

変電所設備のデジタル化に貢献する 三相一括形 GIS 用電子式 VT・CT の開発

■ 山口 達史
Tatsushi Yamaguchi

■ 藤野 守也
Moriya Fujino

■ 小川 晃一
Koichi Ogawa

■ 佐藤 祥輝
Yoshiki Sato

■ 宮崎 未知果
Michika Miyazaki

■ 布施 宏樹
Hiroki Fuse

■ 足立 純一
Junichi Adachi

近年、変電所設備の老朽化や高経年化が進み、施設運用時の保守メンテナンスに多大なコストを要するという課題がある。このため、デジタル技術によって設備構成の最適化を図り、LAN や光ファイバ化を指向したデジタル変電所が注目されている。東光高岳では、デジタル変電所向け製品の研究・開発を進めており、その一部である電子式 VT・CT は、MU と組み合わせて IEC 61850-9-2LE に準拠したデジタル出力を行う次世代の計器用変成器である。現在、実用化を目指して東光高岳製 168 kV 三相一括形 GIS に接続可能なプロトタイプ開発に取り組んでいる。本稿では、開発中のプロトタイプについて、仕様検討、設計・試作および試験・性能評価の概要を紹介する。

1 はじめに

近年、変電所設備の老朽化や高経年化が進み、施設運用時の保守メンテナンスに多大なコストを要するという課題がある。このため、デジタル技術によって設備構成の最適化を図り、LAN や光ファイバ化を指向したデジタル変電所が注目されている。デジタル変電所は、工事期間の短縮やコスト削減などさまざまな課題が解決可能であること、またスマートグリッドにおける国際標準規格（IEC 61850）の適用により、設備のマルチベンダ化と信頼性向上および監視制御の高度化が可能であること等の特長を有する。

東光高岳では、デジタル変電所向け製品の研究・開発を進めており、その一部である電子式 VT・CT（Voltage Transformer・Current Transformer）は、MU（Merging Unit）^{注1)} と組み合わせて IEC 61850-9-2LE に準拠したデジタル出力を行う次世代の計器用変成器である。構造的には、鉄心と巻線による従来形の VT・CT に替えて、VT 素子に容量分圧器、CT 素子にログウスキーコイル、信号伝送に光ファイバケーブルを適用することで、機器の大幅な小型・軽量化と設置面積の省スペース化が可能となる。現在、実用化を目指して東光高岳製 168 kV 三相一括形 GIS（Gas Insulated Switchgear）に接続可能なプロトタイプ開発に取り組んでいる。

本稿では、開発中のプロトタイプについて、仕様検討、設計・試作および試験・性能評価の概要を紹介する。

2 電子式 VT・CT の適用イメージ

図 1 に東光高岳製 168 kV 三相一括形 GIS（以下、東光高岳製 GIS）への電子式 VT・CT 適用イメージを示

す。従来形は VT ユニットと CT ユニットが独立して GIS に接続されている。一方、電子式は VT ユニットと CT ユニットが一体化され、かつ鉄心を用いないことから容積および質量が従来形の約 1/3 となる。その結果、GIS の小型・軽量化および省スペース化に貢献する。

