

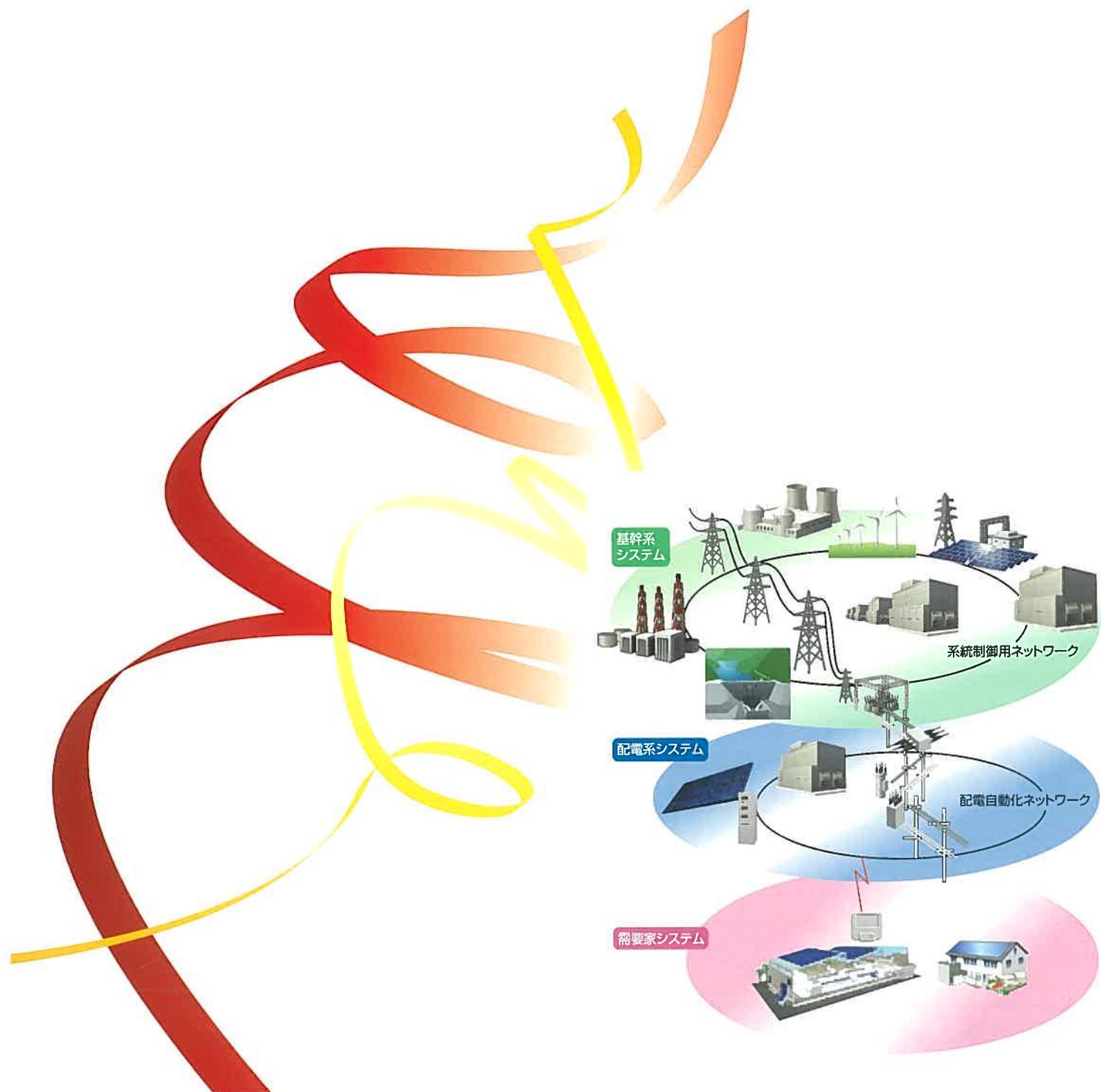


家庭から宇宙まで、エコエンジン

# 三菱電機技報

11 | 2015  
Vol.89 No.11

## 電力流通システムの最新技術



## 目 次

### 特集「電力流通システムの最新技術」

電力流通システムのハーモニー	1
村上 寛	
電力流通システムを支える技術	2
山所通博	
次世代電力系統制御システム向けプラットフォーム技術	8
脇井尚人・塚原 研・鶴 薫・郡 光則	
再生可能エネルギー導入を支える蓄電池制御技術	13
古塙正展・小島康弘	
最近の自端判定型系統安定化システム	17
小和田靖之・西野 宏・佐々木孝志・坂口広二・押田秀治	
レイヤ2ネットワークを適用した送電線保護リレーシステム	21
片山善博・松尾康弘・鍋野恭宏・小比賀勢一	
過渡安定度向上を目的としたSVG	25
正城健次・山中大輔・貞廣光紀・西村和敏	
関西電力株大山開閉所向けSVG用変圧器の完成	29
中嶋陽一・西田 剛・東 武志・貞廣光紀・西村和敏	
油入変圧器の保守軽減技術の動向	33
中嶋陽一・小林研二・中島正貴	
保守性・更新対応性を向上させたGIS	37
中内慎一郎・塚尾康宏・貞廣光紀	
保守性・更新対応性を向上させたGCB	41
芳友雄治・谷垣秀一・森 智仁・吉田大輔	
GCBへの開閉極位相制御の適用	46
森 智仁・山本 紗・吉田大輔	
GISへのセンサ技術適用—部分放電診断の最新技術—	51
田村佳之・藤井茂雄・西田智恵子	

### Power System Advanced Technology

Harmony of Advanced and Basic Technologies in the Power System	
Hiroshi Murakami	

Technological Advancement Supporting Power System Transition	
Michihiro Tadokoro	

### Next Generation EMS/SCADA Platform

Naoto Sugai, Ken Tsukahara, Kaoru Tsuru, Mitsunori Kori	
---	--

Battery Control Technologies for Renewable Energy Resources to Grid Connection	
Masanobu Koshio, Yasuhiro Kojima	

### Recent Wide Area Special Protection Scheme without Telecommunication

Yasuyuki Kowada, Hiroshi Nishino, Takashi Sasaki, Koji Sakaguchi, Hideharu Oshima	
---	--

### Line Protection Relay System Using a L2 Ethernet Network

Yoshihiro Katayama, Yasuhiro Matsuo, Yasuhiro Nabeno, Seiichi Kohiga	
--	--

### SVG for Transient Stability Improvement

Kenji Masaki, Daisuke Yamanaka, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura	
--	--

Completion of Transformer for SVG(STATCOM) in Inuyama Switching Station of Kansai Electric Power Company, Inc.	
Yoichi Nakashima, Tsuyoshi Nishida, Takeshi Higashi, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura	

### Trends of Maintenance Mitigation Techniques for Oil-immersed Transformer

Yoichi Nakashima, Kenji Kobayashi, Masaki Nakajima	
--	--

### Gas Insulated Switchgear Improving Maintainability and Renewability

Shinichiro Nakuchi, Yasuhiro Tsukao, Hitoshi Sadakuni	
---	--

### Gas Circuit Breaker Improving Maintainability and Renewability

Yuji Yoshitomo, Shuichi Tanigaki, Tomohito Mori, Daisuke Yoshida	
--	--

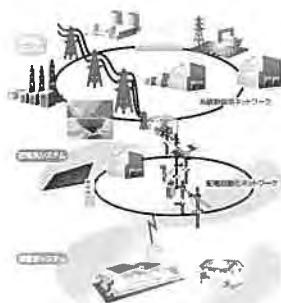
### Application of Controlled Switching System to Gas Circuit Breaker

Tomohito Mori, Aya Yamamoto, Daisuke Yoshida	
--	--

Sensor Technologies Application to GIS—Advanced Technologies for Partial Discharge Diagnostics—	
Yoshiyuki Tamura, Shigeo Fujii, Chieko Nishida	

## 特許と新案

「変圧器」「直流遮断器」	55
「電圧監視制御装置及び電圧監視制御方法」	56



### 表紙：電力流通システムの最新技術

電力流通システムは社会インフラとして、大規模なシステムを形成している。しかし、電力自由化によって、電源構成が変化し、安定供給の観点から、広域系統運用の拡大が必要とされている。

さらに、再生可能エネルギーの接続によって電力流通システムの構成要素・運用の形態が変化し、多層化すると考えられる。これに対応して、パワーエレクトロシステムなどの導入によって、電力流通システムの安定化が検討されている。

今後は、スマートグリッドシステムを構築して、情報技術を駆使し、電気使用量の正確な把握及び電気制御の高度化による効率的な運用が期待できる。

## 巻/頭/言

## 電力流通システムのハーモニー

Harmony of Advanced and Basic Technologies in the Power System

村上 寛  
Hiroshi Murakami

現代社会で欠かすことができない電気。便利で社会のあらゆるところで使われています。しかし電気は貯めることができず、発電した瞬間に消費されます。自転車の電灯が良い例ですが、現実の社会では発電と消費の場所は離れているのが普通です。このため電気を運ぶ送変電設備を中心とする電力流通システムが構築され、周波数や電圧を規定範囲内に保つことで電力の安定供給が実現されています。また、電力需要はリアルタイムに計測することが困難なため、需要を予測して適切に供給力を調整することが大前提ですが、最近では電力自由化による電気供給制度の変更や地球温暖化対策など様々な予測条件が変化し増加しています。これからは電力流通システムを構成するシステムや機器と需要家機器の高いレベルでのハーモニーを実現しながら電力の安定供給が維持されるのがスマートな電気社会と言えます。

## (1) 電力自由化への対応

欧米には先行事例が多々ありますが、日本でも2016年4月の小売全面自由化を目指し、電気供給制度が大きく変更されます。新たに設置された広域機関と電力会社(一般電気事業者)の送配電部門との連携など電力流通システム自体も変わり、さらには2020年に予定される発送電分離の競争環境下では安定供給の維持が社会全体の責任になります。

## (2) 再生可能エネルギー導入への対応

地球温暖化対策として太陽光や風力など自然エネルギーの導入が先進諸国はもちろん、BRICS等でも積極的に進められていますが、気象条件によって発電出力が大きく変動することが特徴です。電力システムに大量に接続されると発電と消費のアンバランスによる周波数変動や局所的な電圧変動が発生し、大規模な供給障害に至る可能性もあります。電力流通システムには発電設備側の出力変動に対処する機能が必須です。

## (3) 高経年機器の計画的更新への対応

先進国では経済成長期に導入した各種変電設備が高経年化しています。大量の設備を使用年数に従って一律に更新するのではなく、機器の劣化状態等を把握してシステムの信頼度を維持しつつ計画的な更新を行うことが求められます。

このような社会的要請に対し、三菱電機ではこれまで培ってきた技術と研究開発を通して、電力流通システムの維持強化に貢献していきたいと考えます。

## (1) 電力自由化関連技術

電力自由化に伴う様々な電力取引の進展に対応し、需要予測・需給計画・電力市場管理等のソフトウェアパッケージを進化させ、最適な電力の需給管理業務を実現します。

## (2) 送電安定化技術

パワーエレクトロニクス技術を活用したSVC/STATCOM (Static Var Compensator/STATic synchronous COMPensator: 無効電力補償装置)を国内外に納入し、送電安定化・過電圧抑制に効果を発揮しています。配電系への再生可能エネルギー導入による電圧変動に対してもこの技術は有効です。また、最近増えている蓄電システムは無効電力制御による電圧制御も行えるため周波数・電圧両方の品質維持に貢献できると考えています。一方、海外では長距離送電や洋上風力の送電に高圧直流送電の適用が拡大しています。日本でも広域での融通力を拡大するために直流送電又は周波数変換設備の増強が計画されるなど、直流送電方式と交流送電方式との一層の協調が進むため、これに対応する最適な製品化開発を加速させます。

## (3) モニタリング／アセットマネジメント技術

高経年機器の状態に応じて適切な時期に更新するためには機器の状態をモニタリングするためのセンサとアルゴリズムが重要です。当社は、機器製造に加えて微小なガス漏れを検出できるセンサなど各種センサを保有しており機器の状態監視を含めた総合設備管理システムの構築を進めます。

## (4) スマートグリッド技術

2011年から当社3か所で太陽光発電・各種蓄電システム・模擬発電機・6.6kV配電線・SVC・スマートメータ等を含む実証実験設備を構築し、制度変更や再生可能エネルギー大量導入時のシステム運用及び配電線電圧変動対策の実証検証等を行っています。これらの成果を基に製品化に向けた開発を進めています。

