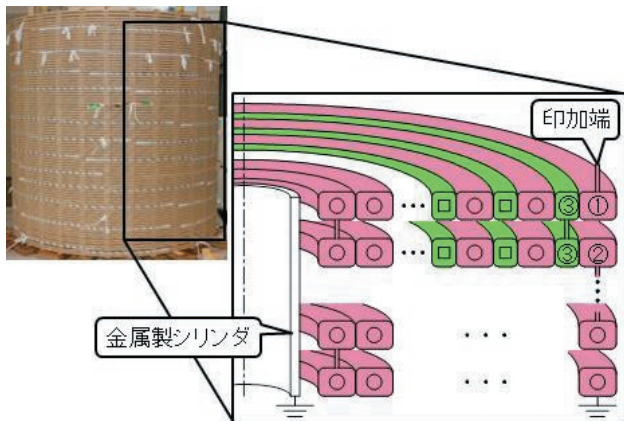


図 2 実規模シールド巻線

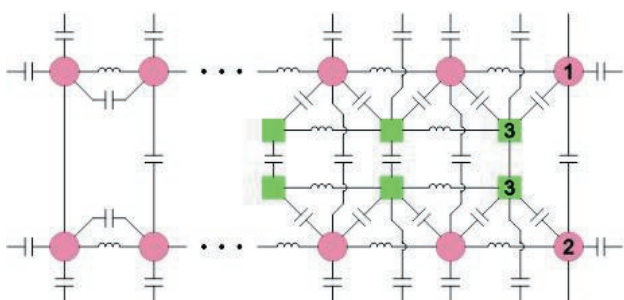
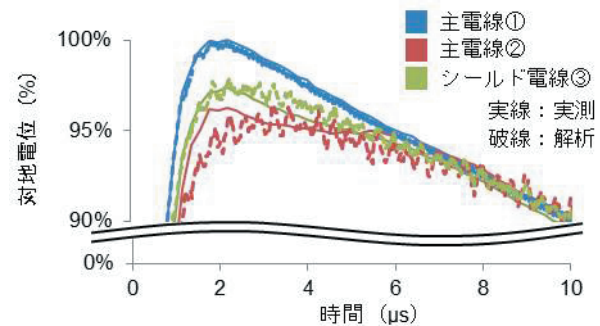


図 3 シールド巻線の等価回路

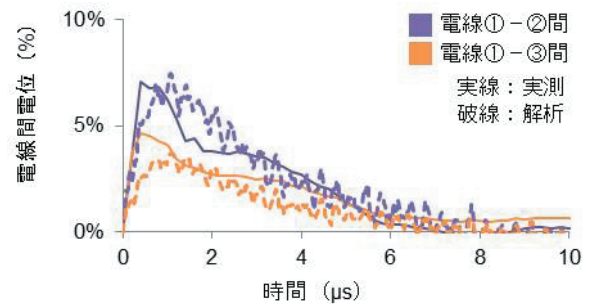
た。図 3 中の電線①～③は、図 2 中の電線①～③と同一位置を示す。

(3) 電位振動波形

図 2 を用いた実測および図 3 を用いた解析による、各電線の対地間、各電線間の電位振動波形を図 4 に示す。印加電圧の最大値を 100% として規格化した値で示す。実線が実測結果で、破線が解析結果である。図 4 より、波形の立ち上がり、ピークの位置、波形の立ち下りの形状がおおむね一致したものの、解析波形に短い周期の振動が重畳した。これは等価回路に抵抗がないことで振動が際立ったものと考えられる。またピーク値については、いずれの波形においても 1% 以内の差で一致しており、この程度の差であれば実用上問題ないと考えられる。よって、今回検討した等価回路の妥当性を確認した。



(a) 対地間電位



(b) 電線間

図 4 電位振動波形

2.3 シールド電線の電位

図 4 の実測と解析の電位振動波形の 1 μ s における値を初期電位分布とし、図 5 に示す。図 5 よりシールド

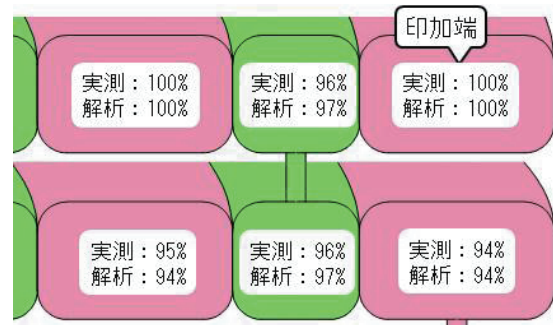


図 5 初期電位分布

電線の電位は隣接する主電線との電位差が約3%で、主電線のセクション間が約6%であった。よって、主電線のセクション間の電位差を100%とするとシールド電線の電位は約50%であることがわかった。

3 要素モデル試験

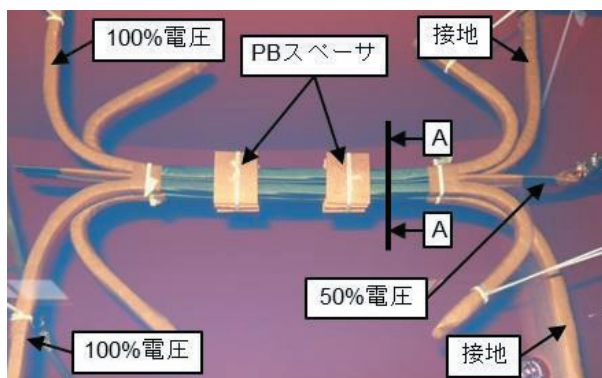
2.3節で得られたシールド電線の電位を印加できる要素モデルを検討し、要素モデル試験にて絶縁特性を取得する。

3.1 シールド巻線の要素モデル

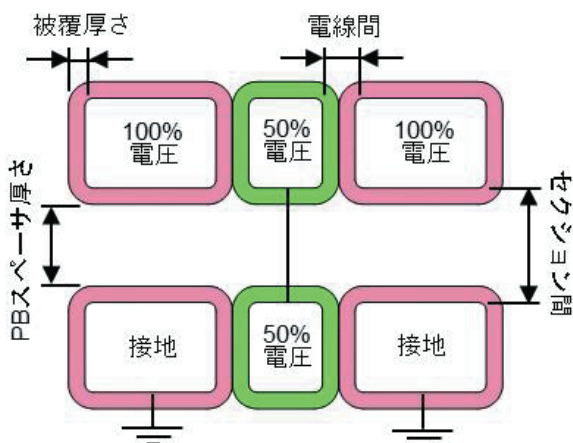
シールド巻線を模擬した要素モデル（以下、要素モデル）を図6(a)に示し、この要素モデルの断面図を図6(b)に示す。上側の主電線に100%の電圧（以下、100%電圧）、下側の主電線を接地とし、シールド電線には50%の電圧（以下、50%電圧）を印加できるモデルとした。上下の電線間にはプレスボードスペーサ（以下、PBスペーサ）を挟み固定した。パラメータは被覆の厚さとした。

3.2 試験方法

試験回路を図7に示す。雷インパルス発生器を用い



(a) 要素モデル外観



(b) 要素モデル断面 (A-A 断面)

図6 シールド巻線を模擬した要素モデル

て、負極性雷インパルス波形 ($-1.2/50\mu\text{s}$) にて試験を実施した。試験は、想定した絶縁破壊電圧の50%から5kVステップで電圧印加し、部分放電開始電圧 (PDIV)、絶縁破壊電圧 (BDV) を測定した。部分放電は、接地線に流れる印加時の充電電流を打ち消して測定する差動検出法⁽³⁾にて測定した。絶縁油は鉱油を使用し、試験前に浄油し真空注油した。

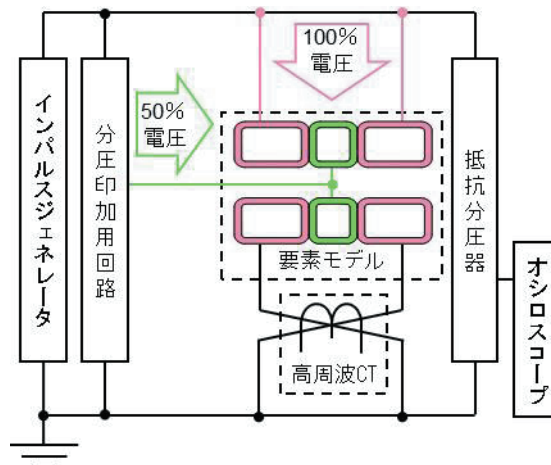


図7 試験回路

3.3 要素モデル試験結果

要素モデルの試験結果を図8に示す。前報のセクション間モデルにおいて、BDVとPDIVが同等であることが確認されている。今回実施した試験の結果、要素モデルのBDVは前報のセクション間モデルのBDVとよく一致したものの、要素モデルのBDVの約60%でPDIVが測定された。要素モデルのPDIVの傾きは、前報のターン間モデルPDIV、セクション間モデルBDVと一致した。これらのことから、部分放電は主電線とシールド電線間および主電線とPBスペーサ間のくさび状の油ギャップで発生し、セクション間の油が橋絡する電界に至ることで絶縁破壊すると考える。

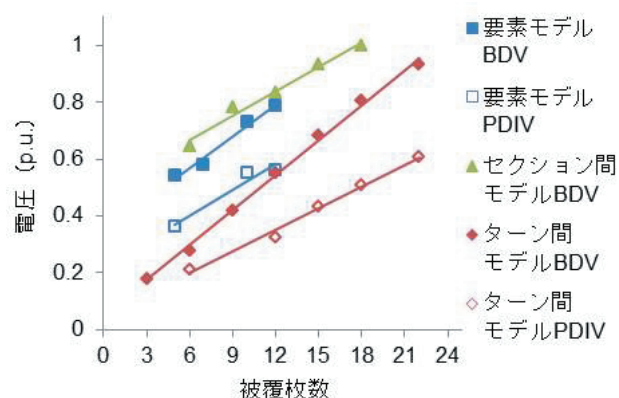


図8 試験結果

4 電界解析評価

4.1 要素モデルの電界解析

前報にて、ターン間、セクション間の絶縁特性は、形成されたくさび状ギャップの最弱点部となる角度での電界で評価できることがわかっている⁽¹⁾。最弱点部の角度はくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点である。今回もこの部分に着目して、電界にて評価を実施する。

図9に電界解析結果の一例を示す。主電線の印加条件は試験で得られた PDIV および BDV とし、シールド電線の印加条件はその 50% 値とした。

主電線とシールド電線の間に形成されるくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点が点 A および点 B である。主電線またはシールド電線と PB スペースの間に形成されるくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点が点 C および点 D である。

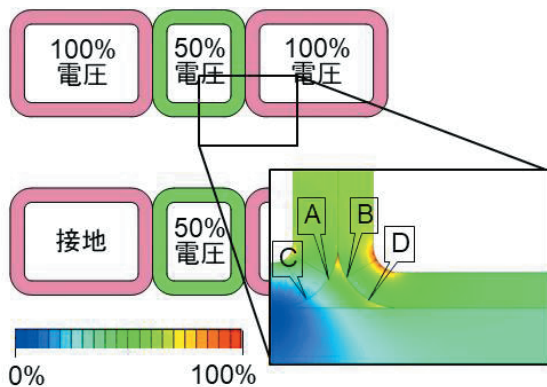


図9 電界解析結果

4.2 電界解析での評価結果

表2に各被覆枚数における各部位の電界を示す。表2の各電界値は、前報のターン間 PDIV 時の電界値で規格化した値である。

前報のターン間モデルの PDIV 時の電界と今回の要素モデルの PDIV 時の電界を比較すると点 B および点 D において同程度であった。このことから部分放電は、主電線とシールド電線間および PB スペースと主電線間のくさび状ギャップで発生し、前報同様にくさび状ギャップの電界で評価できると考える。

前報で、セクション間 BDV 時の電界値およびターン間 PDIV 時の電界値が被覆枚数によらずほぼ同じ値であることが確認されている。しかし、今回の要素モデルの BDV 時の電界は、被覆枚数が増加するにつれ低下する傾向が得られ、前報のターン間 BDV 時の電界と似た傾向であった。また、図8の試験結果においてもターン間モデル BDV と要素モデル BDV の傾きが一致しており、この傾向は被覆の破壊強度が影響したものと考えられる。

表2 各電界解析結果

	被覆枚数	電界の評価点			
		点 A	点 B	点 C	点 D
PDIV 時電界	5 枚	1.04	1.18	0.45	0.99
	10 枚	0.84	1.01	0.30	0.98
	12 枚	0.70	0.87	0.24	0.88
BDV 時電界	5 枚	1.55	1.75	0.67	1.47
	10 枚	1.11	1.34	0.40	1.30
	12 枚	0.98	1.22	0.34	1.23

単位：p.u.

5 おわりに

今回、電位振動解析の結果および、要素モデル試験の結果を用いて、シールド巻線の雷インパルス絶縁特性を評価した。その結果、部分放電特性は主電線とシールド電線間および主電線と PB スペース間のくさび状ギャップの電界で評価することができることがわかった。

今回の検討によって、電界解析を用いてシールド巻線の雷インパルス絶縁特性を評価することができた。引き続き、より信頼性の高い製品開発に繋げていきたい。

参考文献

- (1) 酒井崇行, 吉村智萌, 岩井良:「変圧器巻線の油浸要素モデルによる雷インパルス絶縁特性の評価方法の検討」, 東光高岳技報 No.6 (2019)
- (2) 森山昌和:「大容量変圧器における最近の諸問題」, 日立評論 1968 年 2 月号 (1968 年)
- (3) 電気学会:「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」, 電気学会技術報告, 第 1218 号 (2011)

語句説明

注 1) くさび状ギャップ: 本稿では、電線と電線または電線と絶縁物間に形成される V 字または三角形の形状をした微小ギャップのこと。その部分では、一般的に放電しやすいとされている。

吉村 智萌

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属

酒井 崇行

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属

尾崎 卓也

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属

2019 年度 VPP 実証への取り組み (DR shifTer の改良)

■ 細谷 雅樹

Masaki Hosoya

■ 中山 匡

Tadashi Nakayma

■ 田中 晃司

Koji Tanaka

東光高岳では 2017 年度に東京電力ホールディングス（株）および東京電力エナジーパートナー（株）（以下、東電 EP）が考案した手法を利用して、蓄電池などのリソースをメーカや機種に依存せず、遠隔・統合制御する機器、DR 制御装置（DR shifTer）を開発した。東光高岳は DR shifTer を用い、2017 年度、2018 年度の VPP 実証試験に東電 EP とともに参加してきた。VPP 実証試験は 2021 年度以降に開始する需給調整市場に向けて技術実証、制度的課題の洗い出しを行っている。2019 年度でも技術実証の課題が設けられ、課題に対応するため DR shifTer の改良を実施した。本稿では 2019 年度 VPP 実証試験の内容と実証試験に向けた DR shifTer の改良内容、および、VPP 実証試験での成果を説明する。

1 はじめに

近年、太陽光発電や蓄電池、電気自動車など、需要家側に導入される分散化された小規模エネルギーリソースの普及が進んできた。需要家が有するエネルギーリソースのひとつひとつを束ね、遠隔・統合制御すること（デマンドレスポンス（DR））で、電力の需給バランスを調整する仕組みを「仮想発電所：バーチャルパワープラント（VPP）」とよぶ。

各需要家が持つリソースの中でも、蓄電池は充放電ができ、気候に左右されることもないため、VPP での調整力としての期待が大きい。しかし、既存の蓄電池システムを遠隔からの DR に対応させるためには、メーカや機種ごとに異なる改造が必要となり、多くの費用と労力を必要とする。

そこで、東京電力ホールディングス（株）および東京電力エナジーパートナー（株）（以下、東電 EP）では、蓄電池などのリソースをメーカや機種に依存せず、遠隔から DR 制御をする手法を考案した。東光高岳ではこの技術を実現するための機器、DR 制御装置（DR shifTer）を 2017 年度に開発した。その DR shifTer を用い、2017 年度、2018 年度の VPP 実証試験^{注1)}に東電 EP とともに参加してきた。

VPP 実証試験は VPP 構築に向けた技術実証、制度的課題の洗い出しを行っており、2019 年度も実施された。本稿ではこの 2019 年度 VPP 実証試験の内容を説明し、試験課題を達成するために改良した DR shifTer の改良点と DR shifTer を使用した VPP 実証試験の結果について述べる。

2 2019 年度 VPP 実証について

2.1 VPP 実証試験メニュー

表 1、表 2 に 2018 年度と 2019 年度の VPP 実証メ

ニューを比較したものを示す。2019 年度は 2018 年度と同様に三次調整力①と三次調整力②に参加した。両メニューにおいて、2018 年度との違いは次のとおりである。（黄色の個所が変更箇所）

- ・1 分単位での指令値変更が必要
- ・DR の持続時間が 3 時間
- ・ベースライン^{注2)}の計算は独自方式でも可
- ・成功判定基準の変更

上記のうち、指令値変更および DR の持続時間について、DR shifTer の改良が必要となった。なお、ベースラインの計算は 2018 年度までは DR shifTer にて計算をしていたが、2019 年度はリソースアグリゲータ（RA）^{注3)}が計算をしている。また、成功判定基準については次節にて説明する。

表 1 VPP 実証試験メニュー 三次調整力①

項目	2018 年度	2019 年度
指令値変更	あり（15 分単位）	あり（1 分単位）
応動時間	15 分	15 分
持続時間	1 時間（東電 EP 担当分）	3 時間
ベースライン	High 4 of 5（当日調整あり）または事前計測	アグリゲータが独自に計算
成功判定基準	DR の制御目標値に対して制御指示量の ± 10% 以内	DR の制御目標値に対して入札量の ± 10% 以内

表 2 VPP 実証試験メニュー 三次調整力②

項目	2018 年度	2019 年度
指令値変更	あり（30 分単位）	あり（30 分単位）
応動時間	45 分	45 分
持続時間	1 時間（東電 EP 担当分）	3 時間
ベースライン	High 4 of 5（当日調整あり）または事前計測	アグリゲータが独自に計算
成功判定基準	DR の制御目標値に対して制御指示量の ± 10% 以内	DR の制御目標値に対して入札量の ± 10% 以内

2.2 成功判定基準

VPP 実証試験の評価には滞在率を使用する。滞在率

は成功判定基準 (DR の制御目標値に対して入札量の $\pm 10\%$ 以内) による成功回数をもとに, 以下の式で求められる。

$$\text{滞在率}[\%] = \text{成功回数} / \text{DR 実施コマ}^{\text{注4)}} \text{の数} \times 100$$

成功判定基準について, 図 1, 図 2 にて説明する。2018 年度では制御指示量の $\pm 10\%$ 以内に実績値を収めることで制御成功と判断していた。しかし, 2019 年度では, 制御目標値に対し, 入札量の $\pm 10\%$ 以内に実績値を収めることで制御成功と判断するように変更された。

三次調整力①と三次調整力②の制御成功の判定条件を

以下に示す。

- ・成功判定は受電電力 (kW) の 1 分平均値 (三次調整力②の場合は 30 分平均値) が制御目標値に対して入札量の $\pm 10\%$ 以内に収まっていれば可とする。
- ・制御対象時間内に変更指示があった場合は, 変更指示された時間から, 実際に指令値変更する時間までは, 1 分平均値 (三次調整力②の場合は 30 分平均値) の受電電力 (kW) が現在および指令値変更後の制御目標値に対して入札量の $\pm 10\%$ を含めた上下範囲に収まっていれば可とする。

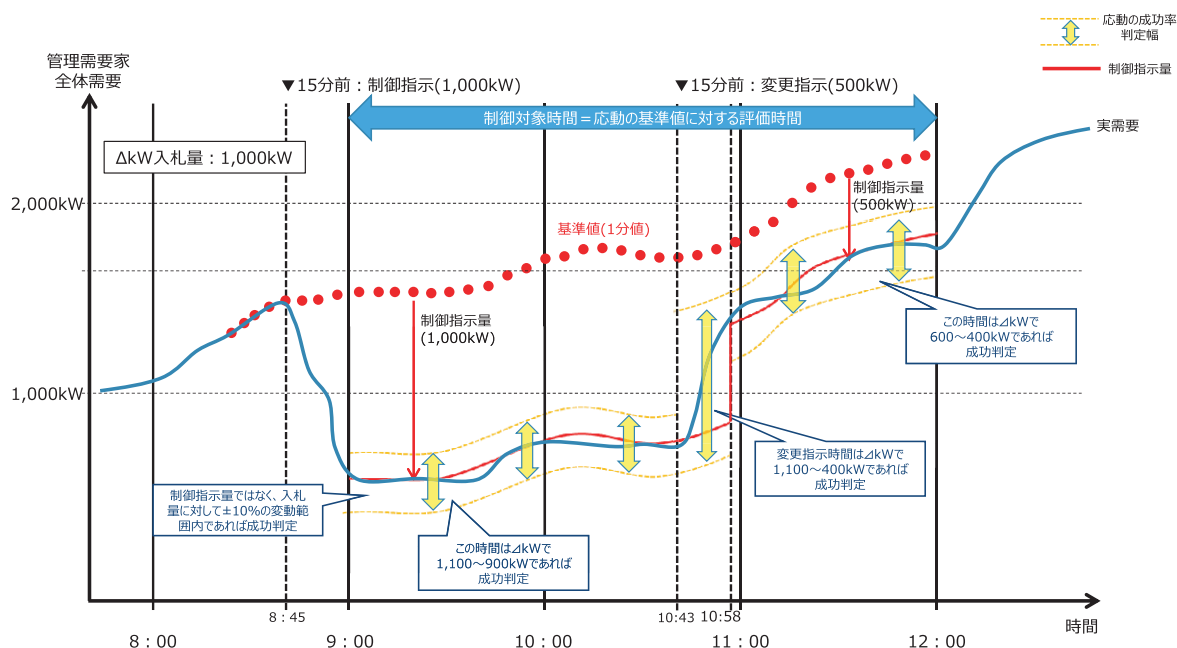


図 1 成功判定基準 (三次調整力①) (出典: SII 公開データ)

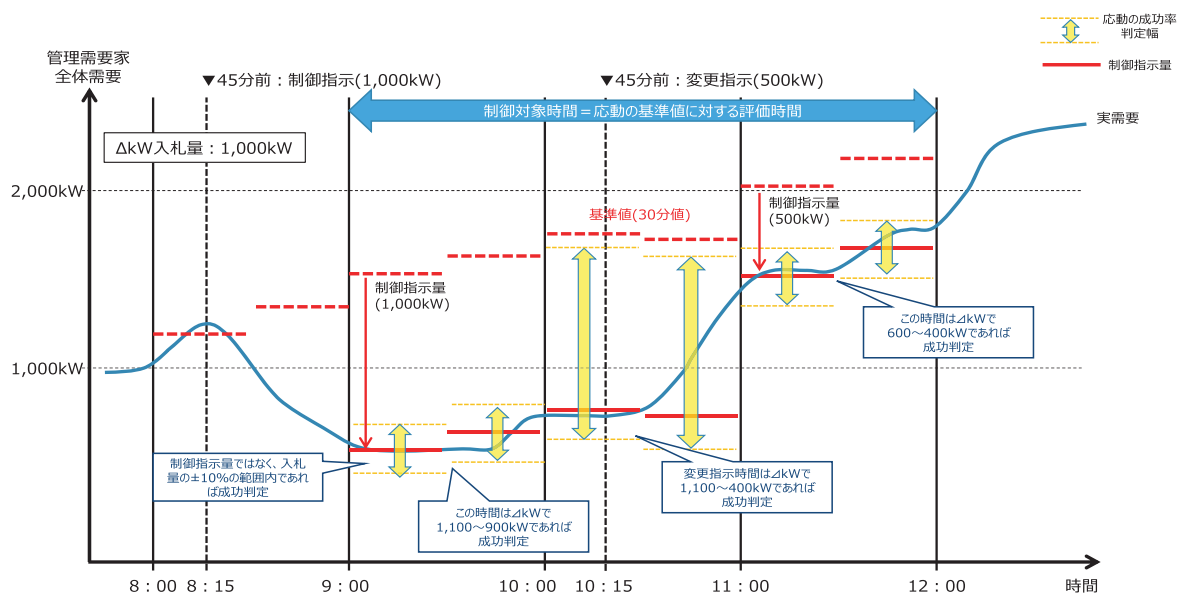


図 2 成功判定基準 (三次調整力②) (出典: SII 公開データ)

※ (一社) 環境共創イニシアチブ 平成 31 年度 VPP 事業共通実証仕様書 Ver.1.0 より引用

3 DR shifTer の改良内容

3.1 指令値変更処理の改良

2018 年度までの VPP 実証試験における指令値変更は固定の枠組み (15 分間, 時計 0 分起点) で実施していた。

しかし, 2019 年度の VPP 実証試験では固定の枠組みではなく, DR 期間中であれば, 1 分単位で変更することができるようにしなければならない。

DR shifTer は指令値変更指令を RA から OpenADR^{注5)} 通信で受信する。OpenADR による指令値の通知方式および指令を受信したときの DR shifTer の処理を改良した。

3.2 DR の持続時間処理の改良

2018 年度までの DR の持続時間は 1 時間固定であった。2019 年度は DR の持続時間が 3 時間となったことから, DR の持続時間が 30 分～3 時間の間であれば実施できるように機能の改良を行った。

4 VPP 実証試験の結果

4.1 VPP 実証試験概要

東電 EP は, 2019 年 12 月 3 日～2020 年 1 月 28 日に実施された VPP 実証試験へ参加した。VPP 実証試験のシステム構成を図 3 に示す。DR shifTer が設置されている 5 個所の需要家の電源リソースを制御し実証を行った。また, VPP 実証試験のメニューを表 3 に示す。DR shifTer が参加する VPP 実証試験メニューは三次調

