

超スマート社会の一翼を担う スマートグリッドに向けて



横山 明彦*
Akihiko Yokoyama

最近 IoT、ビッグデータ、AI が花盛りである。我が国では、これらを活用し、スマート社会を飛び越えて、超スマート社会、Society 5.0 を構築しようとしている。最近では、電力保安の分野においても、スマート保安を目指しているところである。世界中で取り組みが行われているスマートグリッドでは、スマートメータからの需要家の需要データ、配電網のセンサ付き開閉器からの配電線データなどが大量に得られる。将来は、PV、電気自動車、ヒートポンプ給湯器などの可制御な需要家機器の稼働状況データもインターネットも利用しながら得られるであろう。我々電力技術に携わる者としては、これらのビッグデータを活用して、大量の再生可能エネルギーが導入された電力システムを安定かつ経済的に運用・制御していくことを考えなければならない。現在、NEDO の支援を受け、(株) 東光高岳も一緒になって、伊豆七島の一つである新島でスマートグリッドの実証プロジェクトを行っている。予測、運用、制御を 3 本柱とした統合型 EMS の開発実証事業である。もちろん、これらの技術が確立されると、離島だけではなく全国の大規模システムにも展開可能となる。

スマートグリッドには、IoT、ビッグデータはすでに組み込まれているとあってよい。今後は、いかにして最後の AI を織り込んでいくかであろう。AI つまり人工知能は、コンピュータで実現する人間の知能のような仕組みである。AI の適用は、人間の行っている業務の効率をより改善する、または現在コンピュータで行っている処理をより効率化するものでなければならない。太陽光発電、風力発電などの出力予測や小売り事業者の需要予測の精度が、今後の電気事業のコストを左右するであろう。予測はずれは、運用にも大きく影響し、大規模停電につながる可能性もある。この需要予測に AI を適用しようとする試みは昔から行われていた。平成の時代に入っただけに、電力システムにおいても第 2 次 AI ブームに沸いた時期があり、予測、運用、制御の支援システムにいろいろな応用が検討された。しかし、人間の知能を超えて、既存システムを置き換えて使えるものは現れなかったと言ってよい。予測では予測結果の説明や稀頻度事象の予測ができない、制御では不安定にはならないという保証ができないなどの課題もあった。電力システムの 3 本柱の予測、運用、制御において、数理モデルでは扱えず、人間が扱うと機械を上回る処理のできる問題に対して、AI がうまく処理できるものを組み込むことができれば、スマートグリッドは超スマート社会の一翼を担うことができるようになる。今回の第 3 次 AI ブームに乗り遅れないようにしたいものである。

* 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授

配電システムの電圧制御シミュレーション

■ 尾崎 卓也
Takuya Ozaki

■ 茂木 規行
Noriyuki Motegi

■ 宮本 卓也
Takuya Miyamoto

1 はじめに

地球環境問題や省エネルギーに対する意識の高まりを背景に、再生可能エネルギーを利用した分散型電源の普及拡大の取り組みがなされ、特に、太陽光発電は、固定価格買取制度等により、大量導入が進んでいる。

配電システムへの太陽光発電の大量導入により、さまざまなシステム安定上の問題が発生するが、特に電圧変動については、比較的早期に顕在化する課題であると考えられている。

東光高岳では、配電システムの電圧適正化に関する検討や製品開発を進めており、それらに必要なシミュレーション技術にも取り組んでいる。シミュレーションを行うには、まず、その環境を構築する必要があり、また、その妥当性についても確認しておく必要がある。

本稿では、今回検討したシミュレーションの概要とその妥当性の検証結果を述べ、電圧変動が急峻な場合の電圧制御シミュレーションの一例について紹介する。

2 電圧調整機器・太陽光発電モジュール

電圧制御シミュレーションのツールには PSCAD/EMTDC^{注1)} を使用した。しかし、このツールには負荷時タップ切換変圧器 (LRT)、ステップ式電圧調整器 (SVR) 等の電圧調整機器や、太陽光発電等を模擬するモジュール^{注2)} が用意されていないため、新たに設計・製作した。以下に、それらモジュールの概要を示す。

2.1 LRT モジュール, SVR モジュール

LRT モジュールおよび SVR モジュールは、電圧調整機器を設置した箇所の電圧・電流情報を用い、ある地点の電圧が設定した電圧 (基準電圧) の管理値内となるようにタップ制御を行う機能を有している。

LRT モジュールは、あらかじめ設定された送出し電圧特性 ($I-V_S$) から、電流 I に応じて基準電圧 V_S を決定し、LRT 二次側の電圧 V が V_S になるようにタップ制御を行うもので、そのモジュールの構成を図 1 に示す。図 1 のタップ制御では、 V と V_S との差 (%) が不感帯 F_U (%) を超えた場合にその超過分を時間積分し、その積分値が動作時限 T (%・s) 以上になったときにタップ切換 (変圧比の変更) を行うようにしている。なお、動作時間 t は次式で表される。

$$t = \frac{T}{|(V - V_S) / V_S| \times 100 - |F_U|} \text{ (s)} \dots\dots\dots (1)$$

SVR モジュールは、電圧を管理したい目標地点 (負荷中心点) の電圧 V_{LDC} を、電流 I とあらかじめ設定された線路インピーダンス (%R, %X) から推定し、その地点の電圧 V_{LDC} が基準電圧 V_S となるようにタップ制御を行うもので、そのモジュールの構成を図 2 に示す。図 2 のタップ制御は前記 LRT の機能と同様である。また、動作特性の式は前記 LRT と同様で、式 (1) の V が V_{LDC} となる。

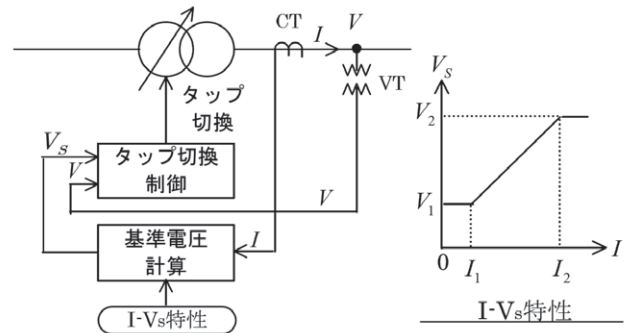


図 1 LRT モジュールの構成

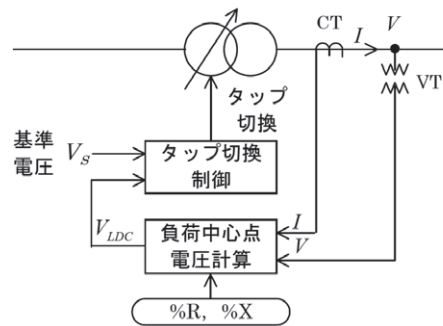


図 2 SVR モジュールの構成

2.2 太陽光発電モジュール

太陽光発電から系統側に有効電力 P 、無効電力 Q を供給するが、日射量によりそれらが変化することになる。このため、日変化する太陽光発電出力データ P_0 、 Q_0 を目標値としてシミュレーションができる太陽光発電モジュールを設計・製作した⁽¹⁾。なお、太陽光発電モジュールは系統側の電圧が変動しても目標値 P_0 、 Q_0 が供給できる定電力型とした。

そのモジュールの構成を図 3 に示す。モジュールは、

振幅と位相を制御できる電源とリアクトル X から構成され、系統側と接続される。制御はモジュールの系統側接続点の電圧 V、電流 I を用いて、P、Q を計算し、それが目標値 P_0 、 Q_0 になるように電源の位相、振幅を調整できる方式とした。

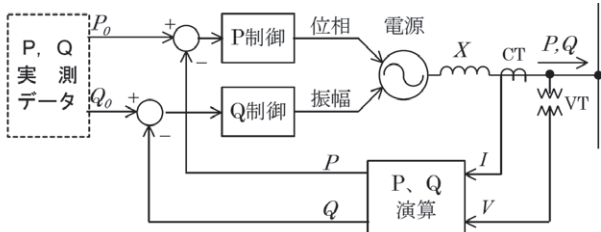


図3 太陽光発電モジュールの構成

3 シミュレーションの検証

前述の電圧調整機器モジュールおよび太陽光発電モジュールを用いて電圧制御シミュレーションを行い、その妥当性を確認するため、東光高岳小山事業所の配電ネットワーク実証試験場⁽²⁾における実測との比較を行った。

3.1 解析条件

シミュレーションの系統構成を図4に示す。これは実証試験場と同じ構成であり、LRT（模擬）の二次母線に配電線が2回線（試験線A、B）引き出され、試験線Aの線路途中にSVR Aを設け、その二次側に太陽光発電1、2（PV1、PV2）が連系している。図4のRL1～RL4は線路インピーダンスを示している。

電圧調整機器の整定を表1に示す。また、LRT一次電圧を図5に、PV1の発電出力（有効電力P、無効電力Q）を図6に示す。これらは実証試験場で実測した日変化である。なお、PV2の実測データは省略するが、発電出力およびその時間変化は図6のPV1とほぼ同じである。

シミュレーションは、LRT一次電圧に実測値の電圧を与え、太陽光発電モジュール1、2に実測データの有効

電力・無効電力 (P_{01} , Q_{01} , P_{02} , Q_{02}) を与えて行った。

本稿では、LRTはロック^(注3)し、SVRのみ使用した場合と、SVRをロックし、LRTのみ使用とした場合について述べる。

表1 電圧調整機器の整定

項目	LRT	SVR
基準電圧	I-V _s 特性	6.6 kV
不感帯幅	± 1 %	± 1 %
動作時限	40%・s	40%・s
その他	(I-V _s 特性) V ₁ = 6.6 kV, V ₂ = 6.72 kV I ₁ = 5 A, I ₂ = 10 A	(線路インピーダンス) %R = 24% * %X = 3% *

* RL3の1/3相当の線路インピーダンスとなっている

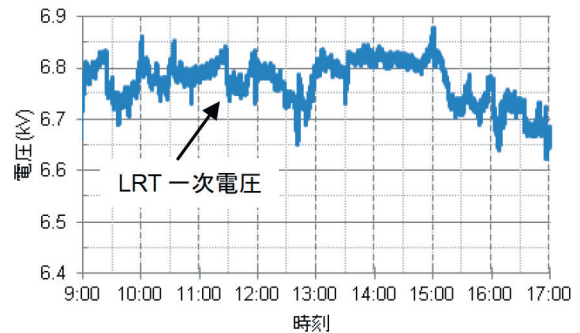


図5 LRT一次電圧（実証試験場実測データ）

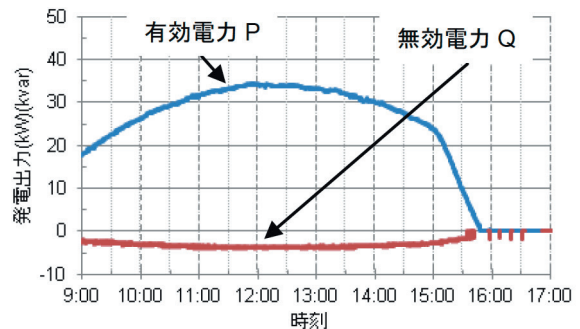


図6 太陽光発電出力（実証試験場実測データ）

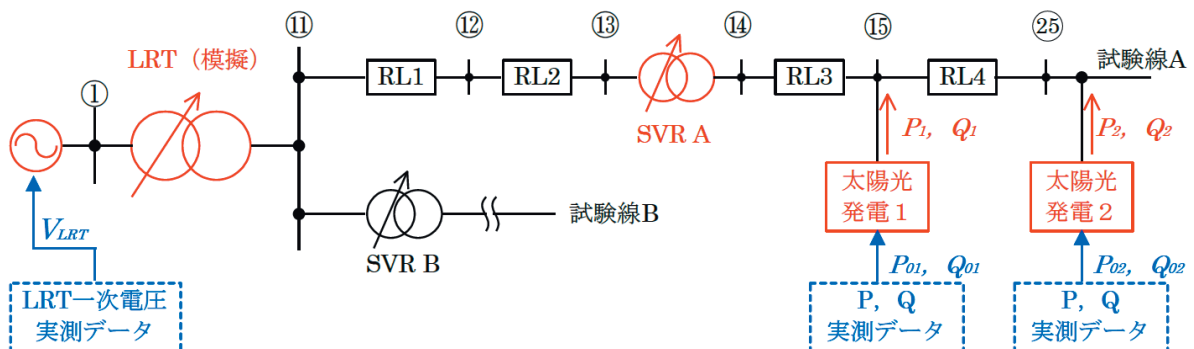


図4 シミュレーションの系統構成

3.2 解析結果

はじめに、LRTはロックし、SVRのみ使用した場合の実測とシミュレーション結果を図7に示す。ここでは、SVR Aのタップ動作と太陽光発電の接続点(図4の⑮)の電圧を示す。図7からタップ動作、接続点の

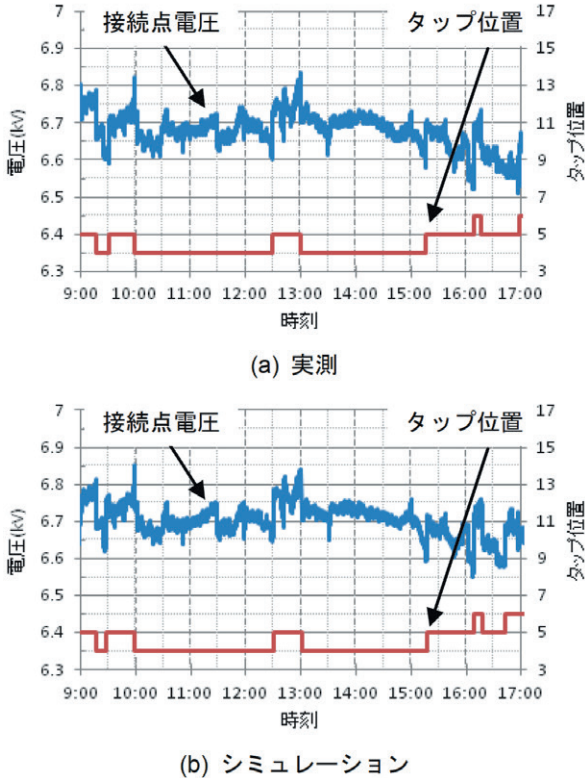


図7 検証結果 (LRT ロック, SVR A 使用時)

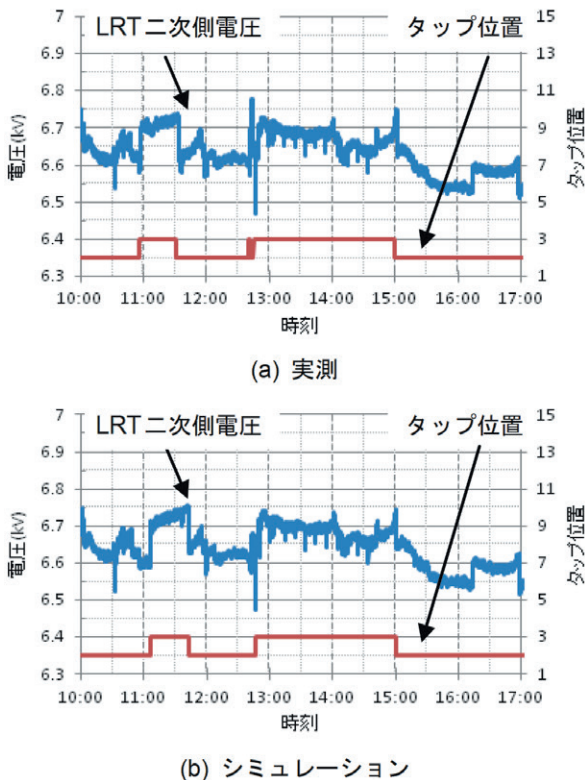


図8 検証結果 (SVR A ロック, LRT 使用時)

電圧ともにおおむね一致していることがわかる。また、接続点の電圧が基準電圧 6.6 kV よりも高くなっているのは負荷中心点が RL3 の途中に設定されているためである。

次に、SVR Aをロックし、LRTのみ使用とした場合の実測とシミュレーション結果を図8に示す。ここでは、LRTのタップ動作とLRT二次側(図4の⑪)の電圧を示す。図8から、タップ動作、LRT二次側の電圧ともにおおむね一致していることがわかる。なお、急峻な電圧変動において若干相違する箇所があるが、これは実器の電圧調整機器の特性等によるものと考えられる。

また紙面上省略しているが、そのほかの計測箇所の電圧についても実測と解析でおおむね一致していることを確認している。

以上から、シミュレーションの妥当性を確認することができたと考える。

4 電圧制御シミュレーション

電圧変動が急峻な場合の電圧制御シミュレーションを行った。線路の電圧変動と電圧調整機器のタップ動作について、一例を紹介する。

4.1 系統条件

実証試験場では太陽光発電出力が最大 100 kW であり、急峻で大きな電圧変動を得られない。このため、シミュレーション上で急峻な電圧変動を模擬し、電圧制御シミュレーションを行った。

系統構成は図4と同様であるが、線路インピーダンスおよび太陽光発電出力を変更し、シミュレーションを行った。電圧調整機器の動作時限の相違による影響を比較するため、SVR Aの整定は表2に示すように2通りとした。なお、LRTをロックとした。太陽光発電1, 2(PV1, PV2)の発電出力は実測データに係数を乗じて増加させたものを用い、それを図9に示す。

4.2 解析結果

SVR Aのタップ動作と太陽光発電の接続点(図4の⑮)の電圧をシミュレーションにより確認した。図10

表2 電圧調整機器 (SVR A) の整定

項目	整定 A	整定 B
基準電圧	6.6 kV	6.6 kV
不感帯幅	± 1 %	± 1 %
動作時限	40% · s	10% · s
線路インピーダンス	%R = 6% %X = 13%	%R = 6% %X = 13%

(a) に整定 A (青線), 図 10 (b) に整定 B (緑線) のシミュレーション結果を示す。

図 10 (a) と図 10 (b) の比較から, 動作時限を小さくすることで, 計測点の電圧が管理値内に収まりやすくなるのがわかる。しかし, 一時的な電圧変動に対してもタップ動作が発生するため, タップ動作回数が増加する傾向が確認されており, 最適な制御の整定方法等について, 更なる検討が必要である。

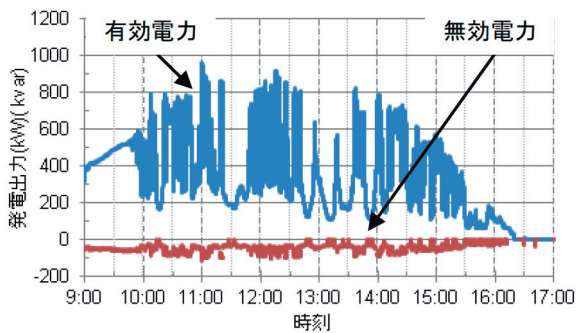
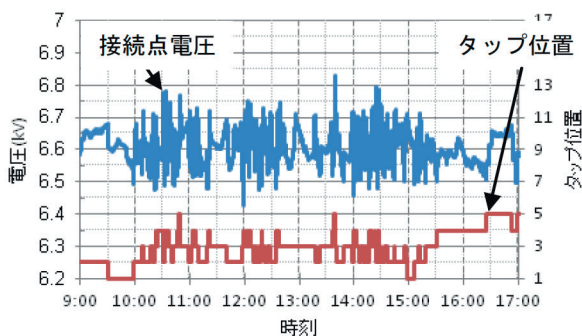
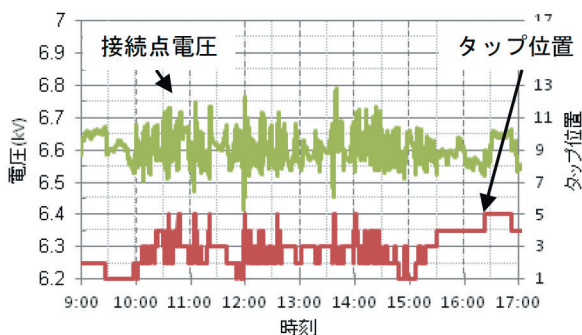


図 9 太陽光発電出力 (PV1 ≒ PV2)



(a) 整定 A (動作時限 40%・s)



(b) 整定 B (動作時限 10%・s)

図 10 電圧制御シミュレーション

ジュールを設計・製作してシミュレーションの環境を構築するとともに, それらを用いたシミュレーションの妥当性が確認できた。

今後, 本シミュレーション技術を活用して実規模での配電システムの電圧適正化や各電圧調整機器間の協調制御等に関する検討に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 甲斐隆章, 藤本敏朗:「太陽光・風力発電と系統連系技術」, pp.42-45 (2010), オーム社
- (2) 茂木他:「配電システムの電圧適正化に向けた取組み」, 東光高岳技報, No.2 (2015)

語句説明

注 1) PSCAD / EMTDC: 電力系統過渡解析シミュレータの一つ。強力な GUI である PSCAD と, EMTDC と同じ理論にもとづいて開発された解析プログラム EMTDC から構成されている。

注 2) モジュール: ハードウェアやソフトウェアにおける, ひとまとまりの機能・要素のことである。ソフトウェアでは, ある機能を実現するプログラムの集合体を示す場合に用いる。

注 3) ロック: LRT, SVR などの電圧調整機器のタップをある位置に固定した状態。



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
解析技術の研究に従事



茂木 規行

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 所属
次世代配電ネットワークに関する研究・開発に従事



宮本 卓也

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 所属
次世代配電ネットワークに関する研究・開発に従事

5 おわりに

本稿では, 今回検討したシミュレーションの概要とその妥当性の検証結果を述べ, 電圧変動が急峻な場合の電圧制御シミュレーションの一例について紹介した。

今回の取り組みで, 電圧調整機器および太陽光発電モ

SiC 素子を使用した 大形パワーコンディショナ

■ 吉井 誠
Makoto Yoshii

■ 鈴木 健司
Takeshi Suzuki

■ 土井 佑太
Yuta Doi

■ 杉浦 豊
Yutaka Sugiura

1 はじめに

1957年のサイリスタの発明以来、パワーエレクトロニクス用のスイッチング素子には、シリコン (Si) を材料とする半導体素子が使用されてきた。インバータに使用するスイッチング素子は、1990年代以降、Si製のMOSFET(金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ)とIGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)が主流となっている。Si製のMOSFETとIGBTの性能は、主にMOSゲートの微細化により向上が図られてきたが、Siの物性限界に近づきつつあり、大幅な性能向上が見込めなくなっている。

一方、炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などのワイドギャップ半導体を用いることで、Siの物性限界を超えるスイッチング素子が実現されている。実用化は、2000年代にSiC-SBD(ショットキーバリアダイオード)から始まった。2010年代に入るとSiC-MOSFETやGaN-JFET(接合形電界効果トランジスタ)が実用化され、複数素子を内蔵するパワーモジュールも製作されている。

東光高岳では、2009年からSiC-SBDを電気自動車用急速充電器に使用している。また、SiC-MOSFETモジュールを使用した30kW共振形交直双方向変換器も、開発している⁽¹⁾。

今回、開放電圧1,000Vの太陽電池と約800Vのリチウムイオン電池への適用を目的として、直流電圧範囲を550V~1,000Vとする500kWPCS(パワーコンディショニングシステム)を開発した。変換損失を低減するため、トランジスタにSi-IGBT、FWD(還流ダイオード)にSiC-SBDを内蔵するSiCハイブリッドIGBTモジュールを使用した。

さらに、ワイドギャップ半導体のみを用いた大容量のパワーモジュールの市販が始まり、東光高岳としてもこれらの実用化に備え、SiC-MOSFETとSiC-SBDを内蔵するフルSiC-MOSFETモジュールを使用する250kWPCSを開発した。

本稿では、SiCハイブリッドIGBTモジュールを使用した500kWPCSと、フルSiC-MOSFETモジュールを使用した250kWPCSについて紹介する。

2 SiCハイブリッドIGBTモジュールを使用した500kWPCS

2.1 SiCハイブリッドIGBTモジュールの特長

これまで大容量のPCSに使用してきたSi-IGBTモジュールは、トランジスタにSi-IGBT、FWDにSi-FRD(ファーストリカバリダイオード)を用いている。Si-FRDが順方向に導通しているとき、逆アームのSi-IGBT(正側のFWDが導通なら負側のIGBT、負側のFWDが導通なら正側のIGBT)をオンさせると、FWDの電流が0になった後に i_{rr} (逆回復電流)が流れる。この i_{rr} はSi-FRDに逆回復損失を発生させ、さらにSi-IGBTの E_{on} (ターンオンスイッチングエネルギー)を増加させるので、 f_{sw} (スイッチング周波数)を高周波化する妨げの一因となっている。

今回使用したSiCハイブリッドIGBTモジュールは、FWDにSiC-SBDを使用している。SiC-SBDは $I_{rr} \approx 0$ であることから逆回復損失がなく、さらにSi-IGBTの E_{on} を減少させ、モジュールの損失を低減できる特長がある。

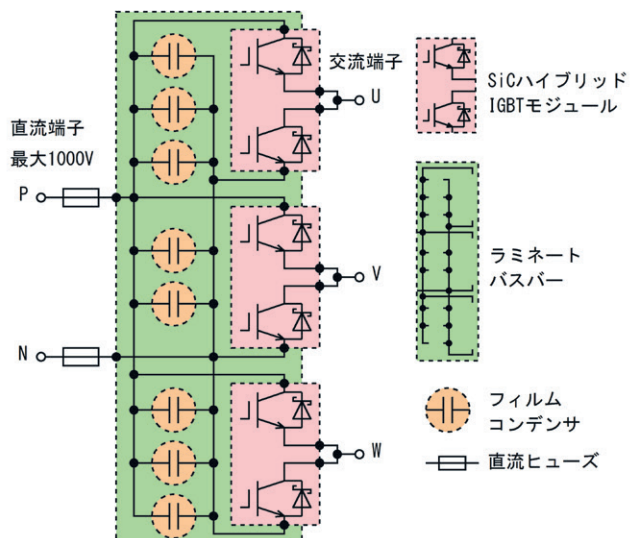


図1 SiCハイブリッドIGBTスタック回路図

2.2 SiCハイブリッドIGBTスタックの特長

製作したSiCハイブリッドIGBTスタックの部品構成と配置を反映させた回路図を、図1に示す。

特長を以下に示す。

- ・定格電圧1,700V、定格電流1,200Aで2in1構成のSiCハイブリッドIGBTモジュールを3個使用して、スタック1台で三相インバータを構成

- ・スタックの回路構成を2レベルインバータとして、3レベルインバータに比べ、回路構成を簡略化
- ・直流最高電圧1,000Vで、定格交流電力を出力可能
- ・直流最低電圧740V、三相交流電圧440Vの仕様では、スタック3台で1MWを出力可能
- ・直流フィルムコンデンサ使用により、期待寿命20年
- ・直流導体に低インダクタンスのラミネートバスバーを使用し、スナバレスを実現
- ・スイッチング周波数をSi-IGBTスタックの1.50kHzから2.55kHzに上げながら、損失は低減
- ・Si-IGBTスタックに対し体積を60%に低減（電力あたり）

2.3 500 kW PCSの特長

500 kW PCSの仕様を表1、単線結線図を図2に示す。

表1 500 kW PCS仕様

定格交流電力		
放電電力	500 kW	PCS 330 V 交流端
充電電力	500 kW	PCS 330 V 交流端
交流側仕様		
定格電圧	330 V	三相三線
電圧範囲	297 V~363 V	定常的な変動範囲
定格周波数	50 Hz	
周波数範囲	47.5 Hz~52.5 Hz	定常的な変動範囲
電流ひずみ率	各次3%以下、総合5%以下（40次以下）	
FRT要件（運転継続範囲）		
交流電圧低下	残存電圧0V、0.3s	電圧復帰後0.1sで電力90%以上
周波数変化率	±2Hz/s	
周波数ステップ変化	±0.8Hz、40ms	
直流側仕様		
定格電圧	750 V	
電圧範囲	550 V~1000 V	
電流範囲	放電932 A~充電886 A	
直流電力	放電513 kW~充電488 kW	
変換効率		
放電効率	97.5%以上	DC750 V, AC330 V, AC500 kW
	98.5%以上	DC550 V, AC330 Vでの最大効率
単独運転検出		
能動的方式	ステップ注入付周波数フィードバック方式（周波数変化率検出）	
受動的方式	位相跳躍検出	

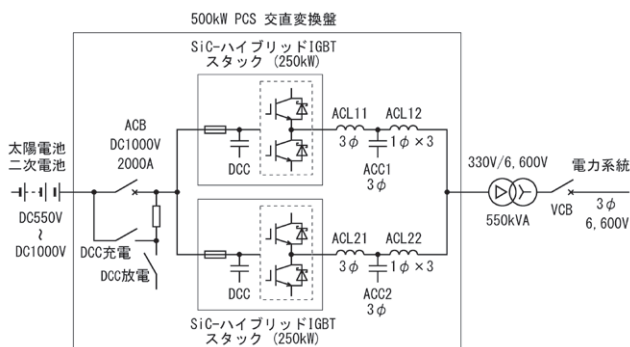


図2 500 kW PCS 単線結線図

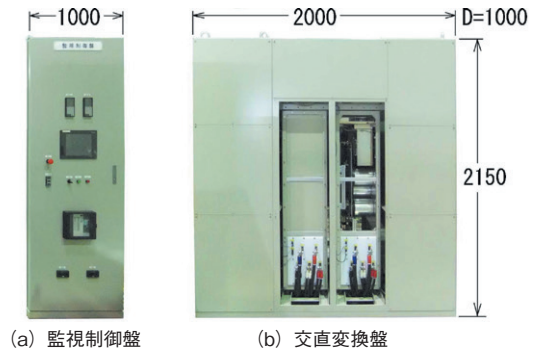


図3 500 kW PCS 外形

SiCハイブリッドスタックを2台使用して、定格交流電力は充放電500kWである。交流側は、連系変圧器を介して三相6,600Vに連系する。

500 kW PCS 外形を図3に示す。(a) 監視制御盤は、シーケンサ、操作画面、系統連系保護リレーなどを収納する。(b) 交直変換盤は制御回路、開閉器、フィルタ回路と、中央にSiCハイブリッドIGBTスタックを2台収納する。

図4に、定格の直流電圧750V、交流電圧330Vにおける、充放電の変換効率を示す。250kW放電（50%負荷）で98.3%、500kW放電（100%負荷）では97.8%であり、表1の仕様を満たしている。交流電圧330Vにおける最大変換効率は、直流電圧550V、250kW放電で98.8%である。

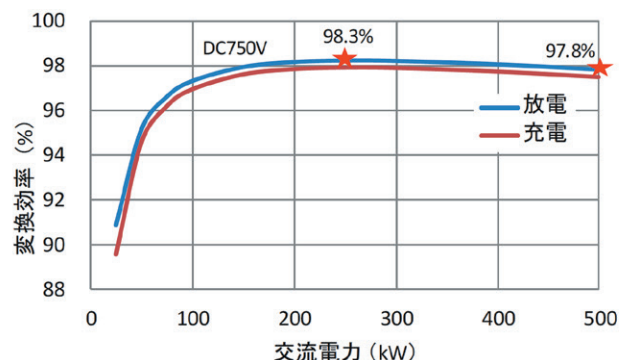


図4 500 kW PCS 変換効率

太陽光発電用PCSの変換効率の指標である部分負荷に重みを置く欧州効率（EURO-eta^{注1)}は、直流電圧750Vの条件で97.6%である。

定格の直流電圧750V、交流電圧330V、500kW放電時の交流電流波形を、図5に示す。測定時の交流電

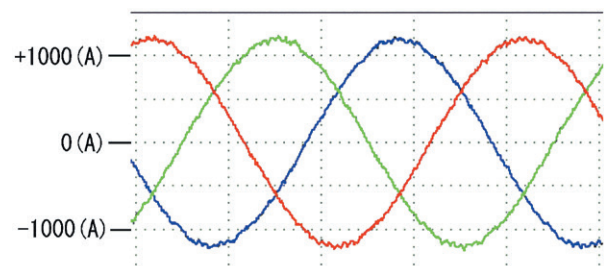


図5 500 kW PCS 交流電流波形

流のひずみ率は、総合 1.8% (40 次以下) であり、表 1 の仕様を満たしている。

3 フル SiC-MOSFET モジュールを使用した 250 kW PCS

3.1 フル SiC-MOSFET モジュールの特長

パワーモジュール内のトランジスタに SiC-MOSFET、FWD に SiC-SBD を使用し、すべての素子が SiC 製であることから、フル SiC-MOSFET モジュールと呼称されている。

SiC の絶縁破壊電界は Si に比べ約 10 倍高いので、SiC-MOSFET は同一の電圧定格の Si-MOSFET に対し、キャリア密度を 100 倍にして、オフ時に空乏層が広がる n-層の厚さを 1/10 にできる。n-層はオン時に MOSFET の電気抵抗の大部分を占めるドリフト領域となるので、SiC-MOSFET は同一の電圧定格、同一面積の Si-MOSFET に対し、オン抵抗を理想的には 1/1,000 に低減できる。(ただし、市販されている定格電圧 1,200 V の SiC-MOSFET は、定格電流時の D-S 間電圧が 2 V~3 V の例が多い。)

また、バイポーラ素子である Si-IGBT はターンオフ時にテール電流が流れるのに対し、モノキャリア素子である SiC-MOSFET は原理的にテール電流が流れないため、Si-IGBT に比べ E_{off} (ターンオフスイッチングエネルギー) が少ない特長がある。

さらに FWD として SiC-SBD をモジュールに内蔵することで、ゲートオフ状態と大電流時の逆方向電流に対するドレイン-ソース間電圧を低減している。

3.2 SiC-MOSFET スタックの特長

製作した SiC-MOSFET スタックの部品構成と配置を反映させた回路図を、図 6 に示す。

特長を以下に示す。

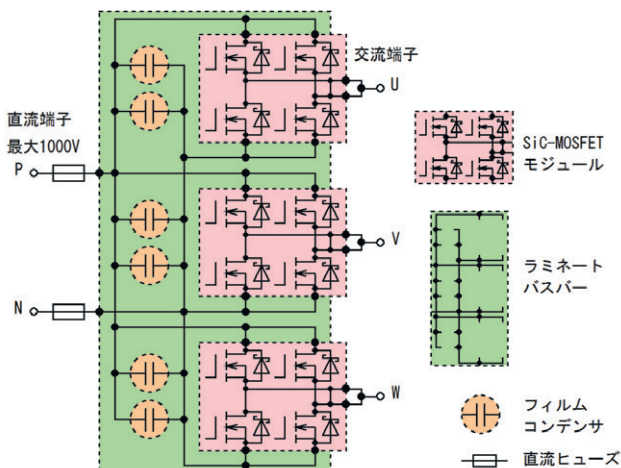


図 6 SiC-MOSFET スタック回路図

- ・定格電圧 1,200 V, 定格電流 800 A, FWD に SiC-SBD を使用した 2in1 構成の SiC-MOSFET モジュールを 3 個使用して、スタック 1 台で三相インバータを構成
- ・スタックの回路構成を 2 レベルインバータにし、3 レベルインバータに比べ、回路構成を簡略化
- ・直流最高電圧 1,000 V に対応 (定格交流電力は直流電圧 900 V 以下で出力可能)
- ・直流最低電圧 740 V, 三相交流電圧 440 V の仕様では、交流 300 kW (充放電) 出力可能
- ・直流フィルムコンデンサ使用により、期待寿命 20 年
- ・直流導体に低インダクタンスのラミネートバスバーを使用し、スナバレスを実現
- ・スイッチング周波数を SiC ハイブリッド IGBT スタックの 2.55 kHz から 12.35 kHz に上げながら、損失は低減
- ・体積を SiC ハイブリッド IGBT スタックに対し約 80%, Si-IGBT スタックに対し約 50% に低減 (電力あたり)

3.3 250 kW PCS の特長

フル SiC-MOSFET スタックを適用して開発した 250 kW PCS は、直流電圧範囲が 640 V~1,000 V, 交流電圧は三相 380 V である。ただし定格交流電力、充放電 250 kW を出力可能な直流電圧は、900 V 以下である。