従来の変電機器に加え、これらの技術を駆使してエネルギーの効率運用・システム安定運用に貢献していきます。

## 巻頭論文



## 電力流通システムを支える技術

Technological Advancement Supporting Power System Transition

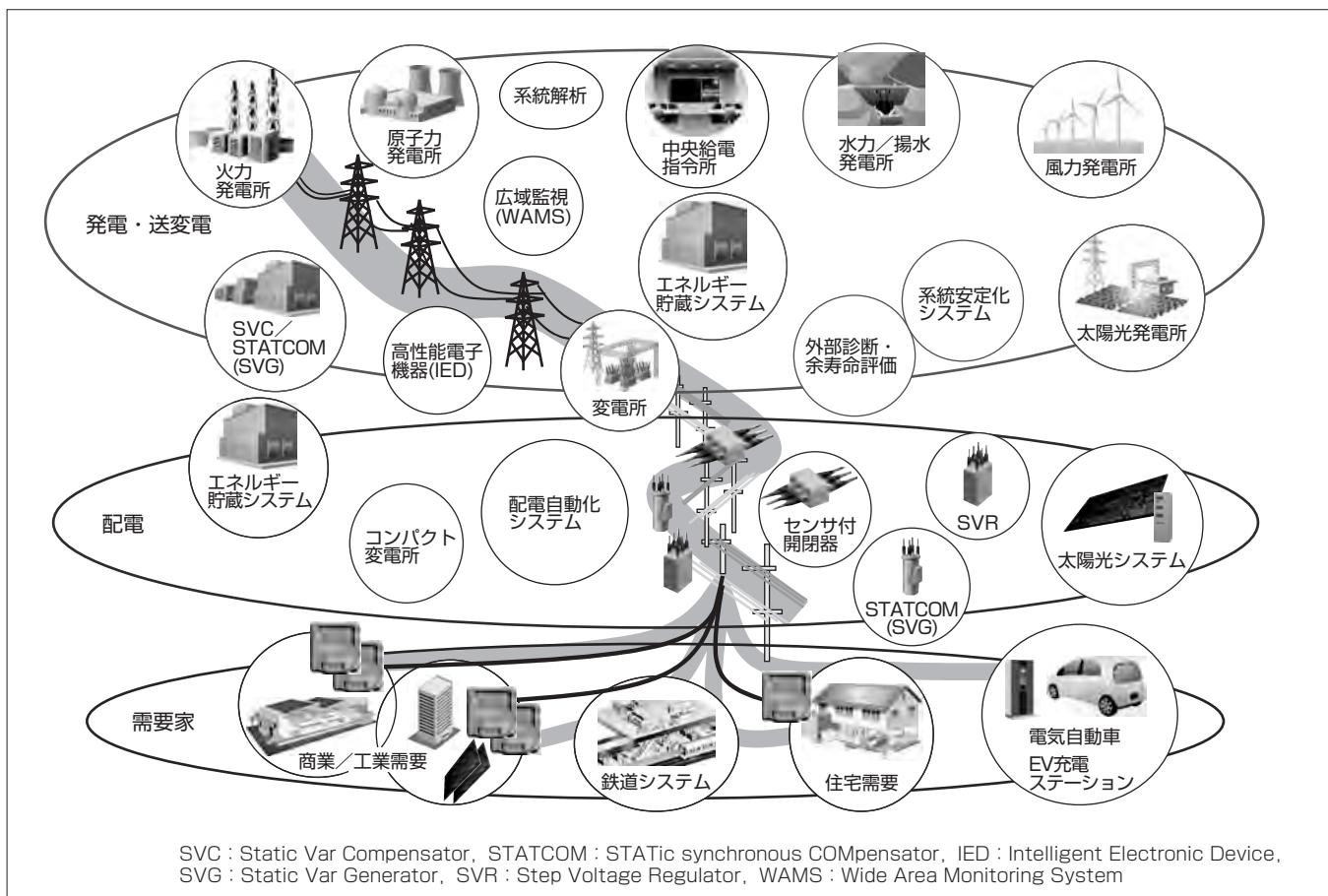
Michihiro Tadokoro

## 要 旨

電力流通システムは、電気を供給する社会インフラとして、大規模なシステムを形成している<sup>(1)</sup>。発電所で発生した電気は、変電所の変圧器で275kV, 500kVなどの高い電圧に変換され、送電網を経由して送電する過程で各変電所で徐々に電圧を下げて、家庭や工場に届けられている。電力流通システム内では電気の発生と消費が同時刻に行われるため、システム全体で電力消費量に合わせて発電を行う需給制御を行っている。しかし、電力自由化の動きによって、電気を供給する新しい電気事業者の参入が想定されること、安定供給の確保の観点から広域系統運用の拡大が必要とされること、また、太陽光を始めとする大量の再生可能エネルギーの接続が見込まれることから、電力流通シス

テムの構成要素・運用の形態が変化して多層化すると考えられる。

今後は、図に示すように、スマートグリッドシステムを構築し、情報技術を駆使して、電気使用量の正確な把握及び電気使用制御の高度化による効率的な運用が期待できる<sup>(2)</sup>。電力流通システム内の変電所には開閉装置・変圧器などの変電機器と保護リレーシステムなどの装置を備え、電力需要の伸びに対応して高電圧・大容量化へ対応するとともに、高信頼性、高経年機器更新を考慮した機種開発を進めてきた。また、電力流通システムの安定化のためのパワーエレクトロニクス機器を導入してきた。今後は電力需給を調整する蓄電システムの導入が考えられる。



## 電力流通システム

電力流通システムでの、発電所から需要家までの電気の流れと関連する設備を、階層的に表現している。送電・配電機器に加えて、システムの状態を監視して広域のネットワーク網を介して情報を収集し、システムの品質維持・安定運用を行っている。電力自由化の動き及び地球温暖化対策の観点から新しい技術が流通システムに導入され、情報技術の重要性が一層高まっている。

## 1. まえがき

電力流通システムは、表1に示すように電力需要の伸びに対応して、機器の高電圧・大容量化を行ってきた。また、システムの規模拡大に伴い、事故時の電力供給支障を軽減するため広域情報をリアルタイムに収集して電源と負荷のバランスを高速制御する事故波及防止リレーが導入された。最近の電力流通システムへの再生可能エネルギー大量接続、発送電分離に伴う電力流通システム運用形態の変化によって、より緻密な運用が求められ、スマートメータの情報などを活用するスマートグリッドシステムの意義は大きい。

本稿では、従来の発電設備から需要家へ大量の電気を送る送配電システムから、各種の電源・電気事業者の間で電力を取引して需要家に電力を供給する電力流通システムへの変遷と、電力流通を支える送変電機器・システムの動向について述べる。

## 2. 電力流通システムを取り巻く環境の変遷

### 2.1 電力流通システム構成の変化

時代の変化に対応して、電力系統の設備構成・運用が変わってきた。図1のように、発送電分離の実施及び再

生可能エネルギーの大量導入によって、システムの運用が複雑になり、新しい技術が必要になる。

スマートグリッドには、電力システムに接続される電力設備、負荷設備、運用にかかる情報通信機器全てが関わっている。三菱電機は、尼崎地区に太陽光発電設備、蓄電システム、模擬発電機など発電系・配電系・需要家を含む6.6kVのスマートグリッド実証設備を設置し、機器の性能検証・各システムの協調制御検証を行っている。

### 2.2 電力流通システムの運用の変化

電力流通システムの役割は、周波数及び電圧変動が少ない良質な電気を発電機から負荷まで円滑に供給することである。このため、電力系統の監視・制御・操作・運用計画・記録などの基本機能に加えて、自由化関連システム連係・配電自動化システム連係などの機能で電力システムの変化に対応した階層的な給電運用体制を構築し系統の運用を行っている。電力会社の最上位の統合管制施設である中央給電指令所では、電力会社の発電機の出力を発電機の制御特性に応じて制御して、周波数を一定に調整している。需要の変動は過去のデータを基に予測され、中長期変動・短周期変動に分けられ、特性を考慮して発電機に出力指令を与える。予測と実需要のずれは周波数の変動に現れるた

表1. 送変電システムの変遷

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
	高度成長期	安定成長期			低成長期	
開閉機器 遮断器 GIS	高電圧・ 大容量化	550kVフルGIS		1,000kV実証器		
			高信頼化・保守省力化 機器センサ		機器センサ	開閉極位相制御
変圧器	高電圧化 大容量化	550kV器	分解輸送器CGPA	1,000kV実証器	三相器1,510MVA	
			77kVガス絶縁Tr		275kVガス絶縁Tr	
電力系統保護	アナログ静止形リレー 位相比較リレー 分散型 事故波及防止リレー			デジタルリレー FM/PCM電流差動リレー		
電力系統運用		集中型		機能分散型	広域分散型	
送電安定化			STATCOM(SVG) 実フィールド検証	STATCOM(SVG) 紀伊水道HVDC		

Tr: 変圧器, GIS: Gas Insulated Switchgear, CGPA: Coil Group Packed Assembly, HVDC: High Voltage Direct Current, FM/PCM: Frequency Modulation/Pulse Code Modulation

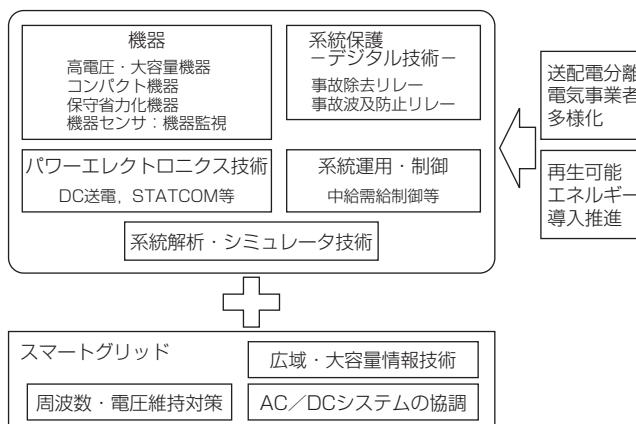


図1. 電力流通システムの構成の変化

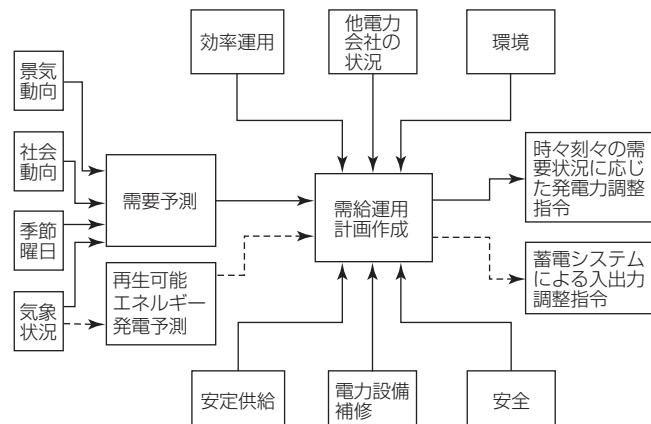


図2. 需給運用

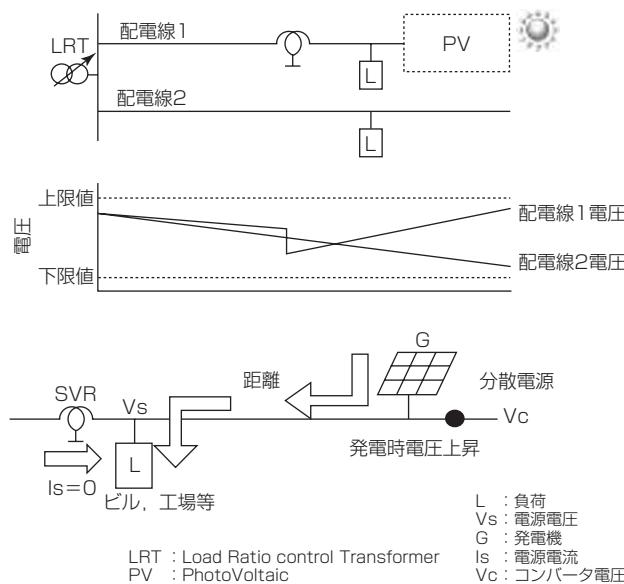


図3. 分散電源導入による電圧変動

め、応答の良い発電機で調整される。しかし、太陽光発電、風力発電は出力が変動して制御できないことから、大量に電力システムに接続されると他の発電装置での需給調整が難しくなる。再生可能エネルギーを前提とした需給制御を考慮する場合、発電機の起動停止問題の最適化に加え、図2の破線矢印で示すように、再生可能エネルギー発電予測技術及びエネルギー貯蔵技術(蓄電池制御技術)の活用が必要と考えている。

### 2.3 配電系統への影響

再生可能エネルギーによる発電は、数kW～数MWと従来の発電設備に比べて容量が小さいため、配電系統に分散して接続される。従来、配電系統は末端に電源がなく、配電変電所から需要家(負荷)に向けて一方向に電気を供給する前提で系統を構成し、運用されてきた。しかし、配電線の途中に発電設備が大量に接続される場合、図3のように、末端から配電用変電所に向けて電気が流れる逆潮流が発生し、末端での電圧上昇の懸念などの今までと異なる課題が生じる。この電圧変動に対応した新しい制御が求められる。

### 2.4 系統保護リレーの技術動向

#### 2.4.1 系統保護リレーの役割

系統保護リレーは、事故を速やかに除去して電力の安定供給を目指すもので、事故除去リレーと事故波及防止リレーに大別される。前者は、落雷等に起因する事故の区間(送電線、変圧器、母線等の設備)を系統から遮断し、公衆安全の確保や設備損傷の防止を図る。後者は、所定の発電機や負荷の遮断などを行い、事故の影響が波及して系統異常現象(脱調、周波数・電圧逸脱、過負荷等)に至るのを未然に防止するもので、系統安定化システムともいわれる。共に、供給支障の軽減を目的とする。

デジタル技術の進歩によって、コンピュータや通信伝送系の性能が格段に向上し、系統保護リレーのデジタル化を

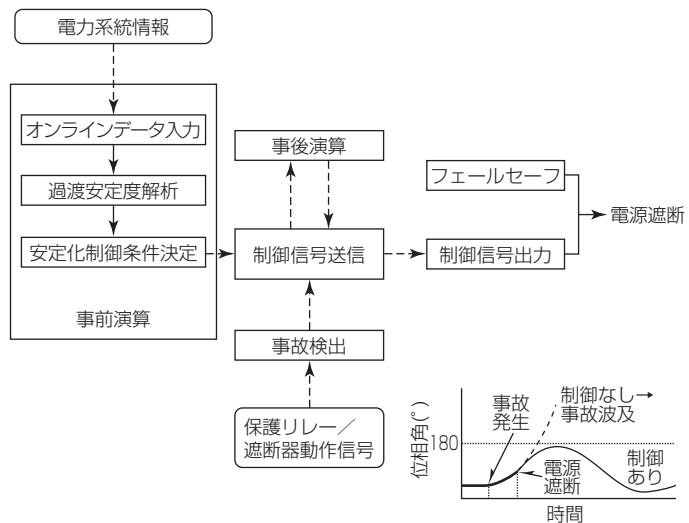


図4. 事故波及防止リレーの構成例

急速に進展させた。

当社は、初期の16ビット形からデジタルリレー市場に参入し、2000年代に入ってからは小型化、運用保守性・信頼性・拡張性・適応性の向上、及び環境負荷低減など時代の新たな要求に応えた32ビット“MELPRO-CHARGEシリーズ”を投入した。最近では、ユニット交換による部分更新を可能として、保守性を大幅に向上し、従来機種と比べてヒューマンマシンインターフェース(HMI)も向上させている。

今後は、分散型電源の事故時応動を考慮できる系統解析手法の確立及び効率的なシステム構築を可能とする新たな通信方式の開発などを推進し、これからの中間保護リレーに求められるニーズに応えていく。