整力①と②の 2 種類ある。

表 3 2019 年度 VPP 実証試験メニュー

項目	三次調整力①相当 (下げ DR)	三次調整力② (下げ DR)
指令値変更	あり (1 分単位)	あり (30 分単位)
反応時間	15 分	45 分
持続時間	3 時間	
ベースライン	アグリゲータが独自に計算	
実施日	・2019 年 12 月 3 日, 12 月 10 日 ・2020 年 1 月 15 日, 1 月 21 日	・2019 年 12 月 17 日, 12 月 24 日 ・2020 年 1 月 23 日, 1 月 28 日
成功判定基準	DR の制御目標値に対して入札値の ± 10% 以内 ※詳細は図 1, 図 2 参照のこと。	

4.2 VPP 実証試験結果

2019 年度の VPP 実証試験の結果について, 以下の確認を行った。

- ・指令値変更に対する応答性能の結果
- ・滞在率の結果

2020 年 1 月 15 日に実施された三次調整力①の DR shifTer の制御結果 (制御した需要家全体をまとめたもの) を図 4 に示す。

図 4 には需要家の受電電力, 制御目標値を表示している。また, 制御目標値をもとに目標上下限値を示している。この目標上下限値の間に受電電力がどのくらい入っているかが滞在率になる。

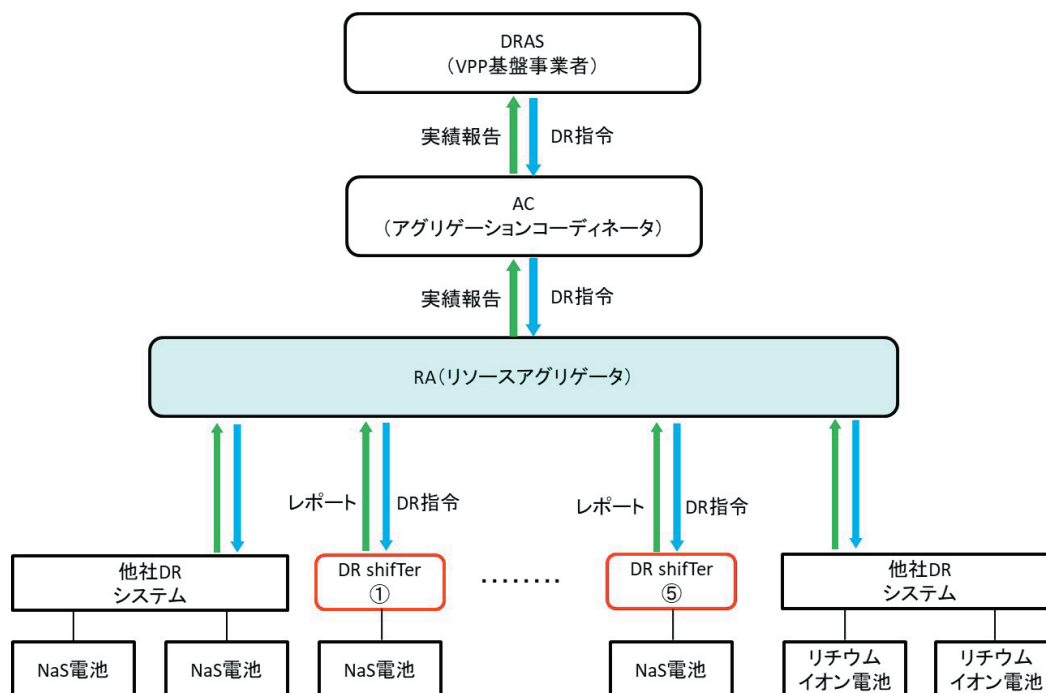


図 3 VPP 実証試験 システム構成

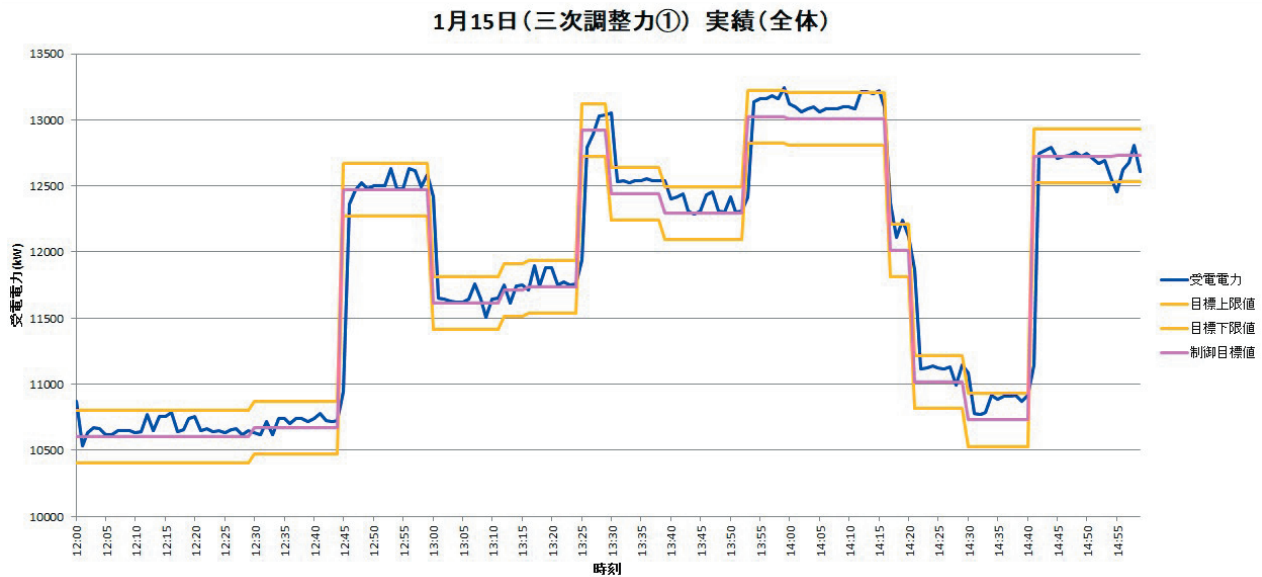


図 4 DR shifTer 実証試験の結果一例 (三次調整力①)

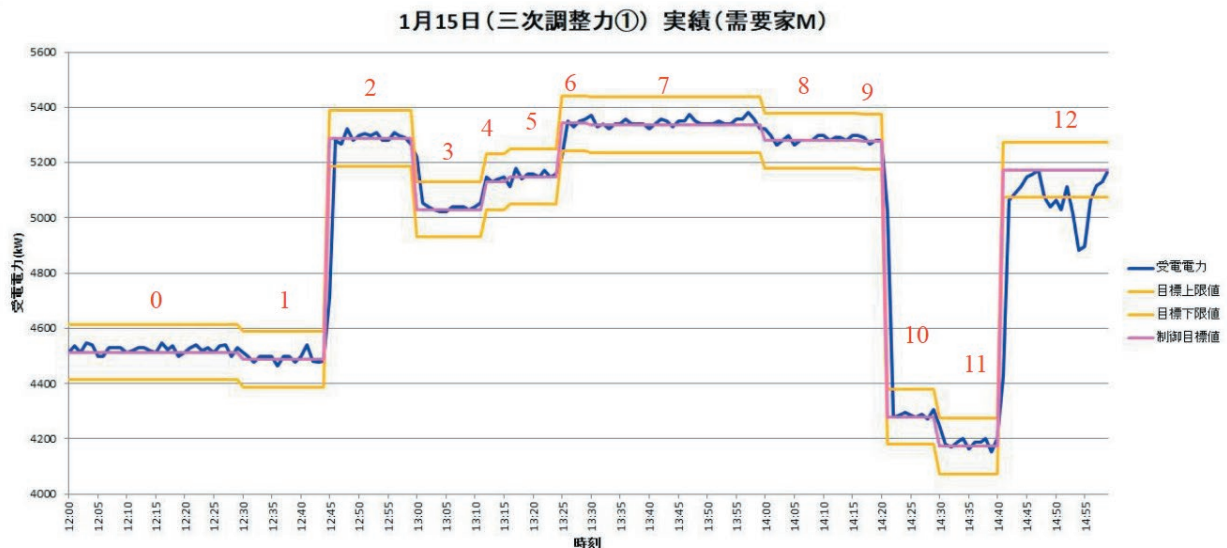


図 5 需要家 M での指令値変更実績

なお、滞在率の計算についてはアグリゲーションコンディネータ (AC)^{注6)}からの指令以外で、RA 独自の制御量調整の指令値変更がある。

DR shifTer としては、実績値が RA から通知される制御目標値に対して入札量 $\pm 10\%$ 以内に収まる場合を成功と定義し、滞在率を求めた。

(1) 指令値変更に対する応答性能の結果

VPP 実証試験の結果から 2019 年度 DR shifTer へ機能追加した 1 分単位での指令値変更について応答性能を確認した。ここでは、例として 2020 年 1 月 15 日の需要家 M を挙げる。この日、需要家 M では 7 回の指令値変更が行われ、最終的に指令は 13 個に分割されている。RA から DR shifTer が受信したイベント情報を表

4 にまとめた。(黄色の箇所が指令値変更箇所)

この日の需要家 M の実績を図 5 に示す。表 4 の指令値の番号を図 5 の該当する時間帯に当てはめてみると、DR shifTer は指令どおりに制御を行い、多くの時間で受電電力が入札量の $\pm 10\%$ 以内に収まることが確認できる。このように、VPP 実証試験において、指令値変更に対する制御の応答性能は良好であることが確認できた。

(2) 滞在率の結果

次に滞在率について確認をした。図 4 の実績値を確認すると、2019 年度の改良点である 1 分単位の指令値変更を実施しても、滞在率が約 91% であった。

2019 年度の実証試験では、AC 全体の滞在率が約 80% であったことから、DR shifTer は、十分な性能を

有しているといえる。

表 4 指令値変更状況

No.	DR 制御目標値	DR 期間	指令値開始	指令値終了
0	4514.4	30 分間	12:00	12:29
1	4488	15 分間	12:30	12:44
2	5288	15 分間	12:45	12:59
3	5030	11 分間	13:00	13:10
4	5130	5 分間	13:11	13:15
5	5149	9 分間	13:16	13:24
6	5342	5 分間	13:25	13:29
7	5336	30 分間	13:30	13:59
8	5280	16 分間	14:00	14:15
9	5276	5 分間	14:16	14:20
10	4280	9 分間	14:21	14:29
11	4174	11 分間	14:30	14:40
12	5174	19 分間	14:41	14:59

5 今後の課題

2019 年度実証試験を実施した結果、自然 DR^{注7)} が多く発生していた。今回の VPP 実証試験では、自然 DR になるパターンに同一の DR 実施コマ内で受電電力の変動が大きい場合、DR 実施時間帯で当日調整^{注8)} 以上の受電電力の変動がある場合であることがわかった。

これらが発生する理由の一つとしてベースラインの計算が現状 30 分ごとになっていることが考えられる。同一 30 分の DR 実施コマ内に受電電力の変動が大きい時間帯（昼休憩や工場の稼働停止時間）があると、自然 DR が発生するリスクが高くなる。対策として、30 分より短い時間でのベースラインの算出や、時間帯により当日調整のある計算方法と当日調整のない計算方法を使いわけなどの工夫が必要であると考えられる。

6 まとめ

蓄電池などのリソースを DR 制御する DR shifTer を 2019 年度の VPP 実証試験に適用するために改良を行っ

た。

各改良事項の動作検証を完了し、2019 年度の VPP 実証試験でも一定の成果を収めた。特に DR shifTer が 1 分単位での指令値変更にも対応できることが確認できた。今後は、2021 年の市場化へ向け、さらなる精度向上を目指す所存である。

■ 語句説明

注 1) VPP 実証試験：「需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラント構築実証事業」において、工場や家庭などが有するエネルギーリソースを VPP として機能させることで、電力の需給調整に活用する実証を行うことを目的とする実証試験。

注 2) ベースライン：DR の要請がなかった場合に想定される電力需要量。

注 3) リソースアグリゲータ (RA)：需要家と VPP サービス契約を直接締結してリソース制御を行う事業者。

注 4) DR 実施コマ：DR を実施している期間を三次調整力①は 1 分ごと、三次調整力②では 30 分ごとに区切った区間。

注 5) OpenADR：電気の需要と供給のバランスをとるために、システム間の通信により、RA が自動的に需要家側のエネルギー機器を制御する自動 DR (ADR：Automated Demand Response) のためのプロトコル。

注 6) アグリゲーションコーディネータ (AC)：RA が制御した電力量を束ね、一般送配電業者や小売電気事業者と直接電力取引を行う事業者。

注 7) 自然 DR：DR の制御目標値より、需要家の受電電力が少なく、節電制御ができない状態。

注 8) 当日調整：ベースラインを計算する際に、使用される値。DR 開始時刻の 4～1 時間前の電力量の平均値などを当日補正值としてベースラインに加算する。

細谷 雅樹

技術開発本部 技術研究所 ICT 技術グループ 所属

中山 匡

技術開発本部 技術研究所 ICT 技術グループ 所属

田中 晃司

東京電力エナジーパートナー株式会社
販売本部 法人営業部 所属

次世代ナノ結晶軟磁性材料の 変圧器鉄心への適用

■ 出井 和弘
Kazuhiro Idei

■ 栗原 二三夫
Fumio Kurihara

■ 須永 善則
Yoshinori Sunaga

次世代ナノ結晶軟磁性材料ナノメット (NANOMET[®] 以下、ナノメット) は、優れた軟磁気特性を有する磁性材料である。ナノメットは、材料レベルでは飽和磁束密度が高いため、変圧器に適用した場合、超高効率変圧器鉄心に使用される Fe 基アモルファス合金に対して鉄心断面積を小さくすることが可能であり変圧器全体としてコンパクト化が図れるといった特長を持つ。さらに無負荷損が低いため、高効率変圧器に使用される方向性電磁鋼板と比較して変圧器の低損失化が図れるといった優位性が挙げられる。一方その優れた軟磁気特性を発現させるためには、ナノレベルの金属組織の微結晶化が必要であり、そのためには適切な熱処理が必須となる。その熱処理だが、条件によっては軟磁気特性に大きく影響する。

東光高岳では、これまでナノメットについて素材レベルから鉄心形態での検証へスケールアップさせ、プロトタイプ変圧器の鉄心に適用するまでの研究に取り組んでおり、各課題を解決し変圧器適用への可能性を見出してきた。本稿では、研究の概要と 10 kVA プロトタイプ変圧器の試作および評価に取り組み、従来の高効率変圧器と同等以上の軟磁気特性を確認したので報告する。

1 はじめに

世界的規模における地球温暖化対策の必要性が叫ばれて久しいが、近年欧米やアジアを中心に環境保全の取り組みが活性化してきている。

これまで国内においては、一般産業用変圧器に関しては 2006 年に油入変圧器、2007 年にはモールド変圧器にトップランナー制度が導入され、さらに 2014 年に第 2 次トップランナー制度の新基準が導入された。変圧器の高効率化は、常時一定に生じている無負荷損低減のための鉄心の改良や代替が不可欠である。一般社団法人日本電機工業会が定めたトップランナー変圧器 2014 において東光高岳では、さらに改善された方向性電磁鋼板などを採用し、省エネ化による機器外形や質量の増加抑制の実現に至っている。欧州、米国、中国、東南アジアなどにおいても、電力分野の環境対策のため、配電用変圧器高効率化のための規制強化が進められてきている⁽¹⁾。

以上のような背景から、東光高岳では、さらなる変圧器の高効率化の一方策として、次世代ナノ結晶軟磁性材料ナノメット (NANOMET[®]、以下、ナノメット) を適用した変圧器の開発に着手している。これまで我々は、ナノメットの材料レベルの検証からスケールアップさせプロトタイプ変圧器鉄心に適用するまでの一連の検証に取り組む、各ステップにおける課題に対し変圧器適用への可能性を見出してきた。その結果、従来の高効率変圧器と同等以上の磁気特性を確認したので報告する。

2 ナノメットの概要

ナノメットは、「東北発 素材技術先導プロジェクト超

低損失磁心材料技術領域 (文部科学省、復興庁) 2012 年 6 月～2017 年 3 月」の中で、国立大学法人東北大学金属材料研究所によって開発された基本組成 FeSiBPCu から成るナノ結晶軟磁性合金の磁性薄帯である⁽²⁾⁽³⁾。ナノメットは、現在東北大学発ジョイントベンチャーの (株) 東北マグネットインスティテュートが製造しているがまだ上市されていない。ナノメットおよび比較材との軟磁気特性の比較を図 1 に示す⁽²⁾。

ナノメットの特長は、方向性電磁鋼板に匹敵する飽和磁束密度と Fe 基アモルファス合金より高い透磁率 (低い無負荷損) を有していることにあり、この優れた軟磁気特性は素材の高 Fe 濃度が大きく寄与している⁽⁴⁾。一方その優れた軟磁気特性を発現するためには、急冷アモルファス組織からナノレベルの金属組織の結晶化が必要であり、そのためには熱処理が必須となる。その熱処理だが、条件によっては軟磁気特性に大きく寄与する⁽⁵⁾。また熱処理前のナノメットはアモルファス状態であるためハンドリング性に問題はないが、熱処理後のナノメッ

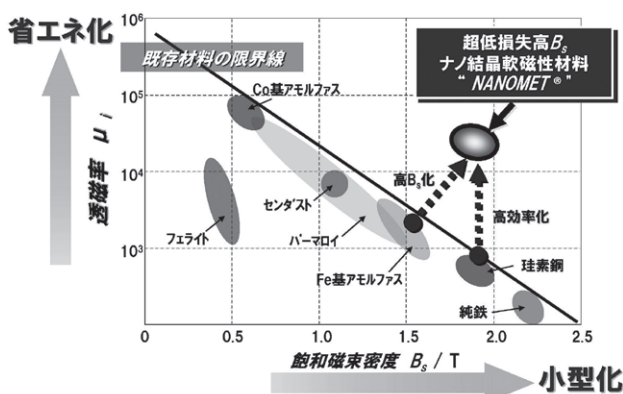


図 1 ナノメットおよび比較材との軟磁気特性の比較⁽²⁾

トは微結晶化に伴い脆化するため、変圧器の製造工程においてはハンドリング性の難易度が高くなる。

3 検討内容

3.1 ナノメット単板試料による検証

(1) ナノメットの基本特性

ナノメットの熱的特性を把握するために DSC (示差走査熱量分析装置) で分析した。その結果を図 2 に示す。

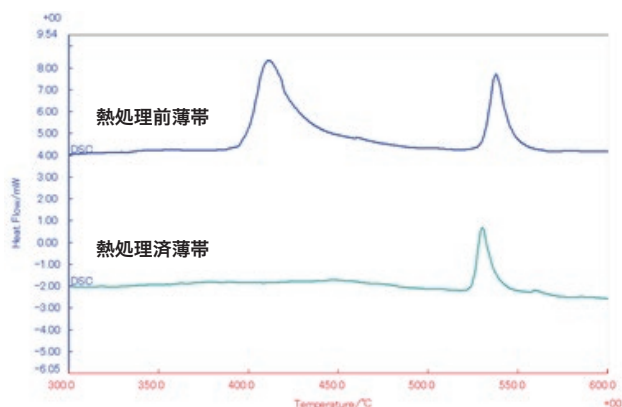


図 2 ナノメットの DSC チャート

熱処理前のナノメットを加熱すると、400°Cを超えた温度域で α -Fe 結晶化に伴う発熱反応が見られた。さらに加熱を進めると 500~550°Cの間で Fe-B 結晶化 (化合物の析出) に伴う発熱反応が現れた。一方一度最適な温度で熱履歴を与えたナノメットに対して、上述と同じように再加熱を施すと α -Fe 結晶化の発熱反応は見られず、Fe-B 結晶化に伴う発熱反応のみが認められた。また結晶構造が変化することで Fe-B 結晶化の発熱ピークは低温側へシフトした。この結果から、ナノメットの最適な熱処理温度範囲が明らかになった。

熱処理後のナノメットの結晶構造を把握するために XRD (X 線回折装置) で分析した。その結果を図 3 に示す。

最適な条件で熱処理したナノメットは、 α -Fe 結晶のみのピークが確認された。また、この結果から求められる結晶子サイズの最適値は 15~25 nm の範囲内であった。これらは、ナノメットの熱処理は限られた条件で実施する必要があることを示している。

(2) ナノメットの軟磁気特性

熱処理炉を用いて大気雰囲気中でナノメットの熱処理を実施し、熱処理後の軟磁気特性を取得した。その結果を図 4、図 5 に示す。

図 4 から磁束密度は 1.80 T 以上であることが確認できた。また図 5 から、ナノメットの無負荷損は鉄基アモルファス合金より若干高いが、方向性電磁鋼板より低いことが確認できた。したがって、ナノメットを変圧器の

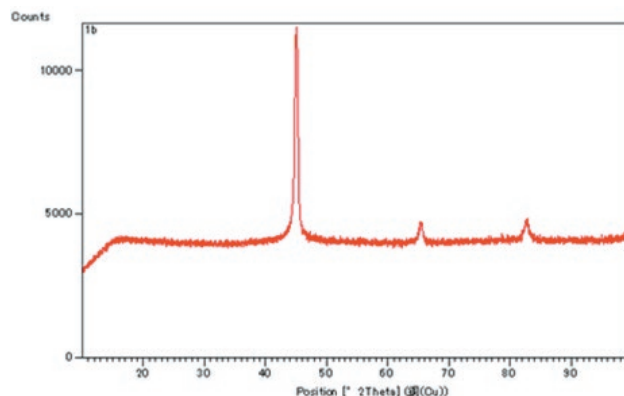


図 3 最適熱処理を施したナノメットの XRD チャート

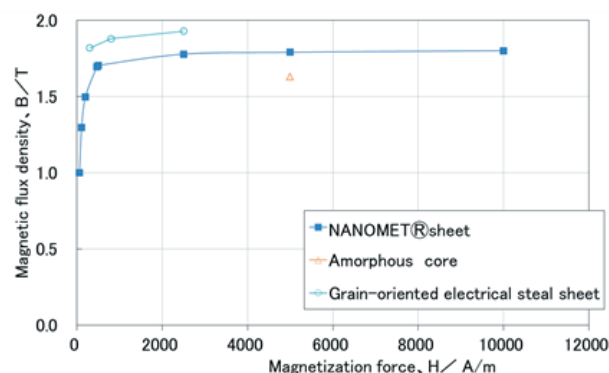


図 4 ナノメット単板試料の軟磁気特性

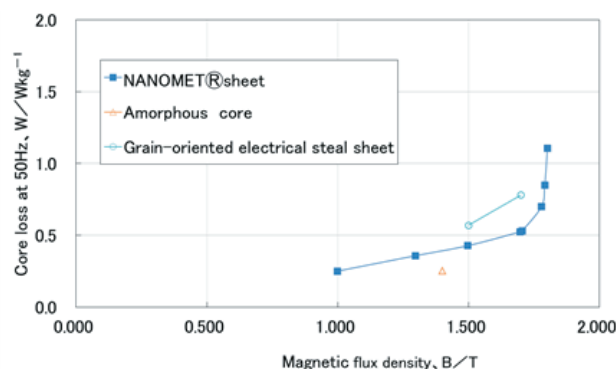


図 5 ナノメット単板試料の軟磁気特性

鉄心に適用した場合、鉄基アモルファス合金と比較して鉄心断面積を小さくすることが可能であり、変圧器全体としてコンパクト化が図れるといった利点が考えられる。さらに無負荷損が低いため、方向性電磁鋼板と比較して変圧器の低損失化が図れるといった優位性が挙げられる。

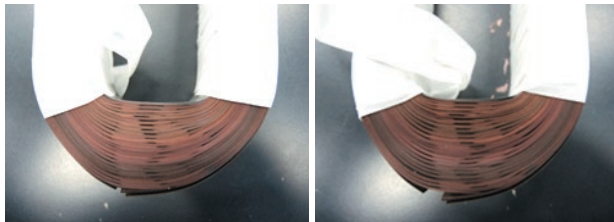
3.2 ナノメット鉄心形態での検証

(1) ナノメット 500 VA 鉄心での検証

現行の変圧器の製造工程には、矩形の鉄心と巻線を個別に製作し、鉄心の 1 辺を開放し巻線を組み込み、開放した 1 辺を再度閉じて鉄心形態に戻す工程がある。これがラップ工程である。ラップ工程ではラップ部で鉄

表 1 ナノメット 500 VA 鉄心の諸元

項 目	仕様
容 量	500 VA
鉄心重量	約 3.5 kg
鉄心寸法	194 mm × 100 mm × 50 mm



(a) ラップ工程前

(b) ラップ工程後

図 6 ナノメット 500 VA 鉄心ラップカット部の状況

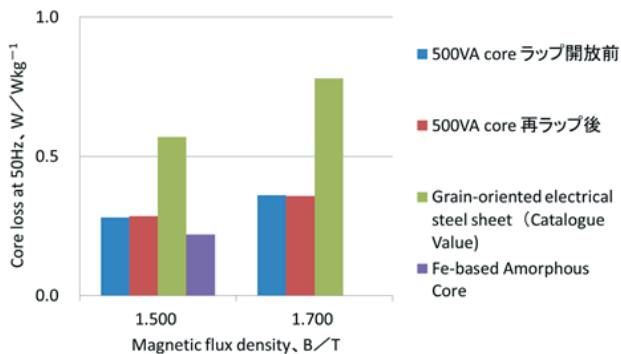


図 7 ナノメット 500 VA 鉄心の軟磁気特性

心材料を複数枚ずつ交互に重ね合わせ閉磁路を形成する必要があるが、ラップ工程後はラップ工程前と同形態であることが軟磁気特性の低下抑制のためには望ましい。

ここでは、熱処理条件の探索とラップ工程による軟磁気特性への影響について明確にするために 500 VA 鉄心の形態に成形して検証した。500 VA 鉄心の諸元を表 1 に示す。ラップ工程前後のラップ部の状況を図 6 に示す。また取得した軟磁気特性を図 7 に示す。