250 kW PCS の仕様を表 2, 単線結線図を図 7, 外形を図 8 に示す。

表 2 250 kW PCS 仕様

定格交流電力		
放電電力	250 kW	PCS 380 V 交流端
充電電力	250 kW	PCS 380 V 交流端
交流側仕様		
定格交流電圧	380 V	三相三線
電圧範囲	342 V~418 V	定常的な変動範囲
定格周波数	50 Hz	
周波数範囲	47.5 Hz~52.5 Hz	定常的な変動範囲
電流ひずみ率	各次 3% 以下, 総合 5% 以下 (40 次以下)	
FRT 要件 (運転継続範囲)		
交流電圧低下	残存電圧 0 V, 0.3 s	電圧復帰後 0.1 s で電力 90% 以上
周波数変化率	± 2 Hz/s	
周波数ステップ変化	± 0.8 Hz, 40 ms	
直流側仕様		
定格直流電圧	750 V	
電圧範囲	640 V~1000 V	充放電 250 kW は 640 V~900 V
電流範囲	放電 399 A~充電 383 A	
直流電力	放電 255 kW~充電 245 kW	
変換効率 (設計値)		
放電効率	98.0% 以上	DC750 V, AC380 V, AC250 kW
	99.0% 以上	DC640 V, AC380 V での最大効率

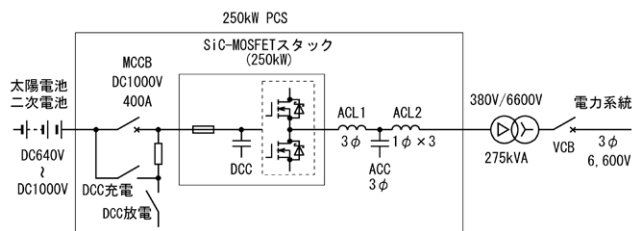


図7 250 kW PCS 単線結線図

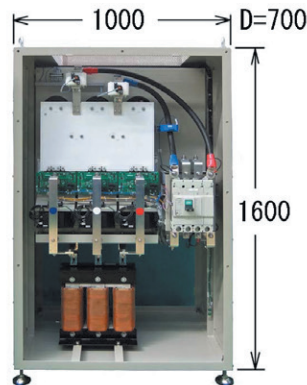


図8 250 kW PCS 外形

Si-IGBT モジュール、SiC ハイブリッド IGBT モジュール、フル SiC-MOSFET モジュールの各スイッチング素子を使用したときの、スイッチング周波数 f_{sw} とスイッチング素子の損失の関係を示す。損失を計算する回路構成は、2in1 モジュール 3 個で 250 kW PCS を構成し、直流電圧 750 V、三相交流電圧 380 V に統一した。

図9では、損失を表す直線の $f_{sw} = 0$ Hz の値が導通損失を、傾きがスイッチング損失の大きさを表わし、両者ともフル SiC-MOSFET モジュールを使用する場合が最小である。

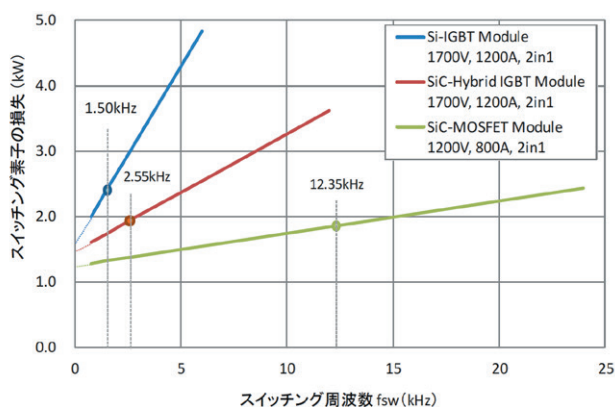


図9 スwitching周波数帯スイッチング素子の損失

今回、250 kW PCS にフル SiC-MOSFET モジュールを使用することで、SiC ハイブリッド IGBT モジュールを使用した 500 kW PCS に比べ、スイッチング素子の損失を増やさずに f_{sw} を 2.55 kHz から 12.35 kHz へ、

約 5 倍に高周波化した。 f_{sw} の高周波化により、フィルタリアクトル、コンデンサを含む部品を小形化、低損失化して、変換部を収納する盤の体積を 47% 縮小した。

4 おわりに

東光高岳では、本稿で紹介した SiC ハイブリッドモジュールを用いた 500 kW PCS をもとにして、太陽電池パネルと組み合わせた太陽光発電システムや、リチウムイオン電池などの二次電池と組み合わせた蓄電システムを開発し、提供していく所存である。

また、フル SiC-MOSFET モジュールを用いた 250 kW PCS の開発をとおして、ワイドギャップ半導体を用いたパワーモジュールを使用して電力変換装置を製造する、基礎的な技術を確認した。

今後も、SiC や GaN などのワイドギャップ半導体素子を積極的に使用していくとともに、リアクトルなどを含む装置全体の損失を低減し、高効率で小形化した電力変換装置を開発していく所存である。

■参考文献

(1) 土井、鈴木：「30 kW 共振形交直双方向変換器」, 東光高岳技報, No.2, pp.8-10, (2015)

■語句説明

注1) 欧州効率 (EURO-eta) : x% 出力時の変換効率を、 $\eta x\%$ とするとき、次の式で求める。

$$\eta_{EU} = 0.03 * \eta 5\% + 0.06 * \eta 10\% + 0.13 * \eta 20\% + 0.10 * \eta 30\% + 0.48 * \eta 50\% + 0.20 * \eta 100\%$$



吉井 誠

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
パワーエレクトロニクス機器の開発に従事



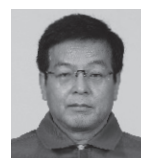
鈴木 健司

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
パワーエレクトロニクス機器の開発に従事



土井 佑太

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
パワーエレクトロニクス機器の開発に従事



杉浦 豊

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
パワーエレクトロニクス機器の開発に従事

気中断路器の耐震解析

論文

■ 大山 友幸

Tomoyuki Oyama

■ 神田 一彦

Kazuhiko Kanda

■ 永田 清志

Kiyoshi Nagata

1 はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、解析による断路器の耐震解析評価のニーズが高まっている。現在では、地震被害を受けた機器の原因究明を目的とした耐震解析や、機器設置地点での想定地震動に対する耐震解析、耐震対策を施した部位の妥当性評価など、精緻な解析モデルを作成しての耐震評価が一般的となってきた。

本稿では、気中断路器の耐震解析の最新動向として、精緻化解析手法、および非線形解析についての取組みを紹介する。

2 精緻化解析

2.1 機器の被害状況

東北地方太平洋沖地震によって、水平二点切断路器のがいし基部金具が破損した事象がある。図1に導電部を支える回転がいし部の下端に位置するがいし基部金具が破損して、回転がいし装置が傾いた状況、およびがいし基部金具破損部の詳細を示す。

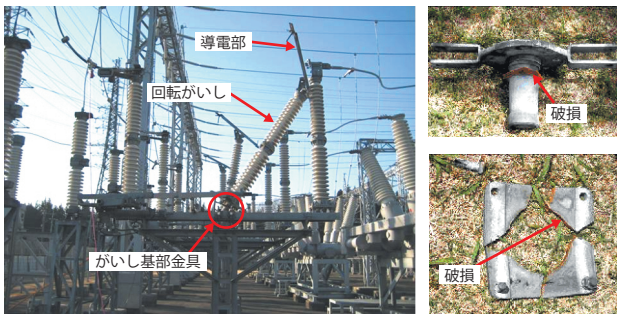


図1 がいし基部金具の被害器

2.2 がいし基部金具の解析手法

従来は、がいし基部金具の危険断面部の曲げモーメントと断面係数から発生応力を机上計算していたが、それでは金具部に局部的に応力集中したときの発生応力が計算されず、実態よりも低い応力値となることがわかってきた。そこで、最新の解析手法として、がいし基部金具の応力評価については、動的解析と静的解析を組み合わせた2段階解析で評価する手法を採用している。

2段階に分けて解析する理由としては、これまで作成してきた多種ある断路器の解析モデル、および解析結果を利用しつつ、がいし基部金具の詳細な解析を行うため

である。評価部位のがいし基部金具部のみを取り出し、三次元ソリッドモデルで静的解析をして、動的解析結果と掛け合わせることで、解析精度が向上し、解析の効率化も図れる。

具体的な解析手順を以下に示す。

(1) 解析手順① 曲げモーメントの算出

機器全体の精緻な三次元モデルを作成して、動的解析(時刻歴直接積分応答解析)でがいし基部金具に作用する曲げモーメントを算出する。作成した三次元モデルを図2に示す。

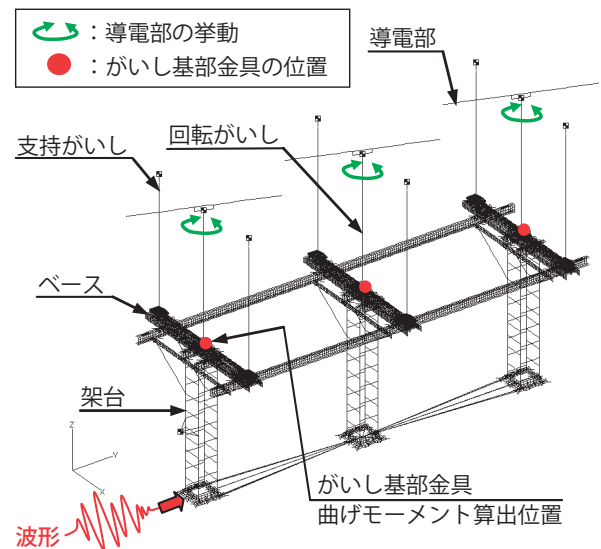


図2 機器全体の三次元モデル

(2) 解析手順② 最大応力が発生する曲げ角度の算出

評価波形を入力した場合のがいし基部金具に最大応力が発生する曲げ角度を算出する。時刻歴応答解析結果から回転がいし頂部が最大変位したときの角度を、がいし基部金具の最大応力が発生する曲げ角度として算出する(図3)。

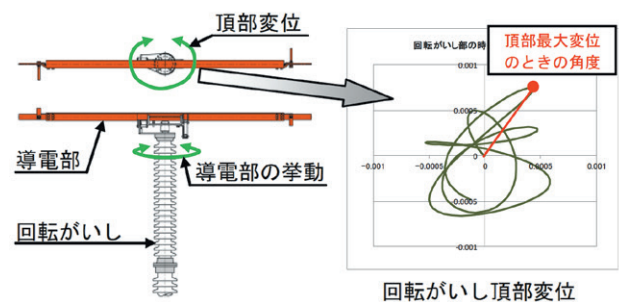


図3 回転がいし頂部の時刻歴変位

(3) 解析手順③ 応力集中で発生する応力の算出

がいし基部金具部だけの三次元ソリッドモデルを作成し、回転がいし頂部で最大変位が発生したときの傾き角度と同じ角度を曲げ角度として、静的解析で単位曲げモーメント 1 N・m あたりの発生応力を算出する (図 4)。三次元ソリッドモデルで静的解析するため、金具の形状・材質によつての応力分布が表現でき、応力集中箇所の最大発生応力が評価できる。

図 4 に三次元ソリッドモデルによる応力分布を示すが、応力集中箇所と図 1 の破損箇所が概ね同じであり、解析の妥当性が確認できる。

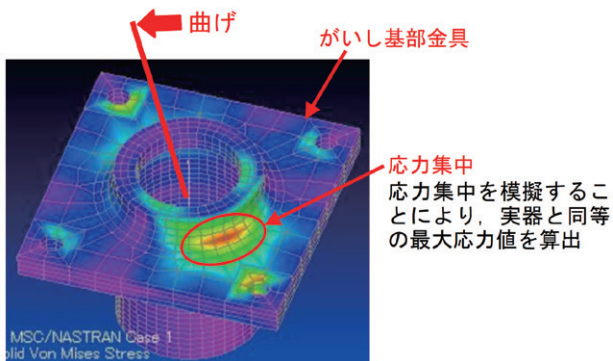


図 4 三次元ソリッドモデルの応力分布

2.3 最大発生応力の算出と実加振試験による検証

動的解析で得られた曲げモーメントと静的解析で得られた応力集中箇所の発生応力を掛け合わせて、がいし基部金具の最大発生応力を算出する。

JEAG5003 に基づく水平加速度 3 m/s² 共振正弦 3 波で加振した場合の、がいし金具の最大発生応力について、この最新の手法による解析結果と実加振試験結果を比較したところ、ほぼ一致した (表 1)。解析の妥当性が検証できたとと言える。なお、解析値は実加振試験の機器条件、および入力波形条件をまったく同じにした解析モデルで算出した。

表 1 解析結果と実加振試験結果 (3 m/s² 共振正弦 3 波)

	がいし基部金具 最大発生応力	機器 固有振動数
最新手法による解析	228 N/mm ²	3.1 Hz
実加振試験	229 N/mm ²	3.0 Hz

2.4 解析手法のフローチャート

先に述べた、最新の解析手法をフローチャート化したものを図 5 に示す。

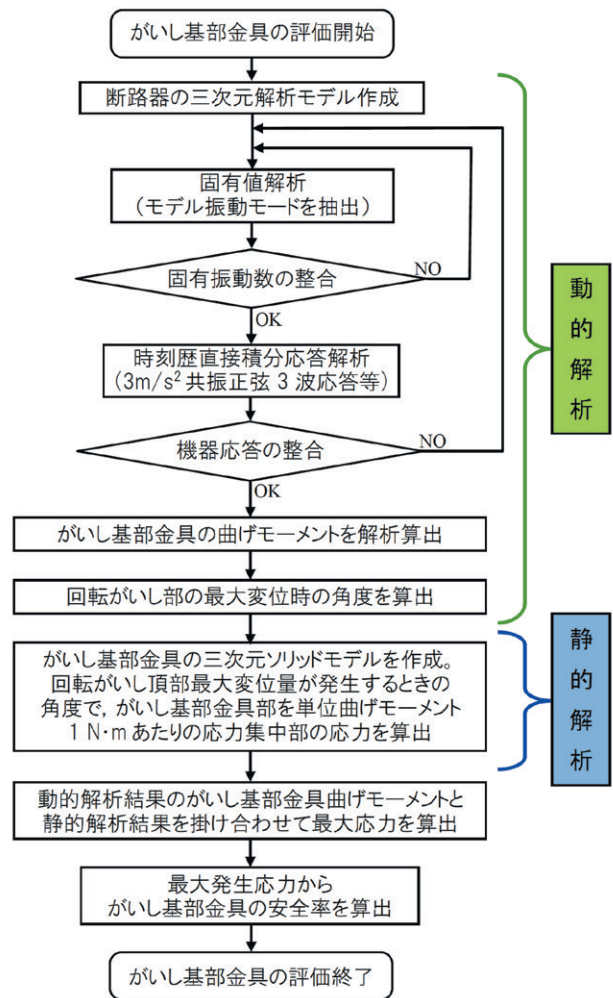


図 5 解析手法のフローチャート

2.5 想定地震動波形での解析結果の検証

この解析手法を用いて、東北地方太平洋沖地震により、がいし基部金具に被害を受けた機器の当該地点で想定された地震波形を解析モデルに入力して耐震評価を実施した。被害機器の台数と発生応力に対するがいし基部金具の安全率を表 2 に示す。

表 2 実器被害と耐震解析結果

機器定格	当該地点 被害数	がいし基部金具 安全率
電圧 72 kV 電流 1,200 A/2,000 A	12 個 (4 台 × 3 相)	0.9

解析結果は安全率 1 を若干下回っており、被害実態とおおむね合う解析結果が得られた。想定地震動波形に対する耐震評価が十分可能であると言える。

これは、動的解析により地震動が入力されたときの機器全体の応答が模擬できたことと、がいし基部金具部を三次元ソリッドモデルで静的解析することで応力集中が模擬でき、金具破損の起点が算出できたことから、より実態の現象に近づいたと言える。

3 非線形解析の取組み

3.1 機器の被害状況

東北地方太平洋沖地震により、水平中心一点切り形 550 kV 気中断路器で中間部にピンジョイント（以下、PJ）の付いた操作がいしのみが破壊した機器があった。被害写真を図 6 に示す。

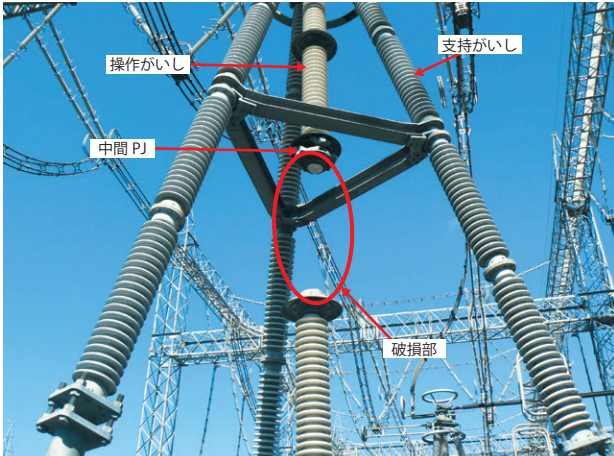


図 6 中間 PJ 付き操作がいしの被害器

3.2 破損原因の追究

中間 PJ 付き操作がいしの破損原因を追究するため、操作がいし単独の縮小モデルを製作した。縮小モデルは、操作がいしの上端、中間、下端は PJ で構成される（図 7）。PJ が理想的に働くならば、がいしには曲げひずみがいっさい発生しないが、PJ 部の可動範囲を超えるような大きな揺れが発生するとカップリング間が接触し、がいしに曲げひずみが発生することとなる。

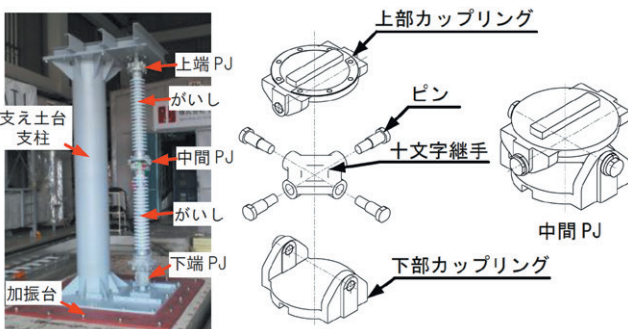


図 7 操作がいし縮小モデルの構造

3.3 破損原因の検証破壊試験

縮小モデルでの、共振正弦 10 波（入力周期 0.7 Hz）、および東北地方太平洋沖地震において宮城県築館で観測された実地震波による試験結果を図 8、図 9 に示す。

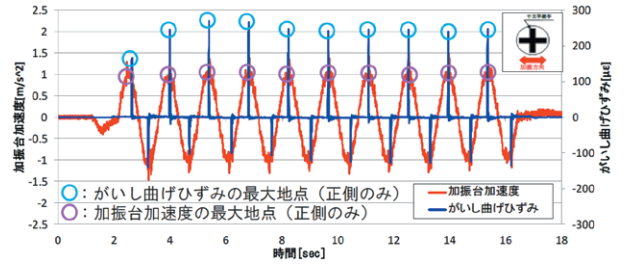


図 8 共振正弦 10 波 水平加速度 1 m/s² 試験結果

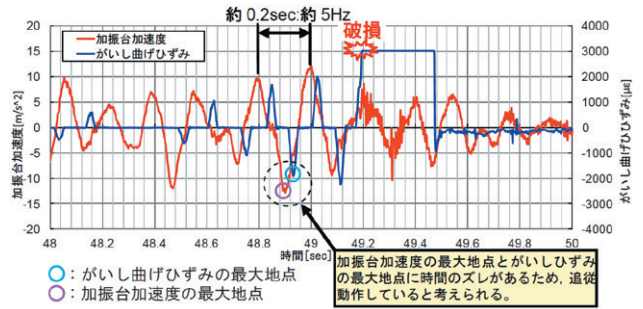


図 9 築館地震 試験結果

図 8 から、共振正弦波を 10 波（赤色）印加しているが、がいし曲げひずみ（図中○）がほぼ一定であることから、上下カップリング間の接触により、共振現象が途中で遮断されて振動特性が変化し非線形現象となっているために、曲げひずみが共振応答のように増加していない。

一方、宮城県築館で観測された地震波を印加した試験（図 9）では、がいしが破損した。加振台加速度が大きくなると、がいし曲げひずみが大きくなる傾向が図 9 から確認できる。このときの周期がおよそ 0.2 sec（およそ 5 Hz）であり、操作がいしの共振帯の波形ではないことがわかる。これは、操作がいし装置は、上端、中間、下端ともにピン構造で、外力に対して敏感に応答する構造体であるため、固有振動数でない振動でも供試器自体が揺れれば、その揺れに少し遅れて中間 PJ 部が追従動作し、上下カップリング間の接触が発生する。さらに大きな揺れになると、衝撃力となりがいし部に伝播して、がいしが破壊することが判明した。操作がいし部の追従動作の簡易説明を図 10 に示す。

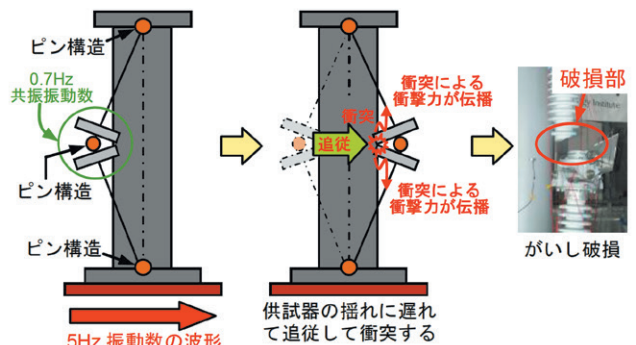


図 10 追従動作の簡易説明

3.4 非線形解析モデルの作成

解析には、MSC.NASTRAN（非線形解析オプション）を使用する。供試器を有限要素法による非線形過渡応答解析で模擬する際の解析モデルを図11に示す。支え土台の支柱とがいしは梁で作成し、上端PJと下端PJの境界条件を図に示すように設定した。中間PJ部は、非線形要素を用いて上下カップリング間の上側（赤要素）と下側（青要素）間に接触定義がしてある。その接触定義により、カップリング間の接触、および衝突による衝撃が表現できる。

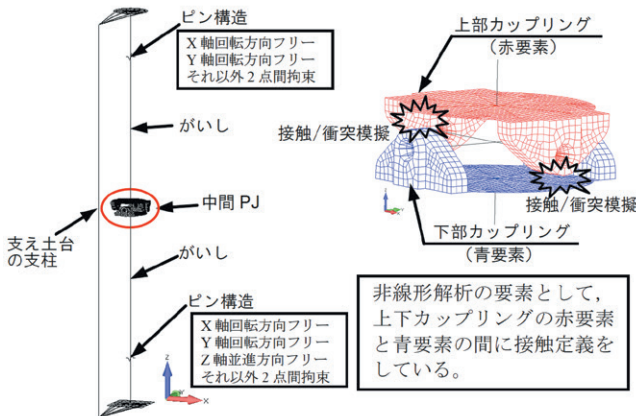


図11 非線形解析モデルの説明

3.5 実加振試験結果と解析計算結果の比較

実加振試験結果、線形解析結果、衝撃を模擬した非線形解析結果を比較したグラフを図12に示す。

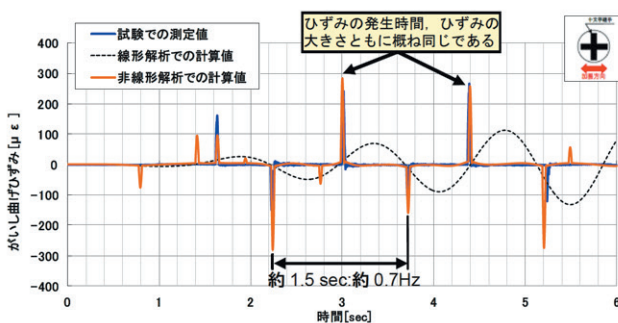


図12 実加振試験結果と解析計算結果の比較

図12は、入力加速度 1 m/s^2 の共振正弦3波とし、がいし最弱点部のひずみを比較したものである。青色が実加振試験結果であり、黒色点線が線形解析結果、橙色が非線形解析結果である。実加振試験結果と線形解析結果の比較をすると、線形解析ではカップリング間の接触、および衝突が模擬できないため、ひずみ波形の衝撃力が計算されない波形になってしまう。

これに対し橙色の非線形解析結果では、実加振試験結果と同等な衝撃力が計算されている。これは、カップリング間の接触、および衝突が模擬でき、衝撃ひずみが計算されているためである。がいし曲げひずみの発生

のタイミング、大きさのオーダー、および衝突時間は実加振結果とほぼ一致している。

このことから非線形解析を用いて耐震解析すれば、衝撃力の表現が可能になるため、実器の中間PJの動きについておおむね模擬できると言える。

今後は適宜、非線形解析を活用し、機器の非線形現象を考慮した耐震解析評価を実施し、さらなる製品の耐震性能向上を目指していく。

4 おわりに

現在までに多くの耐震解析評価を実施してきたなかで、実器振動を再現する精緻な解析モデルが作成でき、耐震解析の精度も向上してきている。

最近では、衝撃力のような非線形現象を解明するため、非線形過渡応答解析により、実器挙動を模擬した解析が可能であることを示した。

今後は、これらの解析技術を耐震性能向上品の開発に活用していきたい。

本稿の詳細は参考文献(2)、(3)を参照されたい。

■参考文献

- (1) 一般社団法人日本電気協会日本電気技術規格委員会：「変電所等における電気設備の耐震設計指針」, JEAG5003-2010
- (2) 大山友幸他：「単柱構造断路器における基部金具の耐震解析技術の構築」, 電気学会論文誌B, Vol.135, No.12, pp.737-742
- (3) 神田一彦他：「ユニバーサルジョイント付き操作がいしの非線形振動特性と解析技術」, 電気学会論文誌B, Vol.135, No.12, pp.724-730



大山 友幸

電力プラント事業本部
断路器製造部 設計グループ 所属
気中断路器の設計および開発業務に従事
電気学会会員



神田 一彦

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属
製品の解析技術開発に従事
電気学会会員



永田 清志

電力プラント事業本部
断路器製造部 設計グループ 所属
気中断路器の設計および開発業務に従事
電気学会会員

パームヤシ脂肪酸エステルを用いた 変圧器絶縁油のレトロフィリングに 関する検討

■栗原 二三夫
Fumio Kurihara

■大和田 裕樹
Hiroki Owada

■塚田 智史
Satoshi Tsukada

■本庄 智也
Tomoya Honjo

■鈴木 貴志
Takashi Suzuki

1 はじめに

近年、重電分野においても環境対応が必要とされている。変圧器においては、鉱油に替わる液体絶縁媒体として生分解性に優れたエステル系絶縁油^{注1)}(以下エステル油)を適用した変圧器の開発が進んでいる。エステル油には菜種油や大豆油などの天然植物油、植物由来の脂肪酸エステル、合成系のポリオールエステルといった種類がある。高吸湿性や生分解性、腐食性硫黄成分不含であるほか、油種によっては防災性(高引火点)や冷却性(低粘度)といった特長を持つ。また近年では高吸湿性に起因し、油浸絶縁物中水分がエステル油へ移行することによる絶縁物劣化抑制といった効果も報告されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。変圧器への適用実績としては、近年国内においても電力用、電鉄用としての適用事例が増加している⁽⁴⁾。また最近ではIECにおける天然エステル品質規格(IEC62770)の発行やメンテナンスガイドの検討、国内では石油学会における品質指針(JPI-5R-76-15)の発行など、エステル油を使用しやすい環境の整備が進む傾向にある。

エステル油の変圧器への適用は新設変圧器に限らず、既設変圧器では保守・改修などの際に、従来使用されている鉱油からエステル油へのレトロフィリング^{注2)}(入替)がある。CIGRE WG A2.35の技術報告書「Experiences in Service with New Insulating Liquids」⁽⁵⁾ではエステル油へのレトロフィリングの理由として、火災安全性、環境への配慮、水分耐久性付与、腐食性硫黄回避、固体絶縁物寿命延伸と記載している。海外においてはこのような要求に対しエステル油の特長を生かしたレトロフィリングが実施されている。エステル油へのレトロフィリングに関する研究は、近年国内でも鉱油からエステル油への入替時に生じる油種混合による特性変化の評価といった観点で種々報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。東光高岳においても低粘度で従来絶縁油との代替性が高いエステル油であるパームヤシ脂肪酸エステル(以下PFAE)を用いた環境対応特高変圧器の開発を行う中で、鉱油との混合性検証や経年機器への油入替による実器検証などを実施している。本稿ではその検証結果を紹介する。

2 PFAE/ 鉱油混合時の絶縁油特性

既設変圧器の絶縁油のPFAEへのレトロフィリングを

行う場合、従来の鉱油との混合が生じるため、PFAEに鉱油が混合した場合の特性変化に関する基礎検証を実施した。なお本検証は、PFAE製造・供給元であるライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社の協力を得て実施した。

2.1 試料と試験条件

鉱油(JIS C2320 1種2号)とPFAE(ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ(株)製 パステルNEO)を用い、PFAEに対し0~100%の混合率で混合を行い、JIS法による動粘度、引火点、電気特性(体積抵抗率、絶縁破壊電圧)の測定を実施した。

2.2 鉱油とPFAEの混合特性

図1に動粘度と引火点、図2に絶縁破壊電圧、体積抵抗率の変化傾向を示す。

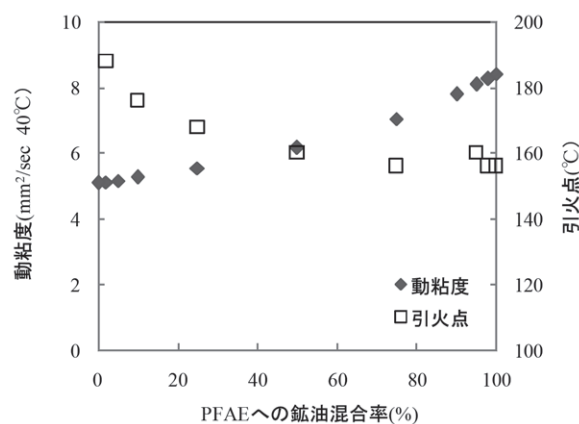


図1 PFAEへの鉱油混合による動粘度、引火点変化

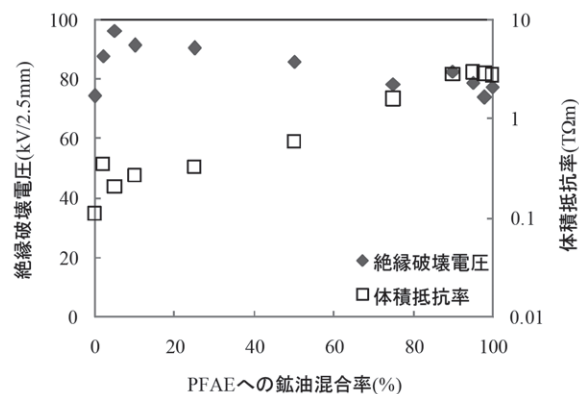


図2 PFAEへの鉱油混合による絶縁破壊電圧、体積抵抗率変化

各特性により若干の変動はあるが、鉱油混合率に応じ

各油種の特性値差の間で緩やかな変化を示した。変圧器絶縁油を抜出した際の残存油の割合は、変圧器内洗浄を行う場合は4%以下、行わない場合は7%以下であるとの報告例がある⁽⁸⁾。最大10%の鉱油残存が生じたとしても、PFAEは鉱油混合によって著しい特性悪化はない。なお鉱油混合によるPFAEの酸化安定性変化についても別途検証しているが、10%程度の鉱油混合では大きな影響はない。また生分解性では10%程度の鉱油混合では大きな変化は生じない(OECD301F試験^{注3)}の易分解性基準である60%以上を保持)とのシミュレーション結果があり⁽⁹⁾、生分解性への影響も少ないと考えられる。

2.3 劣化鉱油混合時の電気特性

経年器絶縁油に著しい劣化が生じている場合は、電気特性の低下した劣化鉱油の混合により入替後PFAEの電気特性が低下する可能性がある。そこで加速劣化によって調製した劣化鉱油をPFAEへ混入することで、PFAE電気特性(絶縁破壊電圧、体積抵抗率、誘電正接(tanδ))の変化の傾向を検証した。図3、図4に結果を示す。なお調整した劣化鉱油の酸価は0.15 mgKOH/g、体積抵抗率は0.004 TΩm、誘電正接(tanδ)は9.9%であった。

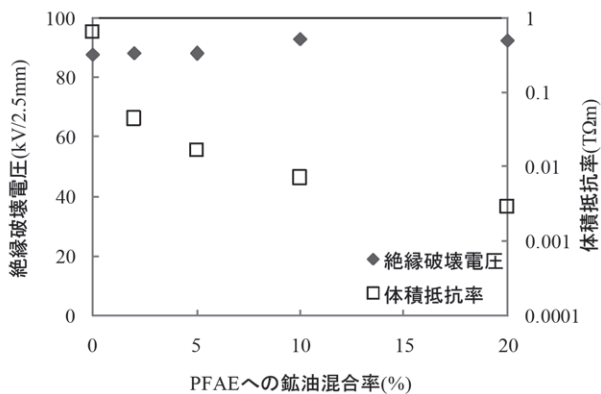


図3 PFAEへの劣化鉱油混合による絶縁破壊電圧、体積抵抗率変化

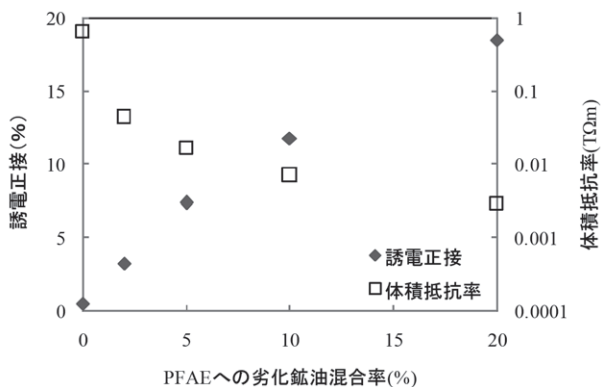


図4 PFAEへの劣化鉱油混合による誘電正接、体積抵抗率変化

PFAEへの劣化鉱油混合により、絶縁破壊電圧の低下はなかったが、体積抵抗率は20%混入までに劣化鉱油レベルまで徐々に低下、誘電正接も大きく増加した。一般にこれらの特性はイオン性劣化生成物の影響を受けて低下することが知られている。電子伝導のキャリアとなりうるイオン性鉱油劣化生成物の混入により、PFAEが比較的大きな影響を受けていることが想定されるが、加速劣化鉱油の使用による過剰な影響、誘電正接測定(80°C加熱)における加熱影響等の可能性もあり、今後のメカニズム検討が必要である。

3 PFAE/ 鉱油混合時の変圧器特性

鉱油入りの経年変圧器実器をPFAEへレトロフィリングした場合の変圧器特性の良否について検証した。

3.1 供試器

供試器は、経年21年の自社製特高変圧器とした。表1に供試変圧器の諸元を示す。

項目	定格
定格容量	5,000 kVA
相数	3相
定格周波数	50 Hz
定格電圧	66 kV / 3.3 kV
冷却方式	油入自冷
油量	5,750 L

3.2 試験内容

PFAEへの絶縁油入替は、真空注油により実施した。その際の鉱油混入量は、おおよそ10%程度と想定される。入替前後および変圧器試験後に、絶縁油特性の測定を実施し絶縁油入替による特性変化を確認した。変圧器試験は変圧器規格であるJEC2200に準拠し各種特性試験

表2 変圧器諸特性試験項目

受入試験	巻線抵抗
	変圧比
	短絡インピーダンス
	負荷損
	無負荷損
形式試験	短時間交流耐電圧
	温度上昇
特殊試験	雷インパルス耐電圧
	騒音
	巻線 - 対地間静電容量
	絶縁抵抗, 誘電正接 (tan δ)
その他試験	油中溶存ガス分析
	コロナ

を実施した。表 2 に試験項目を、図 5 に試験風景を示す。



図 5 試験風景

3.3 試験結果と考察

表 3 にレトロフィリング前後の絶縁油特性変化を示す。

表 3 レトロフィリング前後の絶縁油特性変化

	入替前 (鉱油)	入替後 (PFAE)	温度 試験後	PFAE 初期値
油中水分 (mg/kg)	7	41	58	17
酸価 (mgKOH/g)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
体積抵抗率 (TΩm)	0.45	0.05	0.04	0.11
絶縁破壊電圧 (kV/2.5 mm)	94	85	87	98

入替後の油中水分は PFAE 初期値に対し上昇した。これは PFAE の吸湿性の高さによる固体絶縁物からの水分移行のためと思われる。その後さらに移行が進み水分は増加するが、絶縁破壊電圧への影響はほとんどなかった。体積抵抗率は PFAE 初期値に対して若干低下した。これは前述の劣化鉱油の混入試験結果から経年劣化鉱油の影響である可能性が示唆されるが、詳細なメカニズムについては今後の検討が必要である。また酸価については大きな変化はなかった。