#### 2.4.2 事故波及防止リレー

系統規模の拡大や電源の大容量化・遠隔化等で系統現象が複雑化し、これに応じて事故波及防止リレーは単体の分散型から通信を活用する中央集中型へとシステム化されてきた。最近では、演算論理の高度化によって、装置間通信を行わない自端判定型システムでも広域系統の安定度維持が可能になりつつある。当社は、当初からこの市場に参入し、大幅な系統構成の変更、新規大容量電源・長距離送電線の新設等による保護範囲の拡大に応じて、複数の大規模系統安定化システムを製作・納入している。図4は事前演算型に事後演算機能を付加したシステム構成である。

### 3. パワーエレクトロニクス適用技術

#### 3.1 系統安定化技術

電力系統では、大容量長距離送電の送電安定化や、老朽化電源の廃止に起因する電圧不安定への対策などが求められている。パワーエレクトロニクスを活用したFACTS(Flexible AC Transmission System)機器であるSVC/STATCOM(SVG)は、無効電力を制御することで、これらの課題の解決策として導入が加速されている。表2にSVC/

表2. SVC/STATCOMの適用目的と現象イメージ

適用目的	擾乱(じょうらん)イメージ	現象イメージ
定態安定度		
過電圧抑制		
過渡安定度		
電圧安定度		

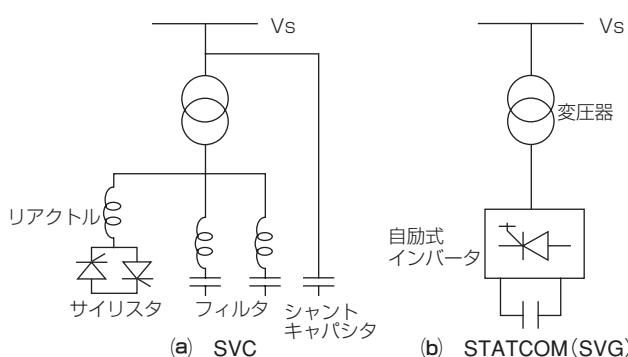


図5. SVC/STATCOMの回路構成例

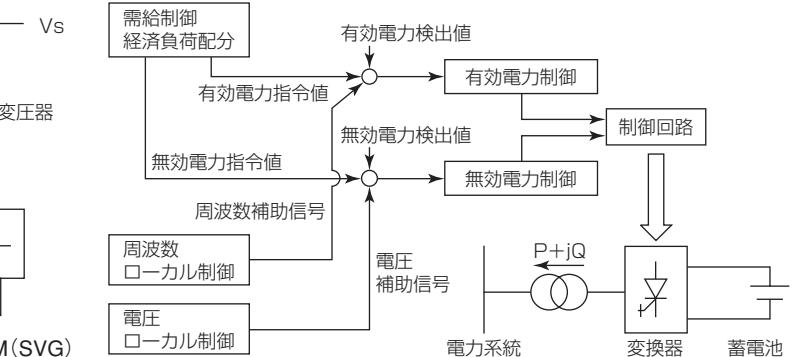


図6. 蓄電システムの制御構成

STATCOMの適用目的と対応する現象のイメージを示す。

SVC/STATCOMは、半導体スイッチング素子を用いることで連続的かつ高速な無効電力制御が可能である。図5にSVC/STATCOMの回路構成例を示す。

STATCOMは、自励(じれい)式インバータの直流コンデンサによって直流電圧を一定に維持しながら、自励式インバータから発生させる交流電圧を上下させることで進相・遅相無効電力を制御する。当社は、1990年に定態安定度向上を目的とした80MVA STATCOMを納入し、2012年には定態安定度向上及び過電圧抑制を目的とした世界最大級容量の450MVA STATCOMを納入した。さらに、2013年には定態安定度向上と過渡安定度向上を行う130MVA STATCOMを納入した。このシステムでは、系統電圧変化に応じた無効電力制御機能に加え、発電機からの潮流変動を検出して系統電圧を上げ下げして電力動搖のダンピングを向上させるPSS(Power System Stabilizer)機能を付加している。

### 3.2 電力変換技術

日本は50Hzと60Hz地域に分かれているため、FC(Fre-

quency Converter)によって異なる周波数間の電力融通を行ってきた。東日本大震災後、連系量を増やして広域融通量を拡大する計画がある。また、海外では大規模な再生可能エネルギー導入に伴い大容量・長距離DC送電の実績が増加している。さらに、先に述べたように、配電線に再生可能エネルギーが接続され、逆潮流によって配電線末端の電圧上昇が懸念される状況で、配電線の出力変動対策と電圧変動対策が必要になる。このため、図6に示すように蓄電システムで有効電力(P)・無効電力(Q)両方を制御する対策が考えられている。

### 3.3 系統解析技術

電力系統解析技術は、電力流通システムの性能評価に欠かせない技術である。図7に示すように、①動作特性を記述したモデル、②モデルを組み込んでシミュレーションを行う解析プログラム、③製品検証・実証試験用にリアルタイム模擬を行うシミュレータがある。

初期のシミュレータは、回転機・変圧器・送電線など実機器をそのまま小型化した模擬送電線が用いられたが、ス

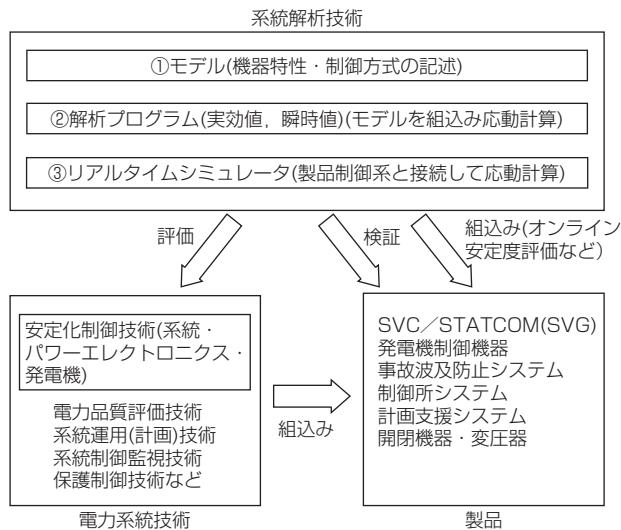


図7. 系統解析技術



図8. 550kV 2点切ばね操作GCB

ベース・保守性・安全性・柔軟性を考慮して1980年代からはデジタル技術を組み合わせたハイブリッド型、さらにはフルデジタル型シミュレータが開発・適用された。自励式パワーエレクトロニクス機器にはハイブリッド型、それ以外の機器にはフルデジタル型を用いて製品を検証している。先に述べた当社のスマートグリッド実証設備では、基幹系の動きをリアルタイムでシミュレーションして実証配電系統にフィードバックすることで配電系と基幹系の相互作用を模擬し、系統全体としての評価を行っている。実証配電系へのシミュレータの接続点には、1MW-6.6kVのBTB(Back to Back)装置を設置して機能を実現している。今後、変換器・分散電源・通信・制御系などの新型機器のモデル開発とともに、各種解析プログラムとシミュレータのシームレスな統合化が進むと考えられる。

#### 4. 変電機器の技術動向

##### 4.1 変電機器の変遷

###### 4.1.1 開閉装置の変遷

当社は、ガス遮断器(Gas Circuit Breaker: GCB)の開発・実用化を背景に、GIS(Gas Insulated Switchgear)の研究に着手し、1973年には主母線が気中の550kVハイブリッド形GIS(H-GIS)を、1976年にはフルGISを実用化した。1990年代には、油圧操作1点切GCB及び550kV GISを開発した。この技術を発展させ、1,000kV機器の開発を行った。2010年にはメンテナンスフリー化、経年機器更新のレトロフィットを指向した550kV 2点切ばね操作GCBを開発した(図8)。

また、雷サージを抑制する避雷器の高耐圧化・高耐量化は開閉機器のコンパクト化に貢献している。

###### 4.1.2 変圧器の変遷

当社は、外鉄形・内鉄形の2種類の変圧器を持ち、高電圧・大容量器や特に堅牢(けんろう)性・コンパクト性を要



図9. 1,510MVA変圧器

求される場合に外鉄形を、標準的中小容量器には内鉄形を適用するなど、ニーズに合わせて適材適所で対応してきた。1970年代から国内外に500kV器を納入し、1980年代には765kV器を輸出、1990年代には1,000kV実証器を納入するなど常に高電圧化の先陣をきるとともに、2002年には三相器として大容量の1,510MVA器を製作・納入した(図9)。

一方で、高電圧・超高压の都心導入に対応して、1980年代には77kV系を、1990年代には275kV系の防災型のガス絶縁変圧器を開発・納入した。高電圧・大容量化機器は輸送制限条件が厳しく、特別三相変圧器や分解輸送変圧器(CGPA)を製品化した。1992年には500kV CGPA変圧器の納入を開始している。

###### 4.2 変電機器の最新技術

開閉機器では、大容量短絡電流への対応が求められる北米等の市場向けに245kV/80kA GISを製品化しており、引き続き大容量化の対応とメンテナンスフリー化、ライフサイクルコスト低減、高経年機器レトロフィット対応の開発に注力している。さらに、機器開閉時に発生する電圧サ

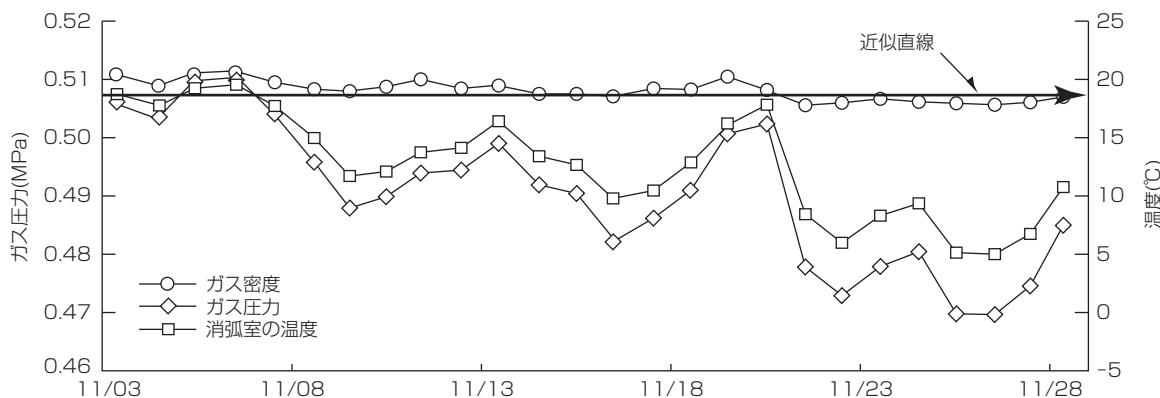


図10. 高経年GCBのガススローリーク計測例

ージ又は電流変化を抑制する目的で遮断器の開閉極位相制御技術を実用化し、シャントキャパシタ投入時のサージ抑制、リアクトル開閉及び変圧器投入時のインラッシュ抑制に効果を上げている。

変圧器では、外鉄形変圧器が本来持っている耐震性に加え、ブッシングの油-ガススペーサ化等の付属部品の簡素化によってトータルとしての高耐震化を図るとともに、低騒音、低損失にも配慮した環境適合形変圧器を目指している。

また、変電所のデジタル信号伝送のネットワーク化に対応して、小型・軽量の計器用変流器(Electronic Current Transformer: ECT)、計器用変圧器(Electronic Voltage Transformer: EVT)を開発し、フィールド試験で順調に稼働している。

#### 4.3 変電機器グローバル生産体制の整備

海外市場の機種競争力強化を目的に、現地生産による地産地消を推進してきた。北米の当社生産拠点であるMEPPI(Mitsubishi Electric Power Products Inc.)社では、1986年から開閉器の製品出荷を開始した。変圧器では、米国の更新需要の活発化を背景に、MEPPI社の傘下に2013年竣工(しゅんこう)の変圧器工場を新設(米国テネシー州メンフィス)し、変圧器事業のグローバル生産体制を強化している。

#### 4.4 アセットマネジメントへの取組み

高度成長期に設置された設備が高経年化してきたことから、機器の延命化・更新計画の平準化が課題となり、アセットマネジメントの重要性が認識されている。当社は、1990年代から機器の状態に対応した保守を行うCBM(Condition Based Maintenance)を支援する高感度のGIS用センサを提供している。変圧器でも、オンライン油中ガス分析装置などの早期異常診断装置を製品化している。図10に、ガス圧力センサの計測例を示す。約1か月間のデータから年間1%程度に相当するガス密度の変化を検出し、微小ガス漏れを確認した。

#### 5. む す び

環境負荷低減、地域間連系・国家間連系強化、電力自由化への対応、異種エネルギーとの統合など電力流通システムに関わる状況が大きく変化し、電力システムが転換期を迎えていているといわれている。海外では、大規模長距離送電に直流送電が適用され、近年では洋上風力関連での直流送電計画が増えてきている。日本でも、広域融通拡大のため異周波地域の連系容量拡大の動きがある。また、システムを安定に運用するため各種のパワーエレクトロニクスシステムが検討されている。これらの技術及び広域大容量通信技術と従来の電力系統運用技術等が融合し、新しい電力流通システムに発展するものと考える。今後も国内外の市場ニーズを見極め、市場が求める製品を世に送出し、多様化する電力システム・社会インフラの発展に寄与していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 田所通博：送配電システムの変遷と今後の展望、三菱電機技報, 88, No. 9, 532~536 (2014)
- (2) 鈴木良平：スマートコミュニティの取組み、三菱電機技報, 88, No. 9, 606~611 (2014)