- （従来形）
・VTユニット
・CTユニットが独立
- （電子式）
・VTユニット
・CTユニットを一体化

電子式 VT・CT の場合

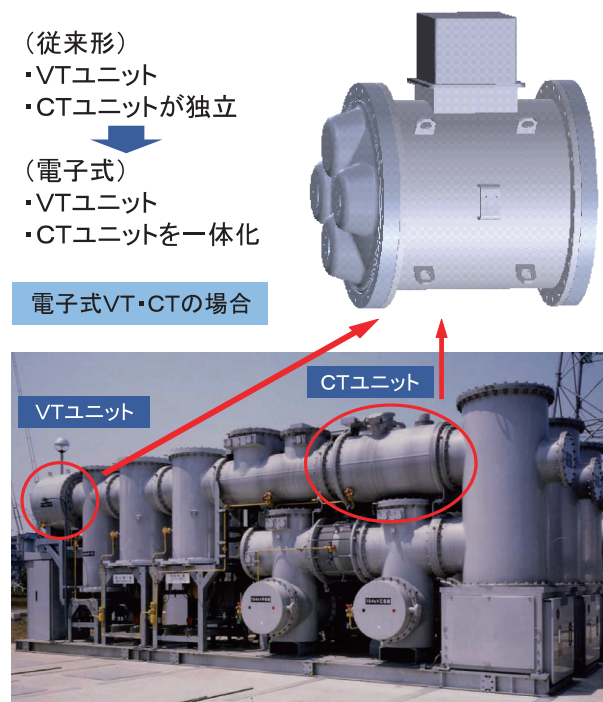


図 1 東光高岳製 GIS への電子式 VT・CT 適用イメージ

3 プロトタイプの仕様検討

プロトタイプの基本仕様を表 1 に示す。仕様検討においては、海外の主な重電機器メーカー製 LPIT（Low-Power Instrument Transformers）^{注2)} の標準的な仕様を踏襲するとともに、東光高岳製 GIS の仕様も合わせ

表 1 プロトタイプの基本仕様

項 目	仕 様	
	電子式 VT	電子式 CT
準拠規格	IEC 60044-7: 1999 ↓ IEC 61869-7	IEC 60044-8: 2002 ↓ IEC 61869-8
検出方式	容量分圧器	ロゴウスキーコイル
絶縁方式	SF ₆ ガス絶縁	
定格ガス圧力	0.4 MPa	
相数	三相	
最高電圧	161,000 V	
雷インパルス耐電圧	± 750 kV (全波)	
短時間商用周波耐電圧	325 kV, 50/60 Hz, 1 min	
定格一次電圧	154,000/ $\sqrt{3}$ V	—
定格一次電流	—	1,000 A
定格短時間電流	31.5 kA 2 sec	
定格周波数	50/60 Hz (切り替え式)	
確度階級	IEC 0.2/3P	IEC 0.2S/5TPE
使用温度範囲	-40~+40℃	
外形寸法	φ 824 × 850 mm	
質量	約 380 kg	
電源電圧	DC 110 V ± 20%	

で考慮した。

(1) 準拠規格

準拠規格は、現行規格である IEC 60044-7 : 1999⁽¹⁾ (VT), IEC 60044-8 : 2002⁽²⁾ (CT) としているが、2023 年度中に新規格として IEC 61869-7 (VT), IEC 61869-8 (CT) がリリースされる予定である。このため、上記リリース後は本規格を準拠規格とする。

(2) 検出方式

検出方式は、VT に容量分圧器、CT にロゴウスキーコイルを適用し、鉄心を用いないものとした。

(3) 絶縁方式および定格ガス圧力

絶縁方式は、東光高岳製 GIS と同様に SF₆ ガス絶縁とし、定格ガス圧力は、使用温度範囲の下限值 (-40℃) で SF₆ ガスが液化しないように 0.4 MPa とした。

(4) 定格一次電圧および定格一次電流

定格一次電圧は、東光高岳製 GIS の定格電圧：168 kV に対する計器用変圧器の定格一次電圧が

154 kV であること、また接地形であることからそれらの仕様に合わせて 154,000/ $\sqrt{3}$ V とし、定格一次電流は 1,000 A とした。

(5) 定格短時間電流

定格短時間電流は、東光高岳製 GIS の仕様に合わせて 31.5 kA, 2 sec とした。

(6) 確度階級および使用温度範囲

海外の主な重電機器メーカー製 LPIT の標準的な仕様から確度階級および使用温度範囲の下限値を設定した。なお、使用温度範囲の上限値は準拠規格の上限値 (40℃) に合わせた。