次に、レトロフィリング後の変圧器諸特性試験結果(入替前との差異)を表 4 に示す。

表 4 レトロフィリング後の変圧器諸特性試験結果

項目	入替前との差異 (%)	比較条件
巻線抵抗	-2.0	等価抵抗
変圧比	0.0	U-V
短絡インピーダンス	-0.8	出荷時との比較
負荷損	0.7	出荷時との比較
無負荷損	0.0	出荷時との比較
短時間交流耐電圧	破壊なし (DGA:C ₂ H ₂ N.D.)	既定の各条件
温度上昇	-1.3	最高油温
雷インパルス耐電圧	破壊なし (DGA:C ₂ H ₂ N.D.)	既定の各条件
騒音	0.8	-
巻線 - 対地間静電容量	27.7	H-L,E 25°C
絶縁抵抗	-62.0	H-L,E 冷温
誘電正接 (tan δ)	23.8	H-L,E 冷温
コロナ	未検出 (DGA : C ₂ H ₂ N.D.)	1.5 E

一部の試験項目を除き特性の変化はほとんどなかった。種類の異なる絶縁油入替による絶縁特性低下リスクという観点では、短時間交流耐電圧、雷インパルス耐電圧、コロナ試験において入替前と変わらない結果となり特性低下は生じていない。また試験後に実施した油中溶存ガス分析でも、放電起因で生成するアセチレン (C₂H₂) や水素 (H₂) 増加、過熱起因で生成するエチレン (C₂H₄) 等は検出されず、その他ガスについても内部異常を示唆するような生成は見られなかった。油入替による絶縁的な特性低下や欠陥などは生じていないものと判断でき、PFAE へレトロフィリングした変圧器は、入替時点において十分な実用性能を有していると考えられる。

鉱油と PFAE の特性の違いが影響すると思われる試験項目については比較的大きな変化が見られた(当該特性の数値は表 4 中で斜体で表示)。以下、考察する。

(1) 温度上昇 (最高油温)

温度上昇試験による最高油温は低下傾向を示した。これは、変圧器冷却性能にかかわる絶縁油物性(比熱、熱伝導率、粘度)の変化が現れているため、低粘度の PFAE への入替によって冷却性が向上し最高油温が低くなったと考えられる。実器温度上昇試験により負荷率に対する二次巻線温度上昇値を実測した結果を図 6 に示す(本検証とは別途実施)。

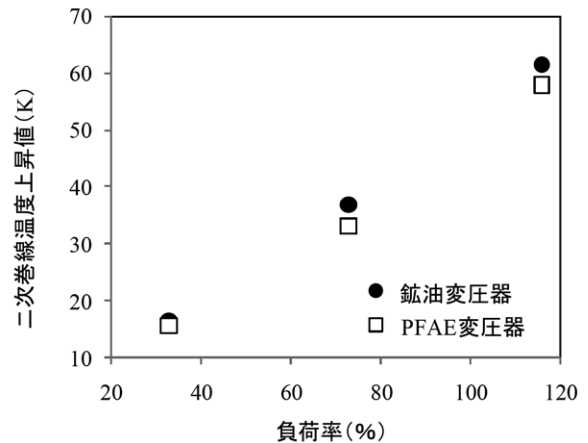


図 6 鉱油変圧器、PFAE 変圧器での温度上昇試験時の負荷率に対する二次巻線温度上昇実測値

鉱油変圧器に対し PFAE 変圧器の二次巻線温度上昇値は負荷率が大きくなると低くなる傾向を示す。PFAE の巻線冷却効果が優れていることがわかる。

(2) 巻線 - 対地間静電容量

巻線 - 対地間静電容量は増加傾向を示した。これは鉱油の比誘電率 2.2 に対し PFAE が 2.9 と約 30% 程度高いため、対地間の絶縁油や油浸絶縁物の静電容量を増加させていると考えられる。

(3) 絶縁抵抗

絶縁抵抗は、変圧器として実用上十分な絶縁抵抗値が

得られたが、低下傾向が見られた。一般に、変圧器の絶縁抵抗は絶縁油体積抵抗率と相関することが知られている。表3に示すようにPFAEへの入替によって体積抵抗率は若干低下しており、この影響が絶縁抵抗低下の一因となっていると考えられる。

(4) 誘電正接 (tanδ)

巻線-対地間の誘電正接 (tanδ) は上昇傾向を示した。表3に示すように入替後の経年劣化鉱油混合のPFAEの体積抵抗率は若干低下していることから、絶縁油の誘電正接は増加していることが想定される。この傾向は図4においても確認されている。誘電正接は対地間の油浸絶縁物中の絶縁油の誘電正接も影響していると考えられ、経年劣化鉱油が混合したPFAEが存在することにより誘電正接が増加したことが想定される。

4 まとめ

低粘度で従来絶縁油との代替性が高いエステル油であるPFAEを用い、経年特高変圧器絶縁油のレトロフィリングに関する検証を実施した。その結果、PFAEへレトロフィリングした変圧器および絶縁油は、若干の特性変化があるものの十分な実用性能を有していることがわかった。今後、レトロフィリングした変圧器や絶縁油の安定性、保守管理方法、レトロフィリングによる付加価値の評価等、更なる検討を進める予定である。

最後に、本検証 (PFAE/ 鉱油混合時の絶縁油特性) の実施に当たり、ご協力いただいたライオン・スペシャリティ・ケミカルズ (株) に謝意を表します。

参考文献

(1) 栗原：「パーマヤシ脂肪酸エステルにおける絶縁紙劣化抑制の検討」, 東光高岳技報, No.1,2014
 (2) 西川他：「植物油を用いた絶縁紙の劣化と酸素の影響」, H24 電気学会電力・エネルギー部門大会
 (3) C. patrick, et al., Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid, IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Oct. 28—Nov. 02, 2001
 (4) 「エステル系絶縁油専門委員会報告」, 第32回絶縁油分科会研究発表会, 2012
 (5) CIGRE Brochure 436, Experiences in Service with New Insulating Liquids, 2010
 (6) 小柳他：「植物由来エステル系絶縁油と鉱油のブレンド検討」, 第35回絶縁油分科会研究発表会, 2015
 (7) 小柳他：「植物由来エステル系絶縁油と劣化鉱油のブレンド調査」, 平成27年電気学会基礎・材料共通部門大会
 (8) C. Patrick, et al., Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension, IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, 2003

(9) 畠田他「パーマヤシ脂肪酸エステル絶縁油の変圧器への適用検討」, 第34回絶縁油分科会研究発表会, 2014

■ 語句説明

注1) エステル系絶縁油：主成分として、脂肪酸とアルコールからなる分子内にエステル結合 (-COO- の化学結合) を有する化合物を使用した絶縁油。生分解性が高い。

注2) レトロフィリング：旧型のを改良することによって存続させることをレトロフィットという。絶縁油入替による電気機器の改良・存続をレトロフィリングという。

注3) OECD301F 試験：OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS に記載された生分解性に関する試験法



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
 材料技術の開発に従事
 電気学会, 石油学会会員



大和田 裕樹

技術開発本部
 技術研究所 材料技術グループ 所属
 絶縁油試験・分析に従事



塚田 智史

電力プラント事業本部
 大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属
 大型変圧器の設計に従事
 電気学会会員



本庄 智也

電力プラント事業本部
 大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属
 大型変圧器の設計に従事
 電気学会会員



鈴木 貴志

ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社
 研究開発本部
 平井研究所 平井第1研究室 所属

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

■ 滝澤 明広
Akihiro Takizawa

■ 森 佑介
Yusuke Mori

1 はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械強度が優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられてきている。近年、防災や環境負荷低減のため、油やSF₆ガスといった絶縁方式に代わり、エポキシモールドによる固体絶縁に対するニーズが高まっている。そのニーズに迅速に応えるべく開発品を早期に市場投入するためには、開発段階で試作前に最適な成形プロセス条件を求め、開発の手戻りを抑制することが必要となる。最適な成形プロセス条件とは、ポイドなどの欠陥を防止するだけでなく、樹脂の硬化収縮に起因する残留応力・ひずみの抑制、モールド表面のヒケなどの外観不良の抑制も含まれる。これまで筆者らは、試作前に最適な成形プロセス条件を求められるように、製造時における樹脂流動、硬化収縮および残留応力・ひずみの解析技術の研究開発に取り組んできた。特に、樹脂ボリュームが大きく、自己発熱の影響が無視できない硬化収縮挙動の解析に精力的に取り組んできた^{(1)~(6)}。これにより、的確な成形プロセス条件を見出すことが可能になり、従来よりも試作回数を低減させることができるようになってきた。しかしながら、これまで取り組んできた残留応力は、**図1**に示す一次硬化の工程にて生じるものであり二次硬化の工程以降を考慮したものではなかった。製品開発に有用な情報を得るには、成形プロセス完了時の残留応力状態を的確に把握することが有効であり、徐冷の工程まで考慮することが必要である。

今回、これまで取り組んできた一次硬化収縮による硬化ひずみ⁽⁵⁾に加え、二次硬化の工程以降で起こる応力緩和と呼ばれる現象を考慮することで成形プロセス完了時の残留応力を求められるようになった。本稿では、単純な形状における計算例とともに残留応力予測のための応力緩和解析について紹介する。

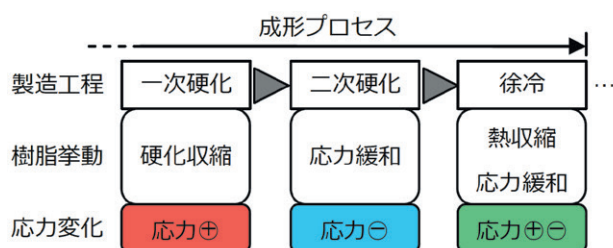


図1 モールド製造工程と応力変化の関係

2 応力緩和現象

2.1 モールド製造工程における応力緩和現象

エポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂は硬化反応によって収縮し、内部部品との熱収縮差により、成形時に機器内部に残留応力が発生する⁽⁵⁾。残留応力が強いと、使用環境での外的な荷重や温度変化などとの組み合わせにより、場合によっては樹脂の割れなどを引き起こす。これまで、一次硬化によって生じる残留応力や硬化温度から常温に下げた際に生じる熱応力を計算できるようにしてきた。しかしながら、応力が生じる現象のみを対象としていた。すなわち、**図1**に示した応力が緩和する現象を考慮しておらず、応力を過剰に見積もっていたことになる。

図1に示すように製造工程では、一次硬化の工程で硬化収縮による残留応力が生じ、二次硬化の工程にて長い時間、高い温度をかけることで応力が緩和する。その後、高温状態から徐々に温度を下げる徐冷と呼ばれる工程を経る。徐冷の際には樹脂と内部部品の線膨張率の差から温度が下がることで応力が生じるものの、時間をかけて徐々に温度を下げることで応力発生を抑制（応力緩和）している。したがって、徐冷においても応力緩和を考慮する必要がある。これらを踏まえ、妥当な残留応力を得るために応力緩和を考慮した解析に取り組んだ。

2.2 応力緩和解析の概要^{(7)~(9)}

エポキシ樹脂は粘弾性と呼ばれる特性を持っている。粘弾性とは粘性的な流動をともなう弾性を示すものであり、一般的に**図2**に示すバネとダッシュポットで構成したMaxwellモデルを用いて挙動を表現する。負荷を掛けた際に即応せずにダッシュポットによって遅れた応答となる。エポキシ樹脂で考えた場合、**図3**に示すように、両端を固定した状態で硬化させると硬化収縮によって内向きに応力が発生する。この状態で変位を固定し続けると、時間経過に伴いダッシュポットがゆっくりと伸びて応力が弱くなる。このようにMaxwellモデル

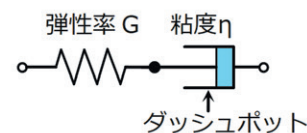


図2 Maxwellモデル

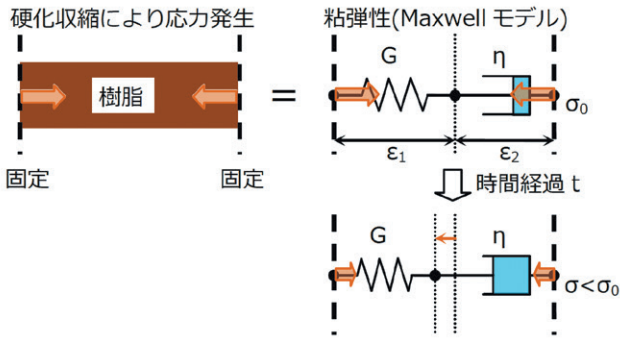


図3 Maxwellモデルによる粘弾性挙動のイメージ

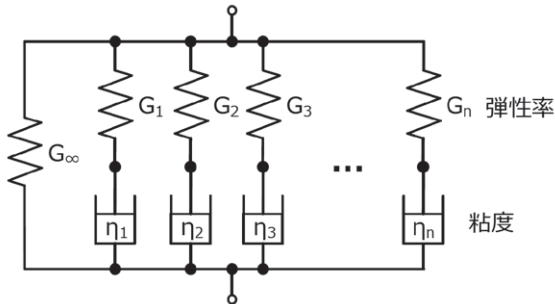


図4 一般化 Maxwell モデル

は応力が緩和するようすを表わすことができる。両端の変位が変わらずに応力が弱くなっていることから弾性率が低下することと等価になり、その弾性率を緩和弾性率とよぶ。

単一の Maxwell モデルであると、ある決まった時間域での応力緩和特性のみの記述となるため、汎用的に粘弾性特性を表わす場合、図4に示すように Maxwell モデルを複数個並列接続した一般化 Maxwell モデルを使用する。

一般化 Maxwell モデルを Prony 級数の形式で表現したものを次式に示す。ここで $G(t)$: 緩和弾性率, t : 緩和時間, G_i : Maxwell モデルの弾性率, τ_i : ダッシュポットの緩和時間, a_T : シフトファクター, T : 温度, n : Maxwell モデルの結合個数である。

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

粘弾性特性の測定から解析適用までの概要を以下に示す。複数の温度条件にて動的粘弾性測定^{注1)}を実施し、周波数に対する動的弾性率^{注2)}の特性を得る。そのデータからある基準温度における時間に対する緩和弾性率の関係が得られる。緩和弾性率は、図5に示すように時間とともに低下していく特性となる。また、この特性は基準温度に対する温度変化に合わせて時間軸方向にスライドできる。この温度変化をシフトファクターと呼ばれる温度の関数を用いて基準温度の特性をシフトして異なる温度も含めた粘弾性挙動を表現する。(1)式のパラメータである τ_i , G_i , G_∞ , $a_T(T)$ を求めることで

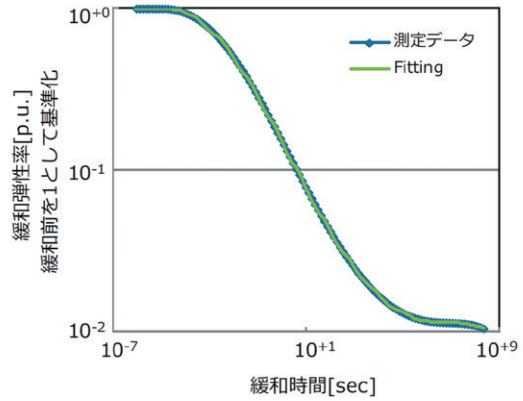


図5 基準温度における粘弾性特性

解析に適用できるようになる。求めた粘弾性特性は、樹脂物性として定義して計算する。これにより温度と時間によって弾性率が低下し応力が緩和する様相が解析できる。

3 応力緩和解析の計算例

3.1 解析モデル

紹介する計算例の解析モデルの形状を図6に示す。外形は円柱形状のモールドであり、内部部品としてモールドの中央部に円柱状の鉄を配置したモデルとなっている。このモデルはある程度樹脂のポリウムがあり、硬化収縮の影響が生じやすくなっている。また内部部品が鉄であるために樹脂と鉄の線膨張率差が大きく、徐冷時に強い熱応力が見込めるものである。

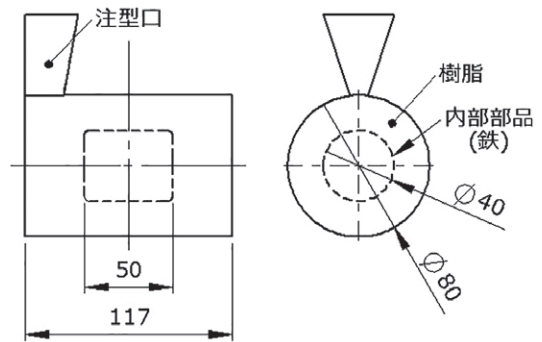


図6 解析モデル

3.2 二次硬化の工程における応力緩和解析

一次硬化後の残留応力と二次硬化後の残留応力の分布を図7に示す。図は円柱形状の断面となっており、樹脂のみの応力分布を示し、内部部品は非表示としている。一次硬化後の状態では、一次硬化の硬化収縮によって生じたひずみにより残留応力が生じている。残留応力は内部部品を中心に樹脂の外表面に向かって弱くなる分布となっている。特に内部部品のコーナー部に接する箇所の樹脂に強い応力が生じていることがわかる。これに対して、二次硬化後の状態は応力緩和によって全体的に

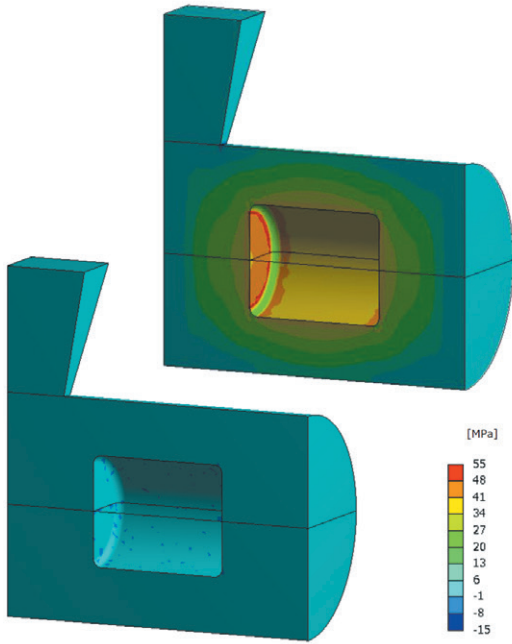


図7 残留応力分布 一次硬化後(上), 二次硬化後(下)

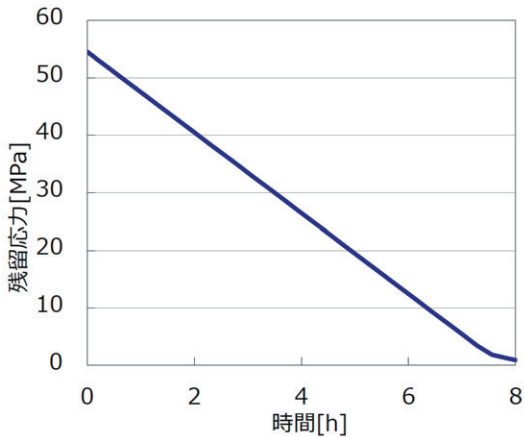


図8 残留応力の時間変化

弱い応力となり、かつほぼ様な分布になっていることがわかる。次に強い応力の生じていた箇所の残留応力の時間変化を図8に示す。この解析モデルの場合、55 MPa程度生じていた残留応力が1 MPa程度まで緩和されている。以上のことから、二次硬化の工程においては高温状態を長時間維持することで応力が大幅に緩和して残留応力を抑制できることがわかる。反対に低温加熱もしくは短時間加熱の場合には、残留応力が強くなることは容易に想像でき、二次硬化の温度・時間の条件は適切に設定しなければならないと言える。

3.3 徐冷の工程における応力緩和解析

応力緩和は主に二次硬化の工程を想定して適用検討を進めてきたが、徐冷の工程でも考慮すべきと考え適用を試みた。

従来の徐冷工程に対する応力解析（以下、従来計算）

では、線膨張率差によって生じる熱応力のみを計算しており、このとき時間によって応力が緩和する要素は含まれない。そのため、徐冷というゆっくり冷やすことの結果を的確に表現することができていなかった。それに対して、今回取り組んだ応力緩和を考慮した計算では温度と時間に応じて応力が緩和する量が変化する。これにより、従来計算よりも的確に徐冷の効果を表現でき、より実際に近い残留応力の状態を示すことができるものと考えた。

従来計算と応力緩和を考慮した計算を比較した結果を図9に示す。この解析モデルの場合、従来計算の熱応力解析結果では残留応力が約40 MPaとなるが、応力緩和を考慮した解析では約24 MPaとなり、応力緩和の効果により4割程度低い残留応力値となった。

次に徐冷の工程に応力緩和効果を考慮した場合の残留

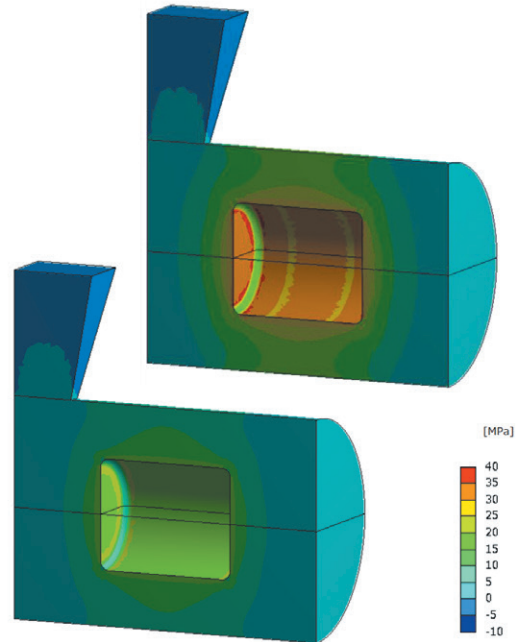


図9 徐冷後の残留応力分布 従来計算(上), 応力緩和考慮(下)

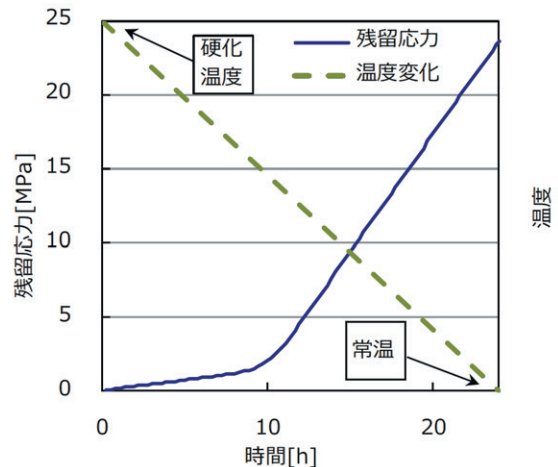


図10 徐冷の工程における残留応力の時間変化

応力の時間変化を図 10 に示す。徐冷はじめの比較的高い温度域では応力緩和の効果が大きく応力は強くないが、温度が下がってくるにしたがって応力緩和の効果が小さくなり、熱収縮による影響が支配的になることで応力が強くなっている様子がわかる。想定通りの変化をしており、実際に近い残留応力状態を示すことができているものとする。

以上のように、応力緩和を考慮した解析に取り組んだことにより、一次硬化の工程から二次硬化、徐冷の工程まで含めた残留応力の挙動を解析できるようになった。各工程を含めた解析としたことで、成形プロセス完了時に生じる残留応力を予測できる解析技術を構築できたものとする。また、徐冷の工程に関しては、従来計算では残留応力を強めに計算しているため、より安全側に機器設計をすることとなり、機器の小型化などの検討に制約を与えることになる。応力緩和を考慮することで実際に近い残留応力となり設計の幅が広がるものと期待できる。

4 おわりに

本稿では、残留応力を求めるための応力緩和現象を考慮した解析について紹介した。これまで取り組んできた硬化収縮によって生じる残留応力に加え、応力緩和を考慮することで二次硬化の工程における残留応力の挙動を把握できるようになった。さらに徐冷の工程に対しても応力緩和を考慮できるようにしたことで、いままで示すことができなかつたゆっくりと冷やすことの効果をよりの確に表現できるようになった。今回の取り組みにより、成形プロセス完了時に生じる残留応力を定量的に予測できるようになった。試作前にこれらを解析することで、適切な形状設計や金型設計に活かすとともに適切な成形プロセス条件の導出にも活かすことができる。その結果、モールドの製品開発の手戻りを抑制でき、開発期間を短縮しつつ、信頼性の高い安定した品質を実現できるものとする。

今後、成形プロセス完了時の残留応力を考慮した上で使用環境を想定した機械的な外力や環境温度の変化によるストレスを重畳して解析することを考えている。製造から使用状態まで考慮したモールド製品の応力状態を予測し、より良い製品の開発に貢献できる解析技術の構築を目指していく所存である。

■参考文献

- (1) 滝澤明広, 山下太郎:「エポキシ樹脂モールド製造プロセスにおける硬化反応時の発熱挙動の解析」, 東光電気技報No.14 (2009)
- (2) 滝澤明広, 山下太郎:「エポキシ樹脂モールド製造プロセスにおける温度依存物性を用いた発熱挙動解析と製品へ

の適用」, 東光電気技報No.15 (2010)

(3) 滝澤明広, 森佑介, 山下太郎:「エポキシモールド変成器の硬化発熱挙動の解析」, 東光電気技報No.17 (2012)

(4) 滝澤明広, 大竹美佳, 森佑介, 山下太郎, 吉谷彰倫:「エポキシ樹脂の硬化解析によるモールド機器の成形プロセス条件の最適化」, 東光電気技報 No.18 (2013)

(5) 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)

(6) 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)

(7) サイバネットシステム株式会社:「アニール解析操作説明書」, PlanetsX 資料 (2015)

(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1 Maxwell モデルの基本的な性質」, Mech D&A News vol.2005-2 (2005)

(9) 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)

■語句説明

注1) 動的粘弾性測定: 試料に正弦振動を与えた際の応答の遅れを測定するもの

注2) 動的弾性率: 通常の静的な弾性率を拡張して応答の位相差を考慮した弾性率



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
電力機器の開発・設計, および解析技術の研究に従事



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
解析技術の研究に従事

高分解能三次元センサ SCS-7040R2

■ 水野 佑樹
Yuki Mizuno

■ 石原 満宏
Mitsuhiro Ishihara

1 はじめに

東光高岳ではバンパ検査装置を商品化している。バンパは、半導体パッケージ内部にあるICチップとパッケージ基板とを接続する微小電極であり、バンパ検査装置はバンパの高さや径を検査する装置である。バンパ検査装置の心臓部は三次元センサとよばれる光学計測器であり、東光高岳で開発した三次元センサは多くのユーザからの支持を得てバンパ検査用三次元センサとして20年にわたり数多くの納入実績を残してきた。

現在半導体業界においては、3D実装・2.5D/2.1D実装と呼ばれる集積化技術を用いた次世代パッケージの実用化が急速に進められている。次世代パッケージは複数の種類のICチップをまとめたマルチチップモジュールであり、TSV (Through Silicon Via) 技術により複数チップを積層した3D実装 (図1a)、TSV技術を用いたシリコンインターポーザ (中間配線基板) 上にチップを並べる2.5D実装 (図1b)、あるいはパッケージ基板内に高密度な配線層を設ける2.1D実装 (図1c) などの技術により実現される。3D実装は集積度が高く効率的なチップ間通信が可能であるが製造の難易度が高い。3D実装の難易度を下げて早期の実用化を目指したものが2.5D/2.1D実装である。

いずれの技術であれ東光高岳のバンパ検査装置が検査対象としてきた従来のパッケージ基板には存在しなかった高密度の配線が用いられ、その配線上に搭載されるバン

パは従来にない微小径・狭ピッチの配列となる。このような次世代パッケージの検査を可能とし、かつ今後の普及を見据えて量産化に対応できる高速性を有した三次元センサの早期の実現は、関連業界の強く望むところである。

SCS-7040R2はこのような背景のもとに開発された次世代パッケージ用三次元センサであり、XY各 $3\mu\text{m}$ の高い画素分解能と $13\times 13\text{mm}$ を超える広い計測視野を有することを特長とする。

量産時の高速検査に対応するために、東光高岳の三次元センサラインナップの中で量産検査対応の標準機となっている非走査型共焦点三次元センサNCS-7020R1の光学系をベースとし、近年東光高岳で開発した走査型共焦点技術SCS⁽¹⁾を適用することで高分解能化を図った。実験的に得られた必要分解能 $3\mu\text{m}$ を満足しかつ高速検査に必要な広視野を確保するために、2,500万画素の高画素数・高速カメラの採用と再結像光学系ユニットの新規開発を行った。

完成した三次元センサSCS-7040R2は、直径 $30\mu\text{m}$ ・ピッチ $55\mu\text{m}$ の微細バンパを搭載した次世代パッケージの高精度計測が可能であり、また量産に対応可能な計測速度を有することが確認できた。

以下では、初めに三次元センサの原理を紹介し、その後SCS-7040R2について詳説する。最後に実験の結果を報告する。

2 三次元センサ

(1) 共焦点法

三次元センサは光学式の表面形状計測器である。計測原理は共焦点法である。共焦点法は、バンパ検査に必要なサブミクロンオーダの精度と、振動などの外乱に頑健である特長を有しており、量産対応のバンパ検査用計測手法として適している。

共焦点法による高さ計測の原理を図2に示す。

照明用ピンホールから射出された光は対物レンズを通して物体上にスポットを形成する。物体表面がスポットの形成位置 (焦点位置) にある場合、反射した光は対物レンズで集光され、ビームスプリッタを介して照明ピンホールと光学的に同等の位置にある検出ピンホール上に焦点を結び、ほとんどの光がピンホールを通過する。通過した光は検出器に到達し強い検出器出力が得られる。一方、物体表面が焦点位置から外れている場合は、反射

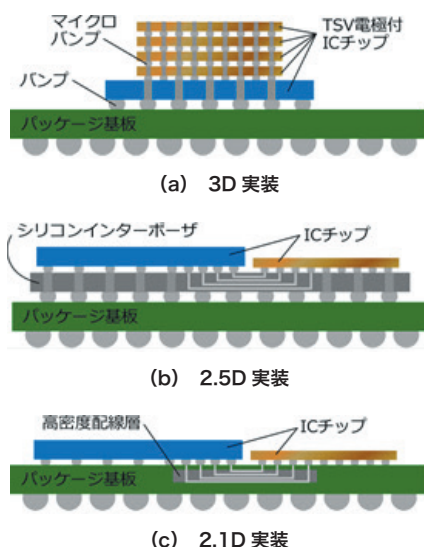


図1 次世代パッケージ技術

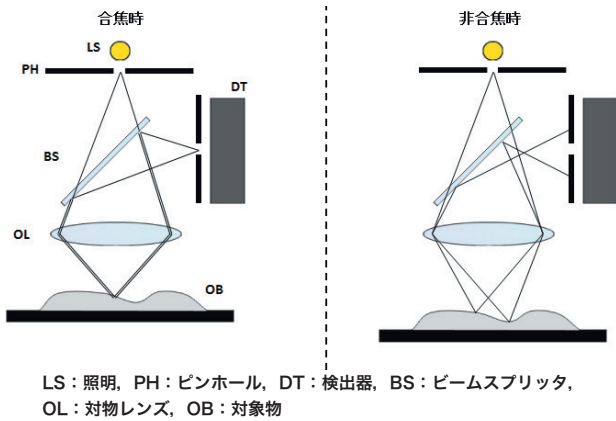


図2 共焦点法

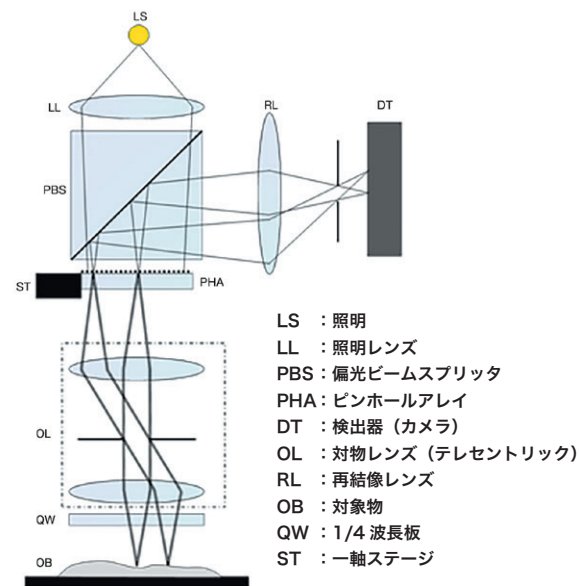


図3 走査型共焦点光学系

光は検出ピンホール上で広がり、ほとんどの光は検出器に到達できず弱い検出器出力となる。この現象を利用して、物体を光軸方向に移動（Z走査）させながら、検出器の出力が最大となる位置を探索すれば物体表面の位置が特定できる。これが共焦点法による高さ計測の原理である。

(2) 走査型共焦点技術 SCS

前記の共焦点法によれば、1回のZ走査により計測できるのは物体表面上の一点だけである。そのため、物体表面全体の情報を得るためには、水平（XY）方向に走査する必要がある。このため共焦点法は一般に時間を著しく消費する手法とみなされている。

東光高岳では、ピンホールを多数並列に配列したピンホールアレイとすることで多点を同時並列に計測する高速化手法—非走査共焦点技術 NCS を開発し⁽²⁾、長年バンプ計測に適用してきた。しかし、非走査共焦点技術 NCS は、ピンホールアレイ上のピンホールの数によって XY 分解能が制限されるため分解能を向上させる手法

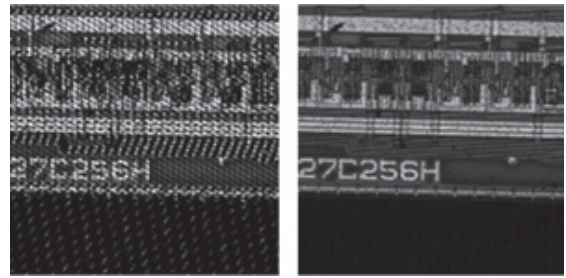


図4 非走査・走査型共焦点技術の解像力 (左：非走査型 右：走査型)

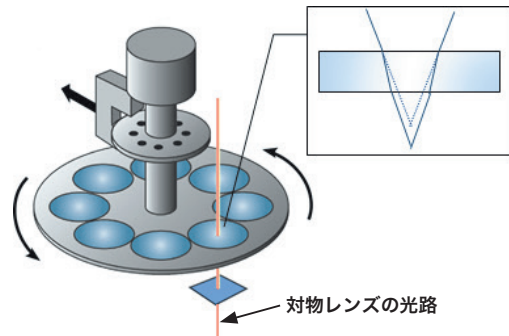


図5 光学的焦点移動機構

として新たに走査型共焦点技術 SCS を開発した⁽¹⁾。

走査型共焦点光学系の構造を図3に示す。走査型共焦点光学系と非走査型共焦点光学系の違いは、ピンホールアレイを走査する一軸ステージの有無のみである。

非走査型ではピンホールアレイの各ピンホールとカメラの画素はほぼ一対一に対応しており、ピンホールの密度より高い画素密度、つまり高分解能のカメラを用いることは意味がない。しかし、カメラの露光時間（シャッターの開いている時間）の間にピンホールアレイを一軸ステージにより移動させれば、元々対応していない画素上にもピンホールが移動しその画素も情報を得ることができる。つまりタイムシェアリングで画素露光が可能となることから、ピンホール密度に制限されない高分解能＝高画素数のカメラを用いることができる。すなわち高分解能の高い計測が可能となる。

実際に、ピンホールアレイの密度より画素密度の高いカメラを用いて撮像した例を図4に示す。非走査型においては、情報が得られない画素が黒くモアレ縞^{注1)}となって見えているが、走査型においてはすべての画素で情報が得られ自然な画像となっている。

(3) 光学的焦点移動機構

先に示したように共焦点法においてはZ走査が必要である。Z軸移動可能なステージに計測対象物を配してZ走査させるのが一般的であるが、東光高岳ではより簡易かつ高速にZ走査が可能な技術を提供している。この技術は、Z走査を機械的ではなく光学的に実現でき、光学的焦点移動機構と呼んでいる。図5にその構造を示す。