再ラップ後のラップ部の状態がラップ開放前と同様の形態に戻るよう試作を重ねた結果、ラップ工程前後のラップ部のようすは、ほぼ差が見られない状態にまで至った。また軟磁気特性においてもラップ処理前後で差が見られず、方向性電磁鋼板より低く、Fe 基アモルファス合金鉄心並みの低い無負荷損が確認できた。また Fe 基アモルファス鉄心合金では実現できない磁束密度 1.7 T においても、方向性電磁鋼板より低い無負荷損が得られている。

(2) ナノメット 10 kVA 鉄心での検証

ナノメット 10 kVA 鉄心を試作した。試作した

表 2 ナノメット 10kVA 鉄心の諸元

項 目	仕様
容 量	10 kVA
鉄心重量	約 36.3 kg
鉄心寸法	206 mm × 294 mm × 120 mm

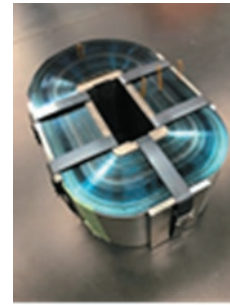


図 8 ナノメット 10 kVA 鉄心の外観

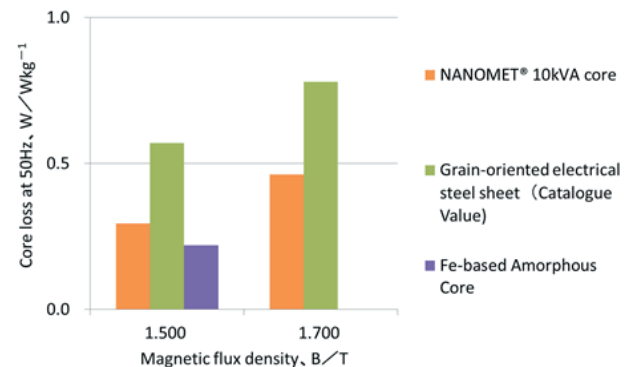


図 9 ナノメット 10 kVA 鉄心の軟磁気特性

10 kVA 鉄心の諸元を表 2 に示し、外観写真を図 8 に示す。また取得した軟磁気特性を図 9 に示す。

ナノメット 10 kVA 鉄心に適切な条件で熱処理を施した結果、鉄心形態では方向性電磁鋼板より無負荷損が低く、Fe 基アモルファス合金鉄心並みの低い無負荷損が確認できた。また Fe 基アモルファス合金では実現できない磁束密度 1.7 T においても、方向性電磁鋼板より低い無負荷損が得られ、従来の高効率変圧器と同等以上の省エネルギーの可能性が確認できた。さらに Fe 基アモルファス合金では実現できない高磁束密度領域における変圧器の設計ができるため、Fe 基アモルファス合金と比較して変圧器の小型化にも寄与できる可能性を見出した。

3.3 ナノメット 10 kVA 鉄心適用変圧器の試作と評価

試作したナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の諸元を表 3 に示し、外観写真を図 10 に示す。また得られた変圧器の特性を表 4 に示す。

図 9 および表 4 より、ナノメット鉄心を変圧器に組み

表 3 ナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の諸元

項 目	定格・仕様
定格電圧	6,600 V
定格容量	単相 50 Hz 10 kVA
鉄心材料	ナノメット



図 10 ナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の外観

表 4 ナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の特性

項 目	測定値	プロトタイプ 変圧器設計値
無負荷電流 (%)	1.01	≤ 3.5
無負荷損 (W)	18.6	15
短絡インピーダンス (%)	2.64	2.64
電圧変動率 (%)	2.23	≤ 2.3
変圧比試験 (N)	± 1/250 以内	± 1/250 以内
極性試験	減極性	減極性
単三平衡度試験 (V)	+~N 短絡 1.04 -~N 短絡 1.04	≤ 2.0

上げる際に無負荷損が若干増加するため、変圧器の設計値には至らず課題となっている。しかし、500 VA 鉄心の検証ではより低い無負荷損が確認されたことから、検証を重ねることで無負荷損の低減が図れると考えている。また変圧器としての特性は、問題ないことが確認できた。

4 おわりに

今後は、500 VA 鉄心の検証ではより低い無負荷損が確認されていることから、10 kVA 鉄心におけるさらなる軟磁気特性向上の検討および同鉄心の変圧器適用に関する研究を進める予定である。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力賜りました国立大学法人東北大学様、(株) 東北マグネットインス

ティテュート様、アルプスアルパイン (株) 様の関係各位に深く謝意を表します。

■参考文献

- (1) 稲垣勝敏ら：「地球環境保全に貢献するアモルファス変圧器」, 日立評論, Vol.93, No.02, pp.222-223 (2011)
- (2) 清水一行ら：「MeV 電子照射による FeSiBPCu 合金のナノ結晶化過程の動的観察」, 日本金属学会誌, Vol. 78, No. 9, pp.364-368 (2014)
- (3) 牧野彰宏：「超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金「NANOMET[®]」の最新研究開発動向」, まてりあ, Vol.55, No.3, pp.89-96 (2016)
- (4) 高宮俊人ら：「JFE スチールにおける方向性電磁鋼板の最近の進歩」, JFE 技報, No.36, pp.1-5 (2015)
- (5) 松浦真ら：「ケイ素鋼板に替わる超低損失ナノ結晶軟磁性材料 Fe₈₅₋₈₆Si₁₋₂B₈P₄Cu₁ (NANOMET[®]) の磁気特性最適化のためのナノ結晶形成プロセスの解明」, http://support.spring8.or.jp/Report_JSIR/PDF_JSIR_26B/2014B1795.pdf

■語句説明

注 1) ナノ結晶軟磁性材料：Fe 基アモルファス合金を結晶化させ、ランダム配向した強磁性相のナノ結晶粒を残存するアモルファス相に分散させた材料

注 2) ナノメット (NANOMET[®])：登録商標 ((株) 東北マグネットインスティテュートと (株) トーキン)

注 3) Fe 基アモルファス合金：合金溶湯を超急冷 (毎秒 100 万℃以上) して製造する結晶構造に由来する異方性がない鉄 (Fe) を主成分とする金属

注 4) 無負荷損：変圧器が無負荷のとき、定格周波数・定格電圧を一次側に加えたときの入力

注 5) 方向性電磁鋼板：鋼板の一方向のみに磁化しやすくなるように結晶方位を一方向に揃うよう製造された鋼板

注 6) 微結晶化：液体急冷により作製したアモルファス相を用いて、このアモルファス相が適当な合金組成であるときに、ナノ結晶組織が形成される結晶化

注 7) FeSiBPCu：元素記号 (組成)

注 8) DSC：一定の熱を与えながら、基準物質と試料の温度を測定して、試料の熱物性を温度差として捉え、試料の状態変化による吸熱反応や発熱反応を測定する装置

注 9) XRD：試料に X 線を照射した際 X 線が原子の周りにある電子によって散乱、干渉した結果起こる回折を解析する測定原理とし、構成成分の同定や定量、結晶サイズや結晶化度を測定する装置

出井 和弘

技術開発本部 技術研究所 材料技術グループ 所属

栗原 二三夫

技術開発本部 技術研究所 材料技術グループ 所属

須永 善則

電力機器事業本部 小型変圧器製造部設計グループ 所属

エポキシモールド機器のライフサイクル全体にわたる環境配慮技術

■ 大竹 美佳
Mika Ohtake

■ 山下 太郎
Taro Yamashita

東光高岳では持続可能な社会の構築にかかわる開発として、電力機器であるエポキシモールド機器の原料から、製造、使用、再資源化までのライフサイクル全体にわたる環境負荷低減を目指した取り組みを行っている。これまで、エポキシモールド機器の適用範囲拡大による温室効果ガス使用量の削減や成形プロセスの最適化などによる低炭素化を推進してきた。本稿では、エポキシモールド機器へのバイオマス資源の適用とリサイクルについての取り組みを紹介する。

1 はじめに

持続可能な社会を構築するため、資源・エネルギーの効率的利用や低炭素化に対する取り組みの必要性が、よりいっそう高まっている。企業に求められる社会的責務の位置付けも大きく、持続可能な開発目標（SDGs）^{注1)}への取り組みが広がっている。

各種電力機器には優れた絶縁特性を有する六フッ化硫黄ガス（SF₆）^{注2)}が、絶縁材料として世界中で広く使用されている。しかし、SF₆は温室効果ガスであるため、排出抑制の対象物質に挙げられており、ヨーロッパを中心に代替ガスが研究されている。また、一部の機器では固体絶縁材料との複合化により、SF₆の使用量削減を実現している。

東光高岳においても、環境負荷低減につながる研究開発を念頭に、固体絶縁材料であるエポキシ樹脂の耐クラック性^{注3)}向上などの高性能化に取り組み、エポキシモールド機器への適用範囲拡大を推進してきた。また、電力機器の環境負荷低減をライフサイクル全体で捉えると、①原料、②製造、③使用、④再資源化のうち、東光高岳のエポキシモールド機器の場合、②は製造時の熱硬化プロセスの最適化による省エネ、③は適宜修理による再使用や省メンテナンスの面で、すでに低炭素化に貢献している部分がある。そのため、さらなる低炭素化には、①原料と④再資源化の面での取り組みが必要である。①の原料面では、電力機器として必要な材料特性を有しつつ、材料そのものが環境にやさしいバイオマス資源の適用が望まれる。④の再資源化面では、エポキシモールド機器が耐久性に優れる反面、リサイクル性には乏しいことから有効なリサイクル技術の確立が望まれる。①、④は、いずれも技術的なハードルが高い課題であるが、ライフサイクル全体にわたり環境にやさしいエポキシモールド機器の実現には必要かつ有効な取り組みと考えている。

本稿では、ライフサイクル全体にわたり環境にやさしいエポキシモールド機器の実現を目指した取り組みとして、バイオマス資源である植物油をベースとしたエポキシ樹脂のモールド機器への適用技術と、エポキシモールド機器のリサイクル技術を紹介する。

2 バイオマス資源の適用

2.1 バイオマス資源適用による環境負荷低減

バイオマスとは一般に「再生可能な生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの」と定義される。バイオマス資源はその成長過程でCO₂を吸収することから、最終的に焼却処分によりCO₂が発生しても、地球上におけるCO₂の増加を抑制できる。また、繰り返し生産可能な資源であり、生産地域も限定されないなどの特長を有する。

電力機器用エポキシ樹脂は、エポキシ主剤、硬化剤、石英などの充填材で構成され、石油由来であるエポキシ主剤や硬化剤をバイオマス資源に代替することで、CO₂の排出抑制が期待できる。

2.2 技術的な取り組みおよび成果

バイオマス資源である植物油をベースとしたエポキシ化亜麻仁油をエポキシ主剤の代替とし、植物油由来エポキシ樹脂を開発した。これまでの検証で、植物油由来エポキシ樹脂は長年実績のある石油由来の電力機器用エポキシ樹脂と比較して、機械強度および耐熱性がやや劣るものの、一定の材料特性を有することを試験片レベルの評価で明らかにした⁽¹⁾。しかし、製品適用においては、耐クラック性と成形プロセス性^{注4)}の両立に課題があった。そこで、従来の耐クラック性向上技術も応用した配合調整などにより、植物油由来エポキシ樹脂の耐クラック性と成形プロセス性の両立を実現した。開発した植物油由来エポキシ樹脂による6 kVクラスの接地形計器用変圧器を試作（図1）し初期性能を評価したところ、判



図1 植物油由来エポキシ樹脂による実器試作品

定基準を満足する結果が得られた。電力機器への適用を目指し、開発した植物油由来エポキシ樹脂の長期信頼性評価に現在取り組んでいる。

3 モールド機器のリサイクル

3.1 モールド機器のリサイクルによる環境負荷低減

エポキシモールド機器は 1960 年代から実用化され始め、すでに 50 年以上が経過しており、順次更新時期を迎え、今後大量に廃棄処分されることが予想される。しかし、固体絶縁材料であるエポキシ樹脂は熱硬化性樹脂のため、成形後は不溶不融となることからリサイクルが難しく、大部分は直接埋め立て処分されている。エポキシモールド機器は主に金属類、エポキシ樹脂、充填材から構成される複合成形品であるが、それぞれ分離して回収することができれば、再資源化による有効活用が可能となる。

3.2 技術的な取り組みおよび成果

主に繊維強化プラスチックの溶解で実績のある常圧溶解技術^(2) 注5)を、エポキシモールド製品に適用することで、金属類、溶解樹脂成分、充填材にそれぞれ分離可能(図2)であることが過去の検証で判明している⁽³⁾。しかし実運用を考えた場合、溶解処理と溶解処理後の充填材などの分離回収の効率化が課題であった。そこで、各種溶解条件と溶解率の関係を明らかにし、効率的な溶解条件を決定した。また、溶解処理後の溶媒中に分散した充填材を効率的に分離回収する方法も重要となる。実運用を模擬した小型のろ過機を用い、数種類のろ布について捕集性と処理時間を検証した。ろ布の違いにより効率的な運用に関係する充填材の捕集性と処理時間(図3)

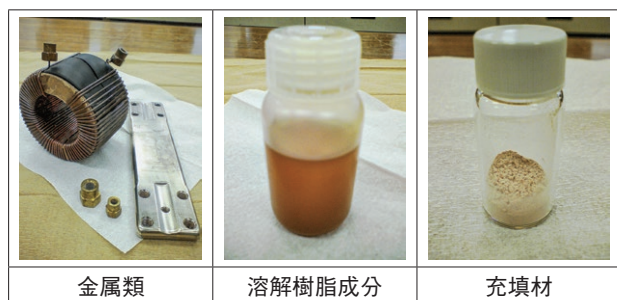


図2 溶解処理による分離回収品

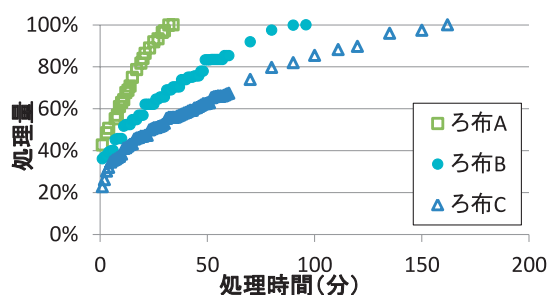


図3 各ろ布の処理量と処理時間の関係

4 おわりに

環境にやさしいエポキシモールド機器を目指した研究として、バイオマス資源である植物油をベースとしたエポキシ樹脂の実器試作・評価により、モールド機器への適用の見込みを得た。また、リサイクル技術については、試験的な検証から、実運用を想定した検証へと移行し、効率的な溶解処理条件の決定や、溶解処理後の効率的な運用方法の検討を現在も継続して進めている。これから技術を集結し、エポキシモールド機器の原料、製造、使用、再資源化(リサイクル)とライフサイクル全体にわたる環境負荷低減の実現に貢献していく。

■参考文献

- (1) 大竹美佳, 山下太郎, 平野一美:「植物油由来エポキシ樹脂の電力用モールド機器への適用に向けた耐サーマルショック性向上」, 東光高岳技報, Vol.1, pp.35-38 (2014)
- (2) 柴田勝司:「FRPのリサイクル技術」, ネットワークポリマー, Vol.44, No.5 (2007)
- (3) 大竹美佳, 大塚尊裕:「エポキシモールド変成器のリサイクル」, 平成22年電気学会全国大会, 5-131 (2010)

■語句説明

注1) 持続可能な開発目標(SDGs): 2015年9月の国連サミットで採択されたもので、国連加盟193か国が2016年から2030年の15年間で達成するために掲げた開発目標。17の大きな目標と、それらを達成するための具体的な169のターゲットで構成されている。SDGsは「Sustainable Development Goals」の略称。

注2) 六フッ化硫黄ガス(SF₆): 化学的に安定した、無毒、無臭、不燃性の気体。優れた絶縁性能をもち、電力機器に広く用いられている。

注3) 耐クラック性: 成形品に生じる割れへの耐性のこと。耐クラック性が悪いと、樹脂の硬化や温度変化に伴う収縮により、成形品に割れが生じるおそれがある。

注4) 成形プロセス性: 製造工程上のものの作りやすさのこと。本稿では、樹脂の流動性低下による成形不良を問題としており、一般的に耐クラック性と樹脂流動性はトレードオフの関係にある。

注5) 常圧溶解技術: いくつか開発されているエポキシ樹脂の溶解技術の中で、比較的穏やかな条件かつ粉碎などの前処理が不要なことから、経済性や安全性に優れる。

大竹 美佳

技術開発本部
技術研究所 材料技術グループ 所属

山下 太郎

技術開発本部
技術研究所 材料技術グループ 所属

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

■ 吉井 誠
Makoto Yoshii

再生可能エネルギーの導入量が増大するにつれ、配電線電圧の上昇、周波数の安定度の低下など、電力系統が不安定化する可能性が懸念されている。

東光高岳では小山事業所配電ネットワーク実証試験場（FDN 試験場）⁽¹⁾に既設置の、太陽光発電（PV）用パワーコンディショナ（PCS）^(注1)に、系統安定化機能とそれを遠隔制御する双方向通信機能を備えたスマートインバータ機能を組み込み、実規模系統での実証試験を開始したので紹介する。

1 はじめに

再生可能エネルギーの導入量が増大するにつれ、配電線電圧の上昇、周波数の安定度の低下など、電力系統が不安定化する可能性が懸念されている。

東光高岳は、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）「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」において、スマートインバータ制御装置を東京電力ホールディングス（株）に納入し、インバータと電力系統を模擬するリアルタイムデジタルシミュレータ（RTDS）と組み合わせての実証実験に供した。

このほど、小山事業所内の FDN 試験場に既設置の東光高岳製 50 kW PV 用 PCS⁽²⁾に追加適用できるスマートインバータ機能を開発して組み込み、性能検証試験を実規模の模擬配電線で開始したので紹介する。

2 スマートインバータの機能

系統安定化機能と電力会社またはアグリゲータとの双方向通信機能を有し、電力系統の安定化および電力品質の向上と同時に電力会社との協調を実現する次世代電源変換装置を称してスマートインバータとよぶ⁽³⁾。

本稿では、スマートインバータ機能を備えた PCS をスマート PCS とよぶ。

スマート PCS では、分散型エネルギー資源（Distributed Energy Resource, DER）を管理する、分散型エネルギー資源管理システム（Distributed Energy Resource Management Systems, DERMS）と通信端末（IED）^(注2)間は IEC61850^(注3) 準拠の protocols で、IED と PCS 制御間は SunSpec^(注4) 準拠の Modbus^(注5) で、双方向通信を行う。

50 kW PV 用 PCS に適用したスマートインバータ機能の概要を表 1 に示す。

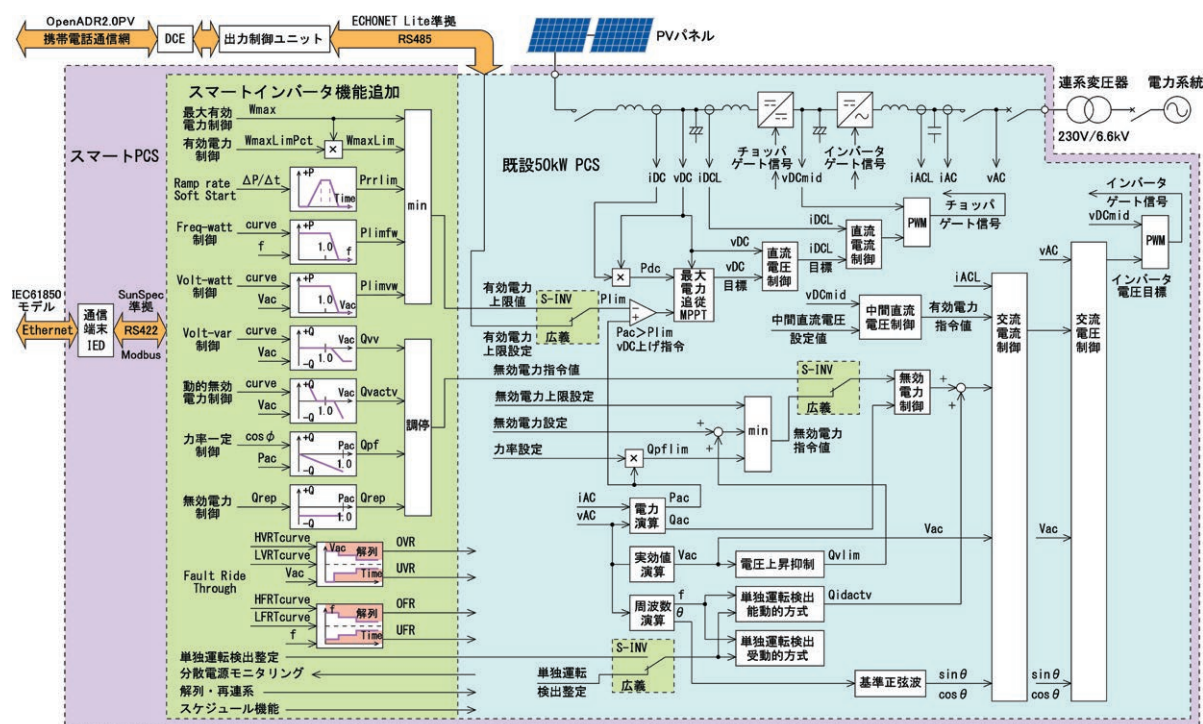


図 1 50 kW PV 用スマート PCS 機能ブロック図

表 1 50 kW PV 用 PCS のスマートインバータ機能

スマートインバータ機能の名称	50 kW PV 用 PCS に適用したスマートインバータ機能の概要
分散電源モニタリング	PCS の状態・計測値を、DERMS で遠方監視する。
解列・再連系	DERMS からの遠方制御で、PCS を電力系統から解列・再連系する。
スケジュール機能	PCS の解列・再連系、以下の制御の制御量をスケジューリングする。
最大有効電力制御	PCS が出力する最大電力を設定する。 スケジュール機能と組み合わせ、出力抑制を行う。
有効電力制御	PCS が出力する有効電力を、DERMS から即時制御する。
Ramp rate, Soft Start	PCS が出力する有効電力、無効電力が変化すると、影響で連系点の配電線電圧が変化する。 あるいは、電力系統に接続する大量の PCS が同時に解列・再連系して有効電力が急変すると、電力系統の周波数に変動を引き起こす可能性がある。 Ramp rate は、連系運転中と解列時の有効電力と無効電力の変化速度を制限して、電力系統に与える影響を和らげる。 Soft Start は再連系時の有効電力の変化速度を制限して、電力系統に与える影響を和らげる。
Freq-watt 制御	送電線の事故などで電力系統から負荷が大量に脱落して、電力系統の発電電力が余剰となり周波数が上昇したとき、PCS が出力する有効電力を減少させ、周波数上昇を抑制する。
Volt-watt 制御	PCS が配電線に有効電力を逆潮流させると、配電線（特に末端）の電圧が上昇して、適正電圧を逸脱する可能性がある。 PCS が連係する配電線電圧が上昇したとき、PCS が出力する有効電力を減少させ、電圧の上昇を抑制する。一般的には Volt-var 制御を先に動作させ、Volt-var 制御だけでは配電線電圧の上昇を十分に抑制できないとき、Volt-watt 制御で有効電力を抑制する。
Volt-var 制御	配電線電圧が上昇したとき、発電方向で進み（誘導性）の無効電力を配電線に供給して、電圧の上昇を抑制する。 電圧の上昇から無効電力供給までの応答時間は、数十秒～数分に設定する。
動的無効電力制御	配電線電圧が急速に変動したとき、変動を打ち消す向き、電圧が上昇したときは進みの無効電力、電圧が低下したときは遅れ（容量性）の無効電力を配電線に供給して、電圧変動を抑制する。 電圧の変化から無効電力を供給するまでの応答時間は、数秒に設定する。
力率一定制御	PCS に進み無効電力を設定力率で出力させ、有効電力による配電線電圧の上昇を抑制する。
無効電力制御	PCS が出力する無効電力を、DERMS から即時制御する。
Fault Ride Through	電力系統の広範囲で電圧変動や周波数変動が生じると、分散電源の PCS が広範囲で同時に解列することによって大量の電源脱落が起こり、系統周波数や電圧が急落する可能性がある。 Fault Ride Through は、電圧変動や周波数変動に対し PCS が解列することなく、連系運転を継続すべき条件を定めたものである。 電圧変化に対する耐量は、電圧低下に対する解列までの時間（LVRT）、電圧上昇に対する解列までの時間（HVRT）の各特性、周波数変化に対する耐量は、周波数低下に対する解列までの時間（LFRT）、周波数上昇に対する解列までの時間（HFRT）の各特性を、設定する。
単独運転検出	単独運転検出機能の能動的方式の周波数変化率に対する無効電力注入量の特性と、受動的方式の周波数変化率リレーまたは電圧位相跳躍検出リレーの整定値を、設定する。

図 1 に示すように、50 kW PV 用 PCS にスマートインバータ機能を追加しスマート PCS としたうえで、既設の ECHONET Lite^{注6)} 準拠の通信による出力制御機能を持つ広義の PCS⁽²⁾ の状態と、スマートインバータ機能を使用するスマート PCS 状態を、切り替えられるようにした。

3 実証試験の内容

3.1 実証試験の内容

50 kW PV 用 PCS は、Volt-var 制御と Volt-watt 制御を

用いた、模擬配電線の電圧上昇抑制機能を検証中である。

さらに、ステップ式電圧調整器（SVR）のタップ制御と PCS の Volt-var 制御、双方の特性を考慮して組み合わせた制御を設定して、配電線電圧の制御効果を評価・検証する予定である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3.2 今後の実証試験予定