# 次世代電力系統制御システム向け プラットフォーム技術

菅井尚人\* 郡 光則\*\*  
塚原 研\*  
鶴 薫\*\*

Next Generation EMS/SCADA Platform

Naoto Sugai, Ken Tsukahara, Kaoru Tsuru, Mitsunori Kori

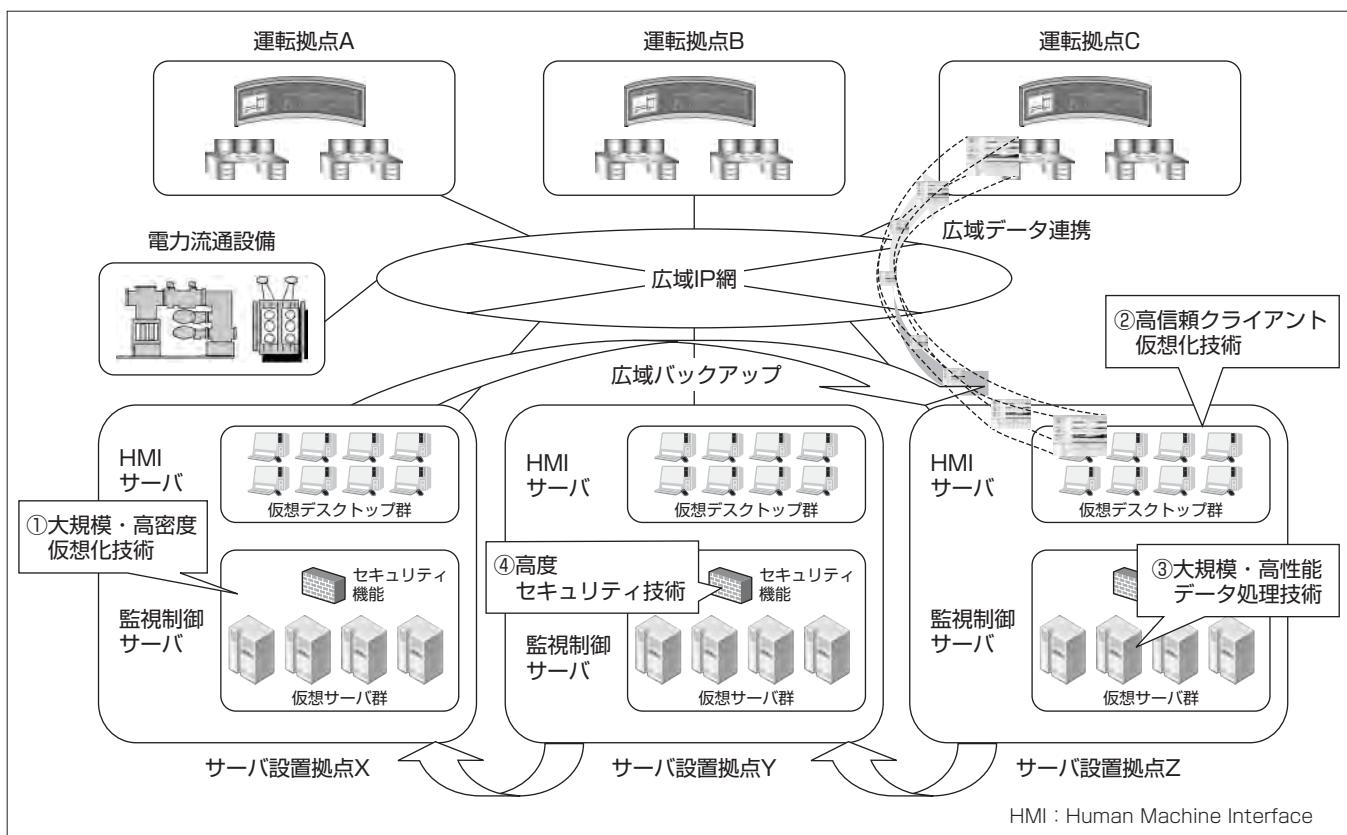
## 要 旨

電力系統制御システム (Energy Management System / Supervisory Control And Data Acquisition : EMS / SCADA) は、電力系統の状態を常時監視し、電力流通設備を合理的かつ効率的に運用して良質な電気を安定的に供給する系統運用を支えるIT (Information Technology) システムである。需給バランスの指令などを行う中央給電指令所、高圧の送電網や変電所などの監視制御を行う基幹給電制御所、地域の送電網や変電所などを監視制御する給電所・制御所などのシステムで構成されている。最近では、これらのシステムは、電力システム制度改革に向けた機能高度化や運用体制変化への対応、更なる保守性向上などが求められている。

三菱電機は、サーバ設置拠点と運転拠点を分離して広域

IP (Internet Protocol) 網で接続する広域分散型システムを開発し、各電力会社に納入してきた。この広域分散型システムの実現に当たっては、様々な制約を持つ広域IP網のインフラに柔軟に対応できる各種広域データ連携技術を適用し、拠点被災時にも他の拠点でシステムの運転継続を可能とする等、電力会社のシステムの特性に応じたバックアップ形態への対応による信頼性向上を図った。また、計算機仮想化技術の適用によってライフサイクルコストの低減を実現した。

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの開発では、この広域分散型システムに適用した技術を更に発展させ、監視制御対象拡大や機能高度化ニーズへの対応、保守性の更なる向上、高信頼性の確保に取り組んだ。



## 次世代電力系統制御システム向けプラットフォーム

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの開発では、広域分散型システムを更に発展させ、監視制御対象の拡大や機能高度化、保守性の向上と信頼性確保の課題に取り組んだ。これらの課題を①大規模・高密度仮想化技術、②高信頼クライアント仮想化技術、③大規模・高性能データ処理技術、④高度セキュリティ技術によって解決し、電力会社のニーズに応えることのできるプラットフォームを構築した。

## 1. まえがき

ITシステムを支える計算機やネットワークなどのシステムインフラ技術の進歩は著しく、これらの最新技術を電力系統制御システムに活用することによって、信頼性向上やコスト低減のニーズに対応することが期待される。当社では、電力系統監視制御という高い信頼性と応答性能が要求される分野で、最新のシステムインフラ技術を適用した開発を行い、順次市場に投入している。

本稿では、次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの大規模・高密度仮想化技術、高信頼クライアント仮想化技術、大規模・高性能データ処理技術と、高度セキュリティ技術について述べる。

## 2. 背景

### 2.1 電力系統制御システムの変遷<sup>(1)</sup>

電力系統制御システムは、電力会社の電力流通設備を監視制御するためのITシステムであり、技術とニーズの変遷とともにシステム構成も変化してきた。

従来のシステム構成は、監視制御処理を実行するサーバ群と運転員が用いる監視制御端末(監視盤、制御卓)が同一拠点内に設置される形態が主流であったが、当社は2005年頃からはサーバ設置拠点と運転拠点を分離して広域IP網を介して接続する広域分散型システムを市場投入してきた。最近の広域分散型システムでは、被災を考慮したシステム信頼性の向上を目的に広域データ連携と広域バックアップ技術を適用し、また、ライフサイクルコスト低減を目的に計算機仮想化技術を適用している(図1)。

#### (1) 広域データ連携の実現

マルチキャスト通信方式やVPN (Virtual Private Network)などがサポートされない通信インフラや、狭帯域の

環境下でも効率的な拠点間通信を実現するため、広域IP網上のユニキャスト通信だけで複数計算機に同報通信を行う機構と、通信データをリアルタイムに圧縮・解凍する機構を開発し、柔軟なデータ連携・配信を可能にした。また、WebベースのHMIを開発し、操作性の向上とともに伝送帯域の制約への対応、通信プロトコルの制約への対応と、遠隔地でのソフトウェア保守性向上を実現した。

#### (2) 広域バックアップの実現～事業継続性(Business Continuity Plan : BCP)への対応

多拠点多拠点構成での拠点間広域バックアップによって、拠点被災時にも監視制御業務を継続可能にした。各電力会社のシステムの特性に応じて、次の3つのバックアップ形態に対応した(図2)。

##### (a) 専用バックアップ方式

通常の拠点とは別に、専用のバックアップ拠点に構成を簡素化したシステムを配置し、被災時には必要最低限の運転業務を継続可能にする方式(図2(a))。

##### (b) 相互バックアップ方式

平常時には各拠点それぞれの監視制御対象を管轄するが、拠点被災時には、他方の拠点で運転業務を継続可能にする方式(図2(b))。

##### (c) 分散バックアップ方式

各サーバ設置拠点は同一の監視制御対象を管轄し、運転拠点はどちらのサーバ設置拠点とも接続可能にする方式(図2(c))。

#### (3) 計算機仮想化技術の適用

計算機仮想化技術の適用によって、サーバ計算機台数の削減とサーバ計算機交換時の新旧ハードウェアの差異隠蔽によるソフトウェア資産(OS、ミドルウェア、アプリケーション)の継承を可能とし、ライフサイクルコストを低減した。計算機仮想化技術を適用するため、仮想化オーバー

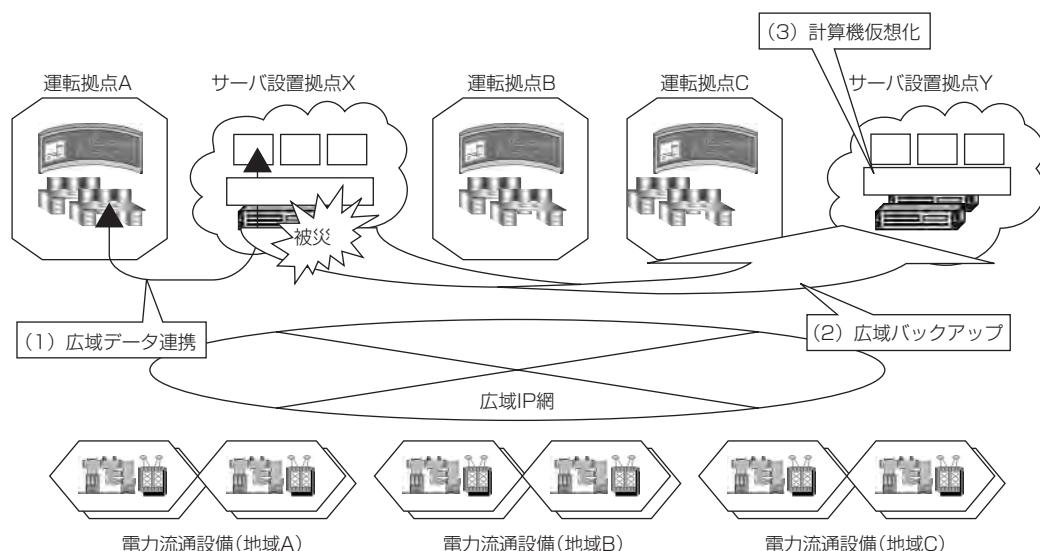


図1. 広域分散型システム

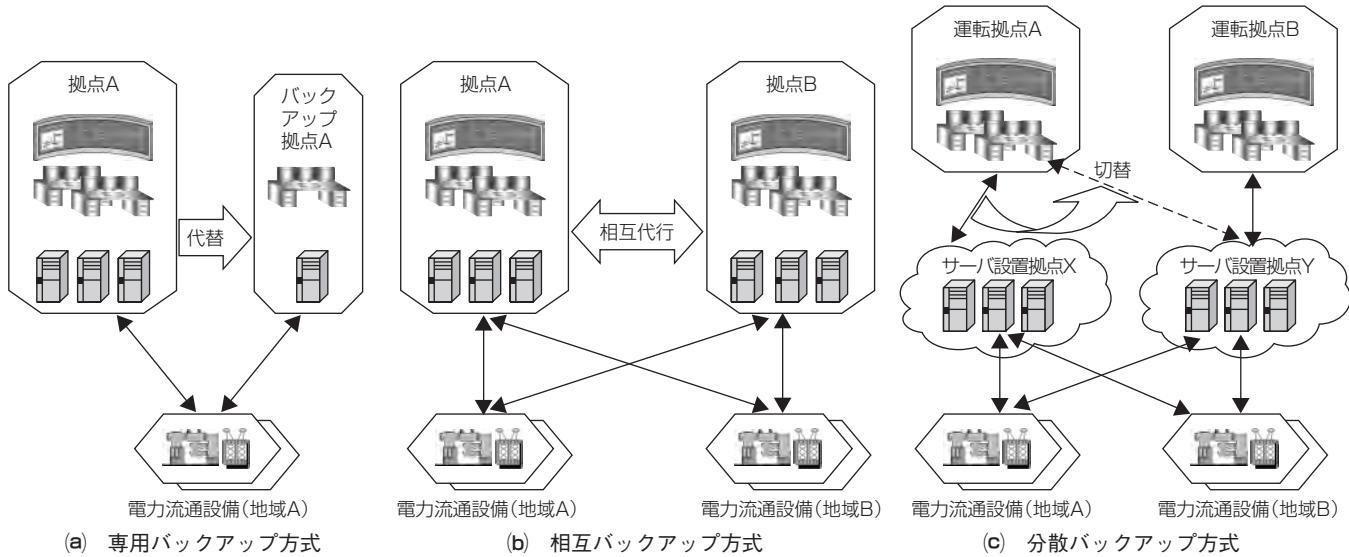


図2. ニーズに応じたバックアップ形態の提供

ヘッドの低減、処理の最適配置、計算機資源の融通などの対策を実施した<sup>(2)</sup>。また、仮想化層で検出した異常を各OS上のミドルウェアに通知する異常通知エージェントを開発し、信頼性を確保した。

## 2.2 次世代電力系統制御システム向けプラットフォームに求められる課題

当社は、次に示す昨今の新たな顧客ニーズに応えるため、広域分散型システムを更に発展させた次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの開発を行った。

### (1) 監視制御対象拡大への対応

電力システム制度改革に伴う運用業務の変化に合わせ、管轄範囲の柔軟な変更や機能高度化への柔軟な対応が必要となる。さらに、監視制御対象機器や範囲の拡大に対応し、大量データを活用した高付加価値サービスを提供するための基盤を実現する必要がある。

### (2) 保守性の更なる向上

保守が必要な計算機設備の更なるスリム化によって保守性を向上させ、ライフサイクルコストの低減を図る必要がある。また、ソフトウェアやデータベースの一元化によってメンテナンスの効率化を図る必要がある。

### (3) 信頼性の確保

監視制御対象の拡大に伴い、スマートグリッド等の様々なシステムとの連携が増えることが想定される。また、社会インフラのセキュリティ向上の要求が高まっていることから、セキュリティや可用性を含めた信頼性の強化が一層必要となる。

## 3. 次世代電力系統制御システム向けプラットフォーム

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの開発では、新技術を積極的に評価・導入して先に述べた課題を解決した。