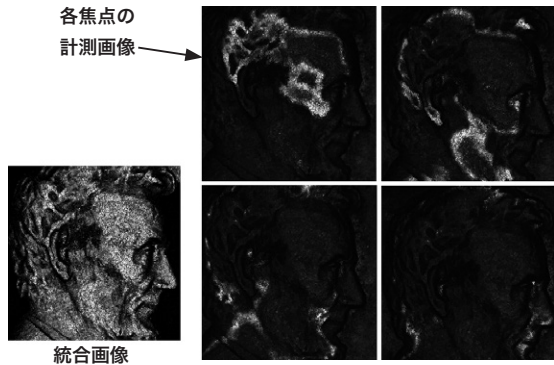


図6 光学的焦点移動機構による共焦点画像の例

円板上に、互いに厚さの異なる平行平面ガラスを配置し、対物レンズの光路中に挿入して円板を連続回転させる。対物レンズの光路中に平行平面ガラスが挿入されると、ガラスの厚みに比例して対物レンズの焦点位置が移動することから、円板の回転により焦点位置移動が発生する。焦点位置の移動は計測対象物のZ軸移動と光学的には同等と考えられるから、焦点位置移動によりZ走査が実現されることになる。円板を高速回転させることで簡易に高速なZ走査が実現できる。

図6に光学的焦点移動機構を用いて撮像した共焦点画像の例を示す。共焦点光学系においては光学系の焦点位置に物体表面があるときのみ強い検出器出力（白い部分）が得られ等高線となって画像に現れる。光学的焦点移動機構により焦点位置が変化しそれに伴い等高線が移動しているのがわかる。

3 SCS-7040R2

SCS-7040R2は、東光高岳の従来の三次元センサが有する、量産検査に対応可能な高速性を維持しながら、次世代パッケージが計測可能な高い分解能を実現することを目標として開発した。

図7に開発したSCS-7040R2の外観を、表1に主な仕様を示す。共通の対物レンズを使用する従来三次元センサNCS-7020R1の仕様も比較のために併記している。NCS-7020R1は、東光高岳の三次元センサラインナップの中でも量産検査対応の主力機種である。

(1) 高分解能の実現

開発前の実験により、次世代パッケージの微細バンブに対応するためには、XY画素分解能として $3\mu\text{m}$ 以下が必要であることが判明していた。この分解能は従来の非走査共焦点技術NCSでは原理的に実現不可能であった。走査型共焦点技術SCSの技術を用いることで初めて $3\mu\text{m}$ 分解能が達成できた。走査型共焦点技術SCSは対物レンズの光学分解能レベルまで画素分解能を向上させることが可能となることから将来的にはさらに高分



図7 SCS-7040R2 外観

表1 SCS-7040R2仕様

	NCS-7020R1	SCS-7040R2
XY画素分解能 (μm)	7.8	3.0
視野サイズ (mm)	13.0 × 13.0, 15.0 × 11.0, 11.0 × 15.0 可変	
対応最小バンブ径 (μm)	50	25
対応最小バンブピッチ (μm)	90	55
画像入力時間 (s/視野)	0.25	0.38
計測速度 (個/H) [計測エリア 35 × 35 mmの時]	550	470
光源	メタルハライドランプ	LED

解能とすることも可能である。

(2) 広視野の確保

視野サイズは検査速度に関して支配的に影響することからNCS-7020R1に劣ることのないように一辺最大15mmを確保した。 $3\mu\text{m}$ 分解能で一辺あたり15mmの視野を確保するためには $(15\text{mm} / 0.003\text{mm} =) 5,000$ 画素以上のカメラが必要となる。従来、 $5,000 \times 5,000$ 画素を超えるカメラは数枚/秒レベルの撮像速度のものしか市場に存在せず、高速検査装置への適用は不可能であった。今回 $5,120 \times 5,120$ 画素を有しかつ90枚/秒を超える高速撮像が可能な高パフォーマンスカメラがSCS-7040R2開発直前に入手可能となったことはSCS-7040R2の実現に大きく寄与している。

(3) 構造

図8にSCS-7040R2光学系の構造を示す。 $3\mu\text{m}$ 分解能、15mmの視野実現のために倍率1.5倍の再結像・照明レンズを新たに開発した。この新規再結像・照明レンズと対物レンズとの間に、走査型共焦点を実現するSCSスキヤナを配置している。SCSスキヤナが一方向に等速移動している間に光学的焦点移動機構が1回転し、計測に必要な画像を取得する。連続回転する光学的焦点移動機構1回転で1回の計測が完了するので原理的な速度は従来の非走査型共焦点三次元センサと差異はない。カメラの撮像速度によってのみ計測速度が左右されることになる。そのため、表1に示すようにSCS-7040R2は、NCS-7020R1に対し画素数比で6倍以上の高解像度と

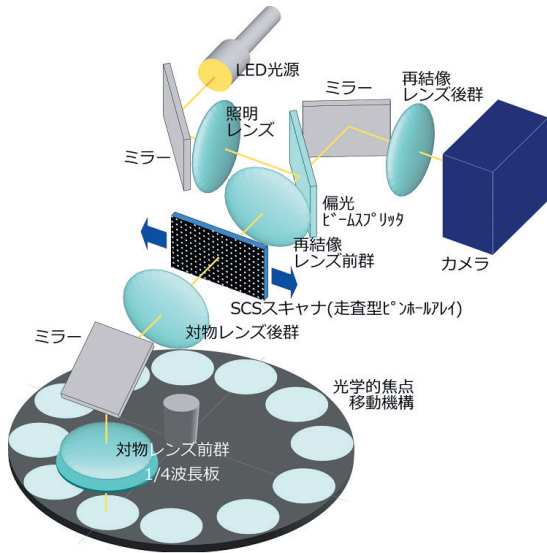


図8 SCS-7040R2 光学系の構造

なったにもかかわらず、遜色のない計測速度が達成できている。速度差異はカメラの撮像速度の違いである。

光源として、新たにLED光源を採用した。従来のメタルハライドランプに比べ寿命が長く、高速なON/OFF・光量切替が可能となった。

4 実験結果

(1) 分解能の確認

図9にNCS-7020R1、SCS-7040R2それぞれの三次元センサで撮像した集積回路の画像を示す。分解能の比較を容易にするために視野の一部を拡大して表示している。NCS-7020R1に比べSCS-7040R2は微細なパターンまで解像できていることがわかる。

(2) 次世代パッケージのバンプ計測

径30μm、ピッチ55μmの微細バンプが搭載された次世代パッケージ用基板の計測結果を図10に示す。約12,000個のバンプの高さ(基板とバンプ頂点の差)を30回計測し、その繰り返し精度を表示している。横軸は各バンプの番号、縦軸が各バンプの計測ばらつき(3σ値)である。計測ばらつきの平均は約0.2μmで

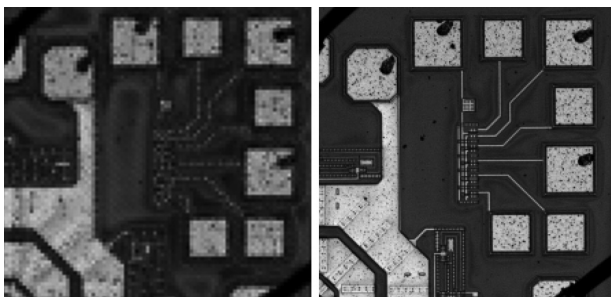


図9 非走査型と走査型の計測画像
(左：非走査型 右：走査型)

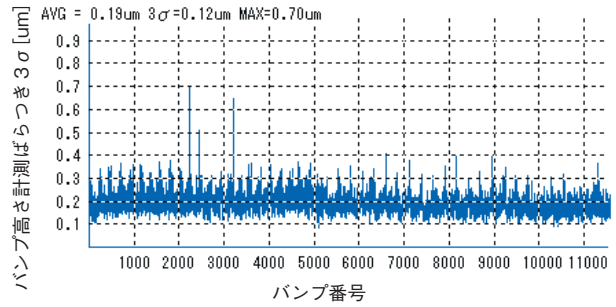


図10 バンプ高さ計測の繰り返し精度

あり、高い精度が得られている。

SCS-7040R2により次世代パッケージの微細バンプを高い精度で計測できることが確認できた。

5 終わりに

本稿では次世代パッケージのバンプ検査に対応できる三次元センサ SCS-7040R2 の開発について報告した。3μmの高分解能と量産検査に対応可能な計測速度を達成できた。

半導体実装の技術革新は頻度が高くかつ急速である。半導体検査装置には新しい技術への対応が常に求められる。今後もより高度な三次元センサを、時期を逸することなく開発していきたい。

■参考文献

- (1) 日名子：「走査型共焦点方式三次元計測」, 東光高岳技法, Vol.2. 2015 pp. 20-23 (2015)
- (2) 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)

■語句説明

注1) モアレ縞：周期性のあるパターン間で発生する幾何学的な干渉縞



水野 佑樹

光応用検査機器事業本部
技術開発部 開発グループ 所属
三次元計測センサの開発に従事



石原 満宏

光応用検査機器事業本部
技術開発部 所属
三次元計測センサの開発に従事
博士(工学), 精密工学会会員

「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」 取組み状況について

■ 上杉 翔平
Shohei Uesugi

1 はじめに

1.1 背景と目的

東日本大震災および福島第一原子力発電所事故を受けて、わが国のエネルギー政策は根本から見直されることとなり、再生可能エネルギーに対する国民の期待はこれまでにないほどに高まっている。

その中でも風力発電は、発電コストが他の再生可能エネルギーと比較して安価で、LNG や石油火力発電とも遜色ない供給力となることが期待されている。一方で、大量導入時には平滑化効果によって、一定のベース電力となる可能性があるものの、大量に電力系統に連系した場合、天候の急変による大きな出力変動によって電力の安定供給に悪影響を及ぼす可能性もある。

東光高岳が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）と委託契約を行っている本実証事業では、電力の需給運用に影響を与える風力発電の急激な出力変動（以下、ランプ）に着目し、ランプ予測技術、風力制御技術や蓄エネルギー制御技術（以下、出力変動制御技術）の確立を目指している。また、再生可能エネルギーが電力系統に大量導入された 2030 年頃を見据え、余剰電力の発生、周波数調整力不足などの技術的課題とその課題解決策を明らかにするため、ランプ予測技術や出力変動制御を評価する需給シミュレーションシステムを開発するとともに、実際の電力系統にて課題解決策の実証を行う。

これらの技術開発によって、再生可能エネルギーの出力を予測し効果的な制御・運用が可能な電源とすることで連系量の拡大を目指す。

2 研究開発状況

2014 年末より実証試験フィールドである東京都新島村において、実証試験を行うための各種設備の設置工事を行ってきており、一部の設備は運転を始めている。取組み状況を以下に紹介する。

2.1 太陽光発電設備

新島の南東に位置する大原遊休地に 315 kW の太陽光発電設備を設置した。設置設備についてはすべて完成しており、現在最終調整を行っている（図 1）。

そのほかにも新島小学校、新島中学校、新島村役場、

また新島の南西に位置する式根島にある式根島小学校、式根島中学校、式根島診療所、式根島開発総合センターなどにも小型太陽光発電設備の設置を行った（図 2）。



図 1 新島村大原太陽光発電所



図 2 新島中学校太陽光発電設備

2.2 蓄エネ設備および実証試験棟

東京電力新島内燃力発電所の構内に、借地契約を結び、国内メーカー製蓄電池 500 kWh、海外メーカー製蓄電池 500 kWh を、それぞれ 1 台ずつ設置した。どちらもリチウムイオン電池を採用している。また後述の統合 EMS (Energy Management System) の導入に向け、今後の実証試験の拠点となる実証試験棟も同敷地内に建設した（図 3）。



図 3 新島東光高岳電気所

「次世代双方向通信出力制御方式 緊急実証」への取組み

■ 村下 直久

Naohisa Murashita

■ 森口 益巳

Masumi Moriguchi

1 はじめに

2012年7月の再生可能エネルギーの固定価格買取制度開始以降、太陽光発電を中心に再生可能エネルギー発電設備の接続申込み急速に増加した結果、電力各社で想定していた受入可能量を超過、または超過するおそれのある状況が発生した。このため電力各社は、一定規模以上の系統への接続申込みへの回答を保留することを公表した。

その後、電力系統の専門家からなる経済産業省総合エネルギー調査会「省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会系統ワーキンググループ」による電力各社の受入可能量の徹底的な検証および拡大施策の検討が実施された。この結果、固定価格買取制度の運用見直しに加え、導入推進のための受入可能量の拡大方策を緊急的に講ずる環境整備の一つとして、遠隔で出力制御を可能とする技術の確立を行うことが必要となった。

その一環として、中央給電指令所等において、域内に分散設置される数十万箇所の太陽光発電設備の発電出力を把握し、これを踏まえたきめ細かな出力制御の指令を行うための機器および発電出力のマネジメントシステム構築を目的として「次世代双方向通信出力制御方式緊急実証」が計画され、実証試験が2015年6月5日～2016年2月29日の間で、4電力会社（九州、東京、関西、北陸）および学校法人早稲田大学等の各サイトにて行われた。

東光高岳は、本実証事業の実証主体である東京電力ホールディングス株式会社（当時の社名：東京電力株式会社）に対して実証試験等で支援を行ったので、本稿でその概要について報告する。

2 実証の目的と実施項目

本実証の目的は、多数の太陽光発電設備出力を把握し、遠隔から出力制御を行うためのシステム構築である。そのため、①通信方式の有効性・信頼性評価および出力制御方式の標準化検討、②太陽光発電設備の遠隔出力制御システムの開発を実施した。

②項に関しては、九州電力株式会社による実証（九州実証）と、東京、関西、北陸の3電力による実証（3社実証）とが並行して進められた。

・九州実証

太陽光発電の出力制御は喫緊の課題であり、早期に実効性のあるシステムの開発・運用を目的とする。そのた

め、実際の出力制御の効果を確認することや、既設システムとの関係を重視した開発と実証を行った。出力制御は、単方向通信による制御（インターネットによるスケジュール方式）を主体として実証した。

・3社実証

太陽光発電の出力制御は当面は不要であるが、将来的に再生可能エネルギー発電設備の接続が増加した場合を考慮して、中長期的な観点を踏まえた実証を行うことを目的とする。

HEMS^{注1)}やBEMS^{注2)}等のエネルギーマネジメントシステムや蓄電システムとの連動、出力制御情報配信事業者が参画する場合のシステムのあり方を検討し、さまざまな方式（制御方式、通信媒体、通信方式など）や出力制御シナリオから検証を行い、双方向通信による出力制御の実証データを取得した。

本実証事業の体制を図1に示す。

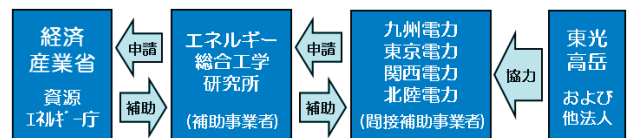


図1 実証事業実施体制図（当時）

3 東光高岳が実施した実証事業項目とその結果

3.1 東光高岳が実施した実証事業の内容

東光高岳は東京電力ホールディングス株式会社から業務を委託され、3社実証による双方向通信出力制御システムの開発検証に参画した。

系統運用者（電力サーバ）と閉域網を介して、双方向通信が可能な多機種対応型出力制御ユニットを、東光高岳の小山事業所内にある配電ネットワーク実証試験場に設置された50kW級PCS^{注3)}（中小規模事業者PCS出力制御を想定）および住宅用PCSへ接続し、遠隔からの出力制御機能の確認試験を行った。

出力制御指令は、早稲田大学に設置された系統運用者を想定した電力サーバおよびアグリゲータ^{注4)}を想定した仲介サーバから、携帯通信会社の閉域網やインターネットを介して、東光高岳サイトに送信される。

当該指令にしたがって、各PCSは出力制御を実施し、その結果をサーバに返送する。

双方向通信出力制御の概要を図2に、出力制御の全体システム構成を図3に示す。

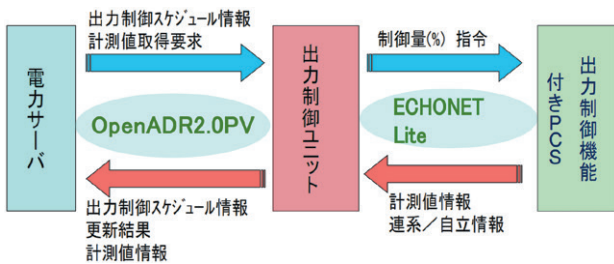


図2 双方向通信出力制御データの概要

また、表1に東光高岳の実証試験項目と、図4に試験場での検証装置の設置状況を示す

表1 東光高岳の実証試験項目

分類	実施項目	対象PCS	備考
中小規模事業者PCS	出力制御ユニットの接続試験	東光高岳 50 kW PCS A社 50 kW PCS	携帯通信網を使用した双方向通信 双方向通信は、多機種対応型出力制御ユニットを使用
	出力制御確認試験		
住宅用PCS	出力制御ユニットの接続試験	B社 3.3 kW PCS C社 5.5 kW PCS	
	出力制御確認試験		

3.2 試験結果

PCSの出力制御方式としてあらかじめ10パターンの試験シナリオを作成し、2015年12月16日～2016年1月19日の間で計17回の試験を実施した。

シナリオは、大まかに下記の2ケースを想定した。

- ① 前日の17:00に次の日の発電量、負荷を想定して次の日の出力制御のパターンを送信するが、当日の状況により見直しを行い、当日の9:00に修正値を送信するケース。
- ② 前日の17:00に次の日の発電量、負荷を想定し



(a) 東光高岳 50 kW 級 PCS (b) 各住宅用 PCS



(c) 出力制御ユニットと通信器

図4 東光高岳試験場試験機器設置状況

て次の日の出力制御のパターンを送信するが、当日の状況により見直しを行い、出力パターンを随時更新するケース。

なお、出力制御を実施しない場合は、あらかじめPCSに格納しているデフォルトカレンダーで発電する。

その結果、すべてケースで双方向通信による太陽光発電の出力制御が、正常に実施できることを確認した。

実施した試験シナリオ②の一例を図5に示す。

図5上部の枠の中に記載された文字列は、OpenADR^{注7)}プロトコルによる出力制御情報であり、下部のグラフは、出力制御によって修正された太陽光発電量の推移を表す。

本シナリオの概要は以下のとおりである。

- ・前日17:00に、翌日10:00～12:00の2時間で

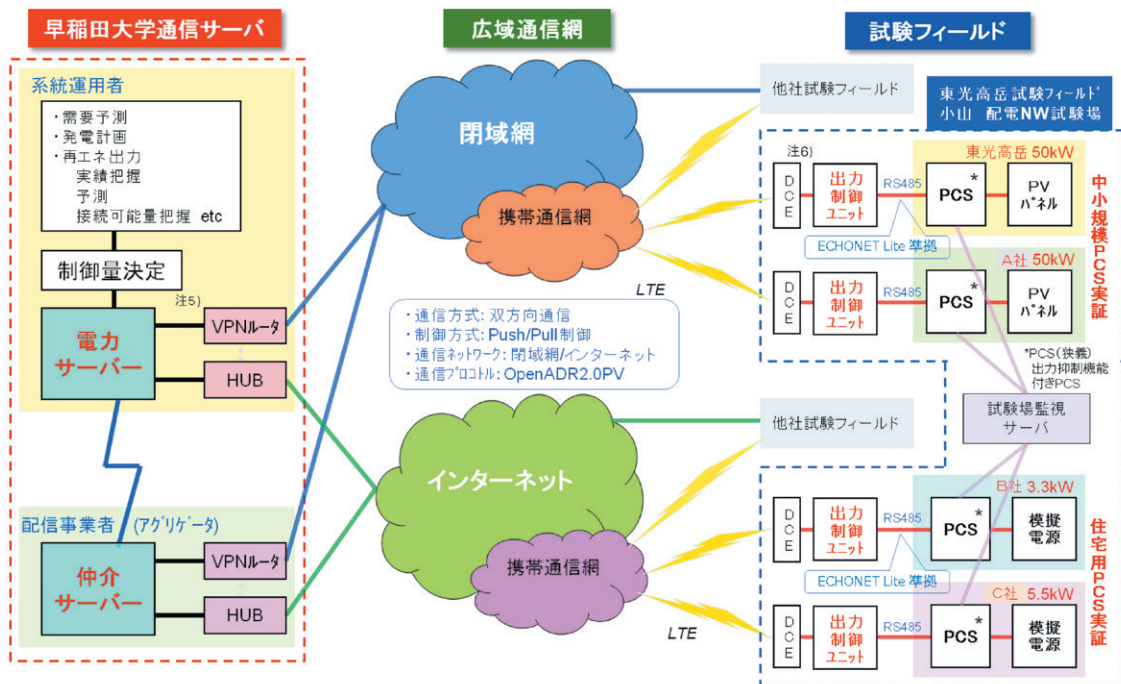


図3 東光高岳サイトでの出力制御システム構成図

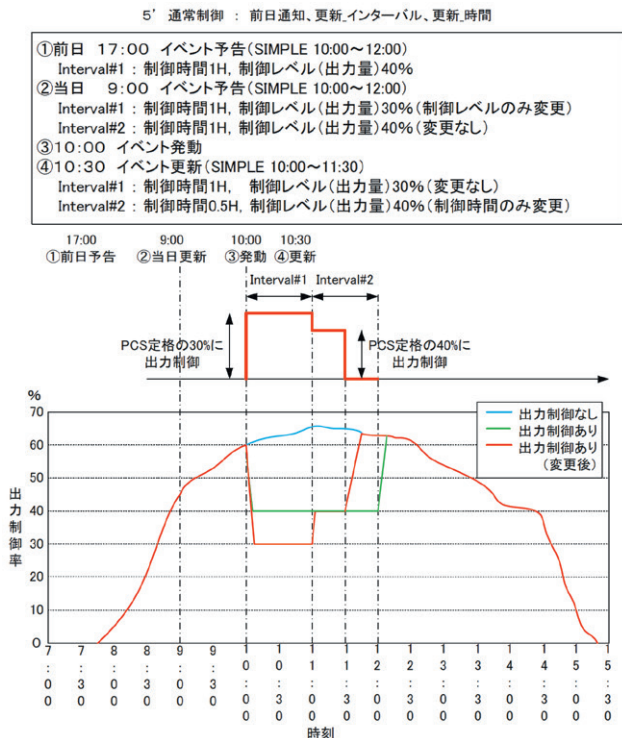


図5 試験シナリオ例

PCS の出力を 40% に制御する指令を送信

- ・当日 9:00 に、当日 10:00~12:00 の 2 時間で
前半の 1 時間は 30% 出力に変更
後半の 1 時間は前日の設定どおり 40% 出力のままとする指令を送信
- ・さらに当日 10:30 に、当日 10:00~11:30 の 1 時間 30 分間で
前半の 1 時間は当日の設定どおり 30% 出力のまま
後半の 30 分を 40% 出力に変更する指令を送信
その結果、東光高岳サイト内の 4 台の PCS は、以下の通り出力制御されることとなる。

 - ・ ~10:00 出力制御なし
 - ・ 10:00~11:00 30% に出力抑制
 - ・ 11:00~11:30 40% に出力抑制
 - ・ 11:30 以降 出力制御なし

図6 に東光高岳 PCS の上記シナリオ実施時の発電出力の実測値を示す。出力制御が指令どおり行われている。

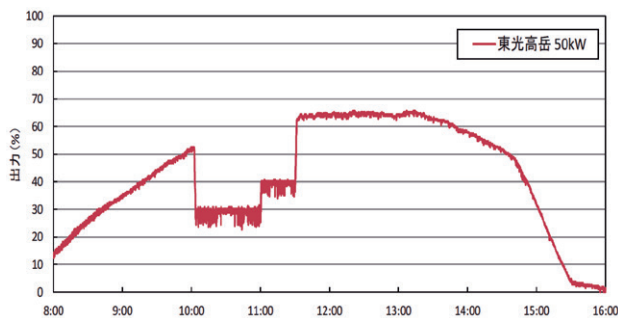


図6 東光高岳 50 kW 級 PCS の発電出力実測値

4 おわりに

東光高岳は、再生可能エネルギーの急速な台頭に伴い安定的な電力システムの制御に双方向通信による PCS 出力制御は今後の欠かせない技術であると考えている。

今回の実証試験にて、太陽光発電を対象に、電力システムに連系している出力制御機能付き PCS に対して、専用通信回線による出力制御情報の送受信の実効性を確認することができた。

本実証は 2016 年度にフォロー研究を実施し、引き続き 1 年間、盆・正月などの太陽光の余剰電力が大量発生する時間帯で出力制御等の検証を行う予定である。

その検証を確実に実施するとともに、HEMS や BEMS 等のエネルギー管理システムや蓄電システムとの連動、双方向通信技術を用いた出力制御システムのあり方など、中長期的な観点からの要請を踏まえた課題について検証を実施していく所存である。

■ 語句説明

注 1) HEMS : Home Energy Management System 家庭で使うエネルギーを節約するための管理システム

注 2) BEMS : Building Energy Management System ビルの機器・設備等の運転管理によってエネルギー消費量の削減を図るためのシステム

注 3) PCS : Power Conditioning System パワーコンディショナー 直流電力を交流電力に、交流電力を直流電力に変換するシステム

注 4) アグリゲータ : 需要家の電力需要を束ねて効果的にエネルギー管理サービスを提供するメーカー、ブローカー、地方公共団体、非営利団体などのこと。

注 5) VTN : Virtual Top Node OpenADR にて事業者や需要家間で情報をやり取りする際の、メッセージの送り手をいう。ちなみに受け手を VEN (Virtual End Node) という。

注 6) DCE : Data Circuit Terminating Equipment ユーザーの機器をネットワークに接続するための接続点を提供する装置の総称。

注 7) OpenADR : デマンドレスポンス発動時、アグリゲータと需要家との間でどんな情報 (データモデル) をどのようにやり取りするのか (メッセージ交換のための通信プロトコル) を定めたもの。

村下 直久

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 兼
スマートグリッド事業推進部 開発・設計グループ 所属
次世代の系統技術およびスマートグリッドに関する研究・開発に従事

森口 益巳

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 所属
次世代の系統技術に関する研究・開発に従事

を例に、既設設備への IED 導入アプローチを紹介する。

図 5 に PLC を使用した従来 SCADA システムの例を示す。

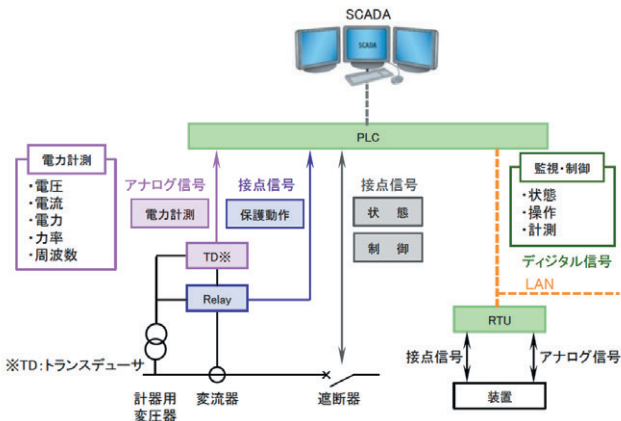


図 5 従来 SCADA システム概要

3.2 従来インタフェースを採用した IED 適用

IED は、複数の保護要素を有し、ユーザ仕様に応じた制御ロジックを組み込むことができる。また、複数の通信プロトコルに対応していることから、保護機能を備えた RTU として SCADA システムを構築することができる。

一般に電力計測は、PLC にアナログ信号を取り込むため、トランスデューサなどのアナログ変換器が介在する。また、機器の状態や制御として接点信号を採用している。IED はこれらのインタフェースを実装し、従来の設備構成を大きく変更することなくシステムを構築することができる。

電力系統の事故波形などの記録においては、オシロ装置など波形記録装置を必要とする。IED は、電力系統の品質を監視するパラメータとして、電流/電圧位相や最小値/最大値・高調波含有率など、さまざまなデータを計測、記録し、事故波形を再生することができる。

以上のように IED を SCADA システムに適用し、IED の機能を活用することで、システムを効率的に構築することができるようになる。IED 適用効果を表 1 にまとめる。また、図 5 のシステムに IED を適用した例を図 6 に示す。

表 1 IED 適用効果

効果	内容
装置台数の低減	<ul style="list-style-type: none"> 保護要素集約化 機能集約化 省配線化 省スペース化
電力計測情報の拡大	<ul style="list-style-type: none"> 電流/電圧位相、最大値/最小値や高調波含有率など
オシロ装置の削減	<ul style="list-style-type: none"> 電圧/電流情報の記録 (IED へ記録)
データロガー機能の追加	<ul style="list-style-type: none"> 接点動作情報の記録
制御回路のソフト化	<ul style="list-style-type: none"> ユーザ仕様への柔軟な対応 補助リレー回路の削減

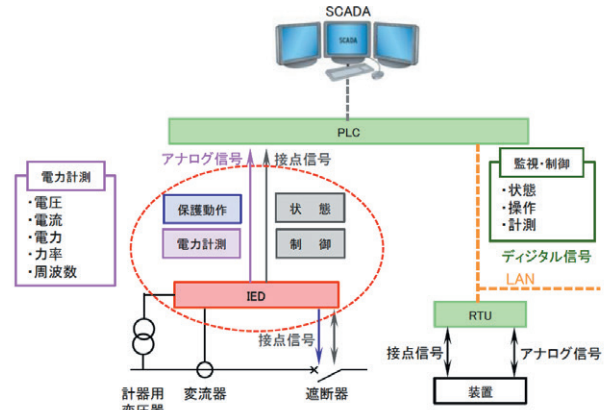


図 6 従来インタフェースを採用した IED 適用

3.3 Modbus を採用した IED 適用

Modbus/TCP を導入した SCADA システムを図 7 に示す。また、SEL 社の IED がサポートする通信プロトコルを表 2 に紹介する。

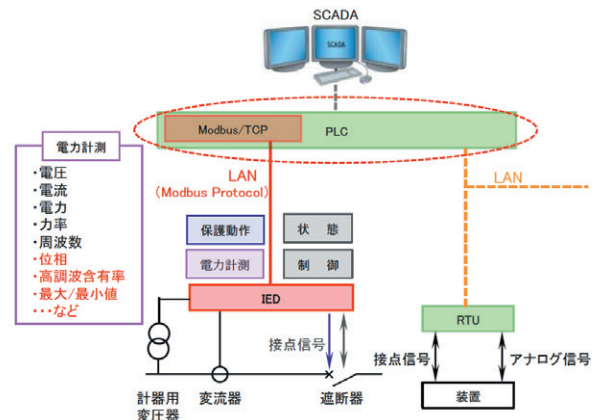


図 7 Modbus を採用した IED 適用

表 2 IED がサポートする主な通信プロトコル

主な用途	通信プロトコル	備考
変電所内、分散型電源などの監視制御	IEC61850	国際標準
変電所～給電所間の遠隔監視制御	IEC60870-5	国際標準
電力システムなどの監視制御	DNP3 (IEEE1815 規格)	米国標準
工場内の監視制御	Modbus/TCP	デファクトスタンダード
SEL 社の IED 間通信	MIRRORED BITS	SEL 社独自

PLC はユーザ仕様に対応するため、機能ごとにモジュール化されたユニットを組み合わせることができる。PLC のユニット化は、システム構築の容易性や拡張性などのメリットがある。国内 PLC メーカーは、Modbus ユニットを PLC 製品にラインナップしているため、IED を適用した SCADA システムの通信プロトコ

ルとして Modbus を採用した例を図 7 に示す。

このように従来 SCADA システムへ Modbus プロトコルに対応した PLC ユニットを設置することにより、IED を従来 SCADA システムに容易に組み込むことが可能となる。

3.4 IEC61850 を採用した IED 適用

IEC61850 を採用することにより、異なるベンダーの機器を接続することができる。IEC61850 は、通信レイヤを簡略して伝送遅延を短縮する特殊なメッセージ (GOOSE: Generic Object Oriented System Event) をサポートしており、短い伝送時間が要求される情報を IED 間で交換できる。また、IED の定義ファイルツールにインプットすることにより、IEC61850 の情報交換設定を容易にすることが可能である。前述したように、近年、東南アジアをはじめとする新興国の SCADA システムにおいては、IEC61850 を採用したシステムが主流となっている。また、スマートグリッドの実現において、国内においても IEC61850 の関心は高い。IEC61850 のメリットを最大限に活用するためには、完全なシステムの切り換えが望ましい。図 8 に IEC61850 SCADA システムの適用例を紹介する。ここでは、現実的な移行として、必要性が高いものから順次切り換えるアプローチを示す。IDC^{注5)} は IED コンセントレータであり、従来 SCADA システムにおける PLC に置き換えることができる。プログラミング言語として IEC61131-3 をサポートする。また、上位ネットワークに接続するゲートウェイの役割を持つ。括弧内は、SEL 社の製品型式を示す。

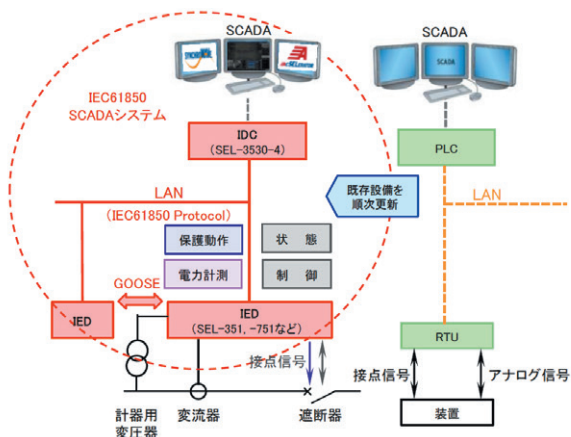


図 8 IEC61850 を採用した IED 適用

4 おわりに

国内において、これから IEC61850 の実用化が始まるものと予想する。東光高岳は、IED メーカーである SEL 社の国内代理店事業を展開しており、当面は SEL

社製品を中心に IEC61850 をはじめとする国際標準 SCADA システムの実用化を進めていく。今回、従来 SCADA システムへの IED 導入アプローチを紹介したが、IEC61850 をはじめとする国際標準技術の更なる習得を行い、国内市場においてはソリューション事業の展開を図っていきたい。

■参考文献

- (1) 電力システム改革について (2015 年 11 月)
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/pdf/system_reform.pdf
- (2) 「SEL 社代理店事業～標準通信規格に対応した次世代汎用機器“IED”～」, 東光高岳技報 No.2 (2015)

■語句説明

- 注 1) SCADA: 『Supervisory Control and Data Acquisition』の略称。集中監視制御装置
- 注 2) IEC 61850: 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規格
- 注 3) IED: 『Intelligent Electronic Device』の略称。IEC61850-2 に定義。
- 注 4) DNP3: Distributed Network Protocol の略称。電力システム、給水システムなどの工業分野に普及する SCADA 接続のオープン通信プロトコル。
- 注 5) IDC: IED Concentrator の略称。IED を統合する通信データコンセントレータ

田沼 秀和

電力プラント事業本部
システム製造部 システム設計グループ 所属

杉山 将悟

電力プラント事業本部
システム製造部 システム設計グループ 所属

小磯 健志

電力プラント事業本部
システム製造部 システム設計グループ 所属

前崎 恒司

技術開発本部
技術研究所 次世代系統技術グループ 所属

携帯通信システムの開発

技術紹介

■ 中山 匡

Tadashi Nakayama

■ 唐澤 典行

Noriyuki Karasawa

1 はじめに

世界規模で M2M 市場が急成長している現代、その牽引を担っている一つとして携帯回線を使ったデータ通信がある。

携帯通信は回線の敷設が不要であり、電波が届く場所であればどこにでも設置ができる。また、携帯回線は強固なセキュア通信であり、そのメンテナンスはキャリアに任せることができるなどのメリットがある。その一方で、携帯回線は有線に比べると回線速度が遅く、大量のデータを送受信するには不向きであり、即時性や信頼性が要求される制御についても不利であった。

しかし、携帯通信の技術の進歩により、2010 年頃、Long Term Evolution (以下、LTE) という携帯電話の通信規格が策定された。現在では LTE も全国的に展開され、ほとんどのエリアで LTE による携帯通信が行えるようになった。LTE は携帯通信の上記メリットに加え、回線速度が大幅に向上しており、有線と遜色ない通信が可能になっている。

本稿では、自然エネルギーの系統連系制御やデマンドレスポンス等の基盤システムとして開発した LTE 回線を使用する携帯端末および、携帯端末からのデータを収集するサーバを含めた携帯通信システムについて紹介する。

2 携帯通信システムの構成

携帯通信システムは主に携帯端末と携帯サーバで構成される (図 1 参照)。携帯端末は計測/制御対象となる機器に設置され、電力量や運転状態などを収集し、LTE を使ってその情報を携帯サーバに伝送する。携帯サーバは各携帯端末を一元管理し、送られてくる情報を保存する。また、携帯端末を通して機器への制御指令を送信することもできる。