4 プロトタイプの設計・試作

4.1 外観

図 2 にプロトタイプの外観を示す。ガスタンクの両側に三相絶縁スパーサ、上部に SC (Secondary Converter) 基板箱を取り付けている。タンクの直径は東光高岳製 GIS の標準管路直径と同サイズであり、三相絶縁スパーサも GIS に接続可能なものとなっている。通常、GIS の絶縁スパーサは各ユニットに片側取り付けとしているが、今回はプロトタイプ単体で試験を行うため両側取り付けとしている。



図 2 プロトタイプの外観 (キャスター付き)

4.2 装置構成

図 3 にプロトタイプの装置構成図を示す。タンク本体に三相分の一次導体、容量分圧器およびロゴウスキーコイルを内蔵し、SC 基板箱は入力保護回路、電源基板および三相分の SC 基板 (信号処理基板) を内蔵している。電気配線は、密封端子を介してタンク本体から引き出し SC 基板に接続する。SC 基板の電源は、外部の MU から DC 110 V で供給され、入力保護回路および電源基板を介して各 SC 基板に供給する。また、SC 基板の出力は光ファイバにて MU に信号伝送する。

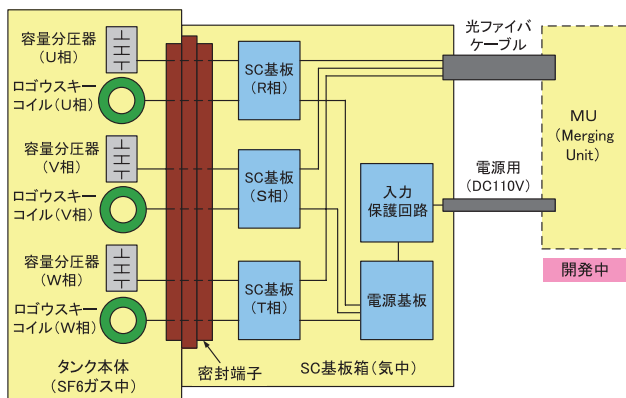


図3 プロトタイプの装置構成図

4.3 SC 基板の動作概要

図4にSC基板の回路ブロック図（1相分）を示す。動作内容は以下のとおりである。容量分圧器は一次電圧を100V以下の低電圧に分圧し、ログウスキーコイルは一次電流を電圧信号（一次電流の微分波形）に変換して、ともにSC基板に入力する。なお、容量分圧器の入力部は、固体コンデンサと抵抗分圧器が備わる。SC基板に入力した容量分圧器およびログウスキーコイルからの信号は、入力保護部を経由してアナログ信号処理部で増幅・フィルタリング後、A/D変換を行いデジタル信号処理部に入力する。デジタル信号処理部では、計測した電圧および電流（積分処理を実施）に見合ったデジタル値に演算処理後、温度補償を行う。ここで、演算処理にはFPGA（Field Programmable Gate Array）を用いて、高速なリアルタイム演算を行っている。また、MUから光通信I/F部に入力される同期パルス（1PPS）に同期して演算処理を行い、外部のMUにSV（Sampled Value）データ^{注3）}を光信号で出力する。なお、MUは開発中であるため、現行品はSC基板に実装したクロックにより同期パルスを生成し演算処理を行っている。また、SC基板は今後の製品化を見据え、アナログ信号処理部～デジタル信号処理部の故障等を常時監視するための自己診断機能部を搭載している。

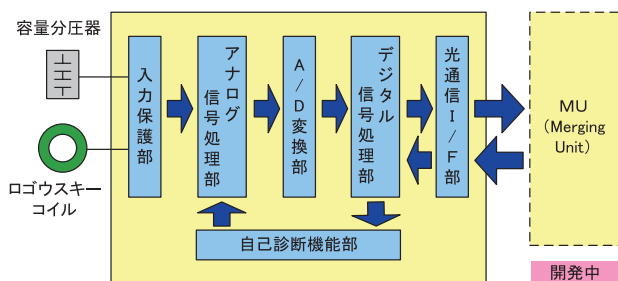


図4 SC基板の回路ブロック図（1相分）

5 プロトタイプの試験と性能評価

5.1 絶縁試験

表2に実施したすべての試験項目とその結果を示す。

また、図5に絶縁試験の試験状況を示す。プロトタイプは三相一括形であるため、絶縁試験では一次導体の1相に電圧を印加し、その他の相の一次導体および二次側をすべて接地して試験を行った。試験項目は、絶縁抵抗