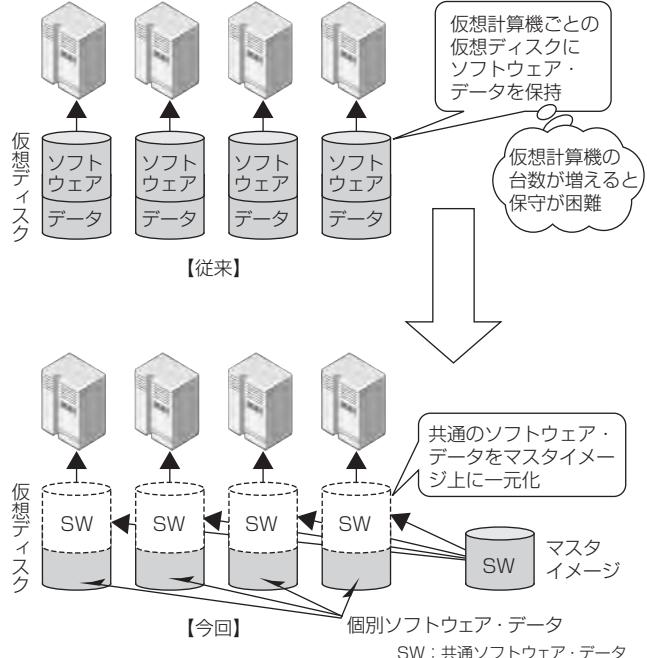


図3. 仮想化環境におけるソフトウェアの一元化

### 3.1 大規模・高密度仮想化技術

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームでは、1台のサーバ計算機上に集約統合して搭載する計算機台数をこれまでの数台レベルから数十台レベルに大幅増加させた環境下でも、処理性能や信頼性を確保し、また各仮想計算機が提供するサービスに対するシームレスなアクセスを可能としている。これによって、監視制御対象の拡大や高付加価値機能への対応に加え、ソフトウェア機能の追加・改造時の保守性を向上させている。

#### (1) リソース制御

1つの物理計算機上に多数の仮想計算機を実装可能とするため、仮想計算機が相互に影響を与えないようする独立性の確保が重要になる。次世代制御システム向けプラッ

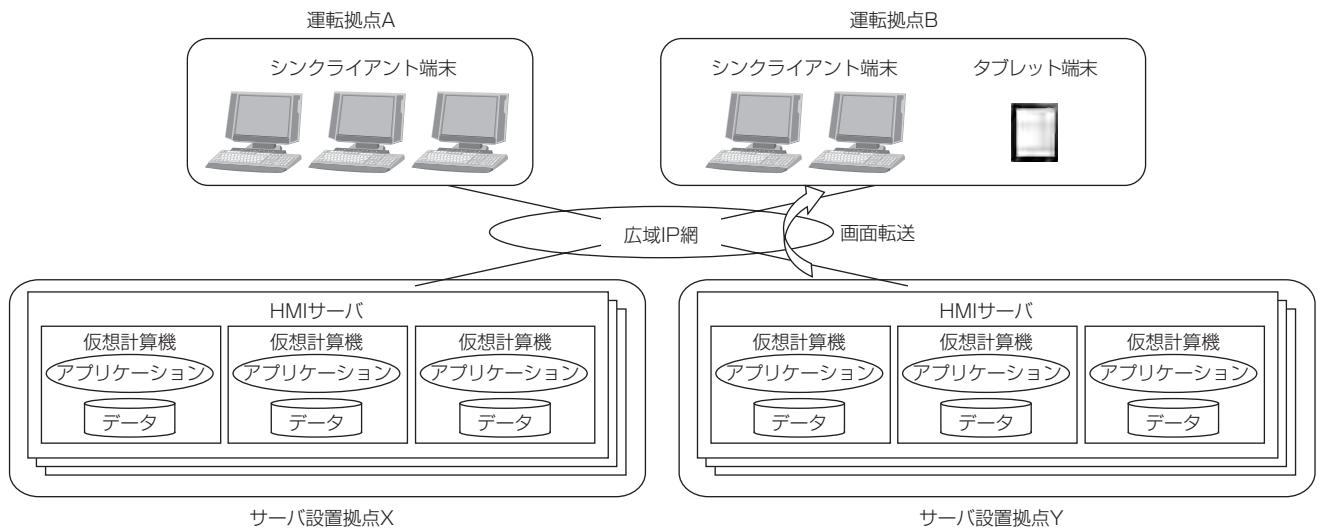


図4. クライアント仮想化

トフォームでは、CPU、メモリ、ネットワーク、ハードディスクなどのリソースを適切に制御する技術を確立した。これによって、仮想計算機の独立性を確保し、物理計算機のハードウェアを有効に活用した効率的な動作を可能としている。また、将来のニーズに対応に必要な仮想計算機の追加を容易にしている。

#### (2) 仮想化環境でのソフトウェアとデータ一元化

従来の仮想化技術では、仮想計算機ごとの仮想ディスクに個別にソフトウェアやデータを実装していた。

このため、仮想計算機の台数が増えるとソフトウェア更新時の保守が困難になるという課題があった。この課題を解決するため、仮想計算機間で共通のソフトウェア・データをマスタイメージ上に一元化した。各仮想計算機は、マスタイメージと計算機個別のソフトウェア・データなどを含む仮想ディスクを組み合わせて使用する(図3)。

これによって、共通ソフトウェア・データの更新はマスタイメージ上で1回行うだけとなり、保守性の向上を実現したほか、ディスク使用量も削減した。

#### 3.2 高信頼クライアント仮想化技術

これまで個々の端末に実装されていたHMI機能を仮想計算機として実装し、サーバ計算機上に集約した(図4)。

データ保存や処理をサーバ側で集中管理し、端末側にはソフトウェアやデータを持たせないシンクライアント方式とした。これによって、ソフトウェアの保守性向上とセキュリティ強化を実現している。クライアント装置としては、ハードディスクを持たず耐久性や信頼性が高いシンクライアント端末に加え、タブレット端末やストレートパソコンも使用可能としており、BYOD(Bring Your Own Device)にも対応することで業務の効率化にも寄与する。

大規模集約環境でもシンクライアント端末の増設に容易に対応するため、シンクライアント端末とHMIサーバの接続管理を自動化するコネクションブローカ機能を開発した(図5)。

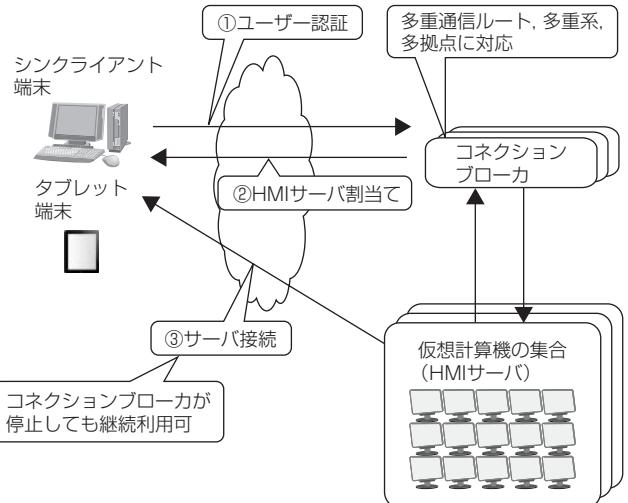


図5. コネクションブローカ

コネクションブローカはシンクライアント端末からの接続要求を受け付け、ユーザー認証を実施した後に、適切な接続先HMIサーバを決定してシンクライアント端末に通知する。これによって、HMIサーバ故障時にも代替サーバの割当てを容易に行うことができ、可用性を向上させた。

また、コネクションブローカはユーザー認証とサーバ管理の機能を併せ持つため、ユーザーの権限に応じてHMIサーバを割り当てることが可能である。これによって、例えば特定のユーザーには機能制限のあるHMIサーバを割り当てるなど柔軟性を持ったシステム構築が実現できる。複数のサーバ設置拠点が設けられるシステム構成では、各サーバ設置拠点に配置されたコネクションブローカ同士がネゴシエーションを行い、システム全体の中から最適なHMIサーバを割り当てることができる。

#### 3.3 大規模・高性能データ処理技術

監視制御範囲の拡大に対応して、広範囲のデータを長期間にわたって蓄積し、分析等に活用するニーズが高まって

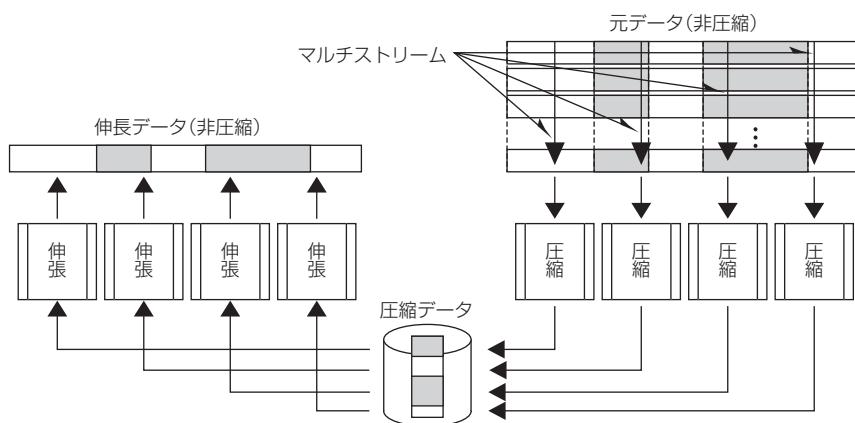


図6. 大規模・高性能データベース

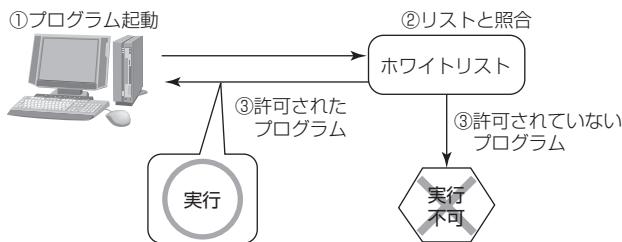


図7. OSホワイトリスト機構

いる。このため、大量のデータを高速に検索することが可能な当社独自の大規模・高性能データベース<sup>(3)</sup>を適用した。

この大規模・高性能データベースでは、大容量・非定型のデータに対してデータの特性に応じた圧縮を行うことによって、ストレージ容量を大幅に削減することが可能である。また、多数のプロセッサやディスクを用いた並列処理によって、データ量が増加しても安定した性能を実現し、一般のRDBMS(Relational Database Management System)に比べて大幅な高速検索が可能である(図6)。

### 3.4 高度セキュリティ技術

広域分散型システムの導入によって、広域IP網を使用することから、暗号化、侵入防止システム、IP分離装置などのセキュリティ対策を実施してきた。次世代電力系統制御システム向けプラットフォームでは、次に示す更なるセキュリティ強化を実現している。

#### (1) OSホワイトリスト機構<sup>(4)</sup>

OS上であらかじめ許可されたプログラム以外の実行を禁止するOSホワイトリスト機構を開発した(図7)。従来のパターンマッチングによるウイルス対策ソフトに比べ、未知の脅威へも対応可能であり、パターンファイルの継続的な更新も不要となる利点がある。OSホワイトリスト機構は、ホワイトリストの初期設定に手間がかかる課題があったが、自動学習機能を実装することで設定の容易化を実現した。また、システム開発・検証時の利便性を考慮し、許可されていないプログラムの実行時にログを記録して、

プログラムの実行は可能とする警告モードも実装した。このOSホワイトリスト機構は当社が独自に開発したものであり、セキュリティソフトベンダーに依存することなく自らによる長期保守が可能である。

#### (2) ユーザー認証の強化

先に述べたとおり、シンクライアント端末として多様なデバイスを接続可能としていることから、セキュリティ確保のためにはユーザー認証を強化する必要がある。これに対応するため、IEEE 802.1Xによる認証方式を実装している。RADIUS(Remote Authentication Dial In User Service)認証サーバを多重化することによって、セキュリティを確保しながら、可用性も損なわれることがないように配慮している。

## 4. むすび

次世代電力系統制御システム向けプラットフォームの大規模・高密度仮想化技術、高信頼クライアント仮想化技術、大規模・高性能データ処理技術、高度セキュリティ技術について述べた。

今後は、分散型電源の導入量拡大や系統運用の複雑化の進展に対してユーザーインターフェースの高度化等、更なる運用者支援機能の拡充も図っていく。

## 参考文献

- 藤田淳文, ほか: 次世代電力系統制御システム, 三菱電機技報, 86, No.9, 498~501 (2012)
- 藤田淳文, ほか: 制御所システムへの計算機仮想化技術の適用, 平成24年電気学会全国大会, 電力システム, 417~418 (2012)
- 郡 光則, ほか: 高性能並列情報検索技術, 三菱電機技報, 83, No.12, 705~708 (2009)
- 伊藤孝之, ほか: Linuxにおけるプログラムホワイトリスト化試作, 情報処理学会第77回全国大会, 4E-02 (2015)