今回開発した携帯通信システムは、通信エリアが最も広い株式会社 NTT ドコモ (以下、ドコモ) の回線を採用した。合わせて、ドコモが提供する携帯モジュールと企業間を接続して通信を行う閉域網リモートアクセスサービスを使用し、携帯サーバと携帯端末の間のセキュリティを強固なものとしている。

携帯端末 (図 2) はインテリジェントネットワークコントローラ (STiNC II)^{注1)} と携帯通信用モジュールを組み合わせた。ただし、今回のシステムに合わせて STiNC II の基本ソフトに QNX^{注2)} を採用し、リアルタイム性・信頼性の向上を図った。また、計測対象機器との通信プロトコルとして、Modbus/TCP と ECHONET Lite を採用しさまざまな機器と接続できるようにした。

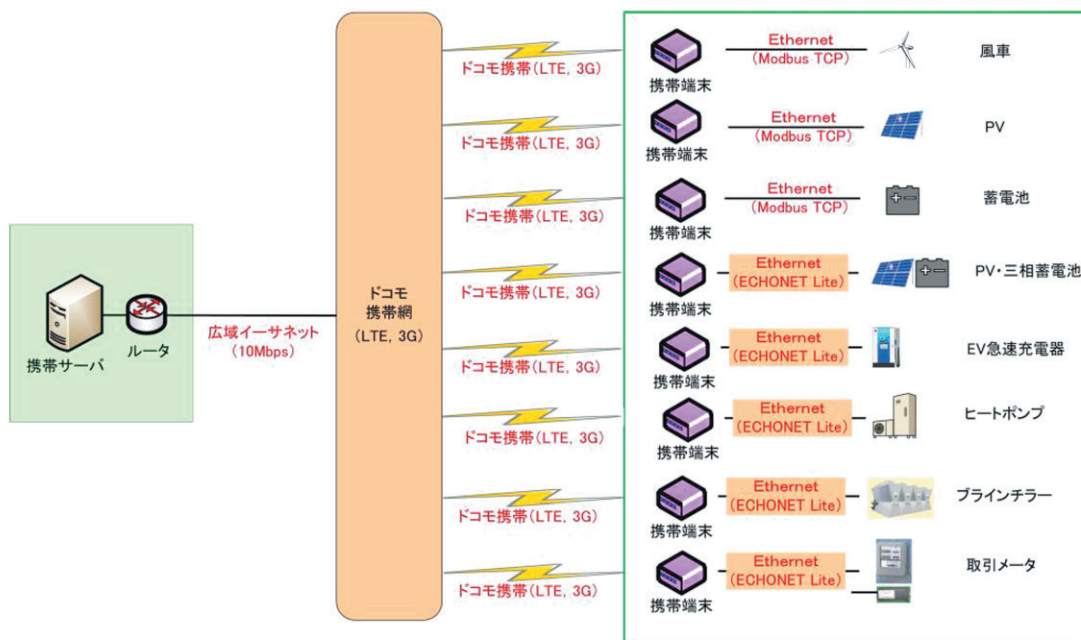


図 1 携帯通信システム構成図



図2 携帯端末と携帯用外部アンテナ

3 携帯通信システムの特長

3.1 LTE 通信技術の活用

従来の携帯通信と比較して、LTE 通信は通信速度が非常に速い。また、従来の携帯通信では通信毎に接続処理を行っていたが、LTE 通信ではその必要がない。

LTE 通信を使うメリットを以下に示す。

- ・計測データ等の即時通知
- ・短い周期での計測データ通知
- ・制御命令等の即時実施（タイムラグが非常に小さい）

携帯通信のメリットに LTE 通信の通信速度を加味すれば、さまざまな分野への適用が考えられる。

3.2 通信方式の多様化展開

携帯端末は、サーバとの通信に携帯回線 (LTE 通信)、機器との通信には有線 LAN (Ethernet) を使用する。しかし、将来的には使用個所やそのときのニーズにあった通信方式が必要となる場合がある。このため、携帯端末は本体と通信ボードが分離可能な構造とし、各種通信方式に対応した通信ボードを開発することで、容易に多様化展開が図れる。なお、通信ボードと本体間は USB によって接続する。

3.3 ECHONET Lite への対応

家電機器の状態監視および制御を行うための国内標準プロトコルである ECHONET Lite を搭載した。ECHONET Lite は、現在、スマートメータの B ルート、太陽光発電、蓄電池、燃料電池、EV/PHV、エアコン、照明機器、給湯器への相互接続性担保が検討されていて、今後この通信プロトコルを搭載した機器がさらに増えていくと考えられる。携帯端末に ECHONET Lite を搭載することにより、容易にさまざまな機器の状態監視や制御が遠隔から行えるシステムの構築ができる。

3.4 リアルタイム処理による制御

携帯端末ではリアルタイム OS 「QNX」を使用している。QNX は機能安全性およびセキュリティに関する各種規格の認証を受けている。QNX を搭載することにより、従来の STiNC II よりリアルタイム性に優れた機能を実現し、セキュリティの高い機器を開発することができた。

また、QNX は POSIX^{注3)} という、Linux 等で使用される標準的な API を搭載しており、他 OS のソフトからの移植もしやすい。

3.5 信頼性が高いセキュア通信の実装

携帯電話などの無線を伝送路に使用する場合、さまざまな要因で通信異常が発生しデータ伝送に失敗することがある。データ欠損が大きな問題となる場合、通信方式に適したリカバリロジックを設計・実装することが重要である。携帯端末には携帯通信に適したリカバリロジックを搭載しており、データ欠損のリスクを回避している。

また、携帯通信自体は非常に強固なセキュア通信であるが、さらにサーバ～携帯端末間の通信を強固なセキュア通信とする為にサーバと携帯端末の間の通信に SSL/TLS^{注4)} を用いた。SSL/TLS を用いることにより、通信文を暗号化させ、不正アクセスによるデータ改ざん、漏えいの防止となる。さらに認証キーを使用した認証をサーバ、携帯端末それぞれで行うことにより、不正アクセスを不可能なものとした。

4 まとめ

LTE 通信を使用した携帯通信システムを開発した。LTE 通信は従来の携帯通信よりも通信速度が格段に速いので、さまざまな分野への適用が考えられる。また、ECHONET Lite を搭載したことにより、容易にさまざまな機器とのシステム構築が行える。

今後、携帯通信システムをフィールドに設置して運用上の課題等を洗い出す予定であり、将来的には本システムを利用したさまざまなサービスを開発し市場に展開していきたい。

■ 語句説明

注1) STiNC II：インターネットを通してさまざまなシステムを構築することができる汎用ゲートウェイ装置（東光高岳製）

注2) QNX：QNX ソフトウェアシステムズが開発した組み込みシステム向け商用リアルタイム OS

注3) POSIX：異なる OS 実装に共通の API を定め、移植性の高いアプリケーションソフトウェアの開発を容易にすることを目的として IEEE が策定したアプリケーションインターフェース規格

注4) SSL/TLS：インターネット等で使用される通信を暗号化するプロトコルの一つ。通信相手の認証や改竄検知等の機能も提供する。

中山 匡

技術開発本部
技術研究所 ICT 技術グループ 所属

唐澤 典行

技術開発本部
技術研究所 ICT 技術グループ 所属

エネルギーの全体最適化を実現するクラウド型 T-Step EMS サービス

■羽鳥 桂太
Keita Hatori

1 はじめに

東光高岳は、エコ、Web やデマンドエースなどのエネルギー計測ツールを市場に提供し、現場サイドでのデマンド監視や EMS を推進してきたが、この度、クラウド EMS を構築し、インターネットによる省エネ支援サービスの提供を開始した。現場側に高価な EMS 設置が不要となり、本社などから、複数拠点の一括したエネルギー管理が可能となる点など、お客さまメリットが多い本サービスについて説明する。

2 特長

現場サイドでのデマンド監視や EMS は、個々の拠点（施設）ごとに改善対策できるが、複数の建物を比較して検討することが難しい。

T-Step EMS サービスを導入し、複数の建物を同時に管理することで、拠点ごとの改善レベルを底上げし、全体最適化を図ることができる。

3 システム概要

お客さま施設側には、ネットワークコントローラとして、東光高岳製エコ、Web IV を設置し、電気・ガス・水道・温度などの計測やデマンド監視を実施する。

各拠点のデータをクラウドサーバで集約し、本社で拠点全体のエネルギー消費把握や、施設間のエネルギー使用状況比較、データ分析による節電効果の把握が可能になるほか、遠方からの省エネ制御が可能となる。

4 補助金対応

東光高岳は、一般社団法人環境共創イニシアチブが主催する「平成 28 年度エネルギー使用合理化等事業者支援補助金」に係るエネマネ事業者登録の公募に参加し、エネマネ事業者の一つとして採択された。

T-Step EMS サービスは、補助金申請に必要な EMS 機能要件を満たしている。

羽鳥 桂太

エネルギーソリューション事業本部
ソリューション営業部 エネルギーコンサルグループ 所属

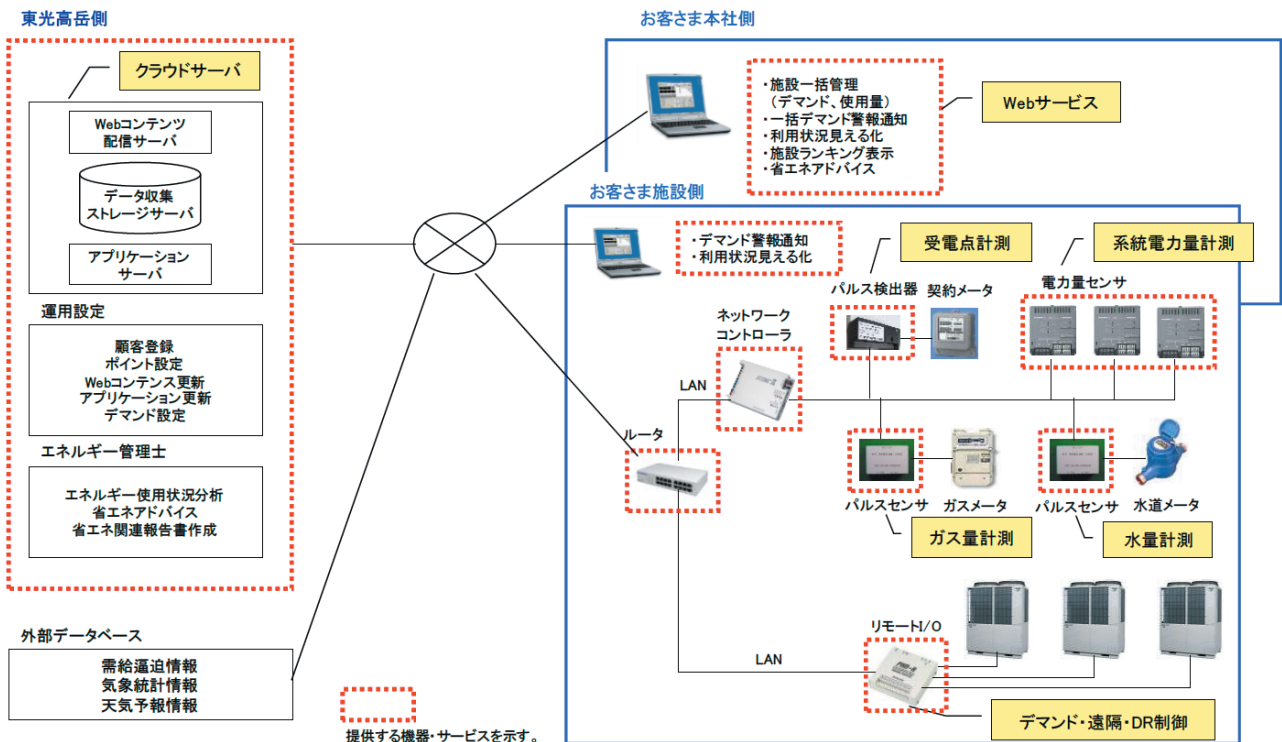


図 1 システム構成図

G3-PLC / 920 コンバータ

技術紹介

■大澤 岳士
Takeshi Osawa

■渋谷 真弘
Masahiro Shibusawa

1 はじめに

B ルートとは、スマートメーターで計測したデータを家庭等の建物内に伝送するルートである。B ルートの情報は HEMS^{注1)} 機器などで使用され、リアルタイムな電力量の把握や住宅内の電気機器の制御が可能になる。さらに、インターネット経由でクラウドサービスの活用も期待されている。

2 特長

B ルートの通信方式は、920 MHz 帯の無線規格の一つである Wi-SUN^{注2)} と、電力線搬送規格の一つである G3-PLC の2種類がある。このうち Wi-SUN 方式が主流であり、HEMS 機器も Wi-SUN 方式が主流である。しかし、電波環境や設備構成上の制約などの理由から G3-PLC 方式が適用される場合、Wi-SUN 方式の HEMS 機器では G3-PLC 方式のスマートメーターとは通信できないことから、需要家が新たに G3-PLC 方式の HEMS 機器を用意する必要がある(図1)。

G3-PLC / 920 コンバータ^{注3)} は、G3-PLC 方式のスマートメーターと通信を行い、Wi-SUN 方式の HEMS 機器に情報を提供する装置である。本装置を用いることで、Wi-SUN 方式の HEMS 機器と G3-PLC 方式のスマートメーターとの通信が可能になる。さらに本装置は、スマートメーターの新規設置に伴い不要となるサービスブレーカの既設分電盤内空きスペースに設置することを可能としている(図2)。

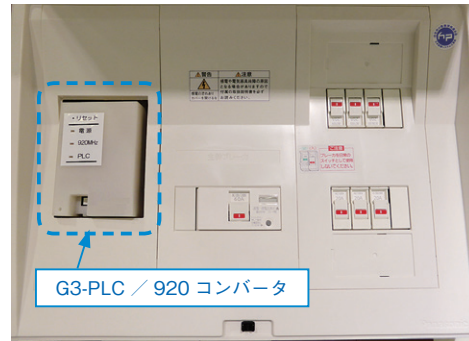


図2 分電盤取り付けイメージ^{※2}

表1 一般仕様

電源	AC100/200 V 50/60 Hz
使用環境	温度：0~40℃ 湿度：30~85%RH (結露無きこと)

■ 語句説明

注1) HEMS：Home Energy Management System の略。家庭内のエネルギー管理を図るシステムを指す。

注2) Wi-SUN：無線通信規格の一つ。Wi-SUN Alliance の登録商標。

注3) G3-PLC / 920 コンバータ：Wi-SUN 相当の 920MHz 無線に対応。HEMS 機器と合わせて ECHONET Lite^{※1)}/SMA 認証の取得が必要である。また、HEMS 機器の一部ソフト変更が必要になる場合がある。

注4) A ルート：スマートメーターと電力会社をつなぐ通信網であり、電力会社との電力使用量のやりとりに利用される。

※1 ECHONET Lite は一般社団法人エコーネットコンソーシアムの登録商標。

※2 開発中のため、告知なく変更される可能性があります。

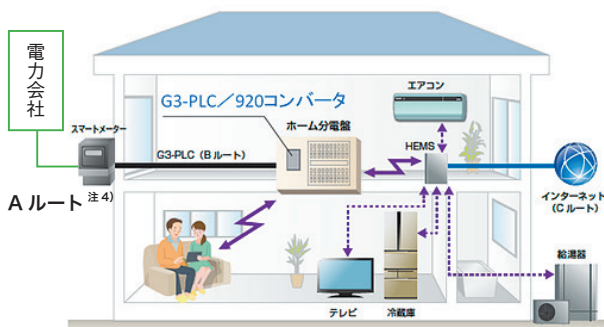


図1 設置イメージ

大澤 岳士

エネルギーソリューション事業本部
ソリューション製造部 開発グループ 所属

渋谷 真弘

エネルギーソリューション事業本部
ソリューション製造部 開発グループ 所属

風車用ログウスキーコイルの 低周波数対応

■ 藤岡 博文

Hirofumi Fujioka

■ 小川 晃一

Koichi Ogawa

■ 山口 達史

Tatsushi Yamaguchi

1 はじめに

東光高岳では、落雷の検知と外部への通知（風力発電設備と連携して運転を停止）、電荷量（エネルギー）の計測（耐雷設計の妥当性を把握）といった、風力発電設備の雷被害再発防止対策に必要な機能を有する雷電流計測装置を開発し、これまでに全国に納入している⁽¹⁾。

最近の観測では、風力発電設備に被害をもたらす、大きなエネルギーを有し、継続時間の長い日本海沿岸地域の冬季直撃雷電流を正確に検出するためには、より低い周波数帯域からの測定が必要であることが報告されている⁽²⁾。このため、ログウスキーコイルを用いた雷電流計測装置のセンサ I/F（インターフェース）部において、低周波数帯域への対応を行った。本稿では、その設計概要および性能評価について紹介する。

2 計測原理

ログウスキーコイルは、一次電流 $I(t)$ を電圧信号に変換して計測するものである。コイルで誘起される電圧 $e(t)$ は、一次電流の微分波形となり、この誘起電圧を積分することで一次電流に比例した電圧信号 $u(t)$ を出力する。また、低域補償回路と組み合わせることで、低い周波数の電流も計測可能になる（図1）。

すなわち、センサ I/F 部の総合特性が、ログウスキーコイルの微分特性と相対する積分特性となるように、積分回路と低域補償回路の定数を選定して加算することにより、平坦な周波数特性を実現している（図2）。

ここで、周波数特性の下限を、低域カットオフ周波

数（入出力比（ゲイン）が 3 dB 低下した点の周波数）と称する。

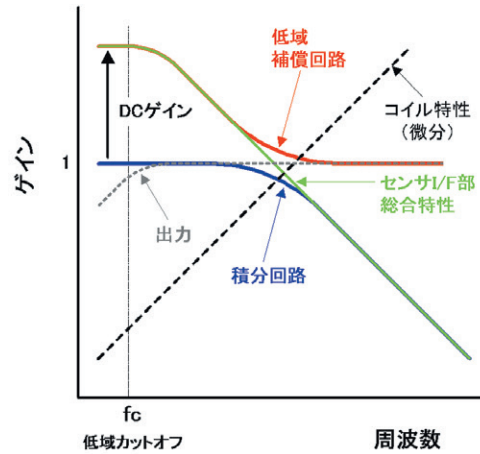


図2 周波数特性の模式図

3 センサ I/F 部の設計

設計においては、低域カットオフ周波数を「0.1 Hz」に設定して、回路定数の検討を実施した。

設計の妥当性を評価するため、電子回路シミュレーションを実施した。その際、ログウスキーコイルは、巻線抵抗と自己インダクタンスおよび測定ケーブルの静電容量による等価回路にて模擬し、その値には実測値を使用した（対象品：コイル長 16 m（風車タワー外径：約 5 m 相当）、測定ケーブル長 15 m）。

図3に、シミュレーション結果の周波数特性を示す。低域カットオフ周波数（-3 dB）が約 0.1 Hz になっていることが確認できる。

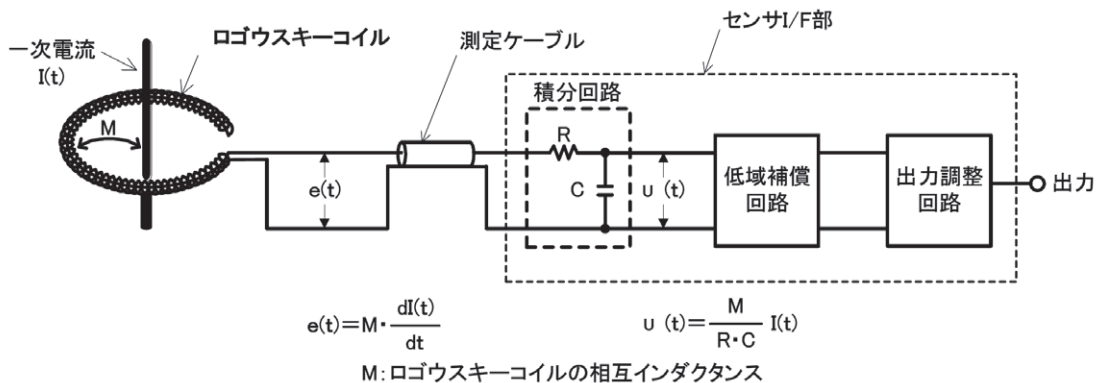


図1 ログウスキーコイルの計測原理

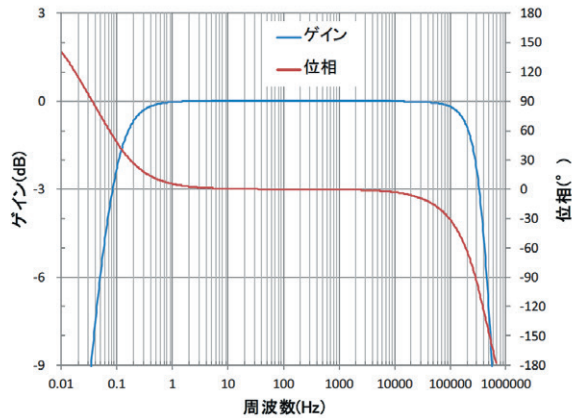


図3 シミュレーション結果

4 センサ I/F 部の性能評価

設計したセンサ I/F 部にロゴウスキーコイルを接続して、低周波数域の電流計測性能評価試験を実施した。ロゴウスキーコイルへの印加電流は、電流値「10 kA 相当（実効値）」、周波数「0.05 Hz～100 Hz」の正弦波（連続波）である。

図4に、周波数特性の測定結果を示す。図3と図4の特性はほぼ一致しており、試験の結果から低域カットオフ周波数（-3dB）が約0.1 Hzであることも含めて、センサ I/F 部の動作が設計通りとなっていることが確認できる。また、周囲温度（-20℃～60℃：雷電流計測装置の動作温度範囲）を変化させても、特性にほとんど変動はなく良好な結果となっている。

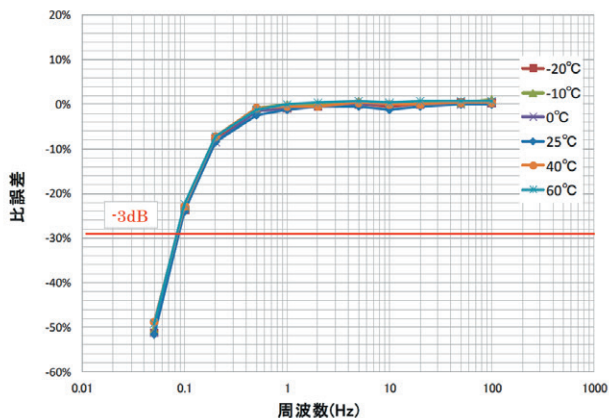


図4 周波数特性測定結果

図5に、例として周波数2 Hzにおける、ロゴウスキーコイルへの印加電流（入力電流）とセンサ I/F 部の出力電流の波形を示す。1波目の立ち上がりには、センサ I/F 部の積分特性に起因して、わずかな位相の進みが見られるが、波形全体としては十分な追従性を有している。

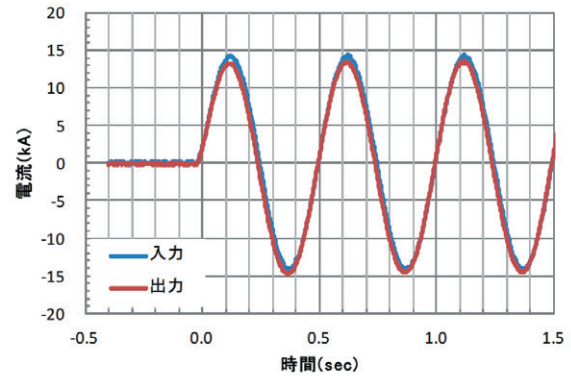


図5 入出力電流波形例（2 Hz）

5 おわりに

本稿では、ロゴウスキーコイルを用いた雷電流計測装置のセンサ I/F 部における低周波数帯域への対応について報告した。

なお、センサ I/F 部を雷波形観測装置に内蔵し、昨冬から日本海沿岸冬季雷地域の風車において、実フィールド観測を実施中であり、今後は、順次、雷電流計測装置に導入していく。

参考文献

- (1) 酒井，細谷，藤岡：「風力発電設備用雷電流計測装置」，東光高岳技報，No.2，pp.38-39（2015）
- (2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「風力等自然エネルギー技術研究開発／次世代風力発電技術研究開発／自然環境対応技術等（落雷保護対策）平成24年度成果報告書」，（2013）

藤岡 博文

技術開発本部
技術研究所 ICT 技術グループ 所属

小川 晃一

技術開発本部
技術研究所 ICT 技術グループ 所属

山口 達史

技術開発本部
技術研究所 ICT 技術グループ 所属

大型変圧器設計高度化の取り組み

技術紹介

■ 岩井 良
Ryo Iwai

■ 吉村 智萌
Tomoaki Yoshimura

■ 五月女 正樹
Masaki Sotome

1 はじめに

わが国で電力用変圧器が製作されるようになり、100年以上が経過した。その間、変圧器の基本構造は大きく変わらないものの、各種基礎試験データの蓄積や解析技術の高度化、新材料の開発などにより、変圧器の設計はたゆまざる進化を続けてきた。

東光高岳においても、1961年にスイスBBC社（現ABB社）との技術提携により66kV 45MVA変圧器を納入して以来、高電圧・大容量化を図り、現在では275kV 450MVAまで製作・納入している。

一方、変圧器に対するニーズも時代とともに大きく変化し、近年では、機器の信頼性向上、小型・軽量化はもとより、低ロス化、環境負荷低減、メンテナンスのミニマム化など多岐にわたっている。さらに、競争の激化や電力システム改革による電気料金の抑制ニーズなどから、大幅なコスト低減も必要となってきている。

東光高岳では、これらさまざまなニーズに対応するため、各種基礎試験や、実規模モデル試験による設計データの蓄積・レビュー、数値解析手法の高度化等に取り組んできている。

本稿では、大型変圧器設計技術高度化の取り組み事例として、貨車輸送変圧器のタンク構造設計に関する取り組みと、変圧器内部の絶縁設計に関する取り組みについて紹介する。

2 タンク構造設計技術の高度化

100MVAを超過するような大型変圧器の輸送は、主として変電所の最寄り駅まで貨車輸送することとなる。貨車輸送の方式は、**図1**に示すように、低床弓形ハリ式、吊り掛け式および落とし込み式に大別されるが⁽¹⁾、質量や旋回半径などの観点からは、輸送制限をもっとも効率的に利用できる吊り掛け式が有利である。しかし、この吊り掛け式輸送の場合、変圧器タンク自体が貨車の一部を形成することから、変圧器タンクに貨車としての強度が要求されることとなり、強固な構造に加え、厳密な強度評価が必要となってくる。そのため、新規タンク開発時には、構造解析による評価に加え、実際にタンクに輸送荷重をかけて強度評価を行う荷重試験を実施してきた。

しかしながら、近年では解析技術の急速な進歩によ

り、大掛かりな荷重試験ではなく、解析による強度評価が主流となってきている。そこで、今回、大幅にコストダウンを指向した実規模モデルにおいて荷重試験を実施し、タンクの強度評価を実施するとともに、その試験結果を解析に反映させることにより、三次元構造解析の精緻化を図った。

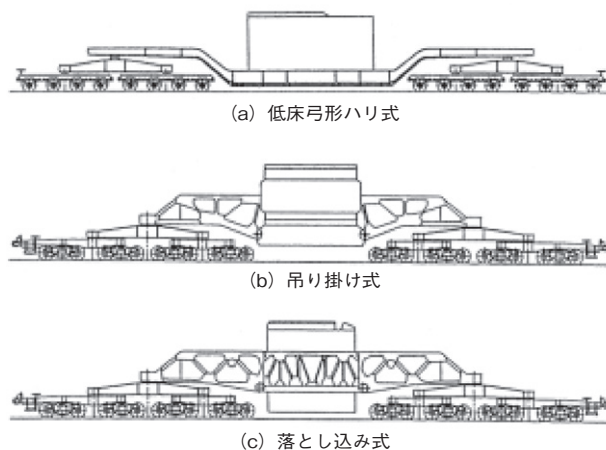


図1 貨車輸送の方式

2.1 荷重試験モデルタンク

荷重試験モデルタンクは、コストダウンを指向した200MVAクラスの実規模タンクとした。**図2**に荷重試験モデルタンクの外観および諸元を示す。



(L7,700 mm × W2,750 mm × H3,400 mm, 25ton)

図2 荷重試験モデルタンク（試験車両への積載状況）

2.2 荷重試験

(1) 測定項目

荷重試験モデルタンクに試験荷重を印加し、各部の応力および変位量を測定した。

応力測定にはひずみゲージを使用し、応力の集中する箇所を中心に、75ポイントの測定を実施した。また、変位量の測定は、レーザ距離計などにより、長辺方向の側板およびタンク底板など、14ポイントの測定を実施した。

(2) 試験方法, 試験条件

荷重試験の状況を図3に示す。荷重試験は、荷重試験モデルタンクを試験車両に積載し、荷重試験枠とジャッキ受け台の間に設置した油圧ジャッキにて、タンク底板上に試験荷重を印加する。試験荷重は、輸送時の動荷重模擬および安全率として、輸送質量の1.5倍とし、6段階に分けて荷重印加および除荷を行い、各段階における応力および変位量を測定した。

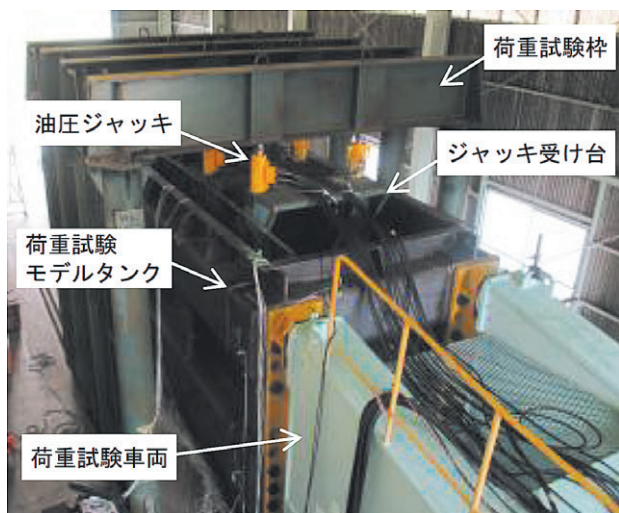


図3 荷重試験の状況

(3) 試験結果

図4に、最大荷重印加時の応力および除荷後の残留応力の測定結果を示す。最大荷重時でも、すべての測定点において降伏点(215~245 MPa)を下回り、また除荷後の残留応力においてもほぼゼロとなることが確認できた。

荷重試験のほか、真空、加圧および吊りなど、各種荷重条件においても同様の測定を実施し、応力および変位量が許容値以下であることを確認している。

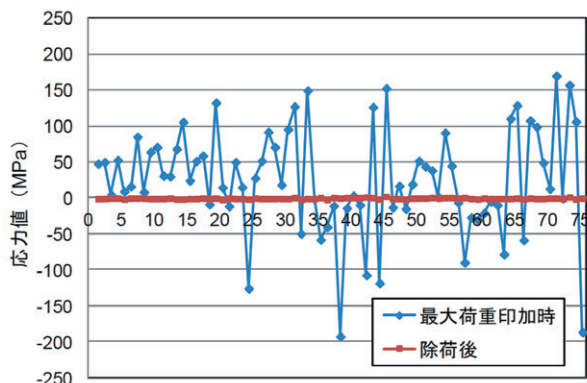


図4 測定結果 (応力値)

2.3 三次元構造解析

(1) 解析方法

構造解析は、製品設計と解析の連携性が良く、また、溶接部の模擬など、細部のモデリングや詳細評価が可

能な、ソリッドモデルにて実施した。なお、短辺方向に対象な構造のため、1/2モデルとし、解析負荷の軽減を図った。図5に解析モデルおよび荷重条件を示す。

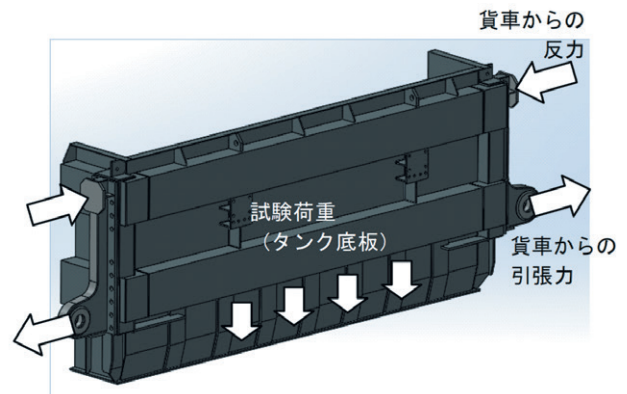


図5 解析モデルおよび荷重条件

(2) 解析結果

図6に解析結果(応力分布)を、図7に各部の応力の実測と解析の比較を示す。一般的なソリッドモデルの構造解析では、溶接部をモデリングせず接触面を鉄板どうしの全面接着とするが、補強の近傍は応力の集中しやすい箇所でもあることから、必要に応じ溶接をモデリングするなど、より詳細に解析を実施した。その結果、図7に示すとおり、解析と実測がほぼ一致し、今後、解析での精度の高い強度評価が可能となったことが確認できた。

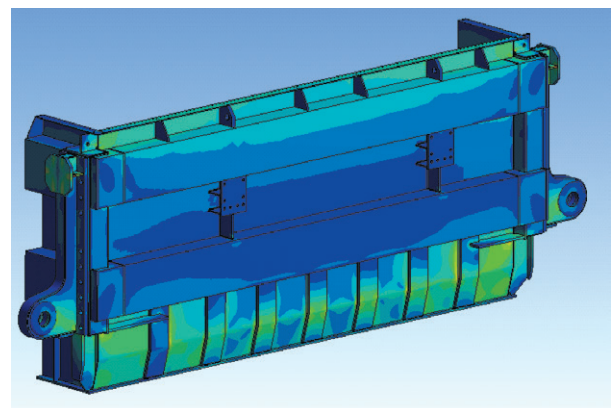


図6 解析結果 (応力分布)

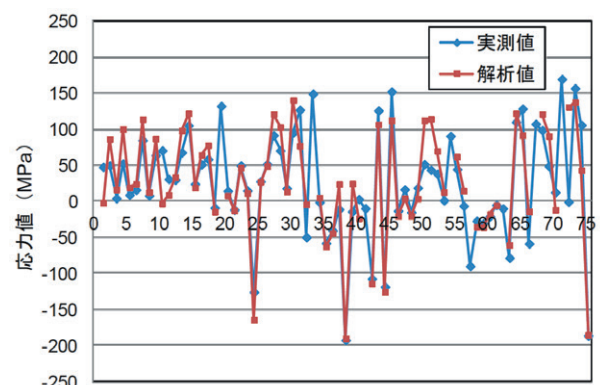


図7 実測と解析の比較 (応力値)

2.4 まとめ

今回、実規模クラスのモデルタンクを使用した荷重試験を実施し、コストダウンを指向した新型タンクの強度を確認するとともに、測定結果をもとに解析精度を向上させることができた。

なお、変圧器のタンクは、輸送荷重のほか、工場内移動時の吊り荷重、注油時の耐真空および内部異常時の内圧上昇に対して、適切な強度を確保する必要があり、同様に試験と解析評価を実施し、総合的に最適な補強構造を採用している。

今後は、この成果を踏まえ、解析を有効活用することにより、設計リードタイムの短縮や更なるコストダウンタンクの開発を進めていく。

3 絶縁設計技術の高度化

変圧器内部の絶縁には、ターン間、セクション間、主ギャップ間、リード～アース間、裸電極間など、さまざまな絶縁構造が存在しているが、いずれも絶縁油と油浸した絶縁紙およびプレスボードを組み合わせた複合絶縁を基本としている。

ターン間やセクション間など、比較的要素モデル化しやすい絶縁構成については、その破壊電圧や破壊現象について、東光高岳でもこれまで数多くの試験を実施してきた。しかしながら、リード支持部については、リード線の表面電界、支持物の沿面電界、支持物とリード線とのクサビ状ギャップなど、複数の要因が複雑に絡み合うため、要素モデル試験での絶縁評価が困難であり、実構造を模擬した絶縁検証試験が必要となってくる。

今回、リード支持部の実構造を模擬した雷インパルス絶縁試験を実施し、更なる構造合理化を図った。

3.1 モデル構造

モデルは、巻線とブッシングを接続するブッシングリード部を模擬し、紙巻軟銅より線（以下、リード線）を、ブッシングアダプタを模擬した金属構造物（アース）に取り付けた絶縁物にて支持する構造とした。また、リード線の支持部には、絶縁耐力の向上およびリード線の被覆保護を目的に、プレスボードを巻回した。模擬アダプタの直径は、300 mm、400 mm および 500 mm の 3 通りとした。