今年度、FDN 試験場に既設置の 200 kW NAS（ナトリウム硫黄）電池用 PCS に、スマートインバータ機能を追加する予定である。

電力貯蔵用の二次電池である NAS 電池を使用するこ

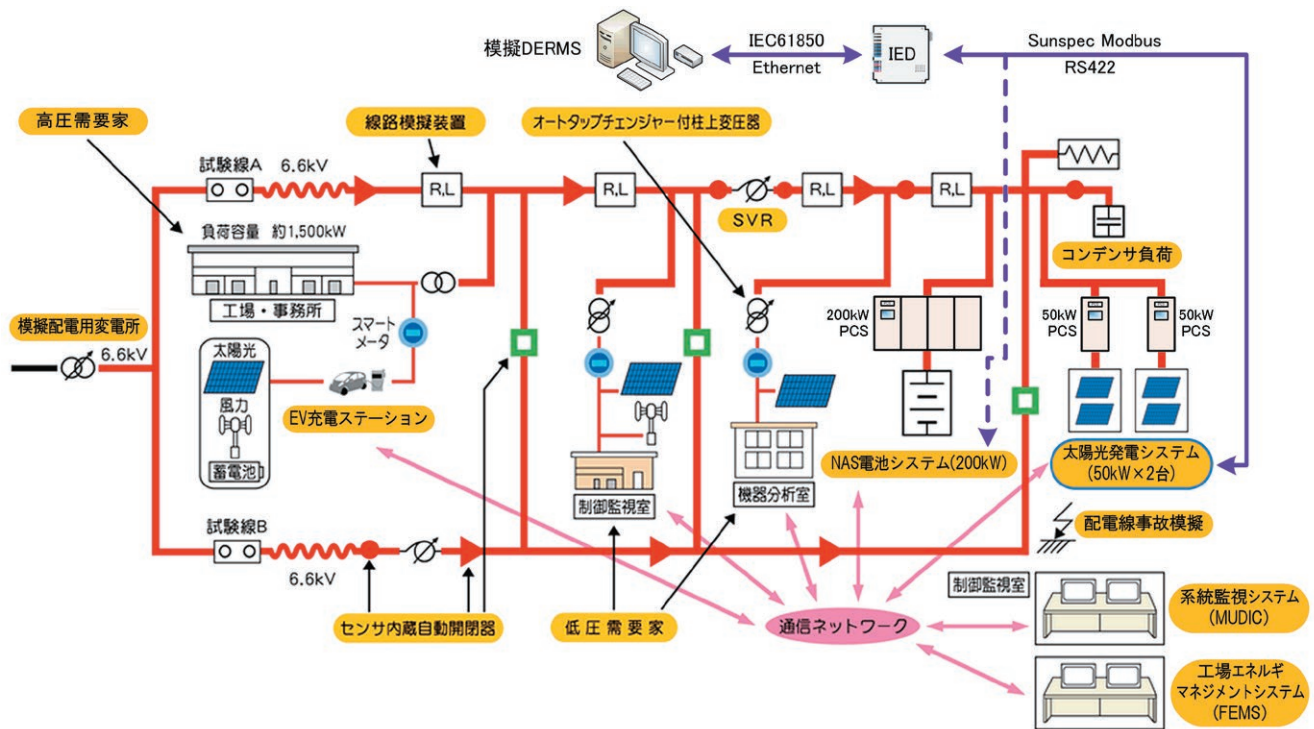


図2 FDN 試験場の構成とスマート PCS 化した 50 kW PV 用 PCS と 200 kW NAS 電池用 PCS

とで、NAS 電池用 PCS は、電力系統の周波数が下降したときに、Freq-watt 制御で有効電力を増加させて、周波数低下を抑制することが可能になり、配電線電圧が低下したときに、Volt-watt 制御で系統への有効電力を増加させて、電圧低下の抑制を行うことが可能になる。

さらに、PV 用スマート PCS と NAS 電池用スマート PCS と SVR のタップ制御の三者を組み合わせた電圧制御機器の協調制御などについて、FDN 試験場の実規模の模擬配電線を用いて効果を評価する予定である。

■参考文献

- (1) 茂木規行：「配電ネットワーク実証試験場」，高岳レビュー，No.175（2011）
- (2) 村下直久，森口益巳：「次世代双方向追伸出力制御方式緊急実証」への取り組み，東光高岳技報，No.3（2016）
- (3) 一般社団法人日本電機工業会：「スマートインバタ」，<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/data/s09.pdf>，（2018）
- (4) 山下裕輔，宮崎輝，芳澤信哉，林泰弘，村下直久：「SVR 設置配電系統への Volt-var 制御適用に関する基礎検討」，論文 No.131，【B】令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会（2019）
- (5) 尾崎卓也，茂木規行，宮本卓也：「配電系統の電圧制御シミュレーション」，東光高岳技報，No.3（2016）
- (6) 電気学会電気規格調査会：「2.用語の説明」，自励変換装置の能動連系，JEC-2441-2012，p.8（2012），電気書院
- (7) エコネットコンソーシアム：「ECHONET Lite 規格

の特長と概要」，<https://echonet.jp/about/features/>

■語句説明

注1) パワーコンディショナ PCS：直流で発電された電力を交流に変換して電力系統に出力する機能を持ち、制御監視装置、系統連系変換装置、直流変換装置、付属装置などすべて備えた装置⁽⁶⁾。

注2) IED：Intelligent Electronic Device（高性能電子装置）の略称であり、システムの合理化、標準化を図ることができる。内蔵機能を組み合わせて幅広くユーザーカスタマイズができ、汎用性が高い。IEC61850-2 で定義。

注3) IEC61850：変電所の統合 / オートメーションに使用される通信ネットワークとシステムの国際規格。

注4) Sunspec：アメリカ合衆国の、サンスペックアライアンスが認証する太陽光発電用機器、通信規格。

注5) Modbus：産業界で広く採用されているフィールドネットワーク。Sunspec Modbus は、DER システム間を相互接続するための規定で、IEEE1547 で参照される。

注6) ECHONET Lite：センサ類、物家電、設備系機器などを IoT（Internet of Things）化し、エネルギー管理システムやリモートメンテナンスなどのサービスなどを実現するための通信仕様⁽⁷⁾。プロトコル、通信手順は ISO/IEC14543-4-3、制御コマンドは IEC62394 で定義。

吉井 誠

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 所属

仮想試験としての CAE 活用

—急速充電器の熱設計—

■ 片柳 厚志

Atsushi Katayanagi

■ 古家 成正

Shigemasa Furuie

1 はじめに

開発設計の工程に、フロントローディングの概念が登場して久しい。東光高岳もフロントローディングを推進し、設計業務に 3DCAD や CAE^{注1)} ツールを積極的に導入している。

以前は、開発設計において複数の設計案がある場合、最適な設計案を選択するために、開発試験を実施しそれぞれの案の性能を比較することが多かった。開発試験を行うためにはある程度詳細設計や製作を進める必要があり、開発試験において結果が要求性能を満足しなかった場合、多くの手戻り工数が発生する。それに加え、詳細設計の段階では設計変更がやりにくくなる傾向にあるため、対症療法的な対策を取らざるを得ない場合もある。

設計変更がしやすく、設計変更にかかるコストが少ない設計工程初期において、設計品質を高めることで工程の手戻りを減らすのがフロントローディングの考え方である。その結果、短期間で品質の良い製品ができあがる。

設計工程のフロントローディング化に役立つのが CAE である。設計案を相対比較する程度であれば、詳細設計の前工程でも CAE を適用することは可能である。設計案を選ぶために実施していた試験を CAE に置き換えることにより、設計工程のフロントローディング化を促進することができる。

実際の試験では、供試器や試験環境を準備し、ある条件のもとで測定装置により物理量を測定する。CAE では、モデルを作成、境界条件を設定し、数学的手法により物理量を計算する。つまり、CAE は、“仮想的な”試験であると考えることができる。

本稿では、設計工程のフロントローディング化を実現するため、仮想試験として CAE を適用した熱設計の検討事例を紹介する。

2 CAE 仮想試験の実施例

対象機器は急速充電器^{注2)}である。本稿で検討した急速充電器の概形図と内部配置図を図 1 に示す。急速充電器にはパワーユニット^{注3)}を最大で 4 台実装する。パワーユニットは運転中発熱しており、高温で故障しないよう、排気ファンにより冷却している。筐体内に外気を取り入れる際に雨水や塵埃などが侵入しないよう、給・排気口にフィルタを取り付けている。

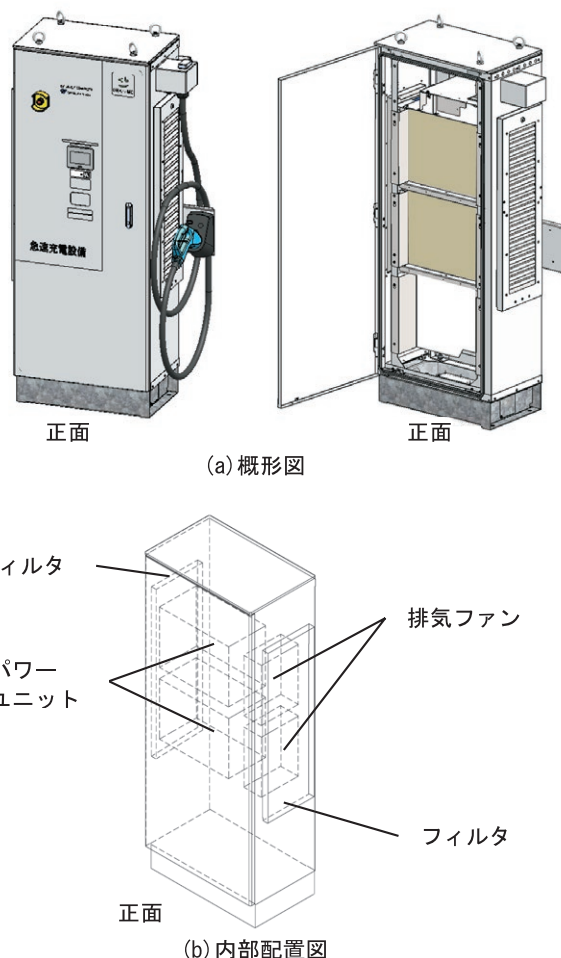


図 1 急速充電器の概形図と内部配置図

紹介例として、CAE の特長を活かした、以下の 2 例を選んだ。

- 試験パターン数が多い事例。
- 試験条件の準備が難しい事例。

次節以降、順に紹介する。

2.1 試験パターン数が多い事例

まず、試験パターン数が多い場合として、パワーユニットの構成を検討した事例を紹介する。急速充電器のパワーユニットは図 1 に示すように上下 2 段に配置しており、各段 2 台の最大 4 台構成である。急速充電器が 50 kW 仕様時には、パワーユニットを 4 台実装し、30 kW 仕様時には、パワーユニットを 2 台実装し出荷する。そこで、2 台構成とした場合、上下段どちらにパワーユニットを実装したほうがより効果的に機器を冷却

できるか検討する。

それに合わせて、パワーユニットを取り外したためにできた空間の扱いも検討する。この空間には、機器の冷却にあまり寄与しない空気の流れができる。このような流れは冷却効率の観点から、存在しないほうが良い。そのため、取り外したパワーユニットがあった位置に、空気の流れを変える阻止板を取り付けることを検討する。

実際に検討した際には、これらの条件のほかにも、排気ファンの運転台数、パワーユニットの実装台数などもパラメータに含めた約 20 通りの組み合わせについて CAE を適用して温度分布を計算したが、本稿では前出の条件の組み合わせである 4 通りの組み合わせの検討結果を紹介する。

計算結果である温度分布図を図 2 に示す。図 2 より、パワーユニットの配置を変えても、温度分布の傾向はほとんど変わらないことがわかる。

阻止板の有無に関して比較すると、阻止板があったほうが筐体下部の温度上昇が抑えられることがわかる。しかし、筐体下部の温度上昇は阻止板がなくてもあまり大きくはないため、あえて阻止板を取り付ける必要はないと判断できる。

よって、ここでの熱設計案の検討結果は、以下のよう

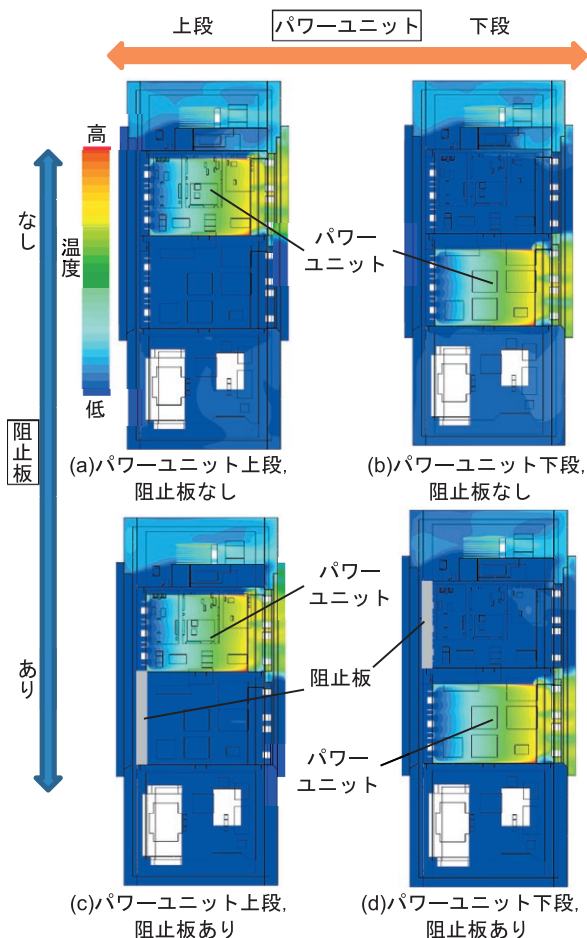


図 2 急速充電器内の温度分布図（パワーユニット構成）

になる。

- パワーユニットは、上・下段どちらにしても影響は変わらない。
- 阻止板は不要である。

このように、詳細設計に入る前に設計案を絞ることができ、後工程に残される不確実さを減らすことができる。開発設計工程がフロントローディング化され、設計品質が向上することが期待できる。

この設計判断をするために試験で確認する場合、より多くの工数を要することが予想される。供試器の調達、試験場・試験人員の確保、試験実施、試験後の片付け、試験データの整理などにかかる工数が必要となる。

いっぽう、CAE の場合は、条件変更に分分、計算に数時間かかる程度である。計算パターン数が多い場合、夜間や休日など、人がいないときにまとめて計算することで、時間を節約することもできる。

このように、設計案のパターン数が多い場合、CAE を活用することにより試験工数の削減が期待できる。

2.2 試験条件の準備が難しい事例

次に、試験条件や環境を準備することが難しい場合として、フィルタの目詰まりによる影響を検討した事例を紹介する。急速充電器には、雨水や塵埃などが機器内部に入り込むのを防ぐため、給・排気口にフィルタを取り付けている。通常、フィルタは空気の流れに対して抵抗として働くため、空気はフィルタを通過しづらくなる。

長時間、機器を運転しているとフィルタに塵埃などが蓄積して目詰まりを起こし、より空気がフィルタを通過しづらくなる。それにより、機器の換気能力が低下し、機器内部に熱がこもりやすくなり高温になる。部品が高温になると部品の寿命が低下し、最悪の場合機器が故障する。

機器の故障を防ぐため、フィルタの目詰まりによる影響を把握する。試験を実施する場合、フィルタの目詰まりを何らかの方法により模擬する必要がある。しかしながら、長時間運転により目詰まりを起こしたフィルタを試験用に再現することは難しい。

空気などの流体がフィルタを通過する際、フィルタが抵抗となって圧力が低下する。そのときのフィルタの入口と出口の圧力差を圧力損失と呼んでおり、圧力損失が大きくなるほど、流体が通過するときの抵抗は大きくなる。フィルタメーカーより提供されているフィルタのカタログや技術資料には、圧力損失の初期値と、最終値が記載されている。初期値はフィルタが新品のときの値であり、最終値は塵埃の蓄積による目詰まりが進行し、圧力損失の増加が限界に達したときの値である。

CAE では、フィルタの設定値は、フィルタを通る流体の流速と圧力損失のデータを基にしている。CAE に

においてフィルタが目詰まりを起こした条件は、フィルタの圧力損失の最終値を適用することにより模擬できる。

フィルタが目詰まりを起こした場合の計算結果を図3に示す。フィルタ構成を標準仕様と耐塩仕様との2種類で比較した。耐塩仕様には標準仕様よりも目の細かいフィルタを採用しており、標準仕様よりも目詰まりしやすい傾向にある。

フィルタが新品のときは、両者とも温度分布はほぼ同じであった。標準仕様ではフィルタが目詰まりを起こしても、筐体内の温度が新品と比較して若干上昇する程度であることがわかる。いっぽう、耐塩仕様ではフィルタが目詰まりを起こすと、筐体内の温度が新品のときと比較して大きく上昇することがわかる。

これより、標準仕様では、長時間運転によりフィルタが目詰まりを起こしても、機器が故障する可能性は低いと考えることができる。

耐塩仕様では、フィルタの目詰まりにより筐体の内部温度が上昇することが予測されるため、標準仕様よりもさらに安全側の温度保護により装置が安全に停止する仕様とすることが考えられる。温度保護のためのセンサ類の取り付け位置は、CAEの結果を参考に決定すること

ができる。フィルタはメンテナンス時に汚れぐあいを確認し、状態に応じて交換ができる構造とすることが考えられる。

このように、試験実施が困難な条件について設計検討する場合、CAEを適用することにより、簡便に機器の性能を把握することができる。

3 おわりに

本稿では、急速充電器の熱設計に関して、実際に試験するにはパターン数が多い場合と、適切な試験条件の模擬が困難である場合について、仮想的な試験としてCAEの特長を活かし有効に活用した事例について紹介した。本稿で紹介した以外にも、東光高岳では以下に示すような場面においてCAEを適用している。

- 大型変圧器やガス遮断器、断路器などの耐震設計
- 大型変圧器やガス遮断器などの絶縁設計
- 操作機構箱や盤内の結露対策など

今後とも、設計工程のフロントローディング化を図る強力なツールとしてCAEを活用し、より良い製品を社会に提供できるよう努めていく。

■ 語句説明

注1) CAE: Computer Aided Engineering の略。コンピュータを用いて設計、製造などの業務を手助けすること。狭義には、コンピュータを使って解析することそのものを指すこともある。

注2) 急速充電器: 電気自動車 (EV: Electric Vehicle) やプラグインハイブリッド自動車 (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle) の充電ができる装置。短時間で急速充電できることが特長。

注3) パワーユニット: AC/DC, DC/DC 変換器。急速充電器の制御に従い、EV に電力を供給する装置。

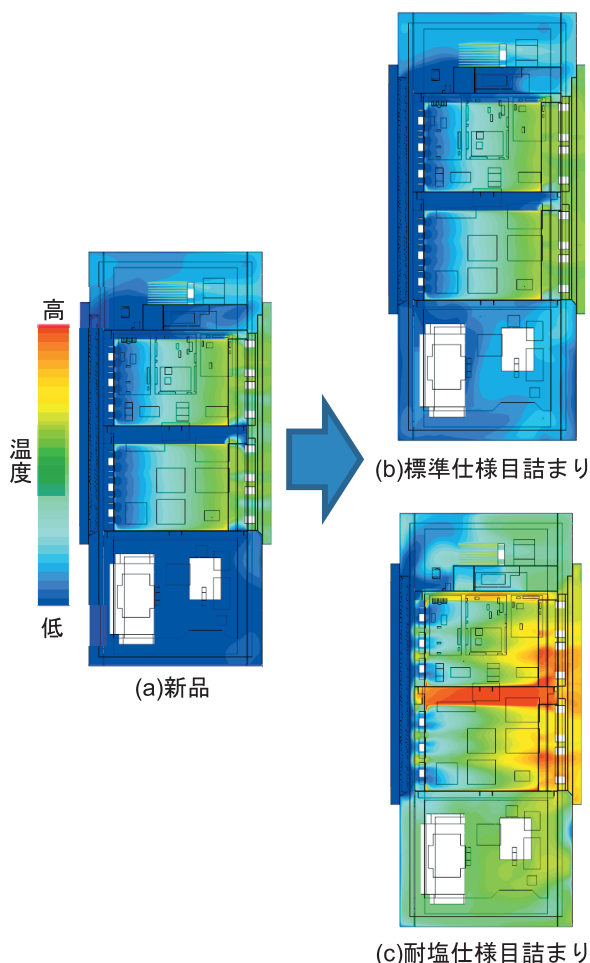


図3 急速充電器内の温度分布図（フィルタ目詰まり）

片柳 厚志

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

古家 成正

エネルギーソリューション事業本部
システムソリューション製造部 開発グループ 所属

発電所用自立形 ガス絶縁計器用変圧器

■ 村上 政倫

Masamichi Murakami

1 はじめに

2020 年度から始まった発送電分離に伴い、発電所に電力取引用の計量器の設置が義務付けられた。SF₆ ガス絶縁接地形計器用変圧器（以下、ガス EVT）は、計量器や継電器とともに使用するものであり、計量器の設置が義務付けられたことによる市場環境の変化への対応に寄与するものとする。

ここに紹介する 110 kV～275 kV の発電所用自立形ガス EVT は、開放形変電設備に設置可能なものとして開発した製品であり、変流器（以下、CT）と組み合わせて使用する。

2 定格仕様

定格仕様は、表 1 のとおりである。

表 1 自立形ガス EVT 定格仕様

項目	仕様	
	110 kV～187 kV	220 kV～275 kV
形式	VGW1 - □□□ Z	VGX1 - □□□ Z
周波数	50 Hz または 60 Hz	
雷インパルス耐電圧	550～750 kV	900～1,050 kV
一次電圧	110,000/√3 V 154,000/√3 V 187,000/√3 V	220,000/√3 V 275,000/√3 V
二次電圧	110/√3 V	
確度階級	0.3 W	
定格負担	50 VA	
定格ガス圧力	0.5 MPa (20℃)	

形式の□□□は、電圧クラスを示す

3 製品ラインアップの拡充

東光高岳では、ガス開閉装置直結形（以下、GIS 直結形）110 kV～275 kV 対応のガス EVT と CT をすでに販売していたが、新たに同じ電圧クラスの自立形ガス EVT を開発し、ラインアップの拡充を図った。110 kV～154 kV 油入 CT やモールド分割形 CT と組み合わせることで、設置スペースや要求仕様に応じて最適な計量用 VT、CT の組み合わせを選択することができる。

表 2 変成器製品ラインアップ（適用電圧クラス：110 kV 以上）

電圧クラス (kV)		110	154	187	220	275	550
GIS 直結形 (ガス開閉装置用)	ガス CT	←————→					
	ガス EVT	←————→					
自立形 (開放形変電設備用)	油入 CT	←————→					
	ガス EVT	←————→ 新製品の適用範囲					
モールド分割形 CT (主回路絶縁は絶縁ケーブル)		←————→					



図 1 220 kV 自立形ガス EVT の設置状況

4 まとめ

開放形変電設備への対応ができるように、自立形ガス EVT を製品化した。すでに東京電力パワーグリッド（株）、四国電力送配電（株）、九州電力送配電（株）、および IPP^{注1)} へ納入しており、電力取引用途だけでなく、保護継電器用としても展開されている。今後の発送電分離市場の拡大に伴い、今回開発した自立形ガス EVT を含めた東光高岳の変成器製品がさらにお客さまへ貢献できるように取り組んでいく。

■ 語句説明

注 1) IPP：独立系発電事業者の略

村上 政倫

計量事業本部

油・ガス変成器製造部 設計グループ 所属

屋外用分割形変流器の ラインアップの拡充

■ 小林 晃一
Koichi Kobayashi

1 はじめに

2020 年度から始まった電力の発送電分離に伴い、電力会社の送配電部門の中立性がより明確に求められることから、電力取引用計量器の設置が義務付けられている。既存のケーブルに直接設置できる分割形変流器（以下、CT）を用いて既存発電設備の改修作業の負担削減に寄与してきたが、より高い電圧クラスに使用されている太いケーブルにも対応できる CT を開発したので紹介する。

2 CT の定格仕様とラインアップ

CT の仕様ならびに分割形 CT のラインアップは、表 1 のとおりである。

開発した CT はケーブル貫通穴径が $\phi 190$ と既存の CT の貫通穴径 $\phi 125$ よりも大幅に広げたことにより、これまでに設置してきた発電設備よりも高電圧および大電流のケーブルにも設置することが可能となった。

また、絶縁に油を使用しないため、お客さま設備の不燃化に寄与している。

表 1 CT の定格仕様，ラインアップ

項目	仕様		
形式	新規開発品 OCA-16	OCA-11BZ	OCA-13Z OCA-13AZ
設置場所	屋外，屋内		
準拠規格	JIS C 1736-1, -2 (2009)		
耐電圧	ケーブルにて絶縁を確保		
定格周波数	50 Hz または 60 Hz		
定格一次電流 適用範囲	750 A～ 4,000 A	750 A～ 1,200 A	1,200 A～ 3,000 A
定格二次電流	5 A		
定格二次負担	5 VA～15 VA（一次電流値による）		
確度階級	0.3 W		
ケーブル貫通 穴径	$\phi 190$	$\phi 125$	$\phi 125$
質量	75 kg	61 kg	38 kg
備考	封印カバー付		



図 1 CT 設置状況



図 2 封印カバー設置状況

3 まとめ

東光高岳の分割形変流器は東京電力パワーグリッド（株）、関西電力送配電（株）、四国電力送配電（株）、九州電力送配電（株）へ納入している。今後、東光高岳の変成器製品が、発送電分離に対するお客さまの検討から据付までの負担削減へさらに貢献できるように取り組んでいく。