# 再生可能エネルギー導入を支える 蓄電池制御技術

古塩正展\*  
小島康弘\*\*

*Battery Control Technologies for Renewable Energy Resources to Grid Connection*

Masanobu Koshio, Yasuhiro Kojima

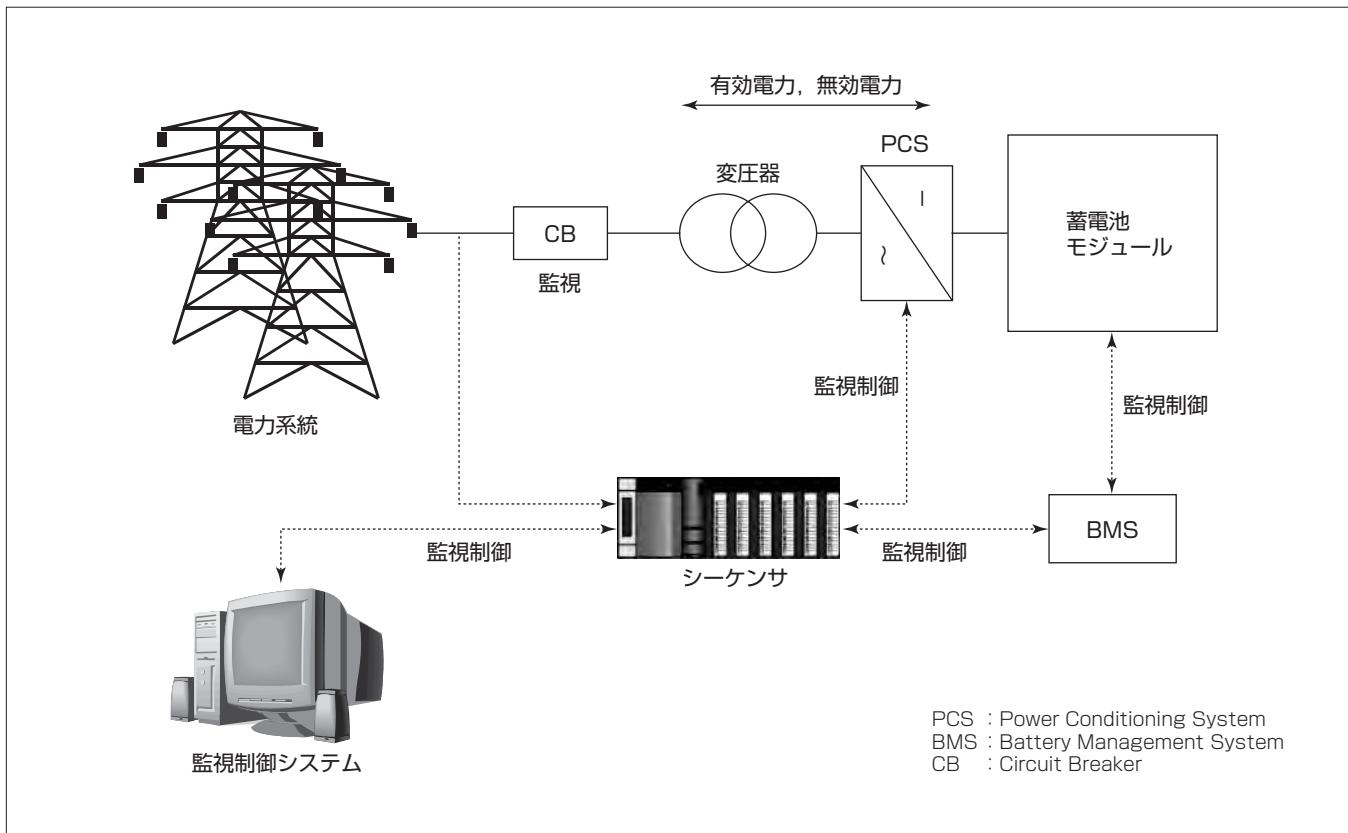
## 要 旨

低炭素化社会実現を目的として、世界的に太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が拡大している。日本でも固定価格買取制度が導入され、特に設備建設のリードタイムが短く買取価格が高い太陽光発電は、2015年3月時点で全国に2,306万kWの設備が稼働し、認定容量は8,263万kWと国内総需要の1/2以上を占めるまでに達している。

一方、電力網はリアルタイムシステムであり、瞬時の高精度な制御によって、電力網全体での周波数や配電電圧は規定値に維持されている。太陽光発電のような不安定な電源が電力網に大量に導入されると、そのままでは周波数や配

電電圧が規定値に維持できなくなる可能性があり、一部の電力会社では再生可能エネルギーの電力系統への連系を保留する状況となっている。

このような背景の下、三菱電機は、尼崎地区で実施中のスマートグリッド実証実験を通じ、従来の電力品質を維持しつつ、より多くの再生可能エネルギーを電力系統へ連系させるための蓄電池制御技術を開発した。電力会社や新電力・太陽光発電などの発電事業者向けに、系統用蓄電システムを提供している。



## 系統用蓄電システムのイメージ

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは出力変動が不安定であり、大量・集中導入時には、周波数変動や電圧変動などによって電力網に悪影響を与える。当社は、従来の電力品質を維持しつつ、より多くの再生可能エネルギーを電力系統へ連系させるための蓄電池制御技術を開発し、再生可能エネルギーの導入拡大に貢献する系統用蓄電システムを提供している。

## 1. まえがき

近年、低炭素化社会実現に向けた供給力の1つ、また日本のエネルギー安全保障を担う供給力の1つとして、太陽光発電(PhotoVoltaics: PV), 風力発電(Wind Turbine: WT)などの再生可能エネルギーの系統連系が加速している。

一方、再生可能エネルギーは天候の影響を受けやすく発電量の変動が大きいため、電力品質の低下が懸念されている。表1に再生可能エネルギー導入時の課題を示す。

本稿では、表1のそれぞれの問題に対して系統用蓄電システムを適用した解決策を述べ、併せて当社が受注した系統用蓄電システムについて述べる。

## 2. 系統用蓄電システムを適用した需給制御技術

### 2.1 需給制御における蓄電システムの必要性

従来の需給制御では、需要の変動に対して火力発電・揚水発電など制御可能な発電機の運転台数と発電量を制御して需要と供給のバランスを取り、周波数の変動を適正範囲に維持してきた。しかし、発電出力が不安定なPVやWTを電力系統に大量に連系した状況では、需要の予測・監視に加え、PVやWTに対する発電出力の予測・監視、及びこれらの変動に備えた需給制御が必要となる。また近年、可変速揚水発電機や系統用蓄電池など、PVやWTの発電出力変動の補償を目的とした大規模な蓄電システムの開発が進んでおり、従来制御対象としていた発電機と新たな蓄電システムや需要側との協調を取りながらPVやWTの発電を最大限に活用できる、より高度な需給制御の実現が求められている<sup>(1)</sup>。

### 2.2 蓄電システムによる系統安定化制御

再生可能エネルギーの変動は、瞬時の出力変動といった短周期の問題と、供給力の余剰・不足といった一日を通じた長周期の問題がある。このような不確定な需給バランスへの対策として、蓄電池そのものの低コスト化という課題があるものの、建設候補地の確保のしやすさや着工から運用開始までのリードタイムの短さ等から、揚水発電機の代替として系統用蓄電池が期待されている。蓄電池の選定は、その特性に応じて、短周期であればリチウムイオン電池やニッケル水素電池、長周期であればNAS<sup>(注1)</sup>電池やレドックスフロー電池が有望である。当社は、離島を始めとした小規模系統の電力品質を運用目標値内に維持するための蓄電池の有効電力制御として、発電機出力の平滑化によって周波数を抑制する $\Delta P$ 制御を開発し、さらに九州電力(株)と共同で計測対象を連系線潮流に拡張した。従来の周波数変動を検出して制御する $\Delta F$ 制御と、新たに開発した $\Delta P$ 制御について次に述べる。

#### (1) $\Delta F$ 制御

基準周波数との偏差に応じたフィードバック制御であり、従来の制御手法である。この手法は、需給アンバランスで

表1. 再生可能エネルギー導入時の課題

項目	イメージ	現象と課題
変動		<ul style="list-style-type: none"> <li>天候次第で出力調整が困難</li> <li>需給アンバランスの発生</li> <li>周波数変動</li> </ul>
余剰・不足		<ul style="list-style-type: none"> <li>軽負荷時にPVが高出力</li> <li>発電予測の精度が低い</li> <li>PV発電の余剰</li> <li>予測はずれ時の供給力不足</li> </ul>
電圧		<ul style="list-style-type: none"> <li>需要家から系統に電力が逆流</li> <li>配電系統電圧の変動</li> <li>電圧上限値を超過</li> </ul>

周波数偏差が発生することに基づいている。どのようなケースでも正しく動作するというメリットがあるが、周波数偏差が発生しなければ制御できないため、 $\Delta P$ 制御に比べると制御動作が遅くなる課題があった。

#### (2) $\Delta P$ 制御

離島系統に連系された再生可能エネルギーの出力変動は、供給力である内燃力発電機の出力を変化させる。一方、内燃力発電機の燃料供給量を即座には変更できないため、機械入力と電気出力のアンバランスが発生して回転速度が変化し、周波数変動が発生する。 $\Delta P$ 制御はこのアンバランス量を直接捉え、内燃力発電機が接続する送電線潮流を計測して、その短周期変動分を蓄電池で分担する制御方式である。

(注1) NASは、日本ガイシ(株)の登録商標である。

### 2.3 短周期出力変動に対応した蓄電システム導入事例

2.2節で述べた系統安定化制御を適用し、短周期出力変動に対応した蓄電システムの導入事例について述べる。離島への再生可能エネルギー導入拡大に向け、経済産業省補助事業“平成24年度風力系統連系量拡大実証事業”的補助を受け、九州電力(株)が芦辺変電所(長崎県壱岐)に当社の蓄電システムを導入した<sup>(2)</sup>。壱岐の系統規模は30,000kW程度であり、2つの内燃力発電所によって電力を供給しているが、2013年3月時点で、既に連系しているWTによって周波数調整力が限界に達していた。導入された蓄電システムは、500kWのPCS(Power Conditioning System)と200kWhのリチウムイオン電池からなる蓄電池ユニット8並列(4,000kW, 1,600kWh)で構成される(図1)。

系統安定化制御方式としては、 $\Delta F$ 制御、 $\Delta P$ 制御を基に、様々なケースで安定動作するよう両者を組み合わせた $\Delta P + \Delta F$ 制御を九州電力(株)と共同で開発、採用した(図2)。2012年度から実施中の実証試験では、 $\Delta P + \Delta F$ 制御によって、連系線潮流の変動と併せて内燃力発電機の出力変動も抑制されることが示され、導入した蓄電システムの有効性を確認した(図3)。

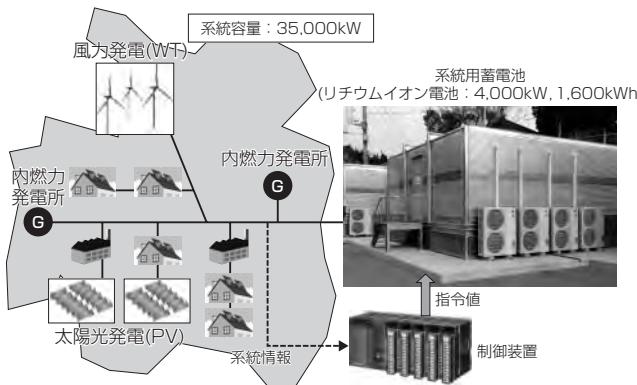


図1. 離島向け蓄電システム(短周期対策)

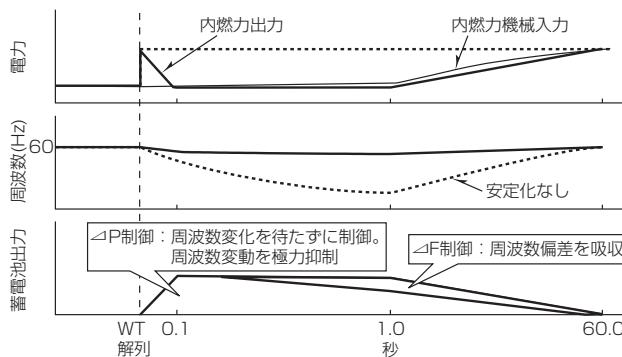
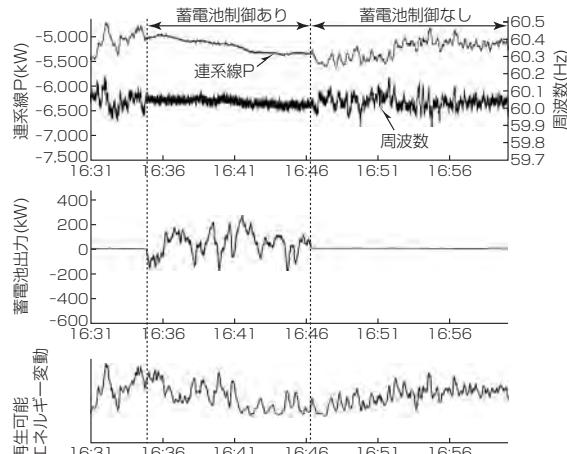
図2.  $\Delta P + \Delta F$ 制御方式

図3. 離島での実証結果の一例

## 2.4 離島へのハイブリッド蓄電池システム導入事例

中国電力(株)が、環境省補助事業“平成26年度離島の再生可能エネルギー導入促進のための蓄電池実証事業”的採択を受け、西ノ島変電所(隠岐郡西ノ島町)に異なる特性を持つリチウムイオン電池とNAS電池の2種類の蓄電池を適用したハイブリッド蓄電池システムを構築している(図4)。

この蓄電システムは、小容量・大出力のリチウムイオン電池と大容量のNAS電池の各々の特性を活用した制御を行うことで、再生可能エネルギーによる“はやすく小さな変動”(短周期変動)や“おそらく大きな変動”(長周期変動、余剰電力)に効率的に対応することを目的として導入された。

また、この蓄電システムには、需要や再生可能エネルギー



図4. ハイブリッド蓄電池システム技術実証事業イメージ



図5. 大容量蓄電システムの設置イメージ

発電出力の予測、内燃力発電機との協調も含めた最適な運用計画・制御技術、及び先に述べた系統安定化制御技術等、当社が開発した需給制御技術が適用されている。

## 2.5 需給バランス改善を目的とした蓄電システム導入事例

一般社団法人 新エネルギー導入促進協議会が平成26年度に公募した“再生可能エネルギー接続保留緊急対応補助金(大容量蓄電システム需給バランス改善実証事業)”の採択を受け、九州電力(株)がNAS電池を適用した50,000kW、300,000kWhの大容量蓄電システム(図5)を構築中である。

この蓄電システムは、揚水発電設備と同等の電力貯蔵機能を活用することで需給バランスを改善するとともに、蓄電池の大容量性を生かした系統電圧制御への適用の可能性等について実証することを目的としている。また、この蓄電システムは、多数のNAS電池運転状況を適切に把握して効率的に全体を制御することで蓄電システムの運転効率向上を図る当社の制御技術を適用する予定である。

## 3. 系統用蓄電システムを適用した配電制御技術

### 3.1 配電制御における蓄電システムの必要性

従来の配電線は、変電所から需要家に向けて電力が一方的に流れることを前提に設計され、運用されている。しかし、需要家に多くのPVが設置され、消費される電力以上の発電が行われれば、電力の逆潮流が発生する。逆潮流が多く発生すると、規定範囲( $101 \pm 6$  V,  $202 \pm 20$  V)を逸脱するほどの電圧上昇や電圧変動が発生する可能性がある(図6)。

このような電圧の上昇や変動は、需要家が所有するPV

の発電量低下を引き起こすだけでなく、配電用負荷時タップ切換変圧器(Load Ratio control Transformer: LRT)に対して従来以上の頻繁なタップ切換えを誘発することとなり、その結果、メンテナンスコストの増加や機器寿命の短縮につながることが懸念される。