なお、模擬アダプタには、モデルの電界に影響を与えないよう配慮した扉を設け、リード線および支持絶縁物の交換が容易な構造とした。

3.2 試験方法

試験は、リード線、模擬アダプタおよび支持絶縁物からなるリード支持モデルを、絶縁試験タンク内に設置

し、1,550 kV まで印加できるよう、550 kV ブッシングを介して試験電圧を印加した。絶縁試験装置およびリード支持モデルの取り付け状況を図 8 に、試験時の回路構成を図 9 に示す。

試験波形は負極性標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μ s) とし、破壊想定値の 70% から 50 kV ステップで各 1 回、電圧を印加した。

リード支持モデルの n 数は各アダプタ径につき $n = 5$ とし、最も実器サイズに近い $\phi 500$ mm モデルのみ $n = 10$ とした。



(a) 絶縁試験装置外観

(b) リード支持モデル取り付け状況 (絶縁試験装置内部)

図 8 絶縁試験装置

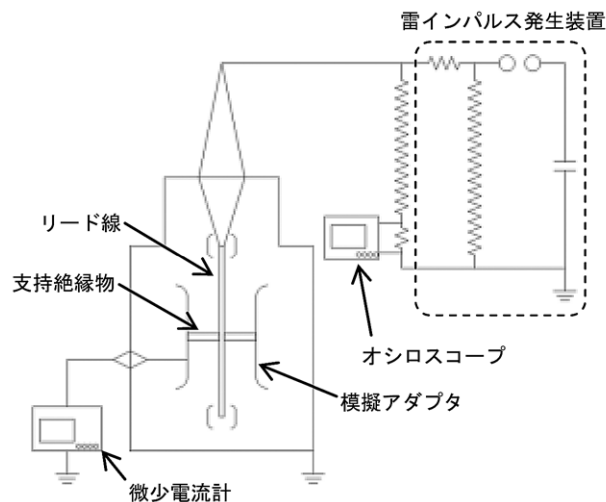


図 9 試験時の回路構成

3.3 試験結果

(1) 破壊様相

図10にφ500 mmモデルにおける放電の進展経路の一例を示す。どのモデルにおいても同様の破壊様相を示しており、その進展フローは以下と考えられる。

- ①リード線と支持絶縁物の接触点を起点に、模擬アダプタに向かって支持絶縁物表面を沿面放電
- ②支持絶縁物の端部から模擬アダプタに油中閃絡（放電経路全体がアース電位となる）
- ③リード線と支持絶縁物の接触点がアース電位となり、そこから破壊しやすいリード線部まで保護絶縁物表面を沿面放電し、リード線部の被覆を貫通破壊

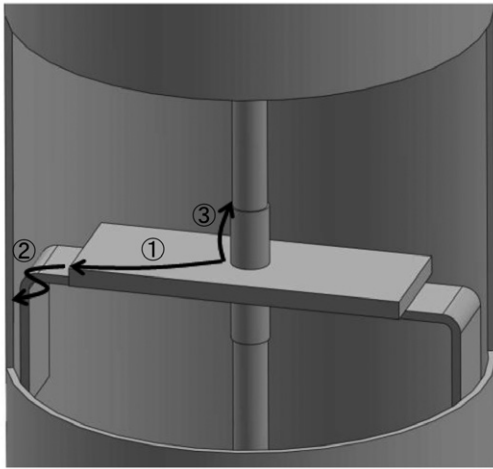


図10 放電の進展経路

(2) 電界評価

破壊の始発がリード線表面であるため、破壊時のリード線表面の電界に着目して整理した。図11に破壊時の電界を示す。図11は、支持絶縁物がない場合と比較しやすいよう、破壊時のリード線の電界を、支持絶縁物がない場合の破壊電界を1.0 p.u.として正規化している。なお、支持絶縁物がない場合の破壊電界については、過去に報告されている90%SOV^{注1)}に関する考え方⁽²⁾に基づいて検討した。

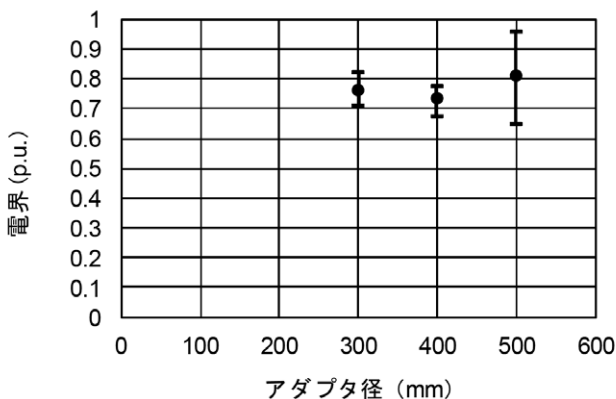


図11 破壊時の電界

破壊時の電界は、分散分析による評価の結果、アダプタ径によらず一定であるという結果となった。また、破壊時の電界は、支持絶縁物を取り付けられることにより、リード線と支持絶縁物間に微小なクサビ状ギャップが生じたこと、および、等電位線に垂直な沿面経路ができたことなどが要因となり、支持絶縁物がない場合に比べ、20%~25%程度低下する結果となった。

3.4 まとめ

今回の実構造を模擬した絶縁試験から、リード線の支持部の破壊様相および破壊時の電界を確認することができた。破壊の過程は、クサビ状ギャップ部を起点とした沿面放電、油中閃絡および絶縁被覆の貫通破壊と、さまざまな破壊現象の組み合わせではあるが、本構造においては、リード支持がある場合も、リード線表面の電界をベースに絶縁設計が可能であることが確認できた。

4 おわりに

変圧器の設計に必要な要素技術は、今回紹介した構造設計や絶縁のほか、冷却、騒音（振動）、電磁機械力など、多岐にわたる。今後も、基礎試験を実施し着実にデータを蓄積していくとともに、数値解析による設計高度化を進め、より高品質、高機能な変圧器を開発し、顧客のニーズに応じていく所存である。

■参考文献

- (1) 日本貨物鉄道株式会社監修 社団法人 日本鉄道車両機械技術協会：「特大貨物・甲種鉄道車両等輸送取り扱い方解説書」
- (2) 毛受新一、池田正己：「変圧器油の絶縁破壊の統計的考察について」、電気学会雑誌，Vol.92，No.12（1972）

■語句説明

注1) 90%SOV：90% Stressed Oil Volume（90%課電体積）。不平等電界における体積効果は、全油体積ではなく、90%以上の電界下にある油体積で評価できるという考え方。

岩井 良

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

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

五月女 正樹

電力プラント事業本部
大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属

熱流体解析の 半導体電力変換装置への適用

■ 片柳 厚志

Atushi Katayanagi

1 はじめに

発熱する部品を有する製品をつくる場合、通常、熱設計を実施する。熱設計が不十分であると、開発段階における検証にて、所定の性能を満たせず、手戻りが発生する。対策が取られても、それは対症的なものであることが多く、根本的な解決には至っていない場合がある。さらに、部品収納スペースに制約がある場合、熱設計の重要性が増してくる。

東光高岳において熱設計には、おもに実験やそれに基づく経験式などを用いている。既存製品の軽度な設計変更程度なら、それでも十分対応できるが「製品を新規に開発する」、「設計に大幅な変更を加える」、「不具合事象の解明」などの場合は事情が異なってくる。従来から使用してきた経験式では、複雑な形状の製品の性能を予測することが難しく、試作試験を行う必要がある。試作試験のパターン数が少なければよいが、パターン数が多くなってくると、多くの時間と費用を要する。

そのため、CAE^{注1)}を活用したフロントローディング型設計は、条件の組み合わせのパターン数が多い場合に、パターン数の絞込みに多大な効果が期待できる。これより、試作試験の回数削減につながり、製品開発の効率化に大いに役立っている。

本稿では、電力変換機器のインバータユニットの標準的な構成のモデルについて、シミュレーションを実施した例を紹介する。また、シミュレーションによる現象の可視化が、設計者の理解に有効な例についても紹介する。

2 インバータユニットの解析例

電子機器専用熱流体解析ソフトが存在するが、汎用の熱流体解析ソフトのソルバ^{注2)}に、電子機器用のユーザインターフェースを実装したものや、熱回路網法を適用し、表計算ソフトのマクロとして提供したもの⁽¹⁾などがある。3D CAD ユーザを考慮して、3D CAD のアドインとして提供されているものもある。東光高岳は従来から、変圧器や配電盤など電力機器の熱流体解析に、市販の汎用熱流体解析ソフトを活用した実績があり、今回はインバータユニットのシミュレーションに、汎用熱流体解析ソフトを適用した。

インバータユニットの解析モデルを図1に示す。ここでは、電力用半導体素子、ヒートシンク、ファンをモ

デル化した。電力用半導体素子の詳細な内部構造の情報は、メーカーからユーザに公開されないため、電力用半導体素子の詳細なモデル化は事実上困難である。その代わりに、DELPHI^{注3)}モデルという形での情報提供があり⁽²⁾、電子機器専用熱流体解析ソフトではDELPHIモデルを使用することができる。東光高岳では汎用熱流体解析ソフトを使用しており、各部品のライブラリやDELPHIモデルが使えないため、電力用半導体素子を上下に分けた、2ブロックモデルにて作成した⁽³⁾。ファンにはカタログ記載のP-Q特性^{注4)}を設定した。ファンはプル型^{注5)}として使用するため、ファンの旋回流は設定していない。乱流モデルはRANS^{注6)}を使用し、定常解析^{注7)}を実施した。

解析結果である流速ベクトルと温度分布の様相を図2に示す。解析結果は解析モデルの左右を二分割で表示しており、図の手前側が流速ベクトル図、奥側が電力用半導体素子とヒートシンクの温度分布図である。ここで解析値と比較したいのは、電力用半導体素子のジャンクション温度^{注8)}であるが、ユーザがジャンクション温度を測定するのは困難である。そこで、ヒートシンクの温度を数点測り、温度上昇値、温度分布を解析結果と比較することにより、解析手法の妥当性を確認した。

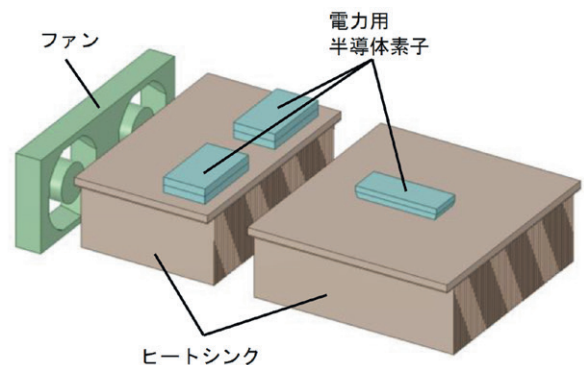


図1 インバータユニット解析モデル

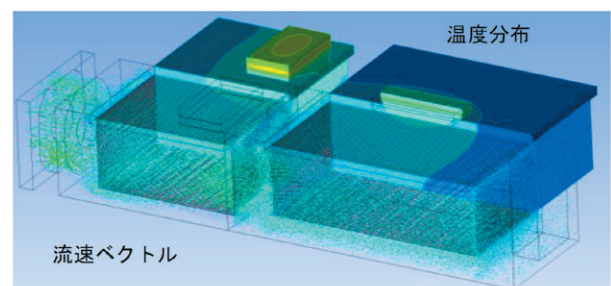
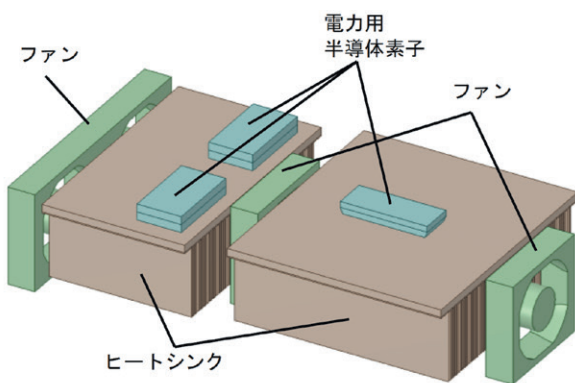
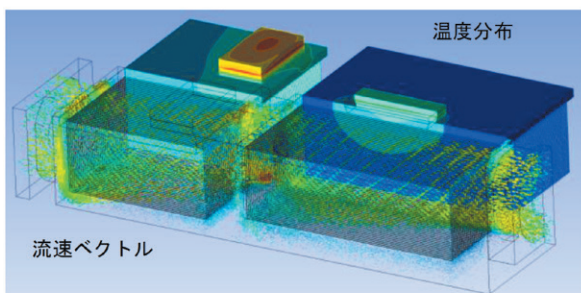


図2 インバータユニット解析結果

最後に、CAE が教育に役立つ例を紹介する。トレーニング用にモデル化したインバータユニットを、シミュレーションした例を示す (図 3)。使用した部品は、図 1 と同じものである。電力用半導体素子を冷やそうとして、多数のファンを取り付けている。しかし、電力用半導体素子の最高温度は図 2 と比較して 10 度以上高く、効率的に冷却されていないことがわかる。解析結果を見ると、原因のひとつは、ヒートシンクに十分な量の空気が均一に流れていないことであるとわかる。このように、解析ソフトを使用すると、空気の流れや温度など、実際には目に見えないものが、分布図やベクトル図等に可視化される。したがって、CAE により設計者が現象を容易に理解できるようになると思われる。



(a) 解析モデル



(b) 解析結果

図 3 適切にファンが取り付けられていない例

3 おわりに

汎用熱流体解析ソフトを使用した、インバータユニットの熱流体解析例を紹介した。今回使用した汎用熱流体解析ソフトは、どちらかと言えば解析専任者向けであり、扱いにくい側面もある。一方、設計者向けの電子機器専用熱流体解析ソフトは、モデルの作成・変更が簡単で、ライブラリも豊富であり使いやすく、なかには計算時間が短い製品もある。両者の長をうまく使い分け、CAE が東光高岳の製品設計の、ひいてはお客さまの役に立てるよう、活用を推進したいと考えている。

■参考文献

- (1) 国峰尚樹：「エレクトロニクスのための熱設計完全入門」、日刊工業新聞社、pp.221-225
- (2) 国峰尚樹：「電子機器の熱流体解析入門」、日刊工業新聞社、pp.121-126
- (3) 国峰尚樹：「電子機器の熱流体解析入門」、日刊工業新聞社、pp.111-118

■語句説明

注 1) CAE : Computer Aided Engineering の略。計算機などを用いて、製品の設計・開発などの支援を行うこと。

注 2) ソルバ : 解析ソフトの計算を実行する部分。

注 3) DELPHI : Development of Libraries of Physical models for an Integrated design environment の略。半導体のモデル化の一つ。半導体を熱抵抗を用いた熱回路網で表す。

注 4) P-Q 特性 : 圧力と流量との特性で、能力を表す。

注 5) プル型 : 冷却ファンの使用方法の一つ。装置内の流体を引き、外に出すことにより装置を冷却する。

注 6) RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes の略。レイノルズ平均モデルのこと。乱流を細かな渦として求めず、時間平均によりマクロ的にとらえる。

注 7) 定常解析 : 時間が十分に経過した状態を計算する。

注 8) ジャンクション温度 : 半導体チップの接合面の温度。半導体は温度が高くなると、p 型でも n 型でもない真性半導体となる。そうすると、接合面のエネルギー障壁がなくなり、デバイスとして働かなくなる。

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

デジタル・サンプリング方式 標準電力量計の開発

■ 後藤 義英
Yoshihide Goto

■ 竹内 利幸
Toshiyuki Takeuchi

■ 高橋 良和
Yoshikazu Takahashi

1 はじめに

東光東芝メーターシステムズ（以下「T2MS」と略記、T2MSは東光東芝メーターシステムズの登録商標第5401335号）は、電力演算方式にデジタル・サンプリング方式を採用した標準電力量計の開発を完了したので報告する。

1.1 標準電力量計について

標準電力量計は、電力量計の精度を確認するための標準器である。電力量の単位Whは、複数のSI単位から導かれるが、交流では、さらに実効値・位相が関係する。交流電力量は、産業界にとって非常に重要な単位であるが、非常に複雑な単位でもある。

このために、(交流)電力量の国家(計量)標準が存在し、日本の電力量の国家標準は、指名計量標準機関である日本電気計器検定所(以下「日電検」と略記)が維持にあっている。

この国家標準の直下に位置し、ワーキング・スタンダードとして産業界への標準供給業務に供される電力量計が、「一級基準電力量計」である。標準電力量計は、計量法に基づく基準器検査に合格することで「基準電力量計」を名乗ることができる。

T2MSは、この「一級基準電力量計」となることができる性能を有した標準電力量計を供給してきた。標準電力量計は誘導形から始まり、時代とともに半電子式となり、現在は完全な電子式に移行した。

さらに、この技術を産業界へも展開しており、同一の技術方式を採用して、①「二級基準電力量計」となることができる一般産業向け^{注1)}標準電力量計、②発電所向けの取引用電力量計(型式承認取得品)、③発電量管理用の高精度電力量計を供給している。

今回開発したデジタル・サンプリング方式は、電子式標準電力量計の第三世代の製品である。

1.2 開発にあたって

現行の標準電力量計は1998年に開発されたもので、入手難の電子部品が増加しているため、モデルチェンジを行うこととした。開発にあたっては、①現時点において最高精度を出しうる技術方式とする、②社会の要求に応える性能・機能を付加する、これら二つを念頭においた。

①の技術方式については、日電検の研究成果である

「サンプリング方式電力量計」の技術供与を受けて開発する。②については、前記の性能を損なわず、ワーキング・スタンダードとしてロバスト性に優れ、取扱いの容易さを追求することとした。

2 従来標準電力量計の技術方式

T2MSの標準電力量計は、常に開発の時点で最高精度を出しうる新技術方式により製品化している。ここでは、電子式以降の各世代の技術方式を簡潔に紹介する。

2.1 高速多重移相時分割方式(第一世代)

電力演算器(乗算器)として、時分割乗算方式を採用したものである。本方式は、計測電流で振幅変調した信号を計測電圧でパルス幅変調(PWM)すると、平均値が電力に比例した大きさの信号になる原理に基づいている。これを、信号の大きさに比例した周波数のパルス列に変換することで、1パルスが電力量の重みを持った「基準パルス」(被試験電力量計との比較に使用するパルス)が生成される。

高速多重移相時分割方式は、PWM周波数を高め、交流各相の電力演算を順次切替えながら行う方式である。記録に留めるべきは、半導体部品が高価で特性も現在ほど良くはない時代において、最少の部品数かつ巧みなアナログ回路技術により誘導形を大きく超える高精度が実現されたことである。PWM制御デジタル部は、専用のワン・チップのカスタムLSIを開発し、基板の小型化に貢献した。

なお、本方式は後に、発電所向けの取引用電力量計に

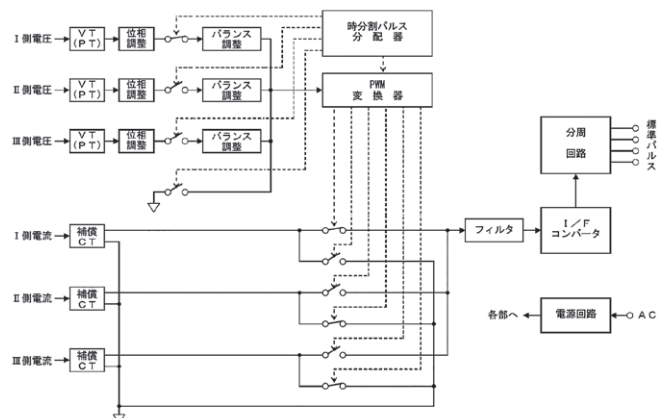


図1 高速多重移相時分割方式のブロック図

も展開され、日本初の電子式電力量計の型式承認を得た。

この「第 814 号特別精密電力量計 SH3A-K11VR 形」は、長きにわたり発電所で使用された。

2.2 自己校正形精密乗算方式 (第二世代)

時分割乗算方式はアナログ方式に分類されるが、PWM 動作により離散的である。1 サイクルの PWM 動作で瞬時電力量が確定する。回路固有の周波数要素を持っていることの影響を最小レベルに抑えるため、高速多重移相時分割方式は PWM 周波数を高く設計していた。

これに対して、純粋なアナログ乗算 IC を利用すれば、乗算動作そのものに周波数要素はなく高速な乗算動作が得られる。しかし、アナログ IC にはオフセットやゲインのドリフトがあり、そのままでは高精度な電力量計に使用できなかった。

その一方で、AD コンバータ、DA コンバータ等のデジタル系 IC が普及してきたが、高速なデジタル乗算は速度・分解能が及ばないか、可能であっても大規模な回路が必要という状況であった。

そこで、純アナログ乗算の特長を生かし、ドリフトのような低速の誤差変化は、デジタル補償 (自己校正) でアシストするという発想から開発されたものが、自己校正形精密乗算器である。

本方式は、高精度基準電圧回路、測定と校正の二つの状態を排他的に切り替えられる多重化されたアナログ乗算器、誤差量をデジタル化する AD コンバータ、校正値を演算するマイクロ・コントローラ、デジタル校正値をアナログ化する DA コンバータで構成された。

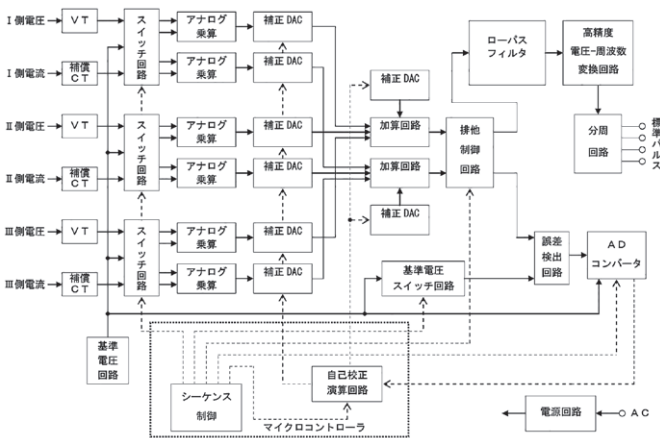


図 2 自己校正形精密乗算方式のブロック図

3 デジタル・サンプリング方式

第三世代となる、デジタル・サンプリング方式電力量計は、電圧信号と電流信号を AD コンバータによるサンプリングで量子化・離散化したのち、デジタル演算処理で電力量を求める。現在のほとんどの電力量計はデジ

タル・サンプリング方式となり、AD コンバータも含めた、ワン・チップ電力量計用 LSI が流通している。これらは、汎用電力量計用として十分な性能と有すると思われる。

しかし標準電力量計には、基本は同様であっても、より高い性能が必要である。

3.1 ブロック図

デジタル・サンプリング方式標準電力量計のブロック図を以下に示す。

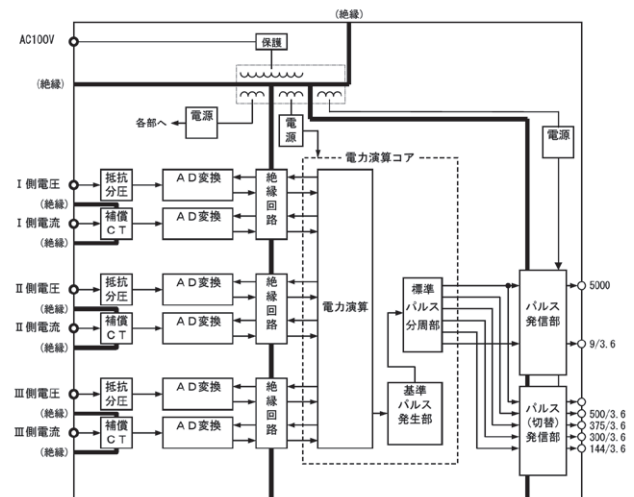


図 3 デジタル・サンプリング方式のブロック図

(1) 電圧入力部

計器に印加される電圧は、抵抗分圧にて低電圧の信号に変換する。

(2) 電流入力部

計器に印加される電流は、補償 CT にて低電圧の信号に変換する。

(3) AD 変換回路

電圧入力部、電流入力部で低電圧に変換された信号を、AD 変換回路でデジタル・データに変換する。

(4) 絶縁回路

デジタル・データに変換された信号を、電氣的に絶縁し、サンプリング方式電力演算コアに入力する。

(5) サンプリング方式電力演算コア

サンプリングされたデジタル・データを電力演算し、電力量の重みを持った基準パルスに変換する。

また、基準パルスを分周し、標準パルスを発生する。

3.2 技術ポイント

(1) AD 変換回路

デジタル・サンプリング電力量計のサンプリング方式電力演算コアは、必要な分解能と高速演算性能を確保し、理論に忠実な演算機能を実現すれば、ほぼ完全かつ経年的にも変化しない性能を確保できる。

よって、デジタル・サンプリング電力量計の性能は、電力量計の電圧・電流入力部から AD 変換までのハードウェアの性能にかかっている。プリント基板においても、サンプリング方式電力演算コアは一つの LSI の中に集積され、プリント基板上のハードウェアは、電圧・電流入力回路、AD 変換回路、電源回路、計器内のインターフェース回路がほとんどを占めることになる。

これらの回路は、日電検の知見を参考に、取引用電力量計等への展開も考慮し、T2MS にて部品選定から始めた設計となっている。

- ・AD コンバータ IC は最重要部品の一つで、その性能を十分に検討し、実機評価を経て決定した。

- ・計器の電圧入力回路は、これまでは性能の優れるトロイダル・コアの VT を採用していた。しかしわずかに残る位相角誤差もデジタル・サンプリング方式にとっては大きな誤差となるため、抵抗分圧方式を採用した。

- ・計器の電流入力回路は、初代の電子式標準電力量計から使用実績のある、補償 CT 方式を引き続き採用した。

- ・電圧、電流入力回路から AD コンバータまでの回路については、AD コンバータの性能を十分に引き出すアナログ回路設計を行った。

- ・電圧入力回路を抵抗分圧方式としたため、安全確保の観点から必要な箇所に電氣的絶縁を施した。

(2) AD 変換誤差への対応

AD 変換において、アナログ値をデジタル値に変換する過程で量子化誤差が発生する。これは信号対ノイズ比 SNR で表され、理論的に以下の式で表すことができる。

$$SNR = 1.76 + 6.02 n \text{ [dB]} \quad n: \text{量子化ビット数}$$

かりに $n = 16$ として試算すると、信号を 0 dB とすれば、量子化雑音は -98.08 dB となるが、実際の AD コンバータ素子の性能、周辺回路の影響等を受けて性能は劣化する。今回の開発では、これらの影響を可能な限り抑える設計を行った。

また、電力量計は、基本的に測定電流のレンジが広く、軽負荷電流時においても精度の高いことが求められる。この要求は、省エネ社会にあって今後さらに強いものとなって行くであろう。

電力量計の誤差は、軽負荷電流時には増大する。この影響を避けるため、標準電力量計は定格電流でのみ使用するのが一般的である。しかしこのような設計では、取引用電力量計に展開できない。この問題についても設計的な対策を折り込むことで、軽負荷電流域まで連続平坦な誤差特性を有したものとした。

(3) サンプリング方式電力演算コア LSI

電力量計のデジタル部にマイクロ・コントローラが普及する以前は、フル・カスタム LSI やゲート・アレイ LSI によるハードウェア・ロジック専用 LSI を積極的に採用してきた。

フル・カスタム LSI は、特定機器専用に設計したロジック回路を作りこんだものである。ゲート・アレイ LSI は、基本ゲートを多数配置した汎用のウェハをあらかじめ用意し、これに任意の配線を施すことで、専用ロジック LSI を作成できるもので、セミ・カスタム LSI とも呼ばれた。

これにより、フル・カスタム LSI に比べれば、専用の LSI を実現しやすくなった。

デジタル・サンプリング方式では、高速な並列演算処理を必要としており、マイクロ・コントローラによるソフトウェア処理には難があった。回路規模を大きくすればソフトウェア処理も可能であると思われるが、消費電力とコストは増大する。ソフトウェアに依らないハードウェア・ロジック回路が再度必要となった。

このような中、ゲート・アレイ LSI に代わって、FPGA (ユーザー側でプログラム可能なゲート・アレイ LSI) が実用的に使用できるようになった。当初は、ゲート・アレイの試作評価用として使用された FPGA であるが、その利便性が注目されると、多様な製品の要求に適合できるよう、それぞれの特長を持った品種を選択できるようになった。

日電検はサンプリング方式を FPGA に実装し、T2MS は、この性能を損なうことなく量産製品に必要な機能を追加搭載することができた。

(4) 試作とその評価

デジタル・サンプリング方式の個々の要素から組み上げると、FPGA の採用など、T2MS にとって初めてとなった本開発は、優れた性能を量産設計で再現することと外乱耐性の確保を両立することに時間を費やした。

前者は、標準電力量計メーカーとして当然であり、後者は今後の製品展開を考慮した場合に必須の課題であった。

T2MS における優れた性能の確保については、そのほとんどをアナログ回路設計に施した。高速・高分解能デジタルの性能を十分に発揮させるには、アナログ性能が重要である。このため、アナログ回路構造を大きく変更する対策も行った。

外乱耐性についてもいくつかの問題が発生したが、問題事象の真因を追究し、最終的な社内評価では、単独普通級電力量計に加えるような条件にも耐えうることを確認した。

3.3 仕様

表 1 に一般産業向けの標準電力量計の仕様を示す。現行品の KS8C 形 (三相 3 線式)、KS9C 形 (三相 4 線式) との互換性を考慮した仕様としている。

表 1 一般産業向けの標準電力量計の仕様

形 名	KS22C 形	KS23C 形
相 線 式	三相 3 線式	三相 4 線式
定 格 電 圧	110 V	$110/\sqrt{3}$ / 110 V
定 格 電 流	5 A	
定 格 周 波 数	50 Hz または 60 Hz	
基 準 パ ル ス	有効正方向 5,000 pulse/kWs	
標 準 パ ル ス	9 pulse/3.6 kWs (500 pulse/3.6 kWs, 375 pulse/3.6 kWs, 300 pulse/3.6 kWs, 144 pulse/3.6 kWs も選択式で出力可能)	
計 量 動 作 表 示 (LED 点滅頻度)	有効正方向 9 pulse/3.6 kWs 有効逆方向 9 pulse/3.6 kWs 無効遅れ 9 pulse/3.6 kvars 無効進み 9 pulse/3.6 kvars	
パ ル ス 出 力 形 式	VOLT および PHOTO	
パ ル ス 幅	基準パルス：40~100 μ s 標準パルス：デューティ約 50%	
電 圧 回 路 負 担	0.1 VA 以下 / 回路	
電 流 回 路 負 担	0.3 VA 以下 / 回路	
補 助 電 源	AC100 V \pm 10 V, 50/60 Hz	
補 助 電 源 負 担	10 VA 以下	
使 用 温 度 範 囲	10~35°C	
使 用 湿 度 範 囲	15~85% (ただし結露なきこと)	
動 作 温 度 範 囲	0~50°C	
本 体 質 量	約 5 kg	
外 形 寸 法	幅 260 × 高さ 156 × 奥行 251 [mm]	



図 4 デジタル・サンプリング方式 KS24 形標準電力量計

図 4 は、今回開発した機能をフル実装した、三相 4 線式・有効/無効 180 度形 4 象限基準パルス出力装備の KS24 形の外觀である。

4 まとめ

T2MS では、デジタル・サンプリング方式を採用した標準電力量計の開発と並行して、これと同一方式である特別精密電力量計および高精度電力量計も開発した。

標準電力量計の性能は、新世代の標準電力量計として使用できる性能が確保できたと考える。

また、特別精密電力量計・高精度電力量計は、標準電力量計の性能を受け継ぎながらロバスト性を確保し、さらに本系列では初めて通信機能を搭載した。引き続き、大電力の公正な計量に使用できる製品を供給できる体制を整えた。なお特別精密電力量計は、2016 年 3 月に型式承認を取得（型式承認番号第 4112 号および第 4113 号）した。

最後に、今回の開発にあたって、多大なるご指導をいただいた、日本電気計器検定所の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

■参考文献

(1) 小金実, 山崎修快, 楠井昭二:「高速多重移相時分割方式を用いた標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 15 巻第 1 号, pp.7-23

(2) 橋本昭憲, 安井孝治, 楠井昭二:「自己校正形精密乗算器を用いた単相標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 31 巻第 4 号, pp.1-8

(3) 川越順:「サンプリング方式による標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 47 巻第 1 号, 2012 年 1 月, pp.1-5

■語句説明

注 1) 一般産業向け: 電力会社向け製品以外の物

後藤 義英

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属

竹内 利幸

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属

高橋 良和

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属

自己給電式無線電流センサを用いた 設備消費電流計測システム

■ 足立 純一
Junichi Adachi

1 はじめに

東光高岳では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構との共同研究事業である『グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト』を東京電力エナジーパートナー株式会社（当時の社名：東京電力株式会社）と共同で遂行し、革新的かつ実用的な自己給電式無線電流センサを開発した。

本稿ではそれらを用いたネットワークシステムについて紹介する。

2 特長

無線通信および自立電源による、配線レス、バッテリーレスのセンサかつ安価で小型なセンサにより、工事・保守費、システム構築費用の低減を図ることが可能である。

3 システム概要

コンセントレータ（東光高岳製 STiNC II）の USB ポートに受信器を接続することで、送信器からの電流情報を、無線通信（920 MHz）を介してデータ収集を行うシステムである。システム構成例を図 1 に示す。

また、マルチホップ機能を有する中継器を設置することで、送信器と受信器間の設置エリア（距離）の拡張や電波状況の悪い環境における通信の信頼性向上を可能としている。

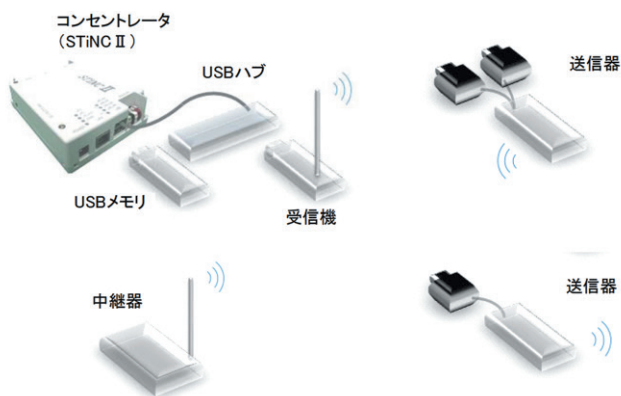


図 1 システム構成図

4 機能概要

4.1 送信器

クランプ式 CT からの自己給電（ケーブル通電電流から取得）により、電流計測と無線通信が可能である。表 1 に仕様を示す。

表 1 送信器仕様

項目	仕様	
計測部	適用電流	30 A, 100 A, 300 A, 600 A
	計測制度	FS ± 2% 以内
	CT 接続数	最大 2 個
通信	無線方式	ARIB STD T108 準拠 920 MHz 帯
	通信間隔	10 秒～600 秒間隔 (設定可能)
	無線規格	ARIB STD T108 準拠
電源	給電方式	クランプ CT から自己給電 外部バッテリーから給電
	動作温度	-10℃～50℃
環境性能	動作湿度	10～90%RH

4.2 受信器 / 中継器

受信器と中継器は共通機器で、ID 設定により使い分けが可能である。表 2 に仕様を示す。

表 2 受信器 / 中継器仕様

項目	仕様	
通信	無線方式	ARIB STD T108 準拠 920 MHz 帯
	衝突防止	キャリアセンス
	送信器 最大接続数	100 台
	中継器 最大接続数	10 台
	インターフェイス	USB1.0 または 2.0
	中継機能	マルチホップ (受信器 1 台に対して 最大 6 段)
電源	給電方式	USB 給電 (5 V)
環境性能	動作温度	-10℃～50℃
	動作湿度	10～90%RH

足立 純一

エネルギーソリューション事業本部
ソリューション製造部 開発グループ 所属

ドコモ LTE モジュール内蔵 IoT ルーター (UMsQuest-LTE)

■ 蓬菜 康行

Yasuyuki Hourai

■ 長谷川 滋郎

Shigeo Hasegawa

1 はじめに

モバイル無線通信の分野では、携帯電話からスマートフォンへの移行を先駆けとして、3G 網から LTE 網への移行が進んでいる。M2M^{注1)}、IoT^{注2)}の分野でも ISDN 網、PHS 網、3G 網から LTE 網への移行が進もうとしている。そのような状況で、総務省は M2M サービス向けの電気通信番号（電話番号）として、「020」で始まる番号を割り当てるとした情報通信審議会電気通信事業政策部会の答申（案）を公表した。ユークエストでは、M2M、IoT の広がりに向けて、LTE 網に対応した IoT ルーター装置を開発したので、その概要を紹介する。