小林 晃一

計量事業本部
モールド変成器製造部 設計グループ 所属

新形 6 kV 固体絶縁開閉装置 (スマート SIS) の開発

■ 伊藤 忠慶
Tadayoshi Ito

■ 佐藤 裕康
Hiroyasu Sato

■ 佐々木 邦彦
Kunihiko Sasaki

1 はじめに

6 kV 開閉装置は、配電用変電所から配電線への送電および事故遮断のために適用している。昭和 30 年代から 40 年代半ばまでは気中絶縁方式のキュービクルを、それ以降はコンパクト化および環境調和を追求した小型かつ、安全な固体絶縁方式の開閉装置（Solid Insulated Switchgear：SIS）を適用し、キュービクルに対し据付面積 55% 減を実現している。

一方、SIS を適用し始めてから 40 年以上が経過し、経年による設備劣化が進んできている。そこで、ICT 技術の適用、ケーブル配線の極小化、設置スペースの縮小化、状態監視を行うためのセンシングを取り入れた固体絶縁開閉装置（スマート SIS）を開発したので、ここに紹介する。

2 スマート SIS の構造

2.1 外観

図 1 にキュービクル、SIS（従来器）と今回開発したスマート SIS の外観比較を示す。



最大構成 (11 面相当)	気中 キュービクル	SIS（従来器）	スマート SIS
据付面積 [㎡]	18.2 (100%)	9.2 (50%)	8.2 (45%)
機器寸法 [mm] W × D × H	7,000 × 2,450 (100%)	5,400 × 785 × 2,140 (22%)	4,760 × 900 × 1,700 (16%)
備考	—	アナログ形 / デジタル形 リレー搭載	デジタル形 保護制御装置 搭載

図 1 外観構造比較⁽¹⁾

2.2 仕様概要⁽²⁾

スマート SIS は、仕様合理化による機器価格低減と、温湿度センシング、機器動作監視による機構部の状態監視などの経年劣化による保全対策や、保守省力化に向けたスマート化などの仕様を反映した。

6 kV スマート SIS の主な定格・仕様を表 1 に示す。

スマート SIS 外観構造を図 2 に示す。図 2 は、配電線 5 回線であり、最大 8 回線まで対応可能である。

表 1 主な定格・仕様

区分	項目	定格・仕様
固体絶縁 開閉装置	定格電圧	7.2 kV
	定格電流	2,000 A / 600 A
	定格短時間耐電流	12.5 kA, 2 秒
	雷インパルス耐電圧	45 kV
	商用周波耐電圧	22 kV
真空遮断器	定格遮断電流	12.5 kA
	操作方式	電磁操作方式
断路部 接地開閉器	操作方式	電動操作方式
変流器	定格	2,000/1A 1 VA
		600/1A 1 VA
零相変流器	定格	200/1.5 mA
計器用変圧器	定格負担	50 VA × 3
避雷器	公称放電電流	10 kA
所内変圧器	定格容量	30 kVA
保護・制御	保護制御装置	SIS の上部へ搭載
	インターロック	ソフト方式

デジタル形保護制御装置を SIS に搭載することで、CT の低負担化を実現した。さらに、保護制御装置の高精度化により、従来のダブルレシオ CT をシングルレシオ化することで、構造を簡素化した。

動作開始電圧 17 kV 以上、制限電圧の低い避雷器 (LA) を SIS にコンパクトに内蔵することで、雷インパルス耐電圧を低減したものとなっている。

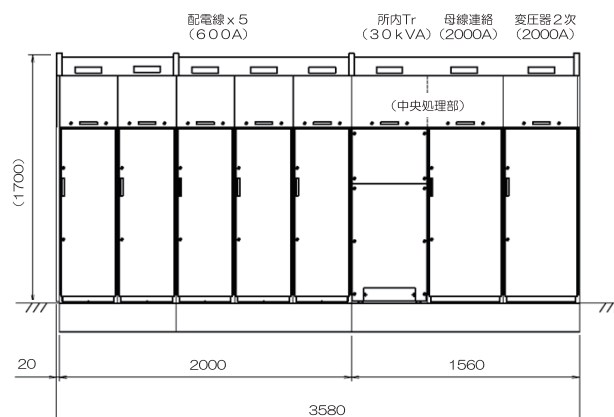


図 2 スマート SIS 外観構造

3 スマート SIS の特長

スマート SIS は、従来形 SIS の特長である固体絶縁方式を踏襲するとともにデジタル化や電磁操作機構の採用ならびに ICT 技術を適用した。これによって信頼性向上と、保守省力化を実現した。

図 3 に、配電線ユニットの内部構造を示す。

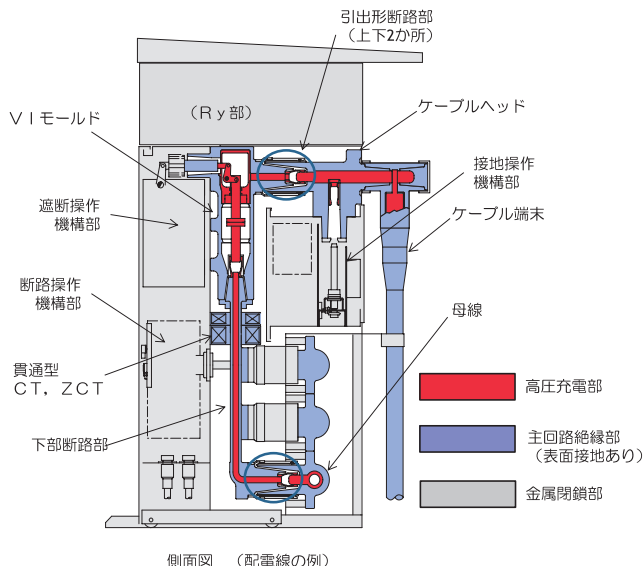


図 3 配電線ユニットの内部構造

3.1 電磁操作機構の採用

真空遮断器は、従来の電動ばね操作方式から、電磁操作方式とすることで構造の簡素化を実現した。特に機構部は、ラッチレス構造および無給油軸受けによるグリスレス化、コンデンサレスによる部品交換の省略など、保守コストの削減をコンセプトとしている。図 4 に電磁操作機構を示す。

真空バルブの遮断器は、動作完了時間や遮断部接点の接触位置近傍での動作速度の要求性能が規定されている。これらの要求性能を満足し、かつ、投入電流のピー

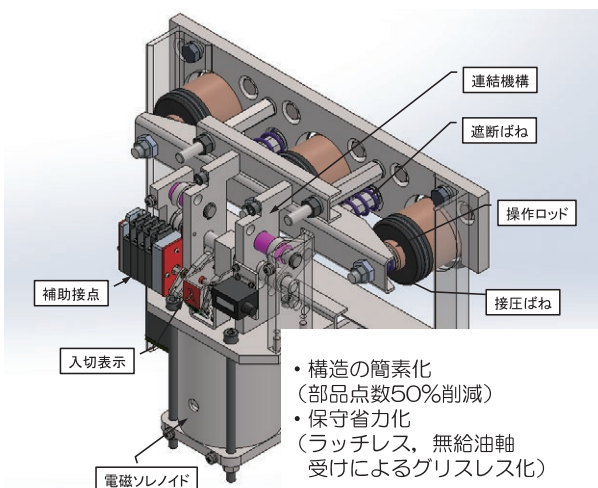


図 4 電磁操作機構

ク値を抑えるため、電磁操作機構の電磁コイルや遮断ばね、接圧ばねの操作エネルギー最適化設計を行った。CAE 技術を活用し、3DCAD から電磁界解析とモーション解析（機構解析）の連成解析で最適設計を行った。

図 5 に投入動作時の操作電流とストローク特性について、解析値と、実器の測定値の比較を示す。操作電流のピーク値や、投入接点直前の動作速度は、実器においても要求仕様を満足する結果を確認できた。

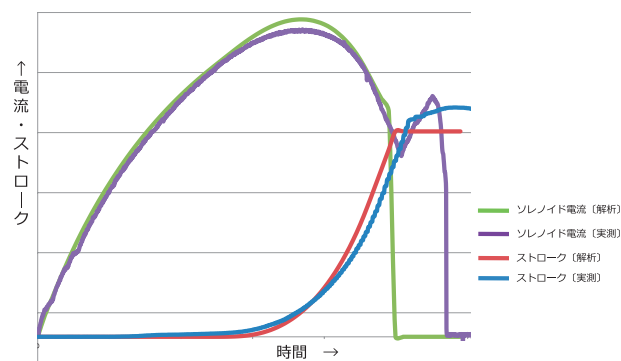


図 5 投入動作時の操作電流とストローク特性（解析と実測比較）

3.2 仕様緩和による最適設計

スマート SIS 開発にあたり、温度上昇限度、定格遮断電流、定格短時間耐電流、雷インパルス耐電圧の仕様緩和、および電磁操作機構、ソフトインターロック採用など機器のコストダウンに影響する合理化仕様を検討した。

遮断器操作機構のほか、断路部 (DS)、接地開閉器 (ES) の仕様に合わせた最適設計を目指し、モデルチェンジを行った。例として図 6 に ES 操作機構比較を示す。操作機構部品点数を約 30 % 削減、電装部品の基板化、ソフトインターロック、検電装置 (VD) のソフト化、組立作業時間の短縮により、コストダウンに大きく寄与した。

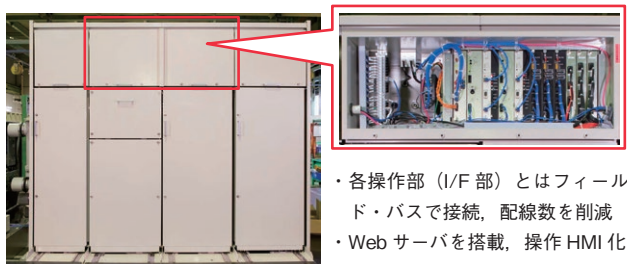
接地開閉器 操作機構比較	
従来器	スマート SIS

図 6 接地開閉器 操作機構比較（例）

4 ICT を活用したスマート化

4.1 保護制御機能

保護・計測・監視制御機能を集中形保護制御装置（中央処理部）として一体化しスマート SIS 内に搭載するこ

図 7 集中形保護制御部⁽¹⁾

とで、コンパクト化とコストダウンを実現させた（図 7）。

なお保護制御方式は、メイン-メイン（M1-M2）構成とした集中形保護制御方式とし、電源や CPU 故障時、異常系を自動的にバイパスさせることで、正常系のみで保護・制御できることから、機能喪失することなく運用継続が可能となっている。図 8 にシステム構成図を示す。

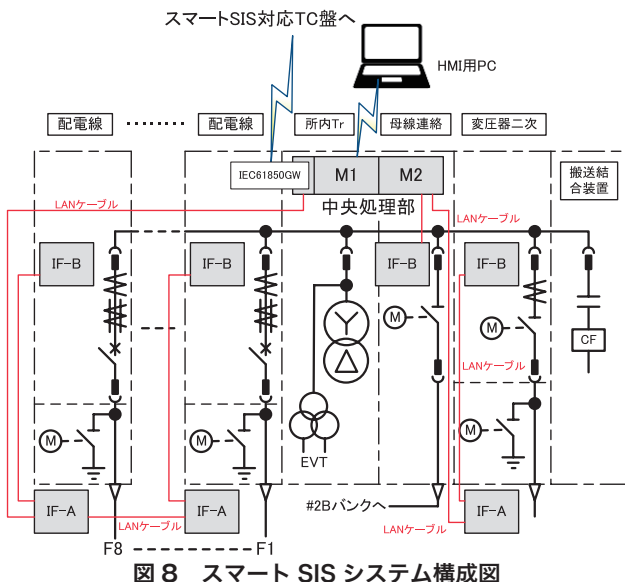


図 8 スマート SIS システム構成図

4.2 機構部のデジタル化

従来装置では操作機構部は補助リレーや各種接点などのハードウェアで構成され、さらにメンテナンスパネル（現地で操作可能な SW や LED のついたパネル）を有していたが、これらを各操作箱内の IF 部にてソフトウェアで実現させ、HMI 用 PC 化することにより、部品点数を大幅に削減した。各 IF 部と中央処理部は LAN ケーブルで接続され、シリアル伝送化することで、SIS 箱内の接続ケーブル類の削減も行った。

したがって、中央処理部で一括して各 IF 情報（機器情報など）が確認できるようになっている。

4.3 HMI

HMI 用 PC を中央処理部に LAN ケーブルで接続することで、SIS 内の機器操作はすべて HMI にて直接操作が行えるようになっている。さらに SIS に関する各種情報（機器状態、計測情報、データ・セーブなど）もすべ

て確認可能である。HMI 用 PC には Java などのプラグイン・ソフトを必要としないため、HMI はブラウザには依存しない。

またセキュリティを向上させるため、HMI 使用時には、あらかじめ登録されたユーザ ID やパスワードを要求する認証機能を搭載した（表 2）。

表 2 HMI の認証機能

項 目	内 容	備 考
ユーザー登録数	最大 100 ユーザ	
ユーザー ID	1～16 文字	英文字、数字、記号のいずれか（大文字・小文字は区別）
パスワード	8～16 文字	
権 限	管理、運用、閲覧から選択	実施権限
パスワード有効期限	無、30 日、60 日、90 日、120 日、180 日、360 日から選択	
パソコン接続台数	最大 5 台	IP アドレス設定可能
保 存	ハッシュ値による暗号化保存	

4.4 ソフトインターロック

従来装置では機器操作のインターロックはハードウェアで構成されていたが、部材や配線作業時間削減を目的に、ソフトウェア化した。これらインターロック条件は、HMI にて確認が行える（図 9）。

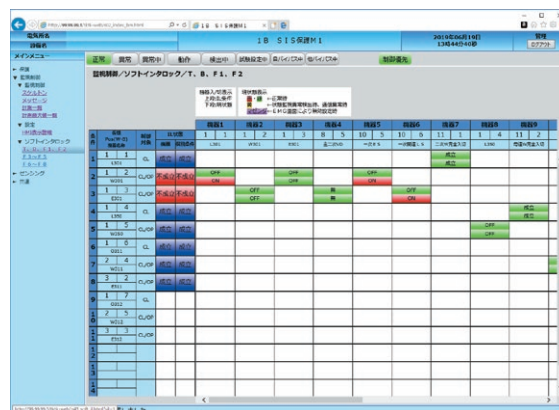


図 9 ソフトインターロック HMI 画面

4.5 センシング

スマート SIS の異常診断および異常予兆の把握を目的に、以下のセンシング機能を搭載している。

- ・遮断部、断路部、接地装置の動作時間測定
- ・可動箱内、主回路断路部の温湿度測定
- ・SIS 主回路部の絶縁劣化の兆候となる間欠地絡などの検出記録

これら各センシング情報は、中央処理部にて HMI 用 PC にて確認が行え、さらに CSV データで保存も可能となっている。

図 10 は温湿度測定の HMI 画面を示している。

図 11 はモールド沿面の部分放電時に発生した零相電

圧, 零相電流波形を表示した HMI 画面である。

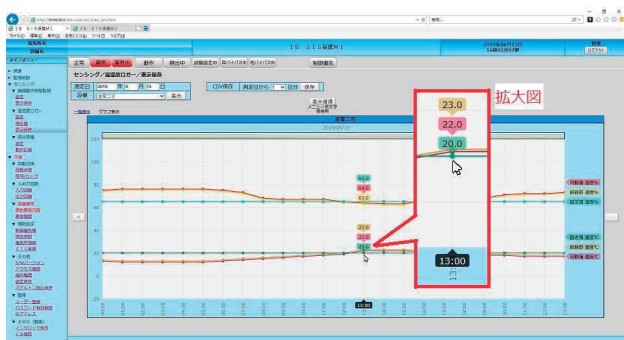


図 10 温湿度グラフ HMI 画面

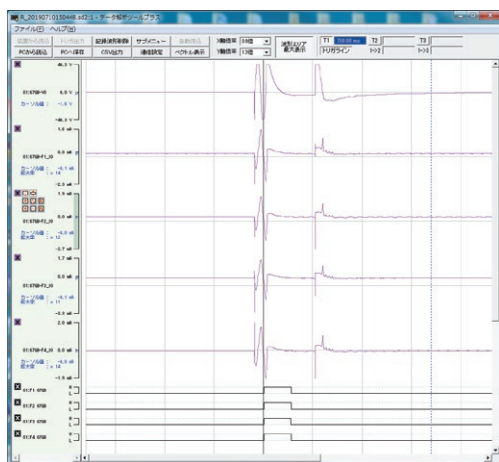


図 11 モールド故障時の HMI 画面⁽¹⁾

モールド部の故障では、地絡事故に至る前の前駆的な事象として、モールド故障部の一時的な絶縁破壊（破壊後に一旦絶縁回復する）の影響から、瞬間的な地絡事象が発生する。この事故兆候を検知するために高速サンプリング（153.6 kHz）かつ全アナログ CH の同時サンプリングを採用した。これにより、外部の地絡事故なのか、内部モールド事故なのかを中央処理部で判断できる。

これらセンシング情報はすべて中央処理部に集められ、HMI にて設定された条件（温湿度レベル、時間など）で、上位システムに警報出力できるようになっている。

4.6 国際標準化対応

スマート SIS からの情報は国際標準規格である IEC61850 伝送により光ケーブルにて IEC61850 対応遠方監視制御装置（SIS-TC 盤）と接続される。これにより従来あった多くの制御ケーブルが光 LAN ケーブルに代替され、大幅に削減が可能となり、部材削減のみならず現地工事期間の短縮にも寄与できる。

図 12 に、スマート SIS と上位接続装置となる SIS-TC 盤との変電所システム構成図を示す。

センシング情報はセキュリティを考慮し、保護監視制御情報用とは物理的にポート分離された LAN ポートで HMI 画面が確認でき、別システムに伝送可能となっている。

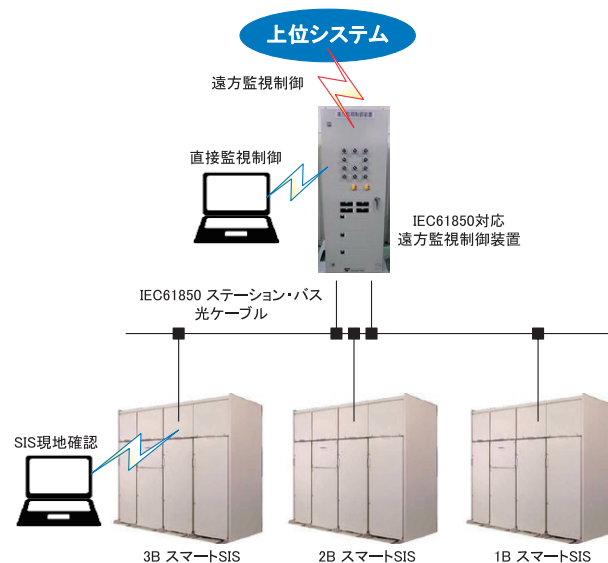


図 12 変電所システム構成図⁽¹⁾

5 おわりに

スマート SIS は、従来器より大幅なコストダウンを達成し、2019 年 9 月より納入している。初号器を図 13 に示す。

搬送結合装置 (既納品) 変圧器 2 次 (2000A) 母線連絡 (2000A) 所内 T r (30 kVA) 配電線 x 3 (600A)



図 13 スマート SIS 初号器

最後に本開発において、多くの方々の知見を借りるなどのご協力をいただいた。紙面をお借りし、お礼申し上げる。

■参考文献

- (1)「新形 6 kV 固体絶縁開閉装置 (スマート SIS) の開発 (その 2)」, 令和 2 年電気学会全国大会, 6-050 (2020)
- (2)「新形 6 kV 固体絶縁開閉装置 (スマート SIS) の開発 (その 1)」, 令和 2 年電気学会全国大会, 6-049 (2020)

伊藤 忠慶

電力プラント事業本部
開閉装置製造部 固体絶縁スイッチギヤグループ 所属

佐藤 裕康

電力プラント事業本部
開閉装置製造部 固体絶縁スイッチギヤグループ 所属

佐々木 邦彦

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

6 kV 分路リアクトルの開発

■ 都 基俊
Gijun Do■ 仲山 雄貴
Yuki Nakayama

1 はじめに

一般的に電力を使用する需要家の負荷は、電動機などの誘導性負荷の割合が比較的高いことから遅れ力率であるが、過度な遅れ力率は電力損失の増加、電圧降下の増大、設備利用率の低下などにつながる⁽¹⁾。そのため高圧需要家などでは、電力会社との契約電力に応じて適切な容量の進相コンデンサを設置し、遅れ力率の改善を図ることが多い。

しかしながら、需要家の進相コンデンサは電力の使用状況を問わず常時接続されていることも多く、軽負荷となる休日や夜間になると、過度な進み力率に至るケースがある。このような需要家が多数接続された6 kV配電線では、電線インピーダンスの影響により電圧上昇（フェランチ現象）が発生することがある。これは、配電線の末端において特に顕著であり、適正電圧維持の観点から問題となる場合がある。

この対策の一つとして、配電線に分路リアクトルを設置する方法がある⁽²⁾。分路リアクトルは、遅れ無効電力を発生させることで電圧調整を行う機器であり、進み力率となった配電線に接続し力率を改善することで、電圧上昇を緩和することができる。現在、日本では再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）の施行に伴い、6 kV配電線への太陽光発電の大量・分散導入が進むなか、電圧安定化に寄与する分路リアクトルは、重要性を増している。

これまで、東光高岳では高電圧・大容量の分路リアクトルを製造、販売してきた。今回、これまで蓄積したリアクトルの設計・製造技術をもとに、6 kV分路リアクトルの開発を行ったので紹介する。

2 構成

通常、分路リアクトルは、開閉装置および制御装置と組み合わせて使用される（図1）。システムとしては、制御装置にて6 kV配電線の電圧を監視し、電圧上昇を検知すると開閉装置が投入され、分路リアクトルが配電線に電氣的に接続される仕組みである。分路リアクトルが接続されることにより、配電線全体に遅れ無効電力が流れ、進み力率が補償される。このことにより、電圧上昇が緩和される。

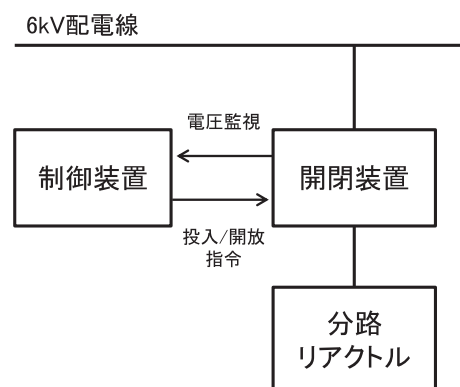


図1 分路リアクトル使用時の構成

3 特長

以下に、開発した分路リアクトルの特長を述べる。

(1) 3容量をラインナップ

150 kvar、300 kvar、450 kvarの3容量の分路リアクトルを開発した。これにより、個々の配電線の進み力率の状況に応じて、適切なリアクトル容量を選択することが可能となるため、よりの確な電圧補償が期待できる。

(2) 単柱装柱方式に対応

リアクトルの外箱側面にはハンガー座を設け、付属のハンガーバンドを使用して装柱する。この構造により、単柱での装柱が可能となり、装柱占有面積の縮小化を図った。

なお、単柱装柱の実現に当たっては、以下の方策によりリアクトルの小型化・軽量化を図った。

・耐熱絶縁紙の採用

コイル（巻線）の絶縁に、当社製変圧器などで実績のある耐熱絶縁紙を採用した。巻線温度上昇限度を従来の55℃から65℃に引き上げることで、コンパクトな構造とした。

・ギャップ付き鉄心の採用

リアクトルの鉄心構造として、高磁束密度化が可能であり、巻線の小型化ならびに低損失化に有利なギャップ付き鉄心を採用した。

・波板放熱器の採用

外箱の放熱器には、当社製6 kV油入変圧器で使用している波板（コルゲートボード）を採用し、機器を小型化した。

(3) 塩害地域への適用

耐汚損性に優れた高圧ブッシングを採用した。また、外箱および放熱器の塗装に亜鉛末塗料（ジンクリッチペイント）を採用し防食性能を向上させており、海岸付近のような塩害地域での適用も可能とした。

(4) 生産性

ギャップ付き鉄心の製作に当たっては、専用の生産治具を整備することで生産性の向上を図った。また、当社製 6 kV 油入変圧器における巻線構造の採用や、標準的な部品との共通化を図った。

4 仕様および構造

4.1 仕様

分路リアクトルの主な仕様を表 1 に示す。

表 1 分路リアクトルの主な仕様

項目		仕様		
相数		3		
定格周波数 (Hz)		60		
定格電圧 (V)		6,900		
最高運転電圧 (V)		6,900		
結線		星型結線		
定格容量 (kvar)		150	300	450
定格電流 (A)		12.6	25.1	37.7
定格リアクタンス (Ω /相)		317	159	106
絶縁性能		AC 22 kV, LI 60 kV		
騒音レベル		50 dB 以下 (5 m 地点)		
温度上昇限度		巻線 65 K, 油 60 K		
外形寸法 (mm)	幅	995	1,035	1,065
	奥行	620	630	750
	高さ	1,370	1,665	1,815
総質量 (kg)		600	890	1,270
耐汚損特性区分		0.35 mg/cm ² 以下 (超重汚損)		
付属品		単柱装柱用ハンガーバンド ブッシング保護カバー		

4.2 構造

分路リアクトル 450 kvar の外観を図 2 に示す。



図 2 分路リアクトルの外観 (450 kvar)

5 おわりに

今回紹介した分路リアクトルは、2020 年 5 月時点において、開発品の最終試験を実施している状況である。開発完了後、本品の共同開発先である九電テクノシステムズ(株)を通じて、九州電力送配電(株)への納入を予定している。