表2 プロトタイプの試験結果

試験項目	試験結果	判定基準	結果
絶縁抵抗測定	DC 1,000 V メガーにて 2,000 MΩ以上	DC 1,000 V メガーにて 1,000 MΩ以上	良
雷インパルス 耐電圧試験	± 750 kV, 15 回閃絡なし	試験電圧に 耐えること	良
短時間商用周波 耐電圧試験	AC 325 kV, 50 Hz, 1 min 閃絡なし	試験電圧に 耐えること	良
部分放電試験 (国内向け) JEC 1201- 2007 準拠	1.1 Um/√3 : 外部雑音 5 pC 以下	外部雑音などの 影響を除き部分 放電のないこと	良
部分放電試験 (海外向け)	1.2 Um : 外部雑音 5 pC 以下	10 pC 以下	良
	1.0 Um : 同上	10 pC 以下	
	1.2 Um/√3 : 同上	5 pC 以下	
VT 基本誤差 試験 (計測)	0.8~1.2 Vn : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.2% 以下	良
CT 基本誤差 試験 (計測)	0.01 In : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.75% 以下	良
	0.05 In : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.35% 以下	
	0.2~1.2 In : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.2% 以下	
VT 温度特性 試験 (計測)	-40~+60℃ : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.2% 以下	良
CT 温度特性 試験 (計測)	-40~+60℃ : ± 0.1% 以下	比誤差 : ± 0.2% 以下	良

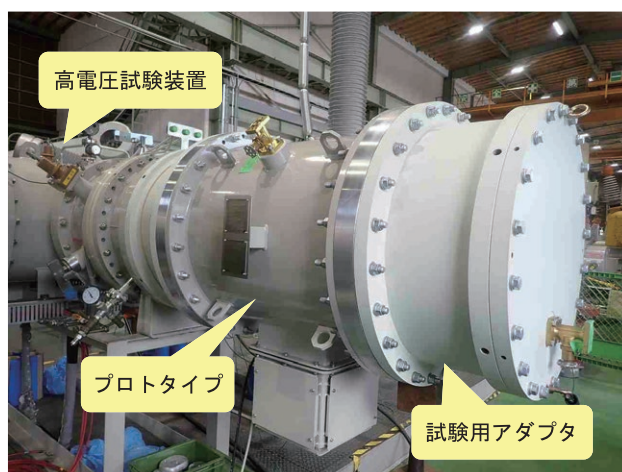


図5 絶縁試験状況

測定、雷インパルス耐電圧試験、短時間商用周波耐電圧試験および部分放電試験とし、IEC 60044-7:1999 および IEC 60044-8:2002 に準拠して試験を行った。部分放電試験では国内向けも考慮し、JEC 1201:2007 準拠の試験も合わせて行った。その結果、各相においてすべての判定基準を満足することができ、良好な絶縁特性が得られた。

5.2 基本誤差試験

基本誤差試験は、三相それぞれについて VT・CT の計測用、保護用の試験を行った。図 6 に試験構成を示す。現在は MU を開発中であるため、SC 基板の FPGA に JTAG 用デバッグを接続して USB 経由でパソコンにデータを取り込み、VT の計測電圧および CT の計測電流を算出した。次に試験電圧および試験電流の計測方法については、標準用 VT の二次電圧および標準用 CT の二次電流をデジタルマルチメータで計測した。なお、標準用 CT の二次電流は、直列接続した標準抵抗の端子電圧により計測した。以上の計測データから VT・CT の比誤差を算出した。