電圧上昇・変動に対応した系統用蓄電システムは、PVの出力増加、又は出力変動に伴う変電所のバンク逆潮流や潮流変動を、有効電力制御によって抑制するとともに、変電所母線の電圧変動をPCSの無効電力制御によって抑制することで、従来の電力品質を維持することを目的として導入された。

### 3.2 電圧上昇・変動に対応した蓄電システム導入事例

中部電力(株)下瀬変電所に導入された蓄電システムについて

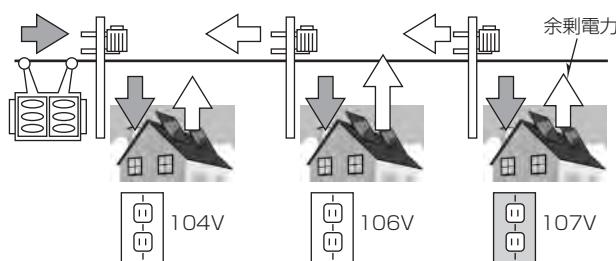


図6. 配電における電圧上昇のイメージ

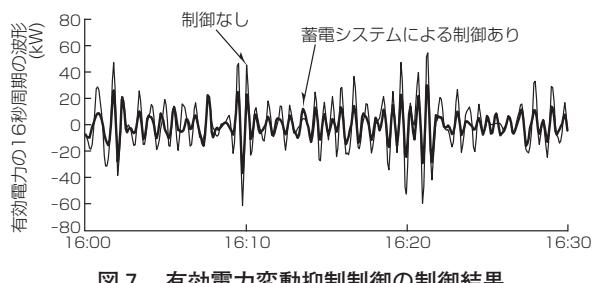


図7. 有効電力変動抑制制御の制御結果

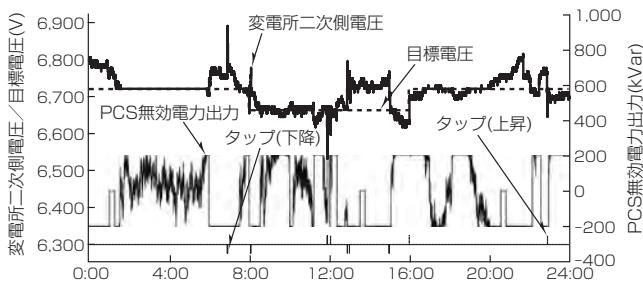


図8. 目標電圧制御の制御結果

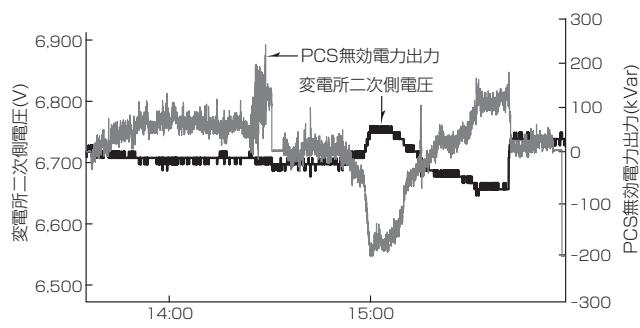


図9. 電圧変動抑制制御の制御結果

て述べる。下瀬変電所は長野県飯田市に位置しており、中部電力(株)が構築したメガソーラーいいだ(1,000kW)と家庭用PVが多数連系した配電用変電所である<sup>(3)</sup>。この蓄電システムは、PVの出力変動に起因した変電所のバンク潮流の変動と、それに伴う母線電圧変動に対する抑制効果を確認するために、中部電力(株)と当社が共同で実フィールドでの実証機として導入したものである<sup>(4)</sup>。この蓄電システムには、潮流変動と電圧変動抑制を目的とした制御方式が実装されている。実証結果の一例を図7、図8、図9に示す。

実証結果から、潮流変動のうちメガソーラーの出力変動と最も相関の高い16秒周期の変動成分に対して一定の抑制効果が得られている(図7)。また、無効電力制御によって、変電所二次側電圧が目標電圧近傍へ制御されていること(図8)，及び変電所二次側の電圧変動に対して変動を抑制する方向に蓄電システムから無効電力が出力されていること(図9)が確認できる。これらの実証結果から、各制御機能の適正動作、及び有効性が確認できた。

## 4. む す び

電力系統への再生可能エネルギーの導入拡大に伴い発生する様々な問題に対して系統用蓄電システムを適用した解決策を述べ、併せて当社が受注した主な系統用蓄電システムについて述べた。

今後、再生可能エネルギーの導入を進めるための対策の1つとして、系統用蓄電システムへの期待はますます高まると想定される。当社は、技術革新が進む各種蓄電池の特性を把握し、それらの特性に合わせた最適な制御技術を開発していくことで、再生可能エネルギーの更なる導入拡大に貢献できる製品を提供できると考えている。

## 参 考 文 献

- (1) 小島康弘, ほか:スマートグリッド／スマートコミュニティを支えるEMS技術、計測と制御, 53, No.1, 56~61 (2014)
- (2) Nomiyama, F., et al.: Demonstration Test of Frequency Fluctuation Suppression Using a Storage Battery in Isolated Island System, CIGRE AORC Technical Meeting (2014)  
[http://www.cigre-thailand.org/tncf/events/aorc2014/full\\_paper/1077R.pdf](http://www.cigre-thailand.org/tncf/events/aorc2014/full_paper/1077R.pdf)
- (3) 大崎聰志, ほか:実測データに基づくメガソーラーいいだ系統対策機能の検証、平成24年電気学会全国大会, 6-135 (2012)
- (4) 中村和博, ほか:配電系統での短周期電圧変動抑制システム検討－蓄電システムの仕様決定と実フィールド試験の開始－、平成25年電気学会全国大会, 6-253 (2013)

# 最近の自端判定型系統安定化システム

小和田靖之\* 坂口広二\*\*  
西野 宏\* 押田秀治\*\*\*  
佐々木孝志\*

Recent Wide Area Special Protection Scheme without Telecommunication

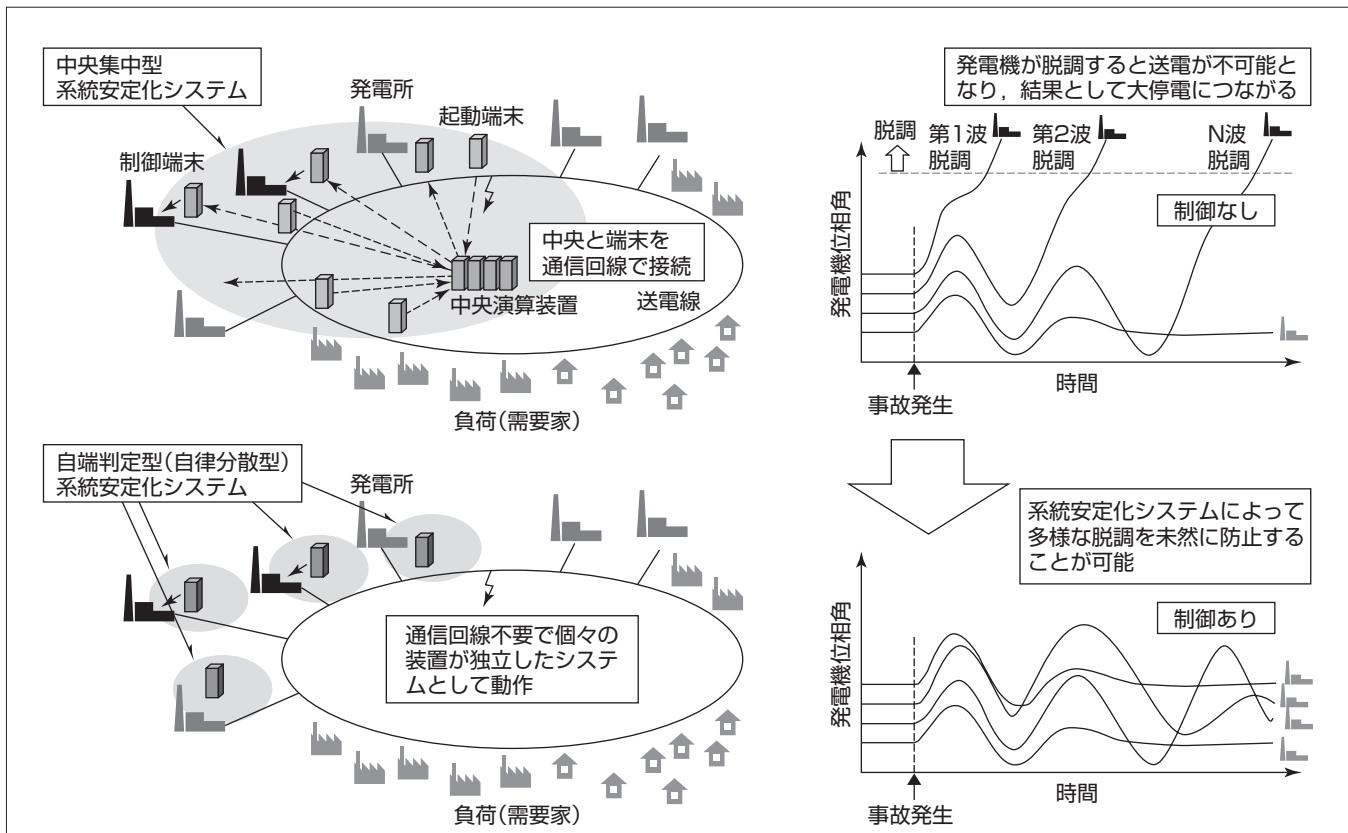
Yasuyuki Kowada, Hiroshi Nishino, Takashi Sasaki, Koji Sakaguchi, Hideharu Oshida

## 要 旨

落雷や暴風雪によって電力系統で線路が短絡する等の事故が生じた場合、保護リレー動作によって電力系統から事故区間を高速に除去することで、電力系統への影響を最低限に抑えている。しかし、過酷事故が生じた場合には、その影響が電力系統全体に波及することで、大規模停電にいたる可能性がある。このような事故波及の未然防止を目的とした系統安定化システムは、国内では1970年頃から開発・導入が進められてきており、現在では高品質な電力流通を支えるための最重要システムの1つとなっている。三菱電機では、黎明(れいめい)期から系統安定化システムの開発を推進しており、国内外の電力会社向けに数多くの製作・納入実績がある<sup>(1)(2)(3)</sup>。

従来、広域系統の安定度維持を実現するためには、多数の端末を系統に配置し、これらの端末から専用通信回線を介して収集した情報に基づき制御を実施する中央集中型の大規模システムの導入が必要であった。これに対して最近では、演算論理の高度化によって、装置間通信を行わない自端判定型系統安定化システムでも広域系統の安定度維持が可能となりつつある。

最近の自端判定型系統安定化システムの開発事例として、東京電力(株)向け統合型PSO(Preventive Step Out relay system)、及び中部電力(株)向けASC(Autonomous Stabilizing Controller)がある。



## 系統安定化システムの構成及び制御イメージ

系統安定化システムは、その構成によって中央集中型と自端判定型(自律分散型)に大別できる。ここでは、電力系統事故時の発電機脱調対策を例に、両タイプのシステム構成例を示す。中央集中型では、事故発生を起動端末で検出し、中央演算装置で制御要否を判断し、制御端末で制御を実施する。自端判定型では、全ての演算を自端で実施する。このようなシステムを導入することによって、図の右上に示すような脱調現象を未然に防ぐことが可能となる。

## 1. まえがき

系統安定化システムとは、電力系統で過酷事故が生じた場合に、その影響によって発電機脱調や周波数大幅変動といった大規模停電の要因となる事象に発展するのを未然に防止するための、発電機遮断(電制)や負荷制限(負制)等の制御を緊急に実施するシステムである。国内電力会社には既に様々な系統安定化システムが導入されており、現在の高品質な電力流通を支えるための最重要システムの1つとなっている。

従来、広域系統の安定度維持には、中央演算装置と多数の端末装置で構成される中央集中型の大規模システムの導入が必要であった。これに対して、対象系統を計測情報に基づき簡易な系統にモデル化する手法(図1)が開発されたため、装置間通信を行わない自端判定型系統安定化システムでも広域系統の安定度維持が可能となりつつある。

本稿では、最近の自端判定型系統安定化システムの開発事例として、東京電力株向け統合型PSO、及び中部電力株向けASCを取り上げ、導入背景や特長、制御論理等について述べる。

## 2. 東京電力株向け統合型PSO

### 2.1 開発の背景

東京電力株は、揚水機高稼働断面における基幹系統での過酷事故によって揚水発電機群が一斉に減速脱調(第1波脱調)にいたる可能性があることから、約30年前から順次PSOを導入している。一方、系統構成の変遷(電源の増設、潮流の増加等)に伴い、PSO導入時の想定に比べて、より多様かつ過酷な不安定現象(第2波脱調、N波脱調、弱制動現象(持続振動現象))が生じ得ることが確認された。

そこで、今回のPSOの更新に当たり、これらの不安定現象に対応した制御機能を追加することになった。また、本来の安定化制御のほかに、周波数低下対策機能、周波数上昇対策機能、脱調分離機能を統合することから、新システムは統合型PSOと称されている。この統合型PSOは、2014年11月から順次納入が進められている。次に、システムの特長と構成及び制御論理について述べる。

### 2.2 システムの特長及び構成

統合型PSOは、次の特長を持つ。

- (1) 現在の系統状況で発生し得る様々な不安定現象に対して、それぞれに即した論理を実装することで適切な制御を実現する。
- (2) 多段階制御の導入によって、自端情報だけに基づく制御であるにも関わらず、十分な適応性を確保するとともに、不安定現象の確実な抑制を可能とする。
- (3) 通信機能が不要であり、各システムは独立して動作可能であることから、導入や更新が容易である。