2 装置概要

本装置は、株式会社 NTT ドコモの LTE 網 Xi^{注3)}（クロッシィ）に対応したユビキタスマジュール UM04-KO を実装した IoT、M2M 用途のルーターである。高速データ通信、常時接続など、LTE 網の特長を活かしたシステムの構築に最適な装置である。



図 1 装置外観

3 装置仕様

本装置の仕様を表 1 に、機能を表 2 に示す。

表 1 装置仕様一覧

通信モジュール	NTT ドコモ UM04-KO ポート数：1 回線、プロトコル：PDP-IP
データ通信速度 ※ 1	LTE (Xi 網) 上り：最大 37.5 Mbps 下り：最大 112.5 Mbps
ネットワーク I/F	Ethernet (RJ45) を 1 ポート装備 10BASE-T/100BASE-TX Auto MDI/MDIX 対応 Ethernet-HUB 経由で、カスケード接続可能
LED 表示	電源、回線状態（接続/切断）、電波強度（アンテナ本数）、データ送受信状態、 その他状態（2 種類）を表示
筐体寸法	W140 mm × D87 mm × H30 mm（アンテナ、スタンド等の突起物を除く）
本体重量	400 g（アンテナ、AC アダプタを除く）
使用温度範囲 ※ 2	本体：-20 ～ +60°C（屋内仕様） AC アダプタ：0 ～ +40°C（屋内仕様）
使用湿度範囲	20% ～ 90% RH（結露なきこと）
電源	AC アダプタ（DC5 V）
消費電力	無通信時：1.6 W 通信中（Typ）：3.5 W 通信中（Max）：4.5 W

※ 上記仕様は予告なく変更する場合があります

※ 1 通信環境や混雑状況により通信速度が変化するベストエフォートによる提供になります

※ 2 AC アダプタの温度範囲拡張については、お問い合わせください

表 2 装置機能一覧

対応プロトコル	IPv4、TCP、UDP、ICMP に対応
ネットワーク接続	動的 NAPT 機能 / IP マスカレード (2,000 エントリ)、スタティック NAPT (32 エントリ) FTP-NAPT 機能による FTP プロトコル対応 (16 エントリ)
ネットワーク機能	IP フィルタリング、MAC アドレスフィルタリング、DHCP サーバー、SNTP サーバー、ドメイン管理 IPsec-VPN 機能（開発中）※ 3
常時接続機能	Xi 網との IP 接続を利用した常時接続が可能（APN 指定：10 エントリ）
DynamicDNS 機能	ユークエスト運営の DDNS サービスを利用、または Dynamic DNS.jp、GnuDIP に対応した DynamicDNS 公告が可能
時刻機能	Xi 網から取得した時刻を更新して、SNTP サーバ機能、及び、ログの時間情報に利用 指定日時に Xi 網に接続するスケジュール設定が可能（5 エントリ） 毎日定時刻にルーター再起動の実施が可能（1 エントリ） 省電力機能による省電力待機状態から指定時刻に復帰可能（4 エントリ）
機器設定機能	WEB ブラウザによる各種設定が可能 設定ファイルを使用したパラメータ一括保存、一括設定に対応
機器情報機能	WEB ブラウザによる電波強度、DDNS 状態、モジュール温度、PING 応答の統計情報の取得が可能
温度管理機能	通信モジュール（UM04-KO）の内部温度上昇を監視して、通信の停止・再開制御が可能
ファームウェアアップデート機能	WEB ブラウザによる画面操作でルーター本体のファームウェアアップデート実行が可能 Xi 網による通信モジュール（UM04-KO）のファームウェアアップデートが可能 ※ 4
その他	ログ機能、エリアメール受信通知機能、SMS 遠隔制御機能、省電力機能

※ 上記仕様は予告なく変更する場合があります

※ 3 ソフトウェアのバージョンアップにて対応予定

※ 4 通信モジュールのファームウェアアップデートには、事前に NTT ドコモへの申し込みが必要になります

※ 5 プロトコルのフォーマットについてはお問い合わせください

4 用途

本装置のおもな用途を以下に記す。

(1) エネルギー監視システム

ビル・建屋の電力監視や、再生可能エネルギー機器の遠隔監視を実現するために、現地に通信設備がない、あるいは、接続できない場所でも監視システムの構築が可能である。

(2) 装置監視システム

店舗、支店などに設置した機器や、橋梁、高速道路などの設備の遠隔制御・監視システムの実現に、現地にネットワーク設備がない場合でも、容易に遠隔システムの導入が可能である。

■ 語句説明

注 1) M2M：機器の相互接続（Machine to Machine）

注 2) IoT：物のインターネット（Internet of Things）

注 3) Xi：クロッシィは株式会社 NTT ドコモの回線の名称であり、商標または登録商標である。

（標題）UMsQuest：ユークエストの IoT ルーター製品名である。

蓬菜 康行

ユークエスト株式会社
営業部 所属

長谷川 滋郎

ユークエスト株式会社
神戸システム部 所属

バッテリー駆動による ポータブル監視通報装置(UMsMonitor)

■ 蓬萊 康行
Yasuyuki Hourai

■ 長谷川 滋郎
Shigeo Hasegawa

1 はじめに

近年、高速道路や橋梁など、社会インフラの老朽化が問題になっている。通信サービスをはじめ、さまざまなサービスを提供している事業者においても、インフラ設備のメンテナンスに対応する保守作業担当者の高齢化や退職などもあり、対応可能な要員不足が問題となりつつある。

ユークエストは、それらの対象箇所に簡単に設置できる監視通報装置を開発したので、ここに紹介する。

2 装置概要

本装置は、監視対象の状態変化を株式会社 NTT ドコモの 3G 回線を利用して、管理者に通知を行うものである。

(1) 持ち運び、設置、移設が容易なポータブル型

電池駆動に対応しており、商用電源がなくても動作するため、設置場所への電源工事、電力線の敷設が不要である。また、携帯電話網を使って通信するため、通信線の敷設も不要となる。

屋外設置を想定した保護等級 IP65 仕様としている。

(2) 目的に応じて各種センサーの使用が可能

標準仕様として、接点監視を行う機能を備えている。例えば、扉の開閉監視、火災検知、水位異常検知等に用いられている。

オプション仕様として、以下のようなセンサー利用を想定して設計を行っており、カスタマイズが可能である。

- ①パルス監視：雨量監視
- ②温度 / 湿度監視：ビニールハウスなどの温湿度監視
- ③赤外線センサー監視：人の不法侵入、害獣監視
- ④ RS232C/RS485 通信：歪センサー計測等

(3) 省電力設計で長時間監視が可能

充電池、乾電池、商用電源に対応している。

電池交換の目安は、単一型ニッケル水素充電池使用で、接点監視による 1 日 2 回の通報の場合、2 か月以上の監視が可能である。(※条件によって変動する可能性あり。)



図 1 装置の構成

3 装置仕様

本装置の諸元を表 1 に示す。

表 1 装置仕様一覧

通信モジュール	NTT ドコモ UM03-KO
外部 I/F	デジタル入力 (2 接点)
	デジタル入力 (パルス) ※オプション
	RS232C/RS485 ※オプション
	I2C (温度, 湿度) ※オプション
通報方式	SMS 通報
	電子メール通報
時刻機能	FOMA 網から取得した時刻を利用し、ログの時間情報を更新
筐体寸法	W200 mm × D200 mm × H120 mm (ただし、突起物を除く)
本体質量	約 3.5 Kg (アンテナ, 信号ケーブルを除く)
使用温度範囲 ※1	本体: -20~+60°C
使用湿度範囲	20%~90%RH (結露なきこと)
電源	DC3.6~6V (標準では、単一電池 × 3)

※ 1 使用する電池の使用温度範囲により制限を受ける場合がある。本装置の構成の特長は、ユークエスト製品 UMsQuest, および, EcoQuest を応用して、省電力で電源工事不要で、通信の無線化を実現した監視装置という点である。

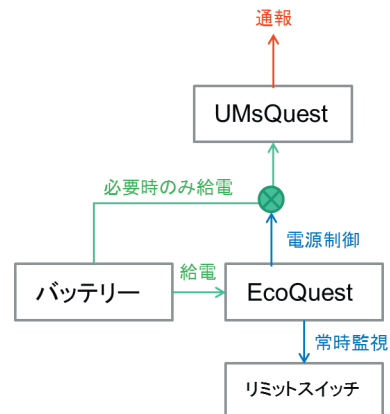


図 2 装置の構成

接点状態の変化により、即時に 3G 回線 (FOMA 網) を介して SMS および電子メールで通報する機能は、ユークエスト製品の UMsQuest^{注1)} の技術に応用したものである。

また、バッテリー駆動で約 1~2 か月程度継続動作 (FOMA 電波良好時) 可能とする機能は、ユークエスト製品の EcoQuest^{注2)} の省電力技術に応用している。

なお、本装置を使用するためには、株式会社 NTT ドコモの回線契約が必要である。

4 電池の寿命

本装置の電池 (バッテリー) 消費は、1 日 2 回、センサー 2ch (常時 OFF) の定期通信をすることを想定して、設計している。ただし、センサーによっては、常時 ON の仕様の製品がある。

図 3 のグラフは、常時 ON のセンサー 2ch と常時 OFF のセンサー 2ch の電池消費の経時変化を実際に測定した結果を示す。

常時 ON では 1 週間に 2 回の定期通信を行った場合に約 2 か月の運用が確認でき、常時 OFF では 1 日 2 回の定期通信を行った場合に約 3 か月の運用が確認できた。

オプション仕様にて、各種センサーを取り付けた場合、電池駆動での消費電力は事前に予測と計測が必要になる。

ユークエストでは、使用したいセンサーでの稼働期間に関する問い合わせ・相談にも対応している。

5 屋外仕様 UMsQuest 応用製品

本監視装置は、屋外での設置に対応しているが、そ

のほかの屋外設置のための UMsQuest 応用製品として、防災パッケージ「緊急速報“エリアメール^{注3)}”対応警報装置」を、株式会社 NTT ドコモ、株式会社パトライトと協力して提供している。

UMsQuest, EcoQuest 製品群の応用製品の開発に関する各種の相談に対応できる体制を整えている。

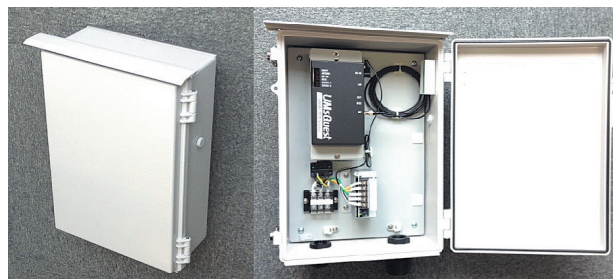


図 4 屋外仕様防災パッケージ

■ 語句説明

注 1) UMsQuest: ユークエストの IoT ルータ製品である。EcoQuest: ユークエストの 920 MHz 特小無線センサネットワーク応用製品である。

注 2) FOMA: フォーマは株式会社 NTT ドコモの回線の名称であり、商標または登録商標である。

注 3) エリアメール: 気象庁が配信する緊急地震速報や津波警報、地方公共団体が発信する災害・避難情報などを受信することができる NTT ドコモの携帯電話向けサービスで、株式会社 NTT ドコモの登録商標である。

蓬菜 康行

ユークエスト株式会社
営業部 所属

長谷川 滋郎

ユークエスト株式会社
神戸システム部 所属

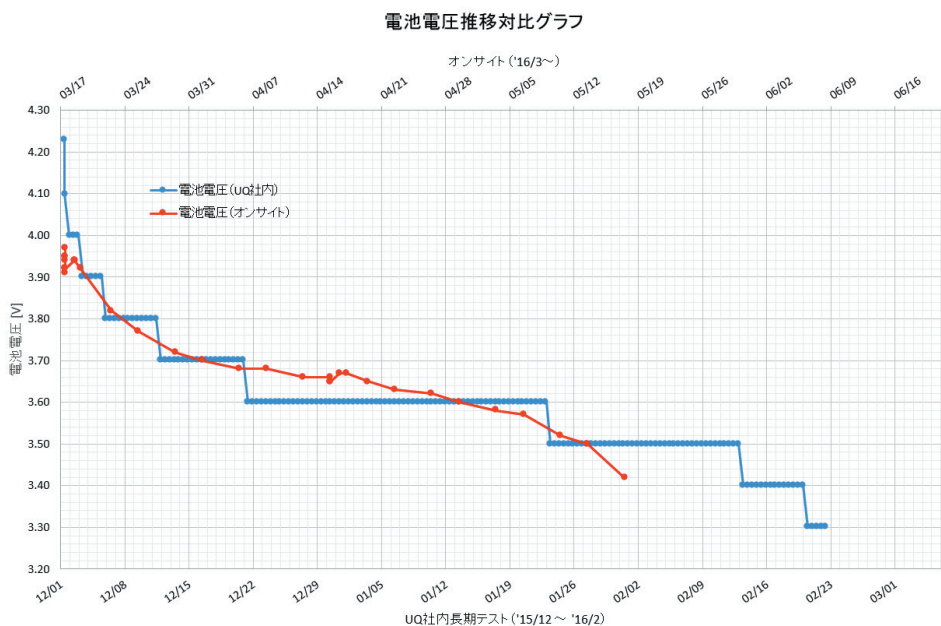


図 3 バッテリーの消費曲線

沖縄電力株式会社向け 手動多回路気中開閉器

■ 村野 敏行
Toshiyuki Murano

1 概要

地中配電線路に設置される手動操作方式の気中多回路開閉器である。

2 仕様

定格電圧 7,200 V
 定格電流 400 A
 回路数 5回路
 定格短時間耐電流 12.5 kA 1秒 1回
 定格短絡投入電流 31.5 kA 3回

3 特長

- (1) エポキシ樹脂ケースを採用し、ガス開閉器と同一外形で実現した地球環境にやさしい気中開閉器。外形寸法は、高さ1,050 × 幅1,100 × 奥行450 mm
- (2) T型終端接続端末を採用することで、保守作業性を向上した。
- (3) ステンレス製の外箱を採用することで、防錆性を向上した。

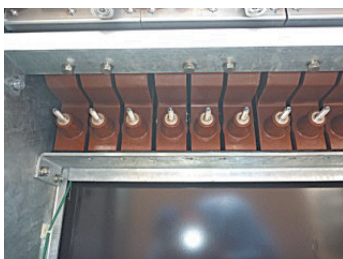


図1 主回路端子

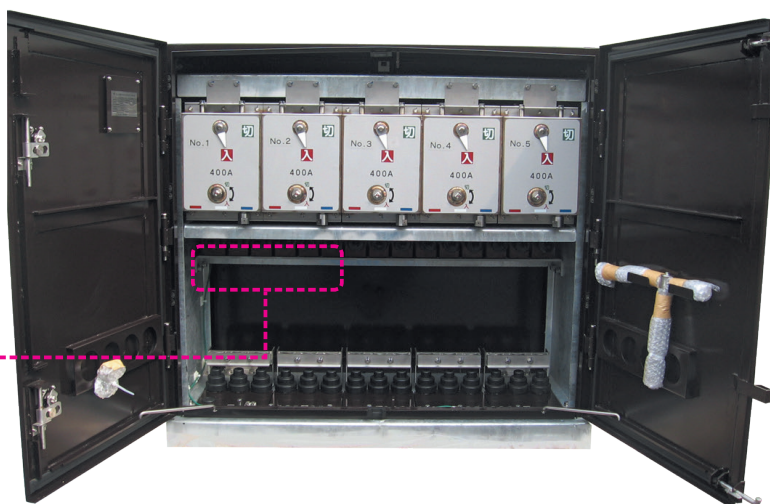


図2 製品外観

村野 敏行

電力機器事業本部
 配電機器製造部 開閉器設計グループ 所属

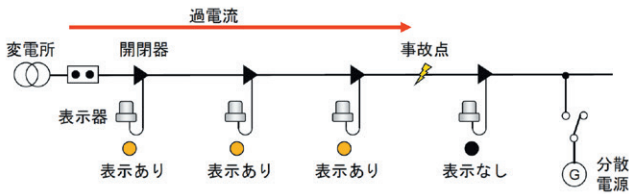
事故区間表示器 (逆潮流対応型)

製品紹介

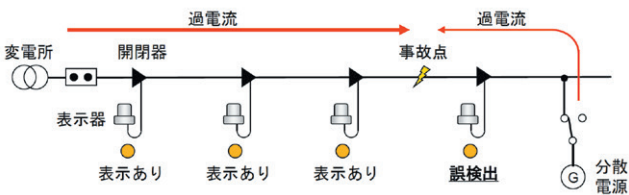
市川 貴洋
Takahiro Ichikawa

1 概要

本製品は、事故区間表示機能付高圧気中開閉器と組み合わせて配電線路において発生する地絡・過電流事故を検出・表示し、事故発生区間の標定を行うものである。



分散型電源の系統連系により、1フィーダの電力供給元が変電所のみではなくなった場合、従来製品の過電流レベルだけによる事故検出では、分散型電源からの逆潮流による過電流で誤検出することが考えられる。



このため過電流検出に事故方向の判別が必要となった。

2 特長

- ・事故検出機能
従来の地絡検出に加え、過電流検出においても事故方向の判別を行い、負荷側事故を検出可能とした。
- ・設定機能
スイッチによる事故検出感度の整定値や停電有無条件の設定機能に変電所方向を設定する機能を追加した。
- ・ログ収集機能
各動作・設定履歴を保存し、読み出し可能とした。



○本製品の仕様は、東北電力株式会社と株式会社三英社製作所との共同開発により制定されたものである。

市川 貴洋

電力機器事業本部
配電機器製造部 システム機器設計グループ 所属

環境配慮型変圧器

製品紹介

梶 陽平
Yohei Keyaki

栗原 二三夫
Fumio Kurihara

1 背景

近年、トップランナー変圧器に代表される、省エネ、地球環境保護を目的とした機器の普及が進んでいる。変圧器においては、従来の鉱油に替わる液体絶縁媒体として生分解性に優れたエステル系絶縁油を適用した変圧器の開発が進められている。今回、植物由来のエステルを絶縁油であるパームヤシ脂肪酸エステルを用いるとともに、トップランナー基準を満足した環境配慮型変圧器を開発した。

2 特長・仕様

主な特長は次のとおりである。

(1) 環境性能向上

植物由来のパームヤシ脂肪酸エステルを用いることにより

○化石資源の使用削減、処分時のCO₂排出量の削減(カーボンニュートラル)に寄与する。

○万が一、絶縁油が土壌へ漏洩した場合でも、環境負荷が少ない。

(2) 性能向上

従来の絶縁油に比べ低粘度・高誘電率であるため、冷却性能や、絶縁物との誘電率整合効果により、油浸絶縁系の絶縁耐力の向上が期待できる。



図1 外観

開発した環境配慮型変圧器の基本仕様・諸元を表1に示す。

表1 基本仕様・諸元

項目	仕様
相数	単相
周波数	50/60 Hz
定格容量	75 kVA
定格一次電圧	6,600 V
定格二次電圧	210/105 V
冷却方式	油入自冷式
結線	単相三線式
外形寸法	W595 × D495 × H915 mm
総質量	320 kg
総油量	78 L

3 まとめ

近年の環境負荷低減への意識の高まりから、IECにおける未使用天然エステル品質規格(IEC62770)の発行やメンテナンスガイドの検討、国内では石油学会における品質指針(JPI-5R-76-2015)の発行など、エステル系絶縁油を使用しやすい環境の整備が進む方向にあり、更なる適用拡大が期待される機器である。

■ 語句説明

注1) カーボンニュートラル：排出されるCO₂量と植物などが吸収するCO₂量がイコールである状態のこと。

梶 陽平

電力機器事業本部
小型変圧器製造部 設計グループ 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

高圧一括受電切替に対応した 小型キュービクル

■ 望月 佑起
Yuki Mochizuki

■ 仲山 雄貴
Yuki Nakayama

1 はじめに

近年、マンションにおいて高圧一括受電契約を結び、電気料金の削減などを行う物件が増加傾向にある。これは新築だけでなく既築のマンションでも同様で、契約切り替えの際は、電気設備の入れ替えが必要になる。

各戸が電力会社と契約を結ぶ低圧受電契約でのマンションの受電設備は電力会社の持ち物であり、マンション内に電気室を設けるか、屋外へ集合住宅用変圧器を設けるものとなっている。一方、マンション全体で高圧受電契約を結ぶ場合は、マンション側の持ち物として電気室内に高圧受電設備を設けるか、屋外へキュービクルを設ける必要がある。

低圧受電契約にて使用する集合住宅用変圧器（以下、現行品という）は、東光高岳が生産し電力会社に供給している機器であるが、キュービクルと比較し据付面積が小さいため、既設の現行品をキュービクルに切り替える際は、設置スペースが問題となることがある。このため、既設の現行品の設置スペースに対応しかつ、自家用電気工作物として電気事業法に適合した高圧一括受電に対応した小型キュービクル（以下、開発品という）の開発を行った。

2 仕様

開発品は、電気事業法上において自家用電気工作物と

なるため、法令や規程などに適合した内部構成とする必要がある。

このため、開発品は変圧器の容量や二次側収納物などを現行品から変更した。

据付部の寸法および固定部の位置は、現行品と同様とし、設備の入れ替えの際に、ハンドホールがそのまま使用できるものとした。

製品化した開発品の主な仕様を表1に示す。

表1 主な仕様

項目	仕様
定格容量	(50 + 150) kVA + 100 kVA
結線	異容量 V 結線, 単相三線
一次電圧	6.6 kV
二次電圧	210/105 V
商用周波耐電圧	一次側 22 kV, 二次側 1.5 kV
雷インパルス耐電圧	一次側 60 kV
温度上昇限度	変圧器絶縁油 60 K, 巻線 65 K
LBS 定格電流	200 A
限流ヒューズ	U 相 60 A, V 相 60 A, W 相 30 A
一般電源用 MCCB (定格電流可調整)	単相用 1,000 AF, 800 AF 三相用 400 AF
非常電源用 MCCB	単相用 250 AF, 三相用 250 AF
外形寸法	W 1,300 × D 1,100 × H 2,000 mm
質量	2,210 kg



図1 外観



図2 内部構造

3 特長

開発品の特長は次のとおりである。

(1) 三相不平衡対策

機器内に収納する変圧器は、高圧受電設備規程⁽¹⁾により変圧器容量ができる限り三相が平衡となるよう、設備不平衡率^{注1)}30%以下とするか、以下の内容に適合するよう勧告されている。

(1) 高圧受電において、100 kVA 以下

(2) 高圧受電において、各線間に接続される単相変圧器容量の最大と最小の差が100 kVA 以下

現行品の容量は50 kVA + 250 kVA であり、設備不平衡率30%以下を満足できない。このため、50 kVA と150 kVA をV結線した単相変圧器中身2台と、100 kVA の変圧器中身1台を変圧器タンク内に収納した。これにより、現行品と等しい容量を確保し、単相変圧器の最大と最小の差を100 kVA 以下とすることでできる限り三相が平衡とすることが可能となった。

(2) 二次側構成

二次側には、集合住宅内の消防用設備への電力供給のため、非常電源用配線用遮断器を設けた。一般電源用回路には過電流保護のため配線用遮断器を設けたため、一般電源用回路での過電流などにより、非常電源が遮断されないものとなっている。

また、点検用コンセントや漏電火災警報器など保守に必要となる回路を設けた。

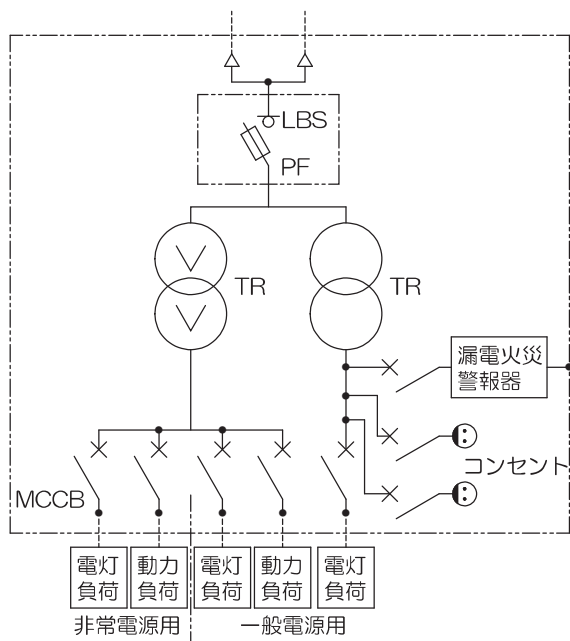


図3 単線接続図

(3) 点検面

機器は、変圧器部・一次コンパートメント部・二次コンパートメント部を鋼材や絶縁物を使用し隔てている。

変圧器のブッシングは、変圧器前面の各コンパートメント部に設けているため、点検の際は機器前面の扉を開けることにより可能となる。

変圧器の波板や底面などの状態の確認は、側面の換気口を取り外すことで実施可能である。なお、側面の換気口の固定は機器外部から特殊ねじで締結しているため、換気口を取り外しは容易に行うことが可能である。

点検を行う面が前面であるため、背面の保有距離^{注2)}は0.2 m 以上となり、背面から点検が必要な場合の0.6 m 以上より短い距離とすることが可能となっている。

(4) 受電方式

高圧受電に必要な計器用変成器（以下、VCT という）や電力量計を機器内に収納しないことで機器の縮小を行っているため、架空線からの引込柱にVCT や電力量計を設ける想定としている。

地中引込とする場合は、VCT などを収納する盤を別途設ける対応となる。

4 まとめ

高圧一括受電切替に対応した小型キュービクルの概要および特長を紹介した。この機器により高圧一括受電を採用する際に生じる問題を低減できる。

電気料金削減の面から高圧一括受電の関心は強いため、今後も技術開発に努め市場のニーズに応える製品開発を行っていききたい。

■参考文献

(1) 一般社団法人日本電気協会：「高圧受電設備規程」, JEAC8011-2014, p.62 (2014)

■語句説明

注1) 設備不平衡率：各線間に接続される単相変圧器総容量 (VA) の最大と最小の差と総変圧器容量 (VA) の平均値の比 (%)。

注2) 保有距離：キュービクル式変電設備等の保安のため距離で、周囲と機器各面の確保すべき距離

望月 佑起

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

電力会社向け 窒素密封式変圧器の開発

■ 酒井原 展寿

Hirohisa Sakaibara

■ 五月女 正樹

Masaki Sotome

■ 大山 修司

Shuji Oyama

1 はじめに

窒素密封式変圧器（以下、N₂Tr）は、絶縁油の温度変化による膨張・収縮をタンク内部に封入した窒素ガスにて吸収する変圧器である。窒素密封式は1960年頃まで主流であったが、ガスケットの経年劣化による気密不良を原因とした水分浸入などが発生したことから、その後はコンサベータによる無圧密封式が主流となっていた。しかし、性能の良いガスケットの開発などにより、N₂Trの弱点であった密封性能低下のリスクが改善されたため、2000年頃から小容量（20 MVA以下）の一般産業向け変圧器では、低コストであるN₂Trが主流となっている。

これに対し、電力会社向け変圧器では無圧密封式が採用されてきたが、一般産業向けN₂Trの良好な運転実績を踏まえ、大幅なコスト低減を目的として、東京電力パワーグリッドカンパニー株式会社（以下、東京電力PG）向けの配電用変圧器を対象に10 MVAおよび15 MVAのN₂Trを開発した。開発にあたっては、電力会社特有ともいえる並列バンク運転時における1バンク故障時の過負荷運転を想定し、過負荷性能についても検討を行った。以下、N₂Trの開発の概要を紹介する。

2 機器仕様

結線や低騒音など、東京電力PGの仕様を満たしつつ、一般産業向けN₂Trをベースに設計することで、タンク設計や外装部品の共通化などによりコスト低減を図った。容量については、東京電力PGの負荷状況や絶縁油封入での全装輸送化を考慮して10 MVAおよび15 MVAとした。

基本仕様を表1、外観を図1に示す。

表1 東京電力PG向け配電用変圧器基本仕様

	現行標準	開発器
容量	20 MVA	10, 15 MVA
電圧	64.5/6.9 kV	64.5/6.9 kV
油劣化防止方式	無圧密封式	窒素密封式
タップ切換方式	負荷時タップ切換	負荷時タップ切換
結線	Y-Y- (Δ)	Y-Y- (Δ)
騒音	50 dB	50 dB
輸送形態	解体輸送	油入全装輸送



図1 窒素密封式変圧器外観（環境調和色）

3 機器の特長

開発した機器の特長は次のとおりである。

3.1 窒素密封式の採用

絶縁油は空気と接触することで吸湿および酸化劣化し、絶縁耐力も低下する。そのため、絶縁油と空気を遮断する必要があるが、その方式として現在では一般的に無圧密封式と窒素密封式が採用されている。油劣化防止方式の比較を表2および図2に示す。

変圧器は運転や外気温の変化によって、変圧器タンク内の油温が変化し、絶縁油の体積が膨張・収縮する。無圧密封式は、絶縁油の体積変化をコンサベータ内のゴムセルの伸縮によって吸収しているが、窒素密封式はタンク内上部に設けた窒素空間の圧力が変動することで体積変化を吸収している。このため、窒素密封式はコンサベータ本体およびコンサベータに接続される配管や支えなどが不要となり、構造がシンプルとなるため材料費や組立費を低減することができる。なお、窒素密封式は、窒素空間の窒素が絶縁油に溶解してタンク内圧力が低下するのを防止するため、窒素飽和处理を施した絶縁油を採用している。

表2 油劣化防止方式比較表

	無圧密封式	窒素密封式
油劣化防止装置	コンサベータ	窒素空間
タンク内圧力変化	無	有
絶縁油への窒素飽和处理	無	有

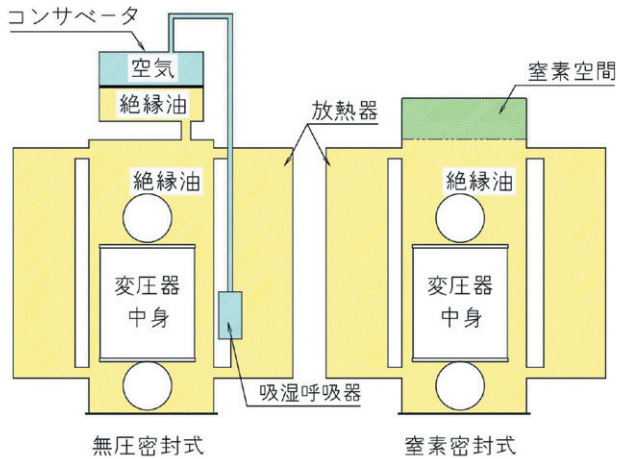


図2 油劣化防止方式比較図

3.2 全装輸送および工期の短縮

従来の配電用変圧器では輸送寸法・重量制限のため、工場試験後、工場内で一度解体し、輸送後に現地にて再度組立をする必要があった。

N_2Tr ではコンサベータが不要となり変圧器高さを低く抑えることが可能である。また、最適化や軽量化設計による変圧器質量の低減により、図3に示すようにすべての部品を取り付けた完成状態のまま油入全装輸送することを可能とした。今回開発した N_2Tr は工場にて確認した品質のまま現地輸送が可能となり、大幅な工期の短縮および工事費用の低減を実現した。



図3 窒素密封式変圧器油入全装輸送

3.3 信頼性の向上

溶接構造の採用などにより気密シール部を極小化するとともに、シール部のガスケット材質には一般産業向け変圧器を中心に多くの運転実績がある NBR を採用し性能向上を図った。なお、変圧器上部には水平シール部を配置しないよう配慮するとともに、比較的温が高い上部フランジ部のガスケットには耐熱性に優れたフッ素ゴムを適用した。

3.4 過負荷性能

変圧器は過負荷運転をすると、定格運転時よりも巻線温度が上昇する。巻線温度が過度に上昇すると、絶縁紙内の水分が気化（バブル発生）することで絶縁性能が低下する可能性がある。そのため、過負荷運転限度の見極めには、バブル発生温度を把握する必要がある。

N_2Tr は窒素飽和絶縁油を用いているためバブル発生温度が低下する要因があるが、一方で過負荷時のタンク内圧は高くなっているため、バブル発生温度が上昇する要因も併存している。これまで N_2Tr におけるバブル発生温度の知見は少なかったため、バブル発生温度と圧力の関係について実器を模擬したモデル試験を行った。モデル試験におけるバブル発生状況を図4に示す。

実験の結果、 N_2Tr は窒素ガス圧を上昇させることでバブル発生温度が高くなり、過負荷性能が向上することが確かめられた。この結果により、過負荷仕様に応じた圧力設計をすることで、必要な過負荷性能を有した N_2Tr を製作することが可能となった。

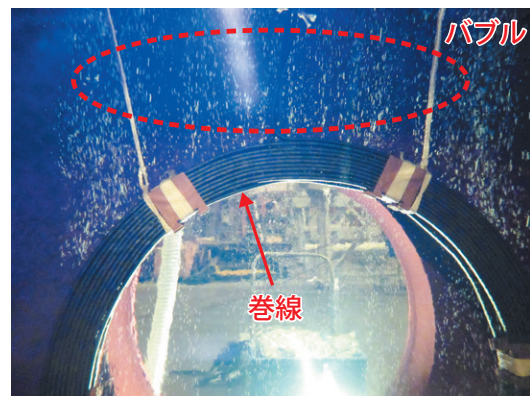


図4 モデル試験におけるバブル発生状況

4 おわりに

今回、電力会社向けのコンパクトで低コストの N_2Tr を開発・製造した。特に過負荷性能については、運転条件を満たしつつ、コストアップを最小限に抑えることができた。

今後もお客さまのニーズを確認しながら、高品質・低価格の製品の開発を推進していきたい。

酒井原 展寿

電力プラント事業本部
大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属

五月女 正樹

電力プラント事業本部
大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属

大山 修司

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

245 kV 気中断路器海外認証機関 タイプテスト合格 (イタリア CESI)

■ 蛭沼 伸行

Nobuyuki Hirunuma

1 はじめに

海外向け断路器および接地装置の国際入札に対応するために、海外認証機関において接地装置付断路器および電動操作装置のタイプテスト (type test) を受検し合格した。

2 仕様

今回タイプテストを実施した接地装置付断路器の主な仕様を表 1、電動操作装置の仕様を表 2 に示す。

表 1 接地装置付断路器の仕様

名称		接地装置付水平中心一点切断路器	
形式		断路器：THB7 形 LG 式 接地装置：EB3 形 AB 式	
定格	電圧 (kV)	245	
	電流 (A)	4,000	
	周波数 (Hz)	50/60	
	短時間耐電流	50 kA / 通電時間：3 s	
絶縁強度		対地	同相主回路間
	雷インパルス (kV)	950	1,050
	商用周波 (kV)	395	460
準拠規格		IEC62271-102 (2013)	

表 2 電動操作装置の仕様

名称		電動操作装置	
形式		MCDA 形 DB1ME 式	
定格	操作電圧 (V) 制御電圧 (V)	DC100	
	制御電流 (A)	約 0.5	
	操作電流 (A) (起動 / 定常)	断路器用：約 10/2.0 接地装置用：約 15/4.0	
	動作時間 (s)	断路器用：4 接地装置用：2.5	
	操作出力 (N・m)	900	
	保護等級	IP54	

3 構造

タイプテストを実施した接地装置付断路器を図 1、電動操作装置を図 2 に示す。タイプテスト実施にあたり、断路器および接地装置は日本国内向けに販売している製

品 (日本国内では、短時間耐電流 2 秒通電) から一部強化して短時間耐電流 3 秒通電に対応した。断路器は接触部の接触圧力を高めた。接地装置は短時間耐電流に耐えるべく通電容量の強化を図った。また、電動操作装置については、主要部品は日本国内向けと同じ部品を使用しつつ、海外専用にあらかじめ開発したものである。



図 1 タイプテストを実施した接地装置付断路器



図 2 タイプテストを実施した電動操作装置

4 タイプテスト合格

4.1 試験場の選定

今回のタイプテストは、CESI S.p.A. (イタリア電気部品・システム研究認証研究所) で実施した。国際入札に参入するためには、代表的な海外認証機関でのタイプテストを要求されることが多い。そのため IEC62271-102 (2013) に基づく試験を遂行するにあたり、実績が豊富で、認証機関として評価されている CESI S.p.A. を選定した。

4.2 タイプテスト対象機器の選定

海外で主流である水平中心一点切断断路器をタイプテスト対象機器とした。その中で主流となる 245 kV で最大電流定格品となる 4,000 A をタイプテスト機種とした。