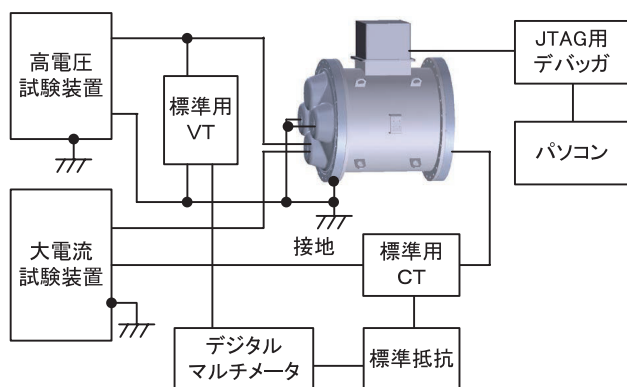


図 6 基本誤差試験構成図

図 7 に V 相の VT 基本誤差試験結果例（計測用）を示す。定格一次電圧 (V_n) の 80～120% の試験ポイントにおいて比誤差は $\pm 0.05\%$ 以下であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

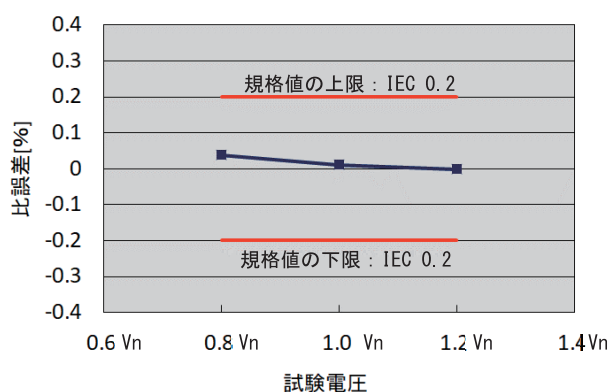


図 7 V 相の VT 基本誤差試験結果例（計測用）

図 8 に V 相の CT 基本誤差試験結果例（計測用）を示す。定格一次電流 (I_n) の 1～120% の試験ポイントにおいて比誤差は $\pm 0.1\%$ 以下であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

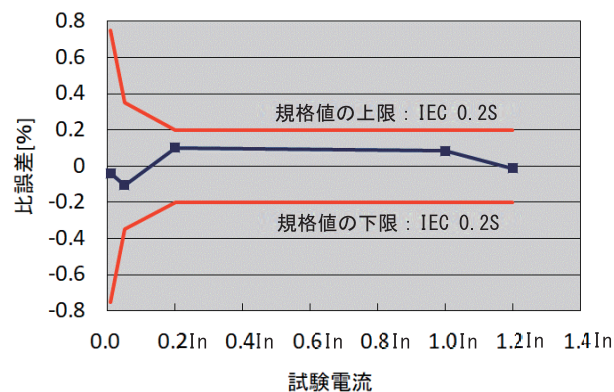


図 8 V 相の CT 基本誤差試験結果例（計測用）

5.3 温度特性試験

図 9 に VT の温度特性試験状況を示す。VT の温度特性試験は、大型恒温槽を用いてプロトタイプの周囲温度を変化させ、装置内部まで温度が安定してから行った。ここで、東光高岳では温度特性試験時に高電圧を印加する設備がないため、定格一次電圧の 1/200 の電圧を印加して試験を行った。CT の温度特性試験においても、温度特性試験時に大電流を通電する設備がないため、CT ユニット単体で試験を行うこととし、一次側に巻線を巻いて定格一次電流相当の電流を通電し試験を行った。温度範囲は、使用温度範囲の上限値 ($+40^{\circ}\text{C}$) に日射による温度上昇を考慮して、 $-40\sim+60^{\circ}\text{C}$ とした。なお、VT, CT の各温度における比誤差は、基本誤差試験と同様の方法で算出した。



図 9 VT 温度特性試験状況

図 10 に V 相の VT 温度特性試験結果例（計測用）を示す。試験結果は、温度補償を有、無の 2 通りで示している。 $-40\sim+60^{\circ}\text{C}$ の周囲温度における比誤差が温度補償無で $\pm 0.2\%$ 以下、温度補償有で $\pm 0.05\%$ 以下