今後は、本開発品をもとに、6 kV 分路リアクトルの製品ラインナップの拡充を図っていく所存である。

■参考文献

- (1) 安藤：「電気技術解説講座」，日本電気技術者協会 (2007)
- (2) 満山：「電気評論」，539 号，p.68，電気評論社 (2009.8)

都 基俊

電力機器事業本部
小型変圧器製造部 設計グループ 所属

仲山 雄貴

電力機器事業本部
小型変圧器製造部 設計グループ 所属

IEC61850 適用・デジタル変電所向け 監視制御システム (SAS+BCU+Ry)

■ 成田 和彦
Kazuhiko Narita

1 はじめに

東京電力パワーグリッド（株）新榛名変電所に隣接している UHV^{注1)} 100 万 V 実証試験場において、所内のキュービクル（以下、Cub）に実装された静止形リレーの更新に合わせて、国際標準規格 IEC61850 に準拠した保護リレー（以下、Ry）と監視制御システムを納入した。

従来、国内の電力会社における監視制御システムの情報伝送は、各電力会社が固有の規格を用いた方式を採用している。このたび、国際標準規格である IEC61850 を採用することにより汎用性が高くマルチベンダ化が可能な監視制御システムを構築・納入したので、その概要を紹介する。

2 装置概要

2.1 監視制御システムの構成（図 1）

監視制御システムは、画面から機器制御・故障表示・計測表示をする SAS^{注2)} と、電力設備と情報の受け渡しを行う BCU^{注3)} と、Cub 実装の Ry で構成した。

SAS の基本ソフトウェアには ATS^{注4)} 社の @Station^{注5)} を採用し、高いカスタマイズ性能を活かして、日本特有の操作や故障表示を短期間で実現した。

各装置間の接続は、光ファイバケーブルを介して、国際標準規格 IEC61850 の MMS^{注6)} 伝送を採用した。

また、リモート端末を設置し、遠隔運用を可能とした。

BCU 盤には、SEL^{注7)} 社 IED^{注8)} と GE^{注9)} 社 IED を実装し、IEC61850 によるマルチベンダ接続を行い、実機器の監視制御システムとして適用できることを確認した。

2.2 SAS の主な機能

- (1) 所内系統表示による監視制御：単線結線図と BCU / Ry 正面パネル表示および異常表示で構成し、的確な監視制御が可能なヒューマンマシンインタフェースを実現、電力設備の機器制御、設備状態の把握、計測値を表示
- (2) アラーム表示：異常発生時などのアラームメッセージを表示
- (3) トレンド表示：計測値のトレンドを表示
- (4) 通信状態表示：IED 間の通信状態を表示
- (5) 制御権設定：SAS とリモート端末の制御権設定

3 おわりに

IEC61850 によるマルチベンダ構成のデジタル変電所への適用が確認できた。今後も、IED を活用したデジタル変電所の構築に向けて開発を進めていきたい。

■ 語句説明

- 注 1) UHV：Ultra High Voltage の略称
 注 2) SAS：Substation Automation System の略称
 注 3) BCU：Bay Control Unit の略称
 注 4) ATS：Applied Technical Systems Joint Stock Company の略称
 注 5) @Station：監視制御画面カスタマイズソフトウェア
 注 6) MMS：Manufacturing Message Specification の略称
 注 7) SEL：Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. の略称
 注 8) IED：Intelligent Electronic Device の略称
 注 9) GE：General Electric Company の略称

成田 和彦

エネルギーソリューション事業本部 電力システム製造部
監視制御システム設計グループ 所属（執筆時）

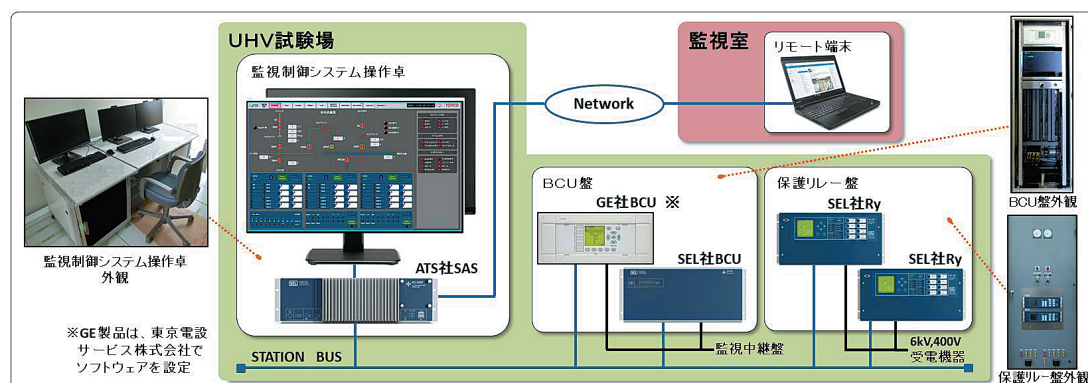


図 1 監視制御システム構成

90 リレー内蔵 LR 連動制御装置

■ 前澤 格
Itaru Maezawa

■ 菅原 雅寛
Masahiro Sugawara

1 はじめに

東京電力パワーグリッド（株）では、現在運用している 2 階層制御システム^{注1)}を統合した「次世代監視制御システム」の構築に合わせ、一次電圧が 275 kV 以下の変電所を対象にした変電所個別の電圧制御装置（以下、VQC）から監視制御システムによる全系 VQC（以下、VVC）への切り替えが予定されている。

「次世代監視制御システム」の電圧制御機能は、専用ネットワークを利用して各変電所に対して制御指令が出力される。ネットワーク回線断などが発生した場合の制御不能に備えるため、各変電所にバックアップ用電圧調整リレー（以下、90 リレー）を設置する必要があることから、90 リレー内蔵の LR 連動制御装置を開発した。

変電所の設備形態により一般変電所用と地下式ユニット変電所の対象設備に応じた LR 連動制御装置構成が必要となる。今回、一般変電所用の LR 連動制御装置の開発を完了し、2020 年 3 月に納入したので、その概要を紹介する。

2 装置概要

2.1 装置構成・仕様

これまでの VQC では、主変圧器との入出力情報処理や主変圧器を並列運転するための連動操作条件の受け渡しは、補助リレー回路で構成される VQCIF 盤を主変圧器ごとに設置している。

また、並列運転している変圧器間のタップ連動操作に必要な主変圧器接続情報やタップ操作信号を受け渡すための LR 連動制御盤を設置している。さらに LR 連動制御盤には、VQC が停止した場合、二次電圧の自動制御を可能とするため、90 リレーの設置を考慮したシステム構成としている。

今回開発した 90 リレー内蔵 LR 連動制御装置は、補助リレー回路で構成していた系統判別機能やタップ並列判定のソフトウェアシーケンスによる対応や HMI を介したソフトウェアスイッチの採用により、設置スペースと機能集約を実現し、補助盤と演算盤によるシステム構成とした。

補助盤では、併用中主変圧器間のタップ連動制御操作に必要な主変圧器接続情報やタップ操作信号など入出力情報の受け渡しを行い、演算盤では、タップ並列判定や

積分制御などのソフトウェア演算を実施する構成とした。

ソフトウェア演算部は、2 系列構成とすることで単一故障で LR 連動制御装置の機能停止に至ることがないよう考慮した設計としている。

表 1 に装置仕様、図 1 に装置外観を示す。

表 1 装置仕様

項目	仕様
外形寸法	幅 700 mm × 奥行 450 mm × 高さ 2,300 mm
盤面数	補助盤 × 1 面、演算盤 × 1 面
その他	材質：ステンレス（扉部のみ塗装） IP 等級：IP2X 相当 ^{注2)}



図 1 装置外観（正面左：補助盤、右：演算盤）

2.2 機能

(1) 制御対象系統・設備判別機能

母線構成に応じ制御対象となる母線および主変圧器を自動選択し、各系統の二次母線電圧を基準値に維持するタップ自動制御の 90 リレーの演算要素（90-1、90-2）を実装している。主変圧器接続状態、母線接続状態および制御対象設備は、HMI 画面上で確認可能とした。

各変電所の設備構成に対応できるよう遮断器、断路器の有無設定および入切設定を HMI に設け、4 ブスタイ / 1 ブスタイ母線構成など幅広く対応できるようロジックを構成し、標準化を図った。

(2) タップ連動操作・制御出力機能

主変圧器接続情報やタップ操作信号から併用運用して

いる主変圧器を判別し、タップ並列判定、タップ連動操作を可能とした。

演算部の入出力信号部および演算ロジック上の実装設備数は主変圧器 4 台を標準とし、ハードウェア分離した 2 系列分を実装している。

(3) 90 リレー

母線の分割運用に対応できるよう 90 リレーを 2 要素実装している。積分制御における整定値には平日／休日の 2 パターンを準備し、系統実態に合わせて 16 ステップの整定を可能としている。

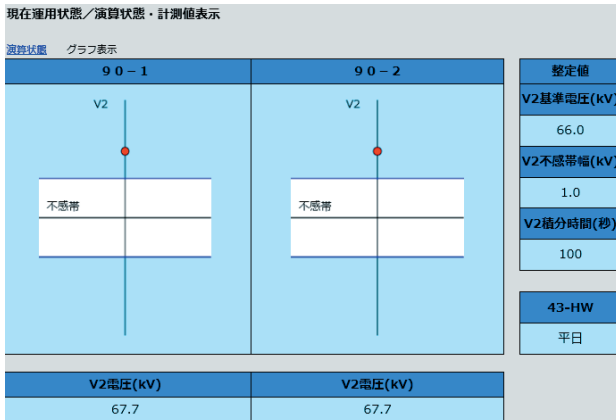
なお、積分演算には線間電圧実効値の三相平均を使用し、検出精度は総合誤差（定格比） $\pm 0.5\%$ 以下の性能を有している。

(4) HMI 機能

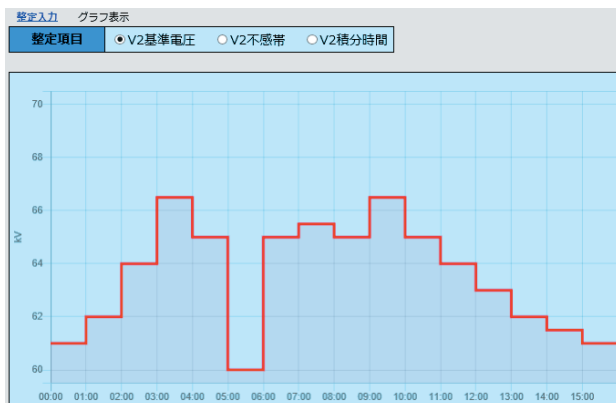
汎用パソコンのブラウザを使用し、整定、監視制御に関する設定およびタップ操作を可能とし、使用するパソコンにはプラグインソフトを不要とした。

HMI では運用面で有用となる入力電圧値の計測機能や入力整定値のグラフ表示機能、演算状態を数値またはグラフ表示で運用状態が確認できる表示機能などを実装している。

HMI 画面例を図 2 に示す。



(a) 演算状態（グラフ表示）



(b) 整定値情報（グラフ表示）

図 2 HMI 画面例

(5) その他

タップ指令動作時や装置異常時の各種情報を確認・保存するデータセーブ機能の搭載、主変圧器の電源喪失を主変圧器ごとに警報出力できる回路の実装など、保守・運用作業の効率化に貢献できる機能も備えている。

補助盤には、VVC から定周期で送信される信号を常時受信し、通信故障などの原因で信号が途絶した場合、自動的に 90 リレーを起動する自動切換装置（有効設置スペース：幅 600 mm × 奥行 350 mm × 高さ 200 mm）が実装可能である。

3 おわりに

LR 連動制御装置は、高性能 CPU や最新 FPGA を採用し、ハードウェアを完全分離した 2 系列構成とすることで信頼性を確保した。また、Web サーバの搭載による遠隔監視や制御などの運用の省力化、操作監視の効率化にも寄与している。

今後は、地下式ユニット変電所に対応した LR 連動制御装置への製品適用も予定している。

末尾ながら、今回の開発に多大なるご指導・助言を頂いた関係各位に対し、厚くお礼申し上げます。

■ 語句説明

注 1) 2 階層制御システム：地方送電系統と配電系統の 2 つの系統階層にかかわる監視制御。

注 2) IP：International Protection の略。

機器内部への固体や水の侵入に対する保護の程度を示す保護等級。IP2X は直径 12 mm の試験指が危険な部分に接近しない仕様。

前澤 格

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

菅原 雅寛

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

IEC61850 対応配電用変電所 遠方監視制御装置

■ 佐藤 一男
Kazuo Sato

■ 川俣 陽輝
Haruki Kawamata

1 はじめに

東京電力パワーグリッド（株）の配電用変電所においては、6 kV 固体絶縁開閉装置（SIS）が適用されているが、近年、更新時期を迎え、新形 6 kV 固体絶縁開閉装置（以下、スマート SIS）に更新することになった。

IEC61850 対応配電用変電所遠方監視制御装置（以下、本装置）は、スマート SIS との接続に国際標準規格である IEC61850 を利用しており、伝送をネットワーク化することによる制御ケーブルの大幅な削減、異メーカーのスマート SIS との接続を実現している。

今回、従来テレコン（TC）を IEC61850 対応するとともに、新たな機能を追加した。本装置を開発・納入したのでここに紹介する。



図 1 本装置外観

2 特長

本装置の特長を以下に記す。

(1) 国際標準 IEC61850 の適用

従来 TC では、SIS と多くの制御ケーブルで接続されていたが、これを国際標準 IEC61850 による光伝送化した。

上位システムからの監視・制御は従来どおりとするために、IEC61850 の論理ノードやデータオブジェクトを東京電力パワーグリッド（株）、（一財）電力中央研究所などといっしょに作り込んできたことから、上位システムからの監視・制御は従来どおり可能としたまま、マルチベンダ対応可能な装置として構築することができた。

図 2 にシステム構成図を示す。

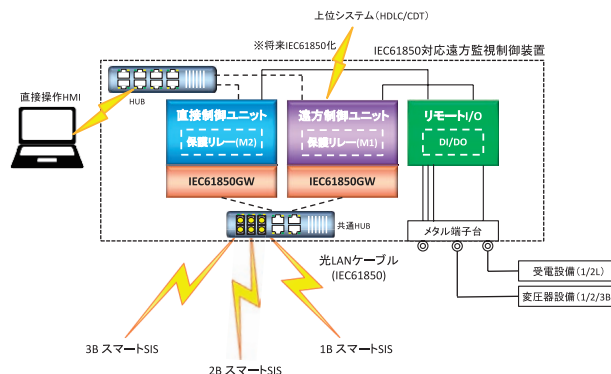


図 2 システム構成図

(2) セキュリティの強化

従来の直接操作盤の機能をヒューマンマシンインターフェース（以下、HMI）を用いて高度化して本装置に内蔵、上位システムとの通信機能を遠方制御ユニットに実装した。HMI には表 1 に示す認証機能を実装し、セキュリティを強化した。

表 1 HMI の認証機能

項目	内容	備考
ユーザ登録数	最大 100 ユーザ	
ユーザ ID	1～16 文字	英文字、数字、記号のいずれか（大文字・小文字は区別）
パスワード	8～16 文字	
権限	管理、運用、閲覧から選択	実施権限
パスワード有効期限	無、30 日、60 日、90 日、120 日、180 日、360 日から選択	
パソコン接続台数	最大 5 台	IP アドレス設定可能
保存	ハッシュ値による暗号化保存	

また、アクセスや操作ログも各 2,000 件記録でき、不正利用の防止・追跡を可能とした（図 3）。

(3) 保護・制御機能の一体化

従来、受電保護リレーをリレー・ユニットもしくはリレー盤として設置していたが、本装置においては遠方制御/直接制御ユニットにおおの搭載し、保護・制御一体形ユニットとした。本装置が正常な場合は遠方・直接制御ユニットの AND 条件で制御する。どちらかのユニットが故障などで異常となった場合は、正常なユニッ



図 3 証設定用 HMI 画面

トのみの動作で保護が可能になっており、ユニット故障時でも運用継続が可能な構成とした。

(4) シミュレータ機能の搭載

スマート SIS の機器状態を模擬するシミュレータ機能を搭載した。本シミュレータは、HMI から操作可能となっているため、上位システムとの対向試験が容易に行え、スマート SIS 更新工事に伴う停止期間の短縮、上位システム対向試験の効率化を実現した (図 4)。



図 4 スマート SIS シミュレータ画面 (HMI 画面)

3 機能・仕様

(1) 機能概要

- ・上位システムからの遠方制御，表示・計測
- ・HMI 表示（単線結線図画面）による変電所全体の監視・制御・表示
- ・変電所設備ごとの制御電源分割
- ・バイパス運用可能な保護機能（受電保護リレー）将来は変圧器保護，電圧調整リレーを搭載予定
- ・自動切替機能（逆潮流対応自切機能を実装）
- ・配電線事故区間・ロック区間の算出
- ・搬送結合装置との I/F 機能（搬送変復調部搭載）
- ・変電用伝送ルート切替機能
- ・主変 2 次ケーブル地絡検出機能

- ・逆潮流時の単独運転防止機能
- ・ソフトインターロック機能

(2) HMI による監視・制御

変電所が直接運転時には直接制御ユニット HMI にて監視・制御が行え、遠方運転時は遠方制御ユニットにて監視・制御を行う。ただし直接制御ユニット故障時、遠方制御ユニットでも直接制御が HMI で行えるように、バックアップ機能を持たせている。

(3) 上位システム対向

スマート SIS 対向は国際標準 IEC61850 対応としたが、上位システム間では従来伝送方式 (HDLC 伝送, CDT 伝送) が行えるようになっている。

将来 IEC61850 対向 (IP 伝送化) も可能なように、LAN ポートなど、裕度を持たせた装置構成となっている。

(4) ソフトインターロック機能

従来装置では、インターロックを補助リレーや接点などのハードワイヤードで構成されていたが、これをソフトウェア化した。インターロック条件はHMIで確認が行え、変更もユーザで行えるようになっている（図5）。



図5 ソフトインターロック用HMI画面

4 おわりに

国際標準である IEC61850 伝送が可能な遠方監視制御装置を 2019 年 8 月に現地納入し、実運用している。

今後、変圧器保護、電圧調整リレーのオプション機能を搭載する予定である。

末尾ながら、今回の開発に多大なるご指導・助言をいただいた東京電力パワーグリッド様、電力中央研究所様に対し、厚くお礼申し上げます。

佐藤 一男

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

川俣 陽輝

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

IP 化装置

(2 階層制御システム向けゲートウェイ)

■ 藤澤 光剛

Mitsuyoshi Fujisawa

■ 桑原 大輔

Daisuke Kuwahara

1 はじめに

東京電力パワーグリッド（株）では、変電所に遠方監視制御装置（TC）を設置し、制御所に監視制御システム（変電所集中監視制御装置または 2 階層制御システム）を設置し、双方を接続することで、変電所内設備を遠方から監視・制御することを実現している。

これまで遠方監視制御装置は監視制御システムとの接続に際し、HDLC^{注1)} または CDT^{注2)} 伝送方式を利用していたが、設備更新に伴い伝送に IP を利用した IP-I/F 装置^{注3)} や IP 伝送方式 TC への置き換えが進んでいる。IP 伝送に変わることにより、既存のネットワーク網を利用することができ、設備投資費用の削減が期待できる。

東光高岳では、2 階層制御システムと IP-I/F 装置、IP 伝送方式 TC 間の通信プロトコルを変換するゲートウェイとして IP 化装置を開発し、2019 年 3 月から納入を開始したので、ここに紹介する。



図 1 IP 化装置

2 装置構成

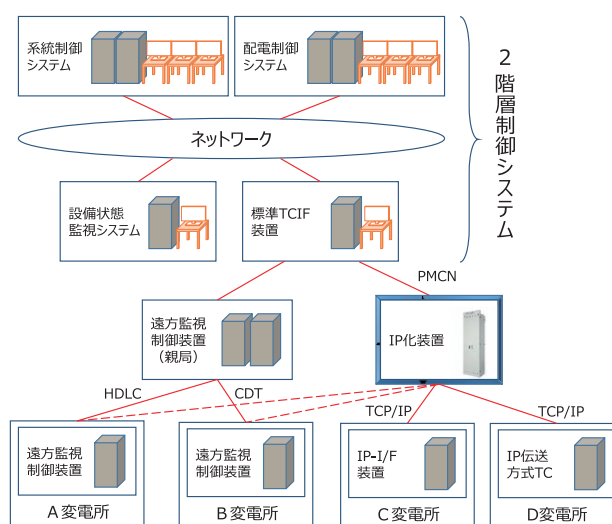
2 階層制御システムにおける監視・制御用の各システムは、標準 TCIF^{注4)} 装置を通して変換されたデータをもとに変電所内設備の監視・制御を行う。

既存の構成では、標準 TCIF 装置と遠方監視制御装置（HDLC、CDT）の間に設置されている親局にて、変電所内設備の情報を集約・変換し標準 TCIF 装置に伝送している。

IP 化装置は、標準 TCIF 装置と IP-I/F 装置や IP 伝送

方式 TC の間に設置され、変電所内設備の情報を集約・変換し、標準 TCIF 装置に伝送する。

IP 化装置を設置した際のシステム構成図を図 2 に示す。



※遠方監視制御装置はIP化装置経由での接続も可能

図 2 システム構成図

3 特長

3.1 ハードウェア

(1) 2 系列化による可用性の向上

本装置内で使用している CPU ユニットやハブ、電源などの機器は 2 系列化されており、障害が発生しても片系列にて運用を継続させることができる。また、片系列での運用を継続したまま故障した機器の交換が可能となっており、装置全体を停止することなく復旧させることが可能となっている。

(2) 消耗品レス化による保守性の向上

各機器は消耗品であるファンやバッテリーを搭載していないため、メンテナンスフリーな構成となっている。

3.2 ソフトウェア

(1) PMCN^{注5)} プロトコルの採用

本装置は、標準 TCIF 装置との通信に PMCN プロトコルを採用している。PMCN プロトコルは、二つの独立した回線に対して同一データを送信することで、片経路の障害発生時も継続して通信可能としている。

また、高速で通信ができる UDP^{注6)} を使用していな

がら、送受信に失敗したときに再送を行う送信保証機能も備えており、高速かつ高信頼な通信を実現している。

(2) Web ブラウザによるメンテナンス

2 階層制御システムにて IP 化装置の状態や装置異常情報の取得を行っている。

異常発生時には IP 化装置内の CPU ユニットに PC を直接 LAN ケーブルで接続することでメンテナンスが可能となっている。このとき、専用のソフトウェアではなく汎用の Web ブラウザにてアクセスすることができるため、特定の PC によらず作業することが可能となっている。

4 機能・仕様

4.1 機能

(1) 対向装置

変電所に設置された対向装置の一覧と、各装置との通信プロトコルを表 1 に示す。

表 1 対向装置と通信プロトコル

対向装置	プロトコル
遠方監視制御装置	HDLC, CDT
IP-I/F 装置	TCP/IP
IP 伝送方式 TC	TCP/IP

(2) プロトコル変換

遠方監視制御装置、IP-I/F 装置などの対向装置のプロトコル (HDLC, CDT, TCP/IP) の違いを吸収し、統一プロトコル (PMCN) に変換し、2 階層制御システム向けに集配信する。

(3) 2 回線接続

IP 化装置と各対向装置間は 2 回線で接続され、オンライン回線とスタンバイ回線で運用している。対向装置ごとにオンライン回線を任意の回線に割り当てることができる。

オンライン回線に障害が発生したとき、スタンバイ回線をオンライン回線へと切り替えることで、対向装置との通信を継続可能としている。

(4) ログの保存

IP 化装置は表 2 に示したログを保存する。

表 2 ログ種別

名称	内容
装置ログ	IP 化装置の動作や異常などのログ
通信ログ	対向装置との通信ログ
制御ログ	変電所内設備に対する制御ログ

(5) メンテナンス機能

Web ブラウザからログインすることにより、下記のメンテナンスを行うことができる。

- ・対向装置との接続設定の変更
- ・通信ログや装置ログなどの取得
- ・対向装置とのオンライン回線の切替

4.2 仕様

IP 化装置の仕様として、対向可能な装置の種別およびその最大実装数を表 3 に示す。ただし、IP 化装置 1 台に対して各装置の合計は 96 対向以内である。

表 3 最大実装数

対向装置	最大実装数
遠方監視制御装置 (HDLC, CDT)	48 対向
IP-I/F 装置	96 対向
IP 伝送方式 TC	96 対向

5 おわりに

本装置の導入により、変電所の IP 化・デジタル化の促進が期待される。今後は、変電所の IP-I/F 装置・IP 伝送方式 TC への設備更新に合わせて、IP 化装置を順次納入する予定である。

末尾ながら、今回の開発に多大なるご指導・助言をいただいた関係各位に対し、厚くお礼申し上げる。

■ 語句説明

注 1) HDLC : High-Level Data Link Control の略

注 2) CDT : Cyclic Digital data Transmission の略

注 3) IP-I/F 装置 : 送電用変電所用 IP 対応インタフェース盤の略

注 4) TCIF : テレコンインタフェースの略

注 5) PMCN : Protocol for Mission Critical industrial Network use の略

注 6) UDP : User Datagram Protocol の略

藤澤 光剛

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 監視制御システム設計グループ 所属

桑原 大輔

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 監視制御システム設計グループ 所属

特高受変電設備監視システム MUDIC-Lite

窪田 直紀
Naoki Kubota

1 はじめに

東光高岳は、監視、制御、計測、伝送技術開発における豊富な経験を活かし、電力需要家の電力設備をはじめ、工場付帯設備や下水処理設備などの設備分野に適用することのできる設備監視制御システム MUDIC^{注1)} 500 Vを提供している。