4.3 タイプテスト試験結果

今回実施した IEC62271-102(2013) に基づくタイプテスト試験項目および結果を表 3 に示す。

表 3 タイプテスト試験項目および結果 (IEC62271-102)

項目No.	名称	結果		
		断路器	接地装置	操作装置
6.2	絶縁耐力試験	○	○	—
6.3	ラジオ障害試験			
6.5	温度上昇試験	○	—	—
6.6	短時間耐電流試験 / 波高耐電流試験	○	○	○
6.7	保護の確認	—	—	○
6.102	運転耐久性 / 機械的耐久性試験	○	○	○
6.103	過酷な結氷下での運転	○	—	○

○：タイプテスト合格を示す，—：試験対象外を示す。

(1) 絶縁耐力試験およびラジオ障害試験

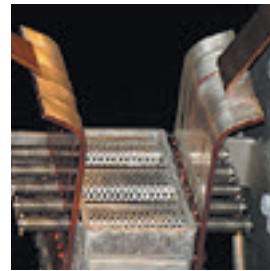
絶縁耐力試験は、表 1 に示す雷インパルスおよび商用周波の電圧を印加し、絶縁破壊することなく合格となった。商用周波については、乾燥状態だけではなく注水状態での試験も実施している。また、ラジオ障害試験は、定格電圧の $1.1/\sqrt{3}$ 倍の 156 kV を印加し、ラジオ障害レベルの基準値 2,500 μ V をクリアした。ラジオ障害試験は JEC-2310 : 2014 では参考試験扱いとなっており、国内では可視コロナの確認を行うのが一般的である。

(2) 温度上昇試験

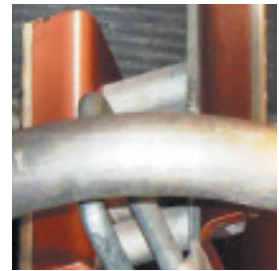
温度上昇試験は、定格電流 4,000 A を通電し、温度上昇値は接触部の基準値 65 K、ヒンジ部の基準値 75 K をクリアした。

(3) 短時間耐電流試験 / 波高耐電流試験

短時間耐電流試験 / 波高耐電流試験は、50 kA3 秒間 (波高値 2.6 倍) にて実施した。IEC62271-102 (2013) の標準値は通電時間 1 秒間であるが、3 秒間を要求されることが多いことから、50 kA3 秒間での試験とした。試験後には、溶着も無く接触部の状態、開閉操作も良好で、試験前後で接触抵抗値の差が基準値の 10% 以内であった。図 3 に試験後の断路器接触部状態を示す。



(a) フィンガコンタクト



(b) バットコンタクト

図 3 短時間耐電流試験 / 波高耐電流試験後の断路器接触部

(4) 保護の確認

保護の確認試験は、操作装置に対して保護等級 IP54^{注1)} にて実施し、問題のないことを確認した。保護の確認は、JIS C0920 : 2003 と同じものである。

(5) 運転耐久性 / 機械的耐久性試験

運転耐久性 / 機械的耐久性試験は、クラス M0 (断路器および接地装置開閉 1,000 回)、機械端子荷重 Fa1 / Fa2 : 1,000 N, Fb1 / Fb2 : 330 N, Fca : 1,250 N にて実施した。試験後の接触部の状態も良好で、試験前後で接触抵抗値の差が基準値の 20% 以内であった。

IEC62271-102(2013) では、鉛直方向荷重 Fca も規定される。

(6) 過酷な結氷下での運転

過酷な結氷下での運転は、試験場スペースの都合から断路器 2 相 (本来は 3 相) での実施とした。このため、クラス 10 の 10 mm の結氷より条件が厳しい 15 mm での結氷試験となったが、投入、開放動作ともに問題なく動作した。

5 おわりに

これまで、海外認証機関におけるタイプテストを実施していなかったため国際入札に参入できないケースがあった。タイプテストを遂行し合格したことで、海外物件の売上拡大に寄与することができる。

本製品はグループ会社である撫順高岳開閉器有限公司の協力を得て製作したものである。

■ 語句説明

注 1) IP54 : IEC60529 にて定める保護等級コードで、第 1 数字は外来固形物に対する保護等級。IP5X は、電気機器の所定の動作および安全性を阻害する量の塵埃の侵入があつてはならない。また、第 2 数字は水に対する保護等級。IPX4 は、あらゆる方向からの水の飛沫によって有害な影響があつてはならない。

蛭沼 伸行

電力プラント事業本部
断路器製造部 設計グループ 所属

縮小形 400 kV ガス絶縁計器用変圧器

■ 岩本 真一
Shinichi Iwamoto

1 経緯

受変電設備として、コンパクトで不燃性の特長を持ったガス絶縁開閉装置が広く採用されている。

近年は設備のさらなる省スペース化の要求を満たすことのできる「縮小形ガス絶縁開閉装置」の開発も盛んに行われている。

ここに紹介するガス絶縁計器用変圧器も受変電設備を構成する機器であり、縮小化のニーズに応じて開発した新製品である。



図1 製品外観

2 定格

規格	: IEC61869-1, 3
形式	: VGZ2-400XD
一次電圧	: $400,000 / \sqrt{3}$ V
二次電圧	: $110 / \sqrt{3} / 110 / \sqrt{3} / 110 / \sqrt{3}$ V
負担	: 50 / 50 / 50 VA
確度階級	: 0.2 / 3P / 3P
雷インパルス耐電圧	: 1,425 kV
定格ガス圧力	: 0.5 MPa (20°C)

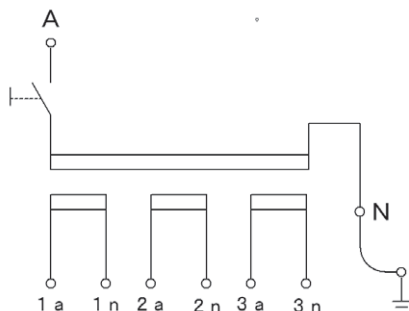


図2 結線図

3 特長

3.1 強固なコイル固定構造

衝撃等の機械力に対しコイルの変形が起こらないように、電線の固定構造に種々の工夫をこらした。したがって、悪路での運搬や地震等の衝撃にも耐える構造である。

3.2 小形軽量

部品はアルミニウムを多用し、最適な絶縁設計による絶縁距離の縮小化との相乗効果で小形、軽量化を実現している。

- ・容積は東光高岳従来品から約 1/2 の小形化
- ・質量は東光高岳従来品から約 1/2 の軽量化

3.3 断路装置付

内部に断路装置を付属しており、現地試験時に容易に主回路からの切り離しができる。

4 海外展開

本製品はインドや中東諸国向けとして販売を開始した。近年は新興国の電力設備への投資も旺盛であり、東光高岳でも全電圧クラスを対象に輸出向け製品の縮小化改良開発に注力している。

東光高岳のガス絶縁計器用変圧器は世界 34 か国に納入実績があり、販売台数は累計 10,000 台を超えている。

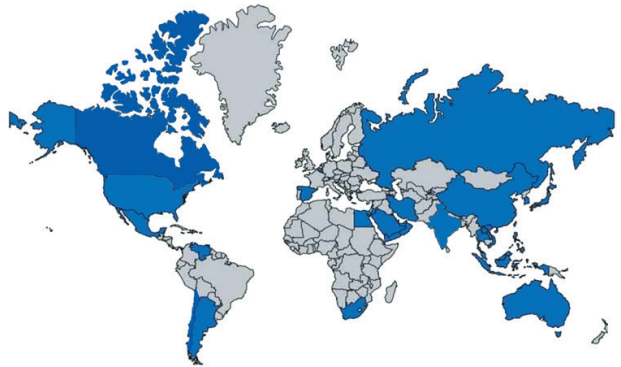


図3 納入国地図 (■ で示す)

岩本 真一

電力プラント事業本部
油・ガス変成器製造部 所属

防浸形 LED 照明器具 (高出力タイプ)

■加藤 修
Osamu Kato

1 はじめに

都市の近代化に伴い、環境整備のため電力線・通信線など設備の地中化が進められている。これら設備が設置されている洞道・共同溝は、高温多湿のきわめて過酷な環境条件であり、ときには、大雨などで冠水するおそれのある場所であるため、防浸形の照明器具が求められている。

また、近年、地球温暖化抑制のため、温室効果ガス排出量を削減することへの要求が高まってきており、照明分野では白色 LED が光源として普及してきている。

東光高岳では、上記ニーズに応えるため、LED の特長（小型、長寿命、省エネ）を活かした高出力タイプの防浸形 LED 照明器具を開発した。

2 製品概要

2.1 特長

(1) 小型・軽量化を実現

狭い空間である洞道では特に小型化が要求される。LED 照明器具では、LED 素子そのものが小さいため、器具形状の自由度は格段に上がり、円盤状のデザインとすることで、小型・軽量化を実現している。

図 1 に本製品の外観を示す。

非常灯…停電時の退避用照明器具。（蓄電池を併置しており停電時に点灯する。）

(2) 蛍光灯 40 W クラスと同等以上の明るさを実現

本製品は高出力タイプであり、従来の東光高岳製防浸



(a) 一般灯



(b) 非常灯

図 1 本製品の外観

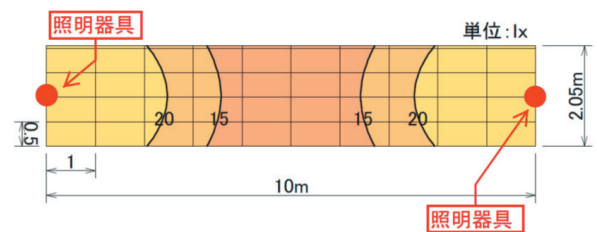
形蛍光灯器具（40 W）と比べて同等以上の明るさを実現した

また、従来の東光高岳製防浸形 LED 照明器具（20 W タイプ）に比べても 2 倍以上の明るさを実現している。

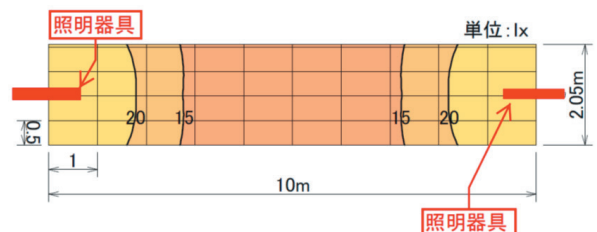
表 1 と図 2 に取付高さ 3.55 m、幅 2.05 m の洞道を模擬した床面照度シミュレーション結果を示す。

表 1 床面照度シミュレーション比較

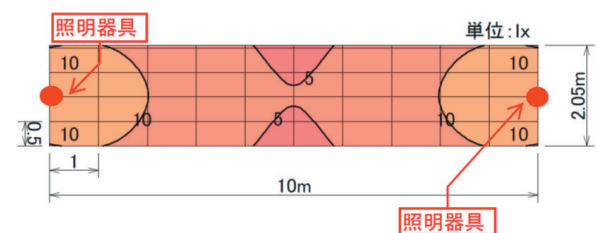
	製品名	平均照度	最小照度	最大照度
本製品	防浸形 LED 照明器具 (高出力タイプ)	19.5 lx	11.9 lx	28.7 lx
従来品(当社製)	防浸形蛍光灯器具 (40 W)	17.4 lx	10.7 lx	27.4 lx
	防浸形 LED 照明器具 (20 W タイプ)	8.28 lx	4.67 lx	12.1 lx



(a) 防浸形 LED 照明器具 (高出力タイプ)



(b) 防浸形蛍光灯器具 (40 W)



(c) 防浸形 LED 照明器具 (20 W タイプ)

図 2 床面照度分布図

(3) 防浸性能 (IP67 以上) を実現

洞道・共同溝に設置された器具は、大雨などの冠水により水没する可能性がある (特に昨今の短時間集中豪雨)。

この対応として、本製品は防水構造とし、水面下 3 m で 24 時間の水没にも耐える性能を実現している。

(4) 効率的な放熱構造により設計寿命 60,000 時間を達成

器具の寿命を長くするには、LED 素子の寿命とは別に、LED を点灯させるための電子回路の寿命も考慮しなければならない。器具の密閉性を追求すると、放熱性が悪くなって器具内に熱がこもり LED 素子および電子部品の劣化が促進され短寿命となる。

本製品は、高い防浸性能を備えつつ、内部の熱を効率よく放熱するケースの凹凸構造と放熱板の採用で、高温多湿のきわめて過酷な環境条件に設置された場合でも設計寿命 60,000 時間を達成した。

(東光高岳製防浸形 LED 照明器具 (20 W タイプ) の設計寿命 12,800 時間の約 4.7 倍の長寿命を達成)

(5) 蛍光灯に比べて消費電力が半分

LED 照明に期待される主だった特長は省電力化であり、蛍光灯器具と同じ照度ながら、消費電力は約半分となり、大幅な省エネが実現できる。

また、全体的な照明設備としてとらえた場合、負荷容量が少ないので、連続的に複数灯設置される洞道では、配線設計時のケーブルサイズを小さくすることができ、コストダウンおよび環境保全にも寄与する。

表 2 に防浸形蛍光灯器具と本製品の消費電力比較と省エネ率を示す。

表 2 防浸形照明器具の消費電力比較と省エネ率

消費電力		省エネ率
防浸形蛍光灯器具 (40 W)	防浸形 LED 照明器具 (高出力タイプ)	
41 W	21 W	49%

(6) 内部結露対策も実施

ケース材質に採用しているポリカーボネートは水蒸気透過率がゼロではない。洞道・共同溝に設置された器具は、高温状態に常時さらされ、長期間においては器具内部の湿度が上昇し、内部結露に至ることがある。

対策として、器具内部の電子部品は、樹脂コーティングなどの防湿処理を施している。

2.2 仕様・外形

(1) 仕様

表 3 に本製品の仕様を示す。

(2) 外形

図 3 に本製品の外形を示す。

表 3 仕様

項目	定格	
入力電圧	AC100 V - 200 V	
周波数	50 Hz / 60 Hz	
入力電流	一般灯	AC100 V 時 0.21 A AC200 V 時 0.12 A
	非常灯	AC100 V 時 0.22 A AC200 V 時 0.13 A
消費電力	一般灯	21 W
	非常灯	22 W
質量	一般灯	1.55 kg
	非常灯	2.55 kg
非常点灯時間	非常灯	30 分
光束		1,600 lm

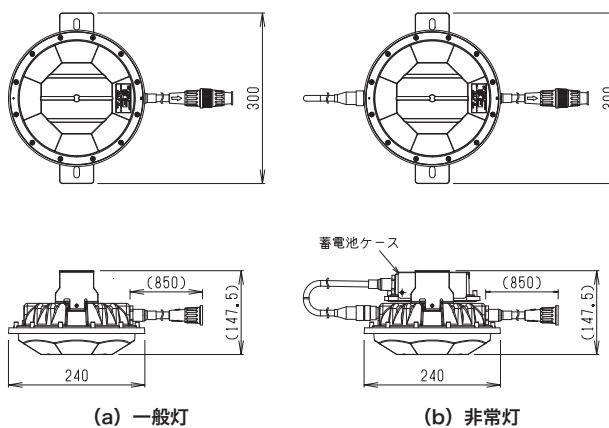


図 3 本製品の外形

3 おわりに

本製品は 2016 年度より販売を開始し、電力線・通信線などの地中化設備点検時の照明用として主に使用される。そのほかとして、トンネルや短時間集中豪雨影響緩和用の地下調整池への適用など多種多様な場所へのニーズに応えることができるものと期待している。

加藤 修
電力プラント事業本部
システム製造部 保護制御装置設計グループ 所属

ブランクス検査装置

(半導体向け 9 inch 対応 / 液晶ディスプレイ向け G10 対応)

■ 富田 剛直

Takenao Tomita

1 はじめに

ブランクスとは、電子回路を形成する原版となるフォトマスクの加工前の材料で、ガラス基板上にクロムを母材として薄膜を形成し、感光性材料（レジスト）を塗布したものである。ブランクス検査装置は、ブランクス上の微細な欠陥の検出を行う。

今回商品化した MIS - B106 は 5~9 inch の半導体向けブランクスに対応、MIS - FB106 は第 3 世代 (G3: 520 mm × 610 mm) から第 10 世代 (G10: 1700 mm × 1,800 mm) の液晶向けのブランクスに対応している。

これらの検査装置は、長年フォトマスク欠陥検査装置で培ってきた欠陥検出技術を応用して、高い欠陥検出感度と高スループットを実現した。

2 概要

両装置とも、レーザ散乱方式と落射光源方式の同時検査が可能で、高い欠陥検出能力を実現（異物を模した標準粒子では、0.5 μm 以下を検出）し、検出した欠陥の特長より欠陥種類を自動分類することが可能である。

欠陥検出結果は、高倍率のレビューカメラで観察することができ、また保存した結果・画像により遠隔レビュー可能なオフラインレビュー機能を有する。

MIS - B106 と MIS - FB106 の検査対象種類と検出可能欠陥の仕様は表 1 のとおりである。

MIS - FB106 の装置外観を図 1 に示し、特長は以下のとおりである。

①半導体としては大型の 9 inch までのブランクスに対応。



図 1 MIS - B106 装置外観

② 9 inch ブランクス 1 枚あたりの検査時間は 10 分。

③最大 10 枚の 9 inch ブランクスを格納するカセットとローダ・アンローダ機構^{注1)}を用いて連続検査が可能。

MIS - FB106 の装置外観を図 2 に示し、特長は以下のとおりである。

①業界最大級の G10 サイズの大判ブランクス対応。

② 2 基の検査ヘッドを搭載して、G10 ブランクス 1 枚の検査時間は、95 分。

③大型ブランクスをロボットハンドにより装置にセット可能。

MIS - B106 / FB106 は、膜厚計測装置によるレジスト膜の膜厚分布計測機能をオプションで用意している。



図 2 MIS - FB106 装置外観

表 1 検査共通仕様

項目	仕様
検査対象	素ガラス (石英), クロム膜付き (石英), レジスト塗付き (石英)
最小検出感度	1 μm
検査方式	レーザ散乱方式, 落射反射方式
検査動作	スキャン方式 (TDI センサ使用)
検出欠陥種類	ピンホール, 異物, ピット, キズブライト欠陥

■ 語句説明

注 1) ローダ・アンローダ機構: ロボットによりブランクスをハンドリングしてカセットー検査ステージ間を自動搬送する機構

富田 剛直

光応用検査機器事業本部
技術開発部 開発グループ 所属

水素水生成器 H₂Oasis PREMIUM

製品紹介

■ 原田 義一

Yoshikazu Harata

■ 川嶋 建史

Takeshi Kawashima

1 はじめに

東光高岳では水素による還元機能にいち早く着目し、独自の技術を採用して高濃度の水素水を連続的に供給できる家庭用の中性電解水素水生成器を実用化し、Active BIO（アクティブバイオ）、H₂Oasis（エイチ・ツー・オアシス）を商品化してきた。とりわけ、H₂Oasis はやわらかなフォルムとコストパフォーマンスから主婦層を中心に支持を得てきたが、近年の水素水ブームにともなう高濃度志向のニーズに対応すべく、H₂Oasis PREMIUM（プレミアム）としてモデルチェンジを図り、2016年4月より販売を開始した。以下、商品の概要を紹介する。

2 商品の概要

2.1 水素水生成方式

H₂Oasis PREMIUM は電気分解によって発生させた水素を大型の活性炭ブロック内に形成された無数の微細孔で流水と加圧接触させることで高濃度の水素水を生成している。陽極、陰極を同一容器に収納した隔膜レスの電解槽を採用し、10枚の電極を搭載することで従来品に比べて電解性能を向上し、水素濃度を40%向上した。併せて、電極間ギャップを25%削減し、電解槽のコンパクト化と消費電力の削減を実現した。

図1に水素水の生成特性を示す。

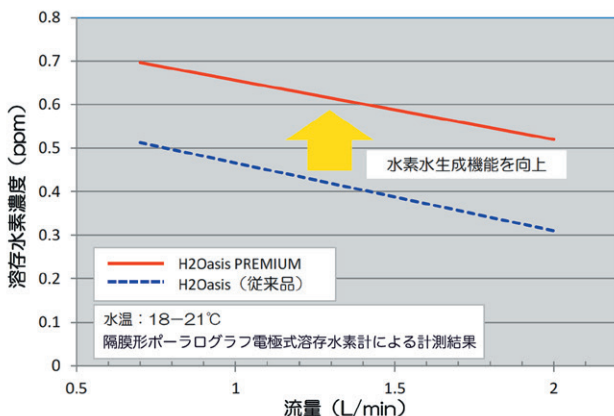


図1 水素水生成特性

2.2 浄水方式

ヤシ殻粉末活性炭、鉛除去剤、抗菌活性炭を配合し、圧縮成形した活性炭ブロックを採用している。JIS S3201に規定された12成分に加え、浄水器協会規格

(JWPAS B規格)に定める2成分（ジェオスミン、フェノール類）に対し10,000Lの浄水能力を備えた。

図2にH₂Oasis PREMIUMの外観を示す。



図2 H₂Oasis PREMIUM 外観

2.3 特長

- 高濃度水素水(最大0.7 ppm)を手軽に必要なだけ生成
- 水素濃度を照明色でお知らせ
- 高度な浄水性能を長期間持続
- エコ設計 (消費電力 約20 W, 捨て水 無)
- 電極のセルフクリーニング機能搭載でメンテフリー
- 高い質感と使い勝手のよいデザイン

2.4 仕様

表1にH₂Oasis PREMIUMの仕様を示す。

表1 仕様

項目	仕様
溶存水素濃度	最大0.7 ppm (流量で調整) 照明 緑：0.5~0.7 ppm 青：0.3~0.5 ppm
浄水能力 (計14項目)	10,000 L … 遊離残留塩素 / 総トリハロメタン / 2-MIB [*] ・ジェオスミン (カビ臭) / CAT [*] (農薬) / 溶解性鉛 他
定格流量	2 L/min 0.1 MPa 時
電源	AC100 V 50/60 Hz 約20 W (通水時)
外形寸法	W180 × D120 × H285 mm

^{*}2-MIB：2-メチルイソボルネオール、CAT：2-クロロ-4,6-ビス（エチルアミノ）-s-トリアジン

原田 義一

経営企画部 ウォーターデバイス事業グループ 所属

川嶋 建史

経営企画部 ウォーターデバイス事業グループ 所属

四国電力株式会社向け 低圧配電線用自動電圧調整器 (LVR)

1 概要

四国電力株式会社では山間部等において従来から低圧配電用自動電圧調整器を用いて電力供給を行っていたが、機器の経年劣化等により更新を予定している。一方、現在施設されている機器は生産中止となっており、これに代わる機器として新たな低圧自動電圧調整器（以下 LVR）の採用検討を 2014 年度から開始した。

これに伴い、東光高岳でも LVR の提案を行い、採用に向けて検討を行った。

提案した LVR は低圧系統に設置し、二次電圧を規定範囲の電圧に自動で調整する機器である。2002 年から東京電力パワーグリッド株式会社向けに納入を開始し、2014 年から四国電力株式会社に性能等の評価をいただき、2016 年度からは四国電力株式会社で採用が決定した。

2 特長

LVR のおもな特長は以下のとおりである。

- (1) 低圧配電線末端の需要家への供給電圧が供給規定範囲を逸脱してしまう場合、従来では高圧配電線を延長し、柱上変圧器の設置を行い供給しなければならないが、LVR を使用することで、建設費の安い低圧配電線の延長で対応が可能である。
- (2) 乾式変圧器の採用により、オイルレス化としており、火災によるリスクを低減するとともに軽量化を実現した。
- (3) 四国電力株式会社の環境、設備に対応するように、変圧器タンクは四国電力株式会社専用のハンガ座を設けるとともに、溶融亜鉛めっきを施し、耐食性能の向上を図っている。

表 1 LVR の定格・仕様

項目	仕様
回路方式	単相 3 線
定格容量	30 kVA
定格周波数	60 Hz
基準出力電圧	210 V (順潮流時)
総質量	105 kg



図 1 LVR 外観

EV ゴーカー用急速充電器 ～株式会社モビリティランド～

株式会社モビリティランドでは、環境に配慮した次世代のEV ゴーカーを開発した。F1 日本グランプリを開催する鈴鹿サーキットを舞台に、子どもから大人までだれもが気軽にかつ本物志向で楽しめるアトラクション「サーキットチャレンジャー」を開催している。

EV ゴーカーを充電するために東光高岳の急速充電器が採用された。急速充電器を採用することによって、短時間での充電が可能となり、より多くの来場者にEV ゴーカーを楽しんでいただける。

今年のゴールデンウィーク期間中には、急速充電器6台がサーキットコース上に設置され、EV ゴーカー70台のフル稼働をサポートした。



鈴鹿サーキットメインスタンド



急速充電器



充電中のEV ゴーカー



コース上に設置された急速充電器

早稲田大学 EMS 新宿実証センター向け 配電系統シミュレータ用電圧調整装置

1 概要

学校法人早稲田大学スマート社会技術融合研究機構（以下、ACROSS）は、国立研究開発法人科学技術振興機構が総括する戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）に参画しており、再生可能エネルギーとデマンドレスポンスの普及を目指した次世代の分散協調型 EMS（Energy Management System）に関する研究を進めている。

ACROSS は、大学構内に設立した EMS 新宿実証センター内に配電系統シミュレータ（以下、ANSWER：Active Network System with Energy Resources）を構築している（図 1）。ANSWER は、公称電圧 6.6 kV で運用される電力会社の配電線を 400 V の電圧で模擬し、等価な電気回路を構成することで、室内に数 km 規模の配電系統を再現できるアナログ形の電力系統シミュレータである。また、実際の配電線に接続するセンサ内蔵開閉器や太陽光発電、蓄電池、住宅用負荷などと同等の機能を有する装置を備えており、これらを活用することにより、実際の電気現象にしたがって高精度かつリアルな配電線の模擬が可能である。

東光高岳は、ANSWER 内で運用可能な配電用電圧調整器の模擬装置を、2015 年 11 月に納入した。現在、ACROSS で研究を進めている配電系統の電圧安定化やエネルギーコストの最小化に向けた制御ロジックの評価を行うため、実証試験などで本装置を使用いただいている。

2 装置の仕様

納入した電圧調整装置は、配電用変電所の負荷時タップ切換変圧器（LRT）の電圧制御方式を模擬した LRT タイプと、配電線のステップ式電圧調整器（SVR）の制御方式を模擬した SVR タイプの 2 種類である（図 2）。表 1 に電圧調整装置の仕様概要を示す。

両装置ともに、電圧制御機器と演算部で構成している。電圧制御機器は、400 V の配電線に接続し、演算部からの昇降圧指令を受けて変圧器のタップ切り換えを行い、機器負荷側の配電線の電圧を調整する。演算部は、ANSWER の制御環境上で動作するよう、電圧調整継電器などの制御モデルをソフトウェア（MATLAB®/Simulink®）で作成している。電圧制御機器のセンサから取得した電圧・電流情報をもとに、実効値や位相差な

どの演算を行い、各制御モデルのパラメータ調整に応じて電圧制御機器に昇降圧指令を出力する。また、外部指令により電圧制御機器のタップ制御を行う集中制御方式にも対応している。



図 1 ANSWER の外観（早稲田大学ホームページより）



図 2 電圧制御機器の外観

表 1 電圧調整装置の仕様概要

項目	仕様	
電圧制御機器	定格容量	40 kVA
	変圧器結線	三相 3 線式，単巻 Y 結線
	定格電圧	400 V
	タップ点数	一次側 17 点，二次側 3 点
演算部	継電器モデル	電圧調整 (90)，逆潮流 (67)，電圧降下補償 (LDC)，基準電圧自動調整 (プロコン)，過電流 (51)，過電圧 (59)，不足電圧 (27) 等
	制御方式	自端制御および集中制御

第46回国際電子回路産業展 〈JPCA Show 2016〉 出展

1 期間・会場

開催期間 2016年6月1日～6月3日(3日間)
会場 東京ビッグサイト 東展示場
東光高岳ブース 5A-28

2 概要

あらゆる電子・情報通信機器に使用される電子回路・電子実装技術ならびに材料・製造機械・装置およびプロセス材料、試験・検査に関する技術と情報の交流を目的に開催される国際的な展示会であり、今年が46回目の開催であった。

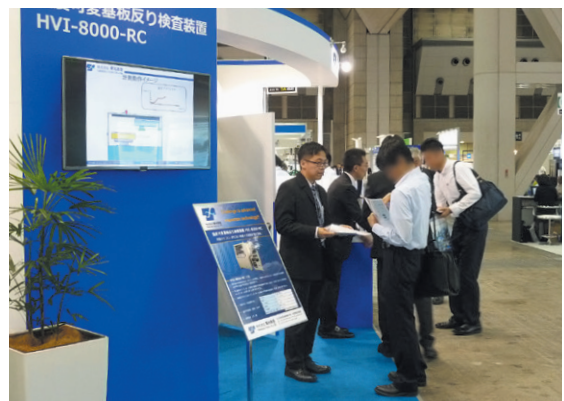
2016年は、760社の出展があり、主催者発表では3日間で40,428名が来場した。

東光高岳ブースでは、三次元検査装置 TVI-7020RA の実機展示および説明資料による温度可変基板反り検査装置 HVI-8000-RC のプレゼンテーションを行い、東光高岳ブースにも多数のお客さまにお越しいただき、20社以上の新規引合い・お問い合わせをいただいた。

新しい市場の開拓と新規受注獲得を目指してフォロー活動を実施している。



東光高岳ブース



来訪者対応



展示品 (TVI-7020RA)



展示品 (HVI-8000-RC)

大型変圧器 2 台を貨車輸送

1 概要

2015年5月、大型変圧器を2台連結して貨車輸送した。最終目的地の変電所は新潟県にあるが、輸送コスト面から千葉県市原市の港まで貨車で運び、その後は新潟の港まで海上輸送である。工場から小山駅までは東光高岳が保有する貨物専用線がつながっており、日本貨物鉄道株式会社との授受線までの約2kmを途中の踏切操作なども行い、東光高岳で輸送した。

2両連結した貨車輸送は約15年ぶりであり、変圧器を積載する貨車も特殊なもので「シキ車」と呼ばれており、今回使われた落とし込み式のシキ車は全国に2台しかない。1台は三重県から回送してきた。

写真は東光高岳の貨物専用線を走行している風景であるが2両連結の貨物をけん引する機関車も重量の関係で2両使用している。最後尾には日本貨物鉄道株式会社の社員が添乗する緩急車と呼ばれる車両も連結されており、全長は100メートルを越す。

鉄道での変圧器輸送は臨時貨物扱いとなるため、1年以上前からの鉄道輸送路調査とダイヤ調整が必要となる。基本的に臨時ダイヤは一般には公開されていないが、どこから聞きつけてきたのか、工場からの搬出当日は平日にもかかわらず、多くの鉄道ファンが集まった。



シキ 800C 型式貨車 工場出発



東光高岳貨物専用線での輸送風景
シキ 800C + シキ 801B2C + 機関車 + 機関車



日本貨物鉄道株式会社へ引き渡し

タンザニア連合共和国ダルエスサラーム 送配電網強化計画

1 概要

2014年12月9日に「タンザニア連合共和国ダルエスサラーム送配電網強化計画」に関し、タンザニア電力公社と、変電所の新設・増設、機器整備、送電線増強、配電線新設に関する契約を締結した。

タカオカエンジニアリングのタンザニアにおけるプロジェクトは1986年に始まり、これまでに5件もの実績があり、東光高岳製の機器も多く納入されている。

2 案件の背景

タンザニアの電力需要の伸びは経済成長を上回る勢いで増加している。しかしながら、電力施設は老朽化し、増加する需要に対応するために慢性的な過負荷状態が続き、また保守管理が不十分なために停電が頻発するなど、社会経済の大きな障害になっている。こうした背景のもと、ダルエスサラーム市における安定的な電力供給

とそのためインフラ整備を実現するため、我が国の無償資金協力による整備の要請を受けた。

3 工事概要

(1) 工事の内容

- ① ILALA 変電所 (132/33/11 kV) の全面改修
- ② 132 kV 送電線路 (約 7.5 km) の増容量
- ③ Msasani 変電所 (33/11 kV), 33 kV 配電線路 (約 7.6 km) の増設
- ④ Muhimbili 変電所 (33/11 kV), 33 kV 配電線路 (約 2.0 km) の新設
- ⑤ Jangwani Beach 変電所 (33/11 kV), 33 kV 配電線路 (約 6.5 km) の新設
- ⑥ Mwananyamala 変電所 (33/11 kV), 33 kV 配電線路 (約 1.1 km) の新設

(2) 工期

2014年12月～2017年6月



ダルエス港から ILALA 変電所前に到着した 60 MVA 変圧器

蓮田地区モールド生産ラインの再構築

1 はじめに

東光高岳では、エポキシモールド変成器の生産を手掛けて40年以上の歴史をもち、時代のニーズに対応して高性能、高品質の製品をお客さまに提供してきた。

2 背景

蓮田地区にあるモールド生産ラインは、生産開始からさまざまな注型装置や検査装置などの設備の導入に伴い生産ラインの構築を行ってきたが、建屋の耐震性、アスベストの問題や設備の老朽化に伴い、2015年度から工場建屋を移転し、新たな生産ラインの構築を進めている。

3 生産ラインのコンセプト

新しいモールド生産ラインのコンセプトは次のとおりである。

●コンパクトライン

→生産性向上を目的とし、→部材搬入～注型～組立～検査～梱包までを品種別にワンストップで効率よくかつ、コンパクトに配置したラインであり、拡張性や負荷変動にも柔軟に対応可能

●作業環境改善

→注型炉や硬化炉などの熱源工程とそのほかの工程の作業室を分けし、室内温度上昇を抑える
→工場照度を上げる

●立会い者通路の確保

→立会い者の案内経路にも配慮した工場通路の確保

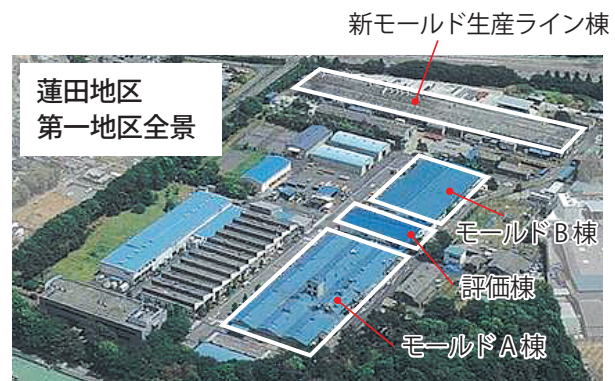
●FEMS (Factory Energy Management system) 導入

→エネルギーの見える化、省エネ化を指向したFEMSを導入予定

4 生産ラインの構築状況

現状のモールドA棟、B棟ならびに出荷検査を行っている評価棟からなるラインおよび設備は、2017年9月には新モールド生産ライン棟への集約による再構築が完了する予定である。なお、製品の生産には影響しないよう、設備の更新、移設は段階的に実施する。

すでに一部のラインは先行して稼働しており、PMT(地上設置用変圧器)の部品生産などを開始している。



モールド工場建屋



新型注型装置

タカオカ化成工業の第2工場

1 第2工場の竣工

TPM活動を推進するタカオカ化成工業では、生産ラインの効率化をめざしてTPSの考え方を取り入れた工場整備を進めているが、この度、超高圧用機器（例えばGIS）に用いられるモールド部品の生産ラインを中心とした第2工場を2015年9月28日に竣工させた。竣工式では、製品をお使いいただいている海外のお客さまにもご参加いただき、新しい生産ラインをご見学いただいた。

タカオカ化成工業の主力製品であるモールド変圧器の生産ラインは、すでに2014年5月12日に第1工場として竣工しており、第2工場の建設によって、当初に計画した工場整備は完了した。

2 工場整備の概要

工場建設時のコンセプトは、一方向へ流す（後戻りをさせない）ラインをめざし、既存設備を最大限活用して流れを清流化させた。

第1工場には、モールド変圧器、配電用モールド部品、電源装置、セラミックの各事業の生産ラインを整備した。

第2工場には、超高圧モールド部品、FRP部品、環境の各事業を整備した。

3 今後の進め方

タカオカ化成工業の基本方針「3年以内の新商品、新しいお客さまによる売上高比率を30%以上を継続する」に基づき、新製品開発を進めている中で、第3工場の建設も視野に入ってきた。お客さまのご期待に応えるべく、今後も精進を重ね「お客さまに感動していただける職場」を構築していく。



第2工場竣工式の記念写真