下であり、温度補償を行うことにより確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

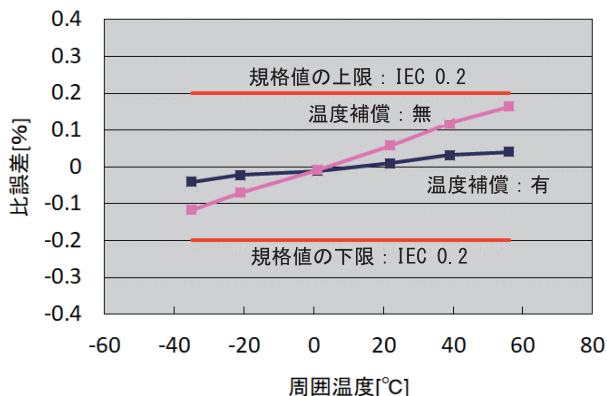


図 10 V 相の VT 温度特性試験結果例（計測用）

図 11 に CT ユニット単体の温度特性試験結果例（計測用）を示す。試験結果は、温度補償を有、無の 2 通りで示している。-40～+60℃の周囲温度における比誤差が温度補償無で±0.35%以下、温度補償有で±0.05%以下であり、温度補償を行うことにより確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

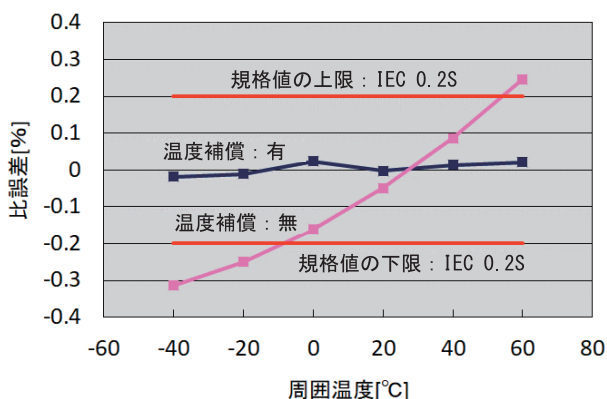


図 11 CT ユニット単体の温度特性試験結果例（計測用）

6 おわりに

変電所設備のデジタル化に貢献する電子式 VT・CT は、機器の大幅な小型・軽量化と設置面積の省スペース化が図れ、MU と組み合わせてデジタル変電所へ適用可能な次世代の計器用変成器である。現在は実用化を目指し、東光高岳製 GIS に接続可能なプロトタイプの試験を行っている。現時点では、絶縁試験、基本誤差試験および温度特性試験等の基本検証を行い、準拠規格を十分満足して良好な特性が得られている。引き続き、VT 他

相電界の影響試験、CT 他相磁界の影響試験や各種環境試験および絶縁に関する裕度確認試験等を行い、機器の実用性および妥当性の検証を行っていく。その後は、開発中の MU と組み合わせて位相角の評価と IEC 規格に準拠した形式試験を行い、早期の実用化を目指して推進していく。

■参考文献

- (1) IEC 60044-7:1999, Instrument transformers-Part 7: Electronic voltage transformers
- (2) IEC 60044-8:2002, Instrument transformers-Part 8: Electronic current transformers

■語句説明

- 注 1) MU (Merging Unit)：変電所内で計測した電圧・電流をデジタルデータに変換して IED (Intelligent Electronic Device) に出力する装置。ただし、電子式 VT・CT の出力はすでにデジタルデータである。また IED は、変電所内外で発生する各種故障を検出し、遮断器ヘトリップ指令を出力する保護演算装置。
- 注 2) LPIT (Low-Power Instrument Transformers)：低電力計器用変成器であり、光 VT・CT や容量分圧器、ログウスキーコイルなどの新しい計器用変成器。
- 注 3) SV (Sampled Value) データ：デジタル化された電圧・電流の瞬時値データ。

山口 達史

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

藤野 守也

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

小川 晃一

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

佐藤 祥輝

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

宮崎 未知果

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

布施 宏樹

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

足立 純一

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属