このたび、特別高圧受変電設備の「監視」に特化し最適化した安価なパッケージシステム MUDIC-Lite を製品化したのでここに紹介する。

2 概要

2.1 特長

(1) 安価なパッケージシステム

特別高圧受変電設備の「監視」に最適な監視項目、監視画面で、合理的で安価なシステムを実現している。

(2) 高い信頼性と保守性

工業用ボックスコンピュータを採用し、信頼性の高い24時間ノンストップ稼働を実現するとともに、省メンテナンスを実現している。

(3) 優れた視認性

ワイド画面、マルチウィンドウを採用し、優れた視認性を備えている。

(4) 高度なデマンド監視

受電電力の推移をモニタリングし、使用電力量を予測して目標デマンド値を超過する兆候が生じたときに警報を発生するなど高度なデマンド監視機能を具備している。

2.2 諸元

表1に主なハードウェア諸元を示す。

表1 主なハードウェア諸元一覧 (I/O タイプ)

項目	機能概要
管理 点数	状態・故障 64点 ※パルス計測と合わせて64点を超えないこと
	アナログ計測 32点
	パルス計測 64点 ※状態・故障と合わせて64点を超えないこと
	制御出力 16点 ※デマンド制御
表示 部	表示解像度 1920 × 1200 ドット
	表示色 1677 万色
	表示機能 マルチウィンドウ
操作	主操作 マウス
	補助操作 キーボード
寸法	CPU 盤 400 mm(W) × 500 mm(H) × 300 mm(D)
	IO 盤 500 mm(W) × 500 mm(H) × 300 mm(D)

2.3 機能

表2に主要機能一覧を示す。

表2 主要機能一覧

機能項目	機能概要
監視 機能	故障監視 故障発生時にアラーム発生と警報メッセージ表示を行う
	機器状態監視 機器状態変化時にメッセージ表示を行う
	上下限監視 電流電圧や電力量などの計測値があらかじめ設定した上下限監視値を逸脱した際にアラーム発生と警報メッセージ表示を行う
表示 機能	グラフィック表示 機器状態や計測値、故障表示などをグラフィカルに一括表示する
	メッセージ表示 警報、状態、上下限異常などのメッセージを一覧表示する
	継続故障表示 発生中の故障や異常を一覧表示する
	状態／計測一覧表示 機器状態や故障発生状況および各種計測値の現在値を一覧表示する
	トレンドグラフ表示 計測値をデータの推移がわかりやすいようにトレンドグラフで表示する
	帳票表示 計測値データを1時間値として蓄え、日報／月報フォーマットに編集して表示する
	統計グラフ表示 帳票用データを折れ線グラフや棒グラフ形式で表示する

3 おわりに

MUDIC-Lite の製品化により、安価な受変電設備監視システムの提案が可能になった。今後、CC-Link などの通信タイプに対応し、東光高岳製品のデジタル形保護計測装置 (PACGEAR) と連携したタイプの提供を行っていく。



図1 MUDIC-Lite

■ 語句説明

注1) MUDIC : Multi Use Distributed Integration Computer control system の略

窪田 直紀

エネルギーソリューション事業本部
電力システム製造部 監視制御システム設計グループ 所属

東南アジア向け エネマネサービスパッケージ

■ 近藤 大介
Daisuke Kondo

■ 服部 美里
Misato Hattori

■ 今井 直樹
Naoki Imai

1 はじめに

近年、東南アジア諸国ではエネルギー使用量の削減・効率化などを規定する法律が整備されつつあり、各国とも電力に関する省エネ意識が高まっている。このような状況のなか、東京電力エナジーパートナー（株）（以下、東電 EP）は PoC（Proof of Concept）として、フィリピンの電力関連企業に対しクラウドによる電力の見える化サービスを提供した（2018 年度）。

上記のサービス提供にあたり、東光高岳は見える化対象設備の電流を計測し、クラウドへ計測値を伝送するエネルギー計測装置の開発・試作・設置を担った。本装置では計測対象を電流計測のみに限定し、電力量はクラウドで換算する方式とした。

図 1 に装置外観と実装状況を示す。今回、その試作品をブラッシュアップし、東南アジア向けのエネルギーマネジメントサービス用にパッケージ化したエネルギー計測装置を製品化したので、その概要を紹介する。

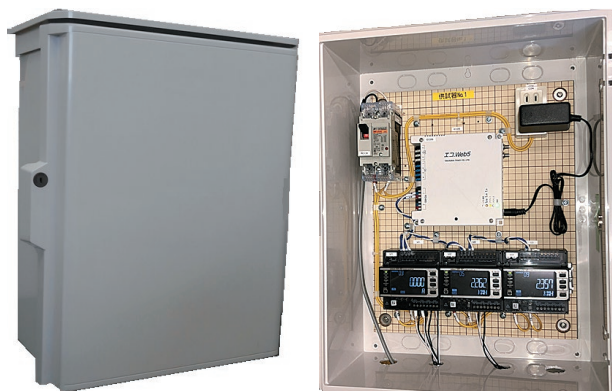


図 1 装置外観と実装状況

2 特長

(1) 最大 12 設備の消費電流を連続で計測

表 1 に基本仕様を示す。エネルギー計測装置は 1 台で最大 12 設備の消費電流を 1 分周期で 24 時間 365 日連続して計測する。

(2) 設置や加工が容易な装置構成

現地の設置条件に合わせてケースの加工を行えるため、設置の自由度と容易性を高めることができた。また、CT にはクランプ方式を採用し、分電盤～負荷設備の電源線への加工や電源線の取り外し／再取り付けを、

非常に容易にした。

(3) メンテナンス性の向上

現地設置時には本装置～ルータ～通信網～クラウドの順に接続が確立されるが、その状況を LED で表示し、問題発生時の解決を支援する。また、現地のネットワーク環境に左右されない、遠隔保守（日本から海外に設置した装置にログインして実施する保守）を可能とした。

表 1 基本仕様

項目		仕様
計測	回路数	単相 2 線式 : 最大 12 回路 単相 3 線式, 三相 3 線式 : 最大 6 回路 三相 4 線式 : 最大 3 回路
	計測範囲	2.5 A～250 A
	計測周期	1 分
CT	接続可能 CT	付属 CT
	定格一次電流	250 A
	定格二次電流	1 A
LAN ポート (Ethernet)		外部ルータ (クラウド) との接続用ポート 10/100 Mbps, 100Base-TX, RJ46 コネクタ 通信速度はオートネゴシエーション
RTC 停電時保持期間		キャパシタによる停電バックアップ時間: 最低 10 日

3 見える化サービスの全体構成

図 2 に見える化サービスの全体構成を示す。

エネルギー計測装置の計測データはリアルタイムで日本国内のクラウドサーバに伝送される。クラウドサーバ

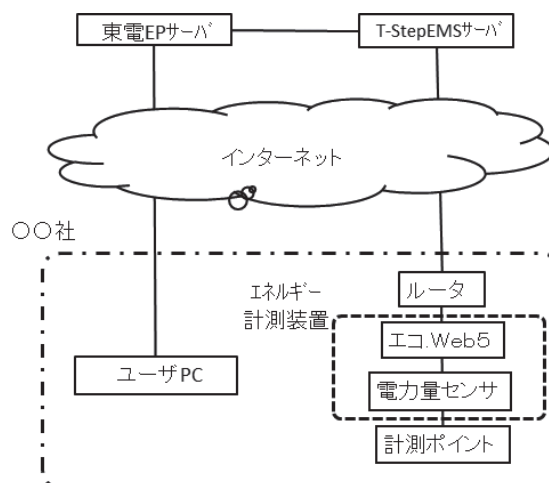


図 2 見える化サービスの全体構成

ではエネルギー計測装置から伝送される電流データを電力量に換算する。ユーザはこのクラウドサーバが提供する Web 画面により、インターネットを介して使用電力を確認することができる。

4 機能概要

エネルギー計測装置は東光高岳製エネルギー情報収集端末「エコ.Web5」の計測機能、通信機能、時刻同期機能を活用した装置であり、各機能の概要は次のとおりである。

(1) 計測機能

3 台の電流計測器を RS485 で接続し、Modbus 通信により、CT に流れる電流値を取得する。計測間隔は 1 分、最大計測点数は 12 点である。

また、最大計測電流は 250A である。

(2) 通信機能

LAN ポートに接続したルータ（ユーザ側で準備）からインターネット回線を介して、計測データをクラウドに伝送する。

データ伝送は、IoT に適した通信プロトコルである MQTT^{注1)}を採用し、安全かつ正確なデータ転送を実現している。

また、世界中に展開するインターネット網を活用し、本装置がターゲットとする東南アジア全域に設置できるよう、DHCP クライアント機能を実装した。

さらに、SSH フォワーディング^{注2)}を使用して、現地のネットワーク環境に左右されない遠隔保守機能を実装した。

(3) 時刻同期機能

仕向先国に合わせて、タイムゾーンと同期先 NTP サーバを任意に設定可能とした。

また、起動時および毎日 1 回の時刻同期を行うことで、正確なタイミングでデータサンプリングを行えるようにした。

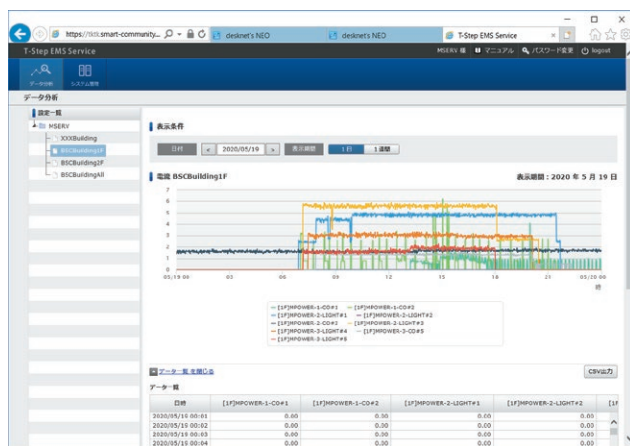


図3 クラウドでのデータ確認画面

5 パッケージの内容

エネルギー計測装置は手順にしたがって CT の取り付けと電源および LAN を配線し、電源を投入すれば稼働を開始する。施工者は装置の設置後に設定や調整を行う必要がなく、計測データがクラウドに集積されていることを確認するだけでよい。図3にクラウドでのデータ確認画面を示す。

この手軽さを実現するために、クラウド使用権もセットにして装置を提供する方法を採用した。

これがエネルギーマネジメントサービス用「パッケージ」たるゆえんである。

6 おわりに

本装置はエコ.Web5を活用した初の海外向け製品であり、まだスタートしたばかりである。

今後、現地での施工や運用が開始し、電力が見える化されることで、ユーザの省エネ意識も向上し、ニーズの高度化に伴って、日本国内では経験したことのない機能の追加といった要求が予想される。

また、販売先が拡大すれば、各国の法規制や電力エネルギー削減への取り組みも、国ごとに異なり、新たな機能の追加要求も予想される。

これらの要求を精査し、機能を追加していくとともに、エコ.Web5が持つ他の機能を活用することで、東南アジア諸国の多くの企業に標準機として採用いただける装置としての完成度を高め、普及させていきたい。

■ 語句説明

注1) MQTT：TCP/IP ネットワークで利用できる通信プロトコルの一つで、多数の端末間で短いメッセージを頻繁に送受信する用途に向けた軽量なプロトコル。

注2) SSH フォワーディング：SSH によって確立された通信経路を利用して、クライアントのポートをクライアントが直接アクセスできないデバイスのポートに転送する仕組み。

近藤 大介

エネルギーソリューション事業本部
システムソリューション製造部 開発グループ 所属

服部 美里

エネルギーソリューション事業本部
システムソリューション製造部 開発グループ 所属

今井 直樹

エネルギーソリューション事業本部
システムソリューション製造部 開発グループ 所属

国内初 CHAdeMO 規格 ver2.0 対応 電気自動車用急速充電器

■ 古家 成正

Shigemasa Furuie

1 はじめに

自動車産業の電動化が加速している。2020 年 1 月から地球温暖化対策の国際的な枠組みとしてパリ協定 (Paris Agreement) の実運用が始まっており、世界的に自動車の環境規制を強化して電動化を促している。排ガスゼロ車 (ZEV^{注1)}) として注目を浴びている電気自動車 (BEV^{注2)}) やプラグインハイブリッド車 (PHEV^{注3)}) などの電動自動車^{注4)} に求められる役割は非常に大きい。今後の普及に合わせて電気自動車用急速充電器 (以下、急速充電器) のインフラ設備が欠かせない状況にある。

海外の市場動向をみると、中国では中央政府を中心に大規模な補助金の投入や国内主要企業からの特別助成金の支給を受けて急速充電器の設置数を急速に伸ばしている。また欧州連合 (EU) では新車に対し二酸化炭素 (CO₂) 排出量の規制が一段と強化されており、電気自動車導入促進に向け充電インフラ設備の構築が政府やインフラ事業者により強力に進められている。

東光高岳では今後の需要拡大を予想し、CHAdeMO^{注4)} の最新規格 (ver2.0) に対応した電気自動車用新型急速充電器 (以下、新型器) をリリースしたのでここで紹介する。

2 装置の特長

新型器は以下の 6 点の特長を有している。

(1) 国内初 CHAdeMO Protocol ver2.0 対応

CHAdeMO Protocol ver2.0^{注5)} の認証を 2019 年度に取得した。今後東光高岳器に実装予定のダイナミックコントロール (本器で EV 出力上限を調整可能) 仕様に対応している。

(2) 小型化・軽量化

新型器では内部の主要部品と配置を大幅に見直すことで本体サイズの小型化と軽量化を実現した。これにより駐車スペースの有効活用に応じることができる。

表 1 新型器と現行器の装置比較

機種 (型式)	新型器 (HFR1-50B9)	現行器 (HFR1-50B8)
容積	470 L	511 L
設置面積	2,707 cm ²	2,925 cm ²
質量	約 270 kg	約 335 kg

表 1 に新型器と現行器の装置比較を示す。現行器と比べ容積比 92%, 設置面積比 93%, 重量比 81% となる。

(3) 電力変換器 (以下、パワーユニット) モジュール化

電力変換器をモジュール構造とし、修理はパワーユニット交換作業のみとなることから、修理時間の大幅な削減が可能となる。

(4) 現地施工が容易

新型器では、運搬・吊り上げは天井に取り付けてある吊り金具を利用する。基礎ベースと新型器本体が分離できるため、現地工事が容易である。

(5) [オプション 1] 認証課金対応

(株) エネゲート製の認証機能を実装し、今後他社の認証システムにも対応予定である。

(6) [オプション 2] クラウドシステム対応 (開発中)

クラウド連携を可能とする通信ユニットを組み込み、本製品が IoT (Internet of Things) 対応となるモデルを販売予定である。

3 装置機能

新型器の装置機能について代表的な 3 点を次に示す。

(1) わかりやすいタッチパネルでの充電操作

充電操作は図 1 に示す液晶のタッチパネル上で行う。操作イメージが見てわかるようアイコンガイダンスを採用している。



(a) START の画面表示

(b) STOP ボタンの画面表示

図 1 新型器 タッチパネル画面例

(2) パワーユニットの冗長設計

新型器では、パワーユニット 4 台を並列に接続し、ユニット間の協調により最大 50 kW を出力する運転方式を採用している。パワーユニット単体の故障時には、健全ユニットにおける 50 kW 以下の運転が可能となる冗長設計を採用している。

(3) 急速充電器の出力制限機能

管理者が運用状況に合わせて最大電力量や利用時間を事前に設定することにより、50 kW 以下で運用ができる。

4 装置仕様

新型器の基本仕様を表 2 に、認証課金対応装置外観写真を図 2 に示す。

表 2 基本仕様

型式	HFR1-50B9
入力	三相 3 線 AC200 V, 50 Hz/60 Hz
出力	DC150 V~450 V, 0 A~125 A
効率	90%以上
寸法	幅 665 mm × 奥行 407 mm × 高さ 1734 mm ※突起部を除く
質量	約 270 kg
保護等級	IP44
周囲温度	-10℃~40℃
周囲湿度	30%~90%
認証課金対応	(株) エネゲート製認証 (今後追加予定あり)



図 2 認証課金対応 装置外観写真

5 おわりに

新型器は、これまで課金装置として利用されている個別の通信方式に対応するだけでなく、オプションでクラウド連携させることにより、さまざまなサービスやシステムに柔軟に対応させることができる製品である。

今後も国内シェア No.1^{注6)} にこだわり、市場の要求を満たす新型器の開発を進め製品化していく所存である。

■語句説明

注 1) ZEV : Zero Emission Vehicle (排ガスゼロ車) は有害な排気ガスを一切出さない自動車を示す。純粋なバッテリーで駆動する電気自動車 (BEV) や燃料電池車 (FCV : Fuel Cell Vehicle) などが該当する。

注 2) BEV : Battery Electric Vehicle (電気自動車) は動力源となる電気を外部からの充電によりバッテリーに蓄電し、電気モーターを駆動させ走行できる自動車を示す。

注 3) PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle (プラグインハイブリッド車) は 2 種類以上の動力源を備える自動車を示す。電気モーターとガソリンエンジンを搭載し、外部からバッテリーを充電することで電気自動車 (BEV) のように走行できる車である。

注 4) 電動自動車 : ハイブリッド車 (HV), プラグインハイブリッド車 (PHV/PHEV), 電気自動車 (BEV/ PHEV), 燃料電池車 (FCV) などの総称を示す。

注 5) CHAdeMO : 電気自動車用急速充電規格「CHArge de MOve = 動く, 進むためのチャージ」, 「de = 電気」, また「(クルマの充電中に) お茶でも」の 3 つの意味を含んでいる。

注 6) 国内シェア No.1 : 2020 年 3 月現在の国内販売実績は累計 3000 台以上。

古家 成正

エネルギーソリューション事業本部
システムソリューション製造部 開発グループ 所属

広視野共焦点三次元計測センサ SCS-10000R1-KN

■ 石原 満宏
Mitsuhiro Ishihara

■ 水野 佑樹
Yuki Mizuno

1 はじめに

共焦点三次元計測はレーザを用いた高精度計測技術として知られている。レーザビームのXY走査と高精度のZ走査が必要であるため計測時間がかかることから、大量生産品の自動検査に用いられることは通常ない。東光高岳ではレーザ走査を必要としない非走査型の共焦点撮像系⁽¹⁾と、厚さの異なる平行平面ガラスと回転板を用いた光学的Z走査機構⁽¹⁾により、大量生産品の自動検査に耐え得る計測速度を有する独自の共焦点三次元計測を実現し、半導体パッケージ内部でLSIチップと多層配線基板とを高密度接続するための bumps と呼ばれる微小電極の形状検査に主に適用してきた⁽²⁾。上市した bumps 検査装置は国内外で広くご利用いただいている。

一方で、共焦点三次元計測を必要とする検査は bumps のような微小物体に限られるものではない。例えば先に述べた半導体パッケージにおいて、図1に示すように外部電極は bumps をそのまま大きくしたものといえることができ、bumps と同様の形状検査が必要である。しかし、bumps 検査と同等レベルの検査速度が求められる一方で、10倍近く広い領域の計測が必要となる。この検査を実現するためには、10倍レベルの広い視野の光学系を使用することが必要となるが、これまで以下のような課題があり実現できなかった。

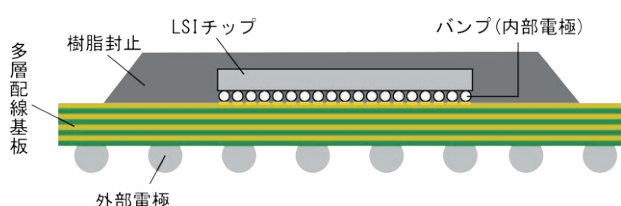


図1 半導体パッケージの構造

- ① 広視野（＝低倍率）の光学系では計測精度が著しく低下する
- ② 広視野光学系においては、大きさの制約から回転板による高速化技術が利用できない

計測精度が著しく低下する原因は、広視野光学系が低開口数^{注1)}となるためである。低開口数であること自体で原理的に計測精度は低下するが、その上に非走査共焦点技術の制約により低開口数においては必然的に低画素分解能（XY分解能）となり、両方の影響でさらに精度低下を招いていた。近年東光高岳で開発したリニア走査

共焦点技術は、低開口数でありながら高い画素分解能を実現できるため、上記精度低下の対策として有効である。

このリニア走査共焦点技術を採用し、さらにリニアスケール付Z移動ステージと高速シャッター（短時間露光）の組み合わせにより、回転板方式の光学的Z走査機構に頼らない高速・高精度のZ走査を実現することで、従来の10倍レベルの広視野計測を達成した共焦点三次元計測センサ SCS-10000R1-KN を開発したので紹介する。

2 リニア走査共焦点技術 SCS

リニア走査共焦点技術 SCS（図2）は、超微細 bumps を計測する目的で開発した技術であり、従来の非走査共焦点技術 NCS の高速性を維持しながらも、NCS では得られなかった高画素分解能の画像を得ることができる⁽³⁾。NCS が、共焦点計測の要の部品であるピンホールアレイの各ピンホール間に受光不可能なマスク領域を有するのに対し、SCS は、検出器のシャッター露光時間中にピンホールを一次元的に走査することで、マスク領域の存在を時分割露光により実質的に消し去って

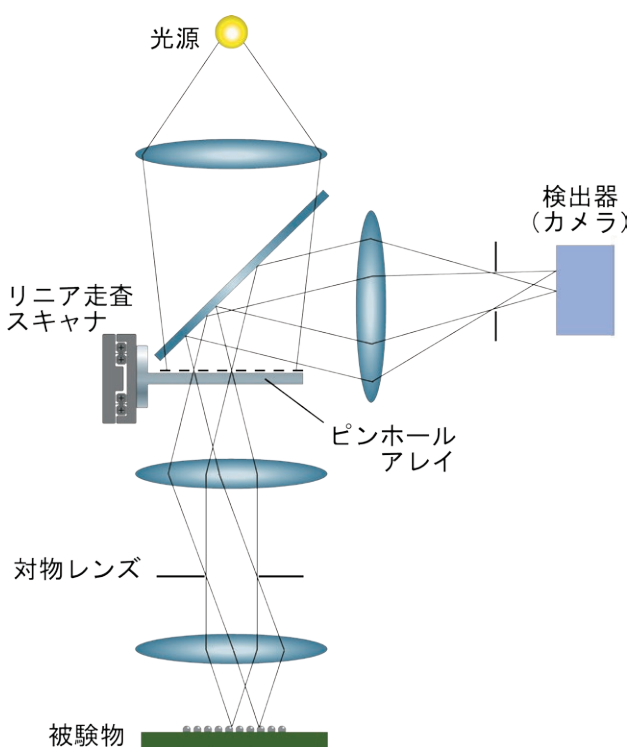


図2 リニア走査型共焦点光学系

る。これによりピンホールの数・密度に制約を受けることなく高い画素分解能の共焦点画像を得ることができる。共焦点三次元計測の精度は、対物レンズの開口数と画素分解能で決まるため、広視野光学系の開口数の低下による精度の劣化を、画素分解能で補うことができる。

3 高速・高精度 Z 走査技術

厚さの異なるガラスを回転板上に並べて高速回転させる光学的 Z 走査機構は、東光高岳の共焦点三次元計測の大きな特長である。しかし、計測視野が従来の 10 倍レベルで大きくなると各ガラスはそれ以上に大きくする必要があるので、回転板も 10 倍レベルの大きさとなり現実的ではなくなってしまう。そこで、Z 走査としてより一般的な Z 移動ステージ走査（図 3）とした。レーザ XY 走査による共焦点三次元計測では、レーザ XY 走査に時間がかかるため、低速度で Z 移動することで XY 走査中に大きく Z 移動しないようにする必要があるが、前記 SCS は、検出器のシャッター露光時間内に XY 走査が完了する高速性を有するため高速な Z 移動が可能である。Z 移動ステージに光学式リニアスケールを搭載することにより正確な Z 位置でシャッターを切ることができるため計測精度も高い。

また光学的 Z 走査機構では、計測範囲や画像の取得間隔はガラスの厚さ・枚数で決まるため変更ができないが、Z 移動ステージ走査においては柔軟に変更でき、計測時間や計測精度を最適化できることが大きな特長である。

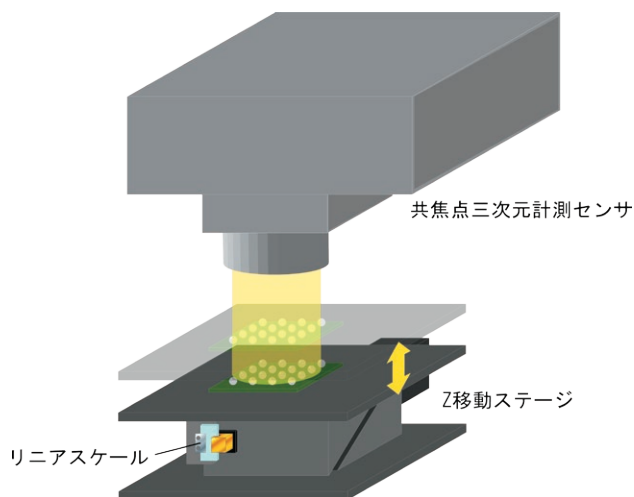


図 3 Z 移動ステージ走査

4 SCS-10000R1-KN

開発した SCS-10000R1-KN の外観を図 4 に示す。また、主な仕様を表 1 に示す。従来型の共焦点三次元計測センサ NCS-7020R1 の仕様も比較のために併記して