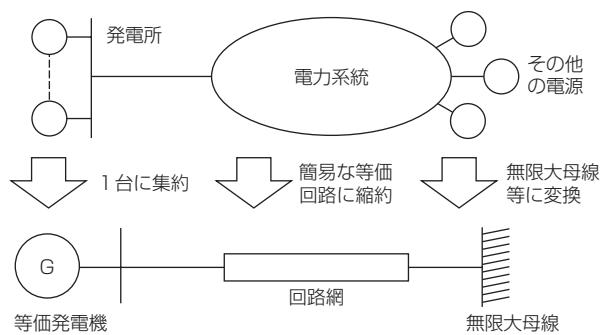


図1. 系統のモデル化

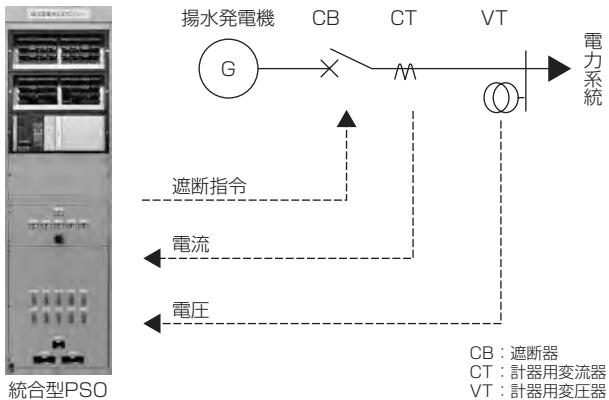


図2. 統合型PSOのシステム構成

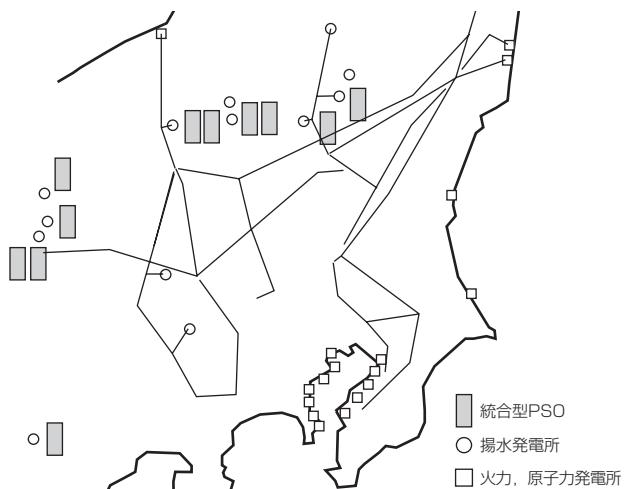


図3. 統合型PSOの設置箇所

(4) 等面積法を適用しているため、安定度判別に係る整定項目は原則不要であり、運用側の負担を軽減する。

(5) 最新の高性能デジタルリレーを使用している。

統合型PSOは、東京電力株系統内の各揚水発電所に設置され、それぞれの発電所の電圧、電流を取り込んで制御演算を実施し、必要に応じて揚水発電機を遮断することで系統全体の安定化を図っている。統合型PSOのシステム構成を図2に、設置箇所を図3に示す。

### 2.3 制御論理

統合型PSOが対象とする現象、及び対応する機能名称、基本技術を表1に示す。次に、これらの各機能について述べる。

### 2.3.1 第1波対応制御

自端で、事故発生から事故除去後一定時間までの発電機有効電力(PE)を計測し、これを基に各要素のデータ( $\delta$ 等)を算出する。これらの値を用いて、事故除去後の電力相差角曲線( $P - \delta$ 曲線)を推定し、等面積法によって安定度判別を行う(図4)。不安定(脱調)と判断した場合には、安定化のために必要な揚水発電機の遮断台数を算出し、必要台数分の揚水発電機を遮断する。

### 2.3.2 第2波対応制御

第2波対応制御では、第1波対応制御と同様に、動搖第2波の自端計測情報から算出したデータを用いて推定した電力相差角曲線に基づいて等面積法による安定度判別を行い、必要遮断台数の算出、及び必要台数分の揚水発電機遮断を行う。

### 2.3.3 N波対応制御

自端計測情報を基に、対象系統を2機系統にオンラインでモデル化し、このモデルを用いた安定度計算によって今後の発電所の有効電力・位相角を推測する。この推測結果から発電機脱調と判断される場合には、揚水発電機を遮断することで脱調を防止する。

### 2.3.4 弱制動対応制御

弱制動対応制御は、計測情報に基づき算出した位相角( $\delta$ )の振幅値( $A_1, A_2, A_3$ )(図5)から制動係数を算出し(動搖波形分析)、この係数の値と振幅条件等から弱制動現象の検出を行う。弱制動検出時は、揚水発電機の遮断によって

表1. 対象現象と対応する機能

対象現象	第1波脱調	第2波脱調	第3波脱調～	持続振動
機能名称	第1波対応制御	第2波対応制御	N波対応制御	弱制動対応制御
基本技術	等面積法	等面積法	安定度計算	動搖波形分析

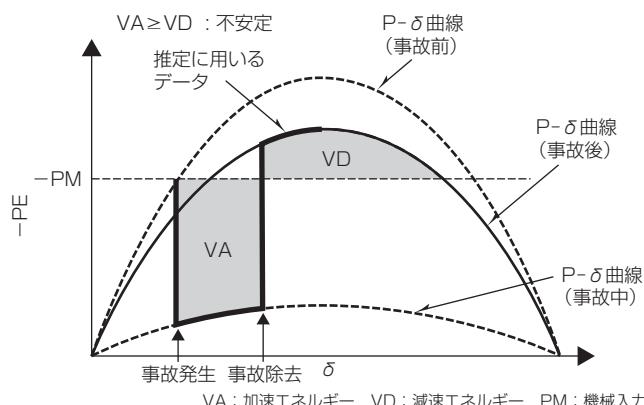


図4. 等面積法による安定度判別

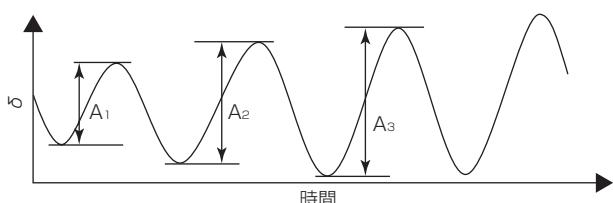


図5. 弱制動現象の検出

弱制動傾向の解消を図る。なお、弱制動傾向の検出には第3波以上の電力動搖が必要となるため、弱制動対応制御はN波対応制御と並列に動作する。

## 3. 中部電力(株)向けASC

### 3.1 開発の背景

中部電力(株)では、系統事故時の安定度維持対策として様々な系統安定化システムを導入してきている。従来、これらのシステムは主保護リレーによる事故除去を前提としており、後備保護リレー動作時の安定度問題は、主保護リレーの2系列化によって回避するのが基本であった。

一方、近年の電源集中化によって、低位系での後備保護リレー動作時に基幹系統の電源が不安定となる事象が顕在化してきた。このような事象に対しても、主保護リレーの2系列化で対処するのはコスト面等で課題があることから、新たな系統安定化システム導入によって対処している。

ASCは、その系統安定化システムによる対策の1つとして、中部電力(株)と共同で開発したものであり、2009年から2システムが運用を開始している。次に、システムの特長と構成及び制御論理について述べる。

### 3.2 システムの構成と特長

図6に示すとおり、ASCは自端で計測可能な情報である電源送電線の電流、及び発電所母線の電圧を用いて、制御演算(起動判定、安定度判別、電制機選択)を実施する。このシステムの主な特長を次に挙げる。

- (1) 自端計測情報だけによって安定度判別を実施するため、通信回線を必要とせず、低コストで実現できる。
- (2) 等面積法に基づく逐次演算方式を用いるため、様々な故障様相に対して柔軟な制御が可能である。
- (3) 事故中のデータを用いて制御演算を実施するため、事故除去までの制御実施が可能である。

図7に、中部電力(株)系統内で運用中のASCの外観を示す。

### 3.3 制御論理

#### 3.3.1 起動判定機能

自端計測情報から算出した電気量(有効電力、無効電力、電圧)の変化に基づき事故発生を検出し、起動判定を行う。この際、事故除去が早期に検出された場合は、主保護リレーによる事故除去であるとして起動をロックしている。このほかにも、幾つかのロック条件を設けることによって、対象とする事象以外での起動をロックし、確実な起動判定を行っている。

#### 3.3.2 安定度判別機能

ASCでは、等面積法に基づき安定度判別機能を構築している。等面積法を採用する系統安定化システムは、先に述べた統合型PSOを含めて幾つか存在するが、このシステムでは、事故中のデータを用いて制御演算を実施し、事故除去を待たずに制御を実施する点が他と大きく異なっている。

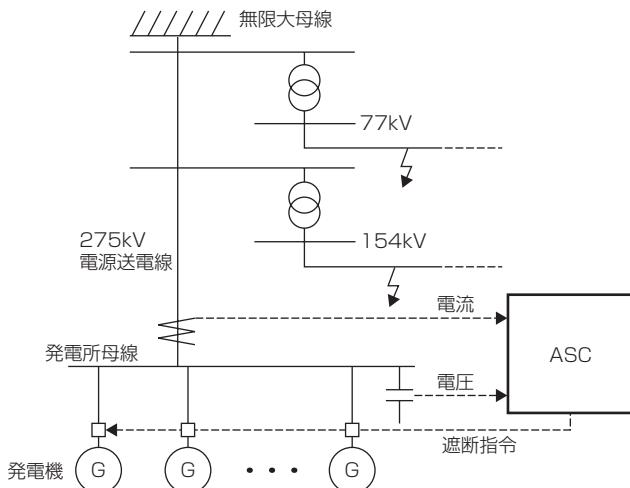


図6. ASCのシステム構成



図7. 運用中のASC

制御対象となる発電機の出力(PE)は計測情報から直接求め、また位相角偏差( $\Delta\delta$ )は計測情報の積分計算によって求めることができる。これらの状態量の事故後における変化を電力相差角平面上の軌跡として描くと、図8の太線部分となる。この軌跡を基に、事故中の電力相差角曲線を推定する。一方、事故除去後の曲線については、初期運転点を通過するように事故中の曲線を平行移動することで算出する。これらの曲線を用いて、図9に示すとおり、加速エネルギー(VA)及び減速エネルギー(VD)の算出を行い、安定度判別を行う。

この安定度判別は、起動判定後8.3msごとに繰り返し実施する。この逐次演算方式の適用によって、安定度判別中の故障除去等の系統変化にも柔軟に対応でき、確実な安定化が可能となる。

### 3.3.3 電制機選択機能

安定度判別機能で不安定と判定された場合は、複数ある発電機の中から電制機の選択を行う。選択に際しては、電制台数の極小化、及び電制後における復旧の容易性を考慮する。すなわち、電制効果が大きい発電機からの選択を基本としつつ、可能な限り、事前設定した複数のグループから1台ずつ選択するものとし、またグループ内発電機の全台選択は極力避けるよう考慮する。

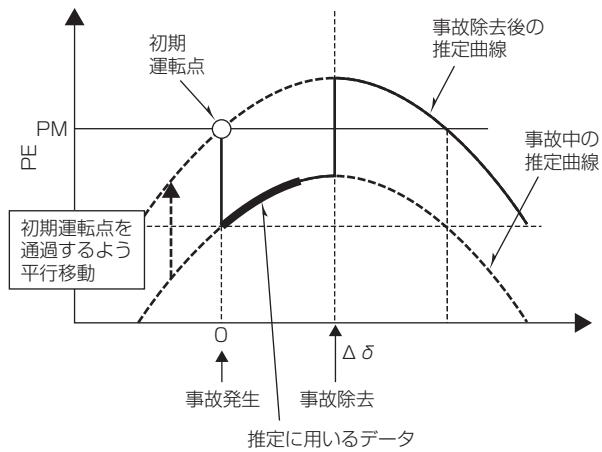


図8. 電力相差角曲線の推定

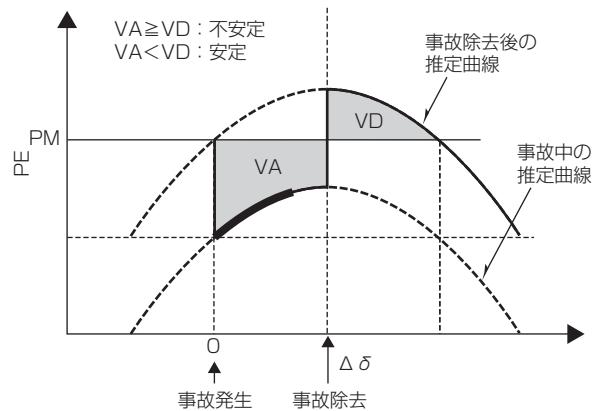


図9. 等面積法による安定度判別

## 4. む す び

三菱電機で製作を担当した自端判定型系統安定化システムについて、導入背景や特長、制御論理等について述べた。

電力流通システムの変化が進むにつれ、簡易な構成であるにも関わらず幅広い不安定事象や多様な不確定要因にも十分に対応可能な自端判定型系統安定化システムは、今後更にニーズが高まると考えられる。

長年培った系統安定化技術を駆使して、これからも様々なニーズに応える系統安定化システムを提供し、電力流通の高信頼度維持に寄与していく。

## 参考文献

- (1) 押田秀治, ほか: 大規模系統安定化システム, 三菱電機技報, 86, No. 9, 484~489 (2012)
- (2) 平井勝志, ほか: 統合型揚水安定化リレーシステムの開発, 平成26年電気学会保護リレーシステム研究会資料, PPR-14-24 (2014)
- (3) 小林亮治, ほか: 負荷系統の後備保護動作時における過渡安定度維持を目的とした逐次演算方式による自端検出型系統安定化装置の開発, 電気学会論文誌B, 130, No. 2, 165~174 (2010)

# レイヤ2ネットワークを適用した送電線保護リレーシステム

片山善博\* 小比賀勢一\*\*  
松尾康弘\*  
鍋野恭宏\*

Line Protection Relay System Using a L2 Ethernet Network

Yoshihiro Katayama, Yasuhiro Matsuo, Yasuhiro Nabeno, Seiichi Kohiga

## 要旨

送電線は、電力を輸送するために電気所間を結ぶ重要な設備であるが、風雪雨などの過酷な環境にさらされている。雷撃などによる事故が継続すると、大規模停電や電力系統設備の損傷にいたる。送電線保護リレーシステムの役割は、送電線の事故を検出し、事故区間を瞬時に切り離すことである。送電線保護リレーシステムには高度な信頼性が要求される一方、昨今の電力供給事情から、電力設備コストの一層の削減が求められている。変電所間通信を利用した送電線保護リレーシステムは、専用の通信設備が適用されているためシステム全体が高コスト化する問題がある。