いる。

図 5 は、SCS-10000R1-KN と NCS-7020R1 の視野サイズの違いを実画像で示している。



図 4 SCS-10000R1-KN 外観

表 1 主な仕様

	NCS-7020R1	SCS-10000R1-KN
計測手法	非走査共焦点法 (NCS)	リニア走査共焦点法 (SCS)
Z 走査手法	光学式 (回転板走査)	機械式 (Z 移動ステージ走査)
視野サイズ (mm)	13 × 13	41 × 33
対物レンズ相対 NA	1 (基準)	0.5
画素分解能 (μm)	7.8	11.0
Z 計測範囲 (μm)	240	~4,000 (可変)
Z 計測分解能 (μm)	0.1	0.3
画像入力時間 (s/視野) (Z 計測範囲 240μm の時)	0.25	0.2
光源	メタルハライドランプ	LED

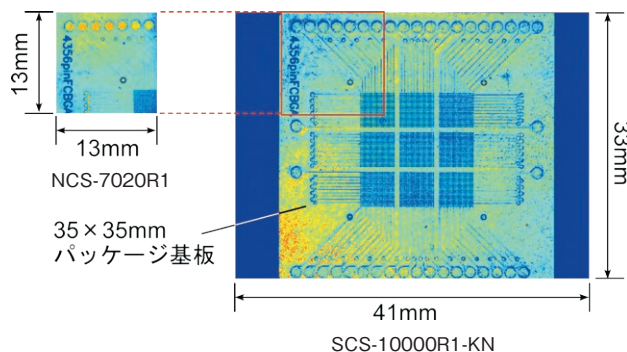


図 5 視野サイズの比較

5 計測例

4枚の1セントコインを一括で計測した結果の鳥瞰図を図6に示す。また図7に、半導体パッケージ外部電極の高さ計測の繰り返し精度を示す。電極は球形であり直径は約 $180\mu\text{m}$ である。横軸は各電極の番号、縦軸は各電極の計測ばらつき(3σ)である。計測ばらつきが $1\mu\text{m}$ 以内に収まっており、高い計測精度が得られていることがわかる。

6 おわりに

従来にない広い視野を持つ新しい共焦点三次元計測セ



図6 1セントコインの計測

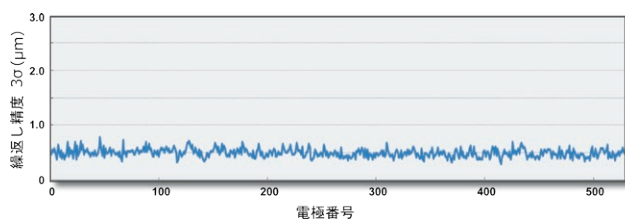


図7 $180\mu\text{m}$ 外部電極の高さ計測繰り返し精度

ンサ SCS-10000R1-KN について述べた。高精度で知られる共焦点三次元計測であるが、それは狭視野・高開口数光学系が前提となっている。 40mm を超える広視野・低開口数光学系での高精度計測は前例が見当たらない。SCS-10000R1-KN が共焦点三次元計測の適用範囲を大きく広げることを期待している。

■参考文献

- (1) M.Ishihara : “A Confocal Surface Measurement System Having Improved Measurement Accuracy for Rough Surfaces and Measurement Speed”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.3, pp.331-440 (2003)
- (2) 小森, 日名子, 石原 : 「イントレー方式 IC パッケージ検査装置 TVI-5220」, 高岳レビュー, No.55, No.1, pp.7-10 (2010)
- (3) 石原, 日名子, 井上, 水野 : 「リニア走査型共焦点光学系による高速マイクロバンプ高さ計測」, エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集, pp.427-428 (2015)

■語句説明

注 1) 開口数 : 対物レンズの明るさや光学分解能, 焦点深度を決定する重要な値で, 一般に広視野・低倍率であると低い値となる

石原 満宏

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 所属

水野 佑樹

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 開発グループ 所属

IEC61850 のデータ活用ソリューション (IEC61850 for SQL)

■ 小栗 伸吾
Shingo Oguri

1 はじめに

ミントウェーブでは、変電所のインテリジェント電子機器（以下、IED）の通信プロトコルを定義する国際標準規格である IEC61850 に対応した SCADA^{注1)}として、ジェイティエンジニアリング（株）製 JoyWatcherSuite に IEC61850 対応ドライバを組み込んだ Mint SCADA を販売してきた。

Mint SCADA は、SCADA に関する知識がなくてもノンプログラミングで容易に監視システムを構築できるなどの特長を持っているが、データの取込周期が定周期のため、取込タイミングによっては、発生した情報が欠落してしまう事象が判明した。また、Mint SCADA では、GOOSE と呼ばれる高速通信および風力発電向け通信規格である IEC61400-25 には非対応であった。

このため、情報の欠落、GOOSE および風力発電向け通信規格に対応させ、SCADA 以外にも幅広く適用が可能な製品として、IEC61850 for SQL を開発し製品化を行ったので、ここに紹介する。

2 製品概要

2.1 特長

- ・ IED からの受信情報をリアルタイムに記録することが可能
- ・ IEC61850 プロトコルに非対応のアプリケーション（SCADA など）でも、IEC61850 に対応させることが可能
- ・ 通信プロトコルとして、GOOSE および IEC61400-25 に対応

2.2 動作概要

本製品は、主に 2 つのプログラムで構成される。

(1) データベース記録設定プログラム

IED ごとに設定された SCL ファイル^{注2)}を基に、データベースに記録・設定を行う。

(2) 通信プログラム

a. 表示機能

各 IED と通信を行い、ユーザーが指定したデータを逐次データベースに記録する。図 1 に SQL 表示機能の動作概要を示す。

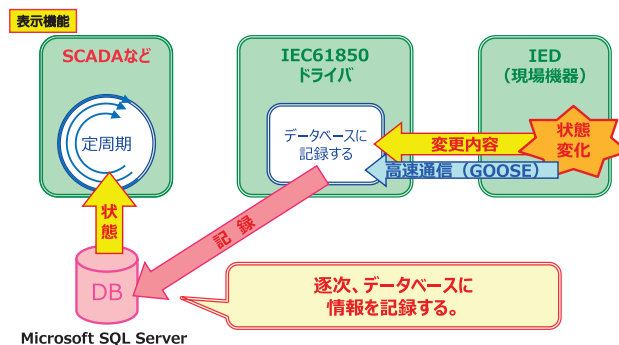


図 1 IEC61850 for SQL 表示機能

b. 操作機能

操作に関する情報がデータベースに記録されると、状態更新を検出し、IED に当該情報を送信することで、現地機器が操作される。図 2 に SQL 操作機能の動作概要を示す。

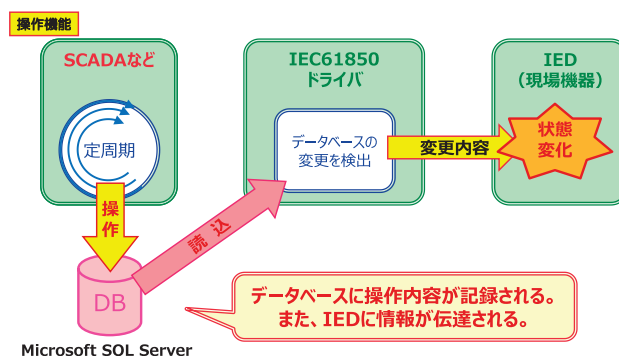


図 2 IEC61850 for SQL 操作機能

上記各プログラムとは別に、データベースの蓄積情報を表示することやデータベースの操作対象項目に値を書き込むことができるツールが付属する。このツールでは、検索機能を有し、データベースに記録された情報を容易に確認することが可能である。

語句説明

注 1) SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition の略。製造や産業の現場で、集中監視とプロセス制御を行うシステム。

注 2) SCL ファイル : Substation Configuration Language ファイルの略。変電所構成言語で書かれた設定ファイル。

小栗 伸吾

株式会社ミントウェーブ
インフラソリューション事業部 所属

電力の遠隔検針用ソリューション

Cloud-TOSCAM^{注1)}

■ 沢野 伸也
Shinya Sawano

■ 成松 正浩
Masahiro Narimatsu

1 はじめに

一般産業用スマートメータの普及により、テナントビルや商業施設などにおいて、通信機能を活用した自動検針システムの導入が増加している。

一方でこれまでの自動検針システムはスマートメータやパルス付計器を端末とし、検針盤やセンター PC といった使用量を算出するセンタ装置が必要となることから、導入コストが増加、また設置場所の確保も必要となることから導入の障壁となっている。

そこで東光東芝メーターシステムズ（以下、T2MS）はセンタ装置を不要とし、システムの導入コスト、リプレイス費用の低減を目的に、T2MS 製一般産業用スマートメータ “SmaMe^{注2)}” シリーズ（以下、SmaMe）とデータ収集ユニット（以下、TOSCAM-M1）、IoTGateway、および T2MS 指定 Cloud を利用した、Cloud 型自動検針システム “Cloud-TOSCAM”（以下、本システム）をリリースしたので紹介する。

本システムは、クライアント PC でどこからでも検針が行えることから、検針時に現地までの移動、巡回が不要となる。また、点在する子メータの検針にも適したシステムとなる。

2 特長

本システムは以下の特長を有する。

- ・ Cloud を使用し遠隔地にある SmaMe およびパルス付計器を検針。
- ・ 検針対象メータ使用量の日報、月報、請求書を出力。
- ・ 日負荷曲線、月負荷曲線表示で負荷のトレンドを分析。
- ・ オプション機能により従量・季時別料金も算出可能。

3 システム構成

本システムは SmaMe の指針値を TOSCAM-M1 で収集し、IoTGateway より東光高岳 MVNO-SIM を利用し共通プラットフォームである Cloud でデータ収集を行う。

本システムの概略構成を図 1 に示す。

4 仕様

本システムの仕様を下表に示す。

項 目	仕 様
計測点数	・ 基本点数：10 メータ（IoTGateway：1 台当たり） ・ 11 メータ以上は、メータの台数ごとに追加費用が必要 ・ IoTGateway の下位に接続できる TOSCAM-M1 は最大 10 台 ・ IoTGateway ごとに基本利用料が必要
計測データ	30 分値（メータの指針値データ）
計測データ保存期間	3 年間（Cloud 側で保存）
帳票出力	任意に設定した月日間の使用量台帳を印字および CSV 出力
グラフ表示	日負荷曲線 ・ 計測メータごとに 30 分使用量を表示および CSV 出力 ・ グラフの横軸は、1 日、7 日、14 日、31 日を選択
	月負荷曲線 ・ 計測メータごとに 1 日分の使用量を表示および CSV 出力 ・ グラフの横軸は、1 ヶ月、2 ヶ月、6 ヶ月、12 ヶ月を選択
	月最大デマンド ・ 当月を含む過去 13 ヶ月の最大デマンド値を月ごとに表示および CSV 出力
オプション機能	OP ① ・ あらかじめ設定した料金単価を元に料金一覧表を作成
	OP ② ・ 従量料金用帳票作成（一般家庭向け） ・ 三段階料金などの料金計算を行い料金一覧表を作成
	OP ③ ・ 季時別時間帯別帳票作成（事業所向け） ・ 昼、夜、ピークなど時間帯ごとの料金計算を行い料金一覧表を作成

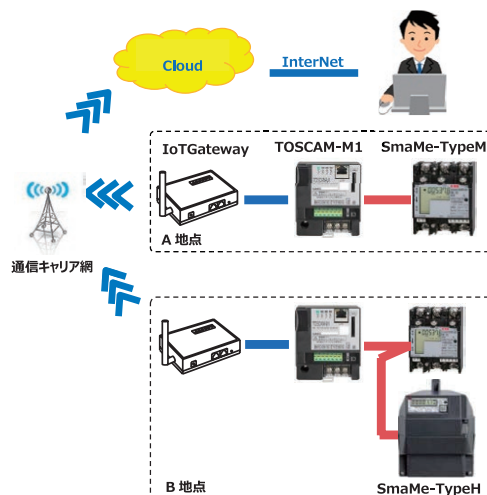
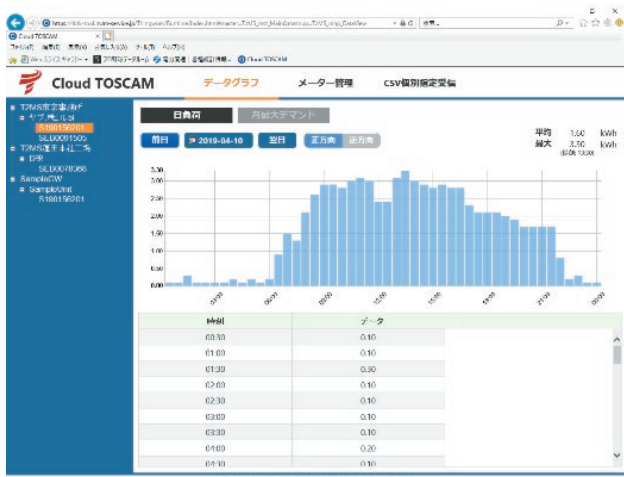


図 1 システムの概略構成

5 画面例

本システムでは、お客さまがひと目で使用状況を把握しやすいことをコンセプトに、日負荷曲線をはじめとするグラフ化により画面を構成している。

① 日負荷曲線



② 月最大デマンド



③ 帳票（請求書イメージ）

2020-04

17000番区事務所

一連番号	検針ID	メータ番号	メータID	メータ名称					
000001	0001	0001	0001	ヤブダビ 1-1001					
前日計料金	今日計料金	使用量		単位					
22581.88	22581.88	1477.48		kWh					
基本料金	1段増額	1段増額	1段増額	2段増額	2段増額	3段増額	3段増額	3段増額	料金合計
1123.30	128.40	11.51	2188.40	188.00	23.40	4212.80	1171.40	25.55	27531.28
調整費									料金合計
東エネ調整料金									481.80
西エネ調整料金									0.00
									料金
									27531.28

一連番号	検針ID	メータ番号	メータID	メータ名称					
000001	0001	0001	0001	ヤブダビ 1-1001					
前日計料金	今日計料金	使用量		単位					
22581.88	22581.88	1477.48		kWh					
基本料金	1段増額	1段増額	1段増額	2段増額	2段増額	3段増額	3段増額	3段増額	料金合計
1123.30	128.40	11.51	2188.40	188.00	23.40	4212.80	1171.40	25.55	27531.28
調整費									料金合計
東エネ調整料金									481.80
西エネ調整料金									0.00
									料金
									27531.28

一連番号	検針ID	メータ番号	メータID	メータ名称					
000001	0001	0001	0001	ヤブダビ 1-1001					
前日計料金	今日計料金	使用量		単位					
22581.88	22581.88	1477.48		kWh					
基本料金	1段増額	1段増額	1段増額	2段増額	2段増額	3段増額	3段増額	3段増額	料金合計
1123.30	128.40	11.51	2188.40	188.00	23.40	4212.80	1171.40	25.55	27531.28
調整費									料金合計
東エネ調整料金									481.80
西エネ調整料金									0.00
									料金
									27531.28

6 導入メリット

本システムの活用により、以下の導入メリットを創出する。

- ・目視検針による読み間違い、書き間違いの撲滅。
- ・電気、ガス、水道の一括検針により検針時間を短縮。
- ・センタ装置（検針盤、PC、専用アプリ）が不要なため、低コストでシステム導入が可能。
- ・検針時のテナント店舗への立ち入り調整が不要。
- ・過去に遡って指定期間で検針可能なため、検針忘れを回避。
- ・どこからでも検針できるため、事務所や自宅などからのリモートでも検針可能。

7 おわりに

今般、「2025年の崖」で想定されているDX^{注3)}の波を活用することがT2MSにおいても必須事項と考える。まずは、“もの売り”から“こと売り”の新たなチャレンジとして、T2MSが長年培ってきた自動検針のノウハウを詰め込んだ、サブスクリプションビジネスを構築した。

本システムは現在のところ、SmaMeをメイン端末とした検針システムとなるが、今後はT2MS製端末伝送器とTOSCAM-M1を連携させ、多点数のパルス付計器が設置されている既存の自動検針システムユーザーへの対応や、お客さまニーズや使い勝手を追求したアプリケーションのバージョンアップなど、さらなる機能向上に向けて開発を進めていく。さらに、収集したトレジャーデータを新たな価値とし、データドリブンを活用することで、今までにないサービスが構築できるように東光高岳とともに改良開発に取り組んでいく所存である。

■ 語句説明

注1) TOSCAMは東光東芝メーターシステムズ株式会社の登録商標（第1154888号）

注2) SmaMeは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3) Digital Transformationの略

沢野 伸也

東光東芝メーターシステムズ株式会社
営業部営業第三グループ 所属

成松 正浩

東光東芝メーターシステムズ株式会社
営業部営業第三グループ 所属

リソルの森における再エネを活用した 日本初の「地産地消システム」の開発

1 はじめに

東日本大震災以降、再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入、分散型電源設置などが本格化してきている。

このような中、リソル生命の森（株）、リソル再生エネルギー（株）、東京電力ホールディングス（株）、東京電力エナジーパートナー（株）の4社は、低炭素投資促進機構支援による「郊外型スマートコミュニティ構築事業」を受託した。

この事業の具現化として、太陽光発電と自己託送を組み合わせて、発電した電力を全量消費する「地産地消システム」をリソル生命の森（株）から東光高岳が受注し、2020年4月1日より本格稼働を開始した。

SDGs, RE100 に貢献するこの再エネを活用した日本初の「地産地消システム」について紹介する。

2 セミオフグリッド型 EMS の開発

東光高岳は、2014年からNEDO実証事業「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」に携わり、東京都新島村に、新島一式根島の独立した電力系統の安定供給をはかるオフグリッド型EMSを開発、設置してきた。

このオフグリッド型EMSは規模的に比較的小さく外部系統から切り離されたオフグリッド内での需給バランスを維持することを目的としたEMSである。

一方、リソルの森スマートコミュニティにおいて地産地消を実現するセミオフグリッド型EMSは、電力会社が維持、管理する電力系統から直接供給を受ける需要家に設置され、需要家受電点の電力の流れを制御するEMSである。具体的には、電力系統が自立したオフグリッド型EMSと異なり、セミオフグリッド型EMSは、周波数は外部系統の所有者である電力会社が制御し、発電設備を持つ需要家は、資本関係にある他の需要場所へ融通する電力を制御する。

今回のリソルの森で実現したEMSは、電力系統内で行われる自己託送という融通制度を利用している。

自己託送の基本的考え方は、発電設備を有する需要場所で自家消費を行い、その余った電力を資本関係のある他需要場所に外部系統を通して託送することで、発電設備で発電した電力を、全量グループ社内で自家消費するという考え方である。リソルの森では、1,200 kWの太陽光発電設備（PCSは1,000 kW）を設置し、リソルの森における主要施設であるメディカルトレーニングセンター（MTC）で自家消費し、余った電力を隣接するグ

ループ会社が経営する二つのゴルフ場クラブハウスに託送して、太陽光発電設備で発電した電力を全量消費するという地産地消システムを構築している。

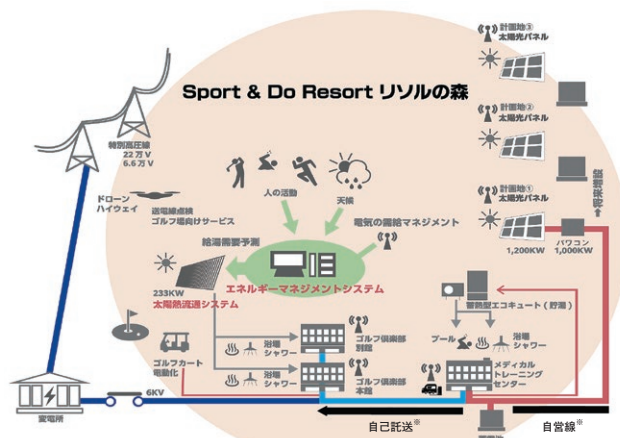
自己託送は、1日24時間を30分コマ、計48点に分解し、それぞれ30分枠内で自己託送計画を策定して、自己託送が行われる前日昼までに電力広域的運営機関（OCCTO）へ提出する。当日は、この計画に従い発電量および需要量（今回はヒートポンプ制御で実現）を制御し、30分間の電力量を計画と一致させる、いわゆる30分同時同量を達成しなければならない。万一、この30分同時同量が達成できない場合は、インバランスとしてペナルティが生じる。したがって、システム開発の最大のポイントは、「自己託送」のルールを順守しながら、インバランスのペナルティを極小化することである。

今回のシステムは前述したリソースのほかに、MTC側には据置型蓄電池100 kW、V2H（Vehicle to Home）1台、ゴルフ場それぞれにヒートポンプを設置し、自己託送を実現する制御対象としている。

このセミオフグリッド型EMSは、以下の機能によって構成される。

- ▶ 気象情報を基にした太陽光発電、各所の需要予測
- ▶ 予測を基にした最適経済計算
- ▶ 経済計算結果を基にした自己託送計画策定
- ▶ 策定した自己託送計画のOCCTOへの自動配信
- ▶ 策定された計画を達成するためのリアルタイム制御
- ▶ 各設備、需要状態を監視・制御するSCADA

なお、本システムは、ATS社^{注1)}との共同プロジェクト第1号として、予測機能、SCADA機能については、ATS社の技術を活用している。



出典：リソルグループ（※部追記）

注1) ATS社：東光高岳が昨年資本提携したベトナムにおいて変電所監視制御システムのトップシェアを持つシステムインテグレーター

四国電力送配電株式会社

北海道電力ネットワーク株式会社への柱上変圧器納入開始

1 概要

装柱型の配電用変圧器は東光高岳の主力商品であり、お客さまの仕様に合わせ、年間 50,000 台程度を生産・納入している。この度、四国電力送配電（株）の新規型式取得、北海道電力ネットワーク（株）の型式変更が完了し、納入を始めた。

2 仕様

四国電力送配電（株）向け柱上変圧器の基本仕様を表 1 に、北海道電力ネットワーク（株）向け柱上変圧器の基本仕様を表 2 に示す。

表 1 四国電力送配電（株）向け柱上変圧器

種類	一般形 耐塩形
相	単相変圧器（単相三線専用）
定格周波数	60 Hz
定格容量	5, 10, 20, 30, 50 kVA
定格電圧	定格一次電圧：6,600 V 定格二次電圧：210/105 V
タップ電圧	F6,750/R6,600/F6,450/F6,300 V

表 2 北海道電力ネットワーク（株）向け柱上変圧器

種類	耐塩用 強化耐塩用
相	単相変圧器（単三専用）
定格周波数	50 Hz
定格容量	10, 20, 30, 50, 75, 100 kVA
定格電圧	定格一次電圧：6,600 V 定格二次電圧：210/105V
タップ電圧	F6,750/R6,600/F6,450 V



図 1 四国電力送配電（株）向け柱上変圧器



図 2 北海道電力ネットワーク（株）向け柱上変圧器

マイナス側インターロック適用 配電用遠方監視制御装置(多機能形) 送電用変電所用IP対応インタフェース盤

1 概要

東光高岳では2017年12月から配電用遠方監視制御装置(多機能形)を、2018年8月から送電用IP対応インタフェース盤を東京電力パワーグリッド(株)に納入している。

両装置はコストダウンのため納入時からソフトウェアで処理を行い、機器操作コイルのプラス側でインターロック^{注1)}を構築する「プラス側インターロック」機能を実装している。今回、装置停止時においても各機器間をケーブル接続してインターロックする「直接インターロック」と同様に、現地機器操作時における人身災害や設備破損を防止することが可能な「マイナス側インターロック」(機器操作コイルのマイナス側でインターロックを構築)をトータルコストを抑え機能追加したので紹介する。

2 実施内容

両装置に以下の変更を行った。

- ① マイナス側インターロック(機器操作コイルよりマイナス側でインターロックを構築)用に補助リレーを追加。
- ② HMI(Human Machine Interface)にマイナス側インターロック設定機能を追加。

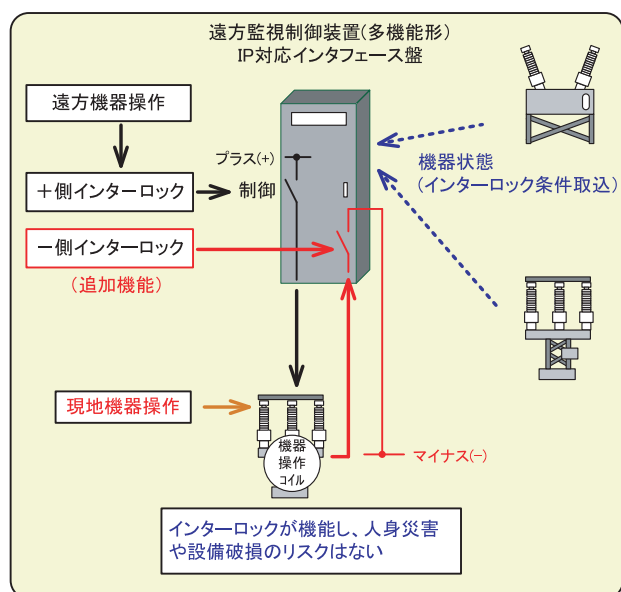


図1 機器操作イメージ

3 特長

主な特長は次のとおりである。

- (1) 現地機器操作時においてもインターロックが機能するため、人身災害や設備破損のリスクはない。
- (2) 「直接インターロック」と比べて、ケーブル布設の費用が削減でき、補助接点や補助リレーが不要。
- (3) 設備追加や変更の際でもお客さまにて任意のインターロック条件を設定可能。

図2は、HMIソフトインターロック画面のスクリーンショットを示している。画面には、43RのHMIソフトインターロック画面が表示されている。画面には、IL対象、IL条件、IL結果、IL状態などの項目があり、各項目のON/OFF状態が色で表示されている。

図2 HMIソフトインターロック画面



図3 遠方監視制御装置(多機能形)とIP対応インタフェース盤

■ 語句説明

注1) インターロック: 誤操作や誤動作による事故を防止するため、一定の条件が整わないと操作できない仕組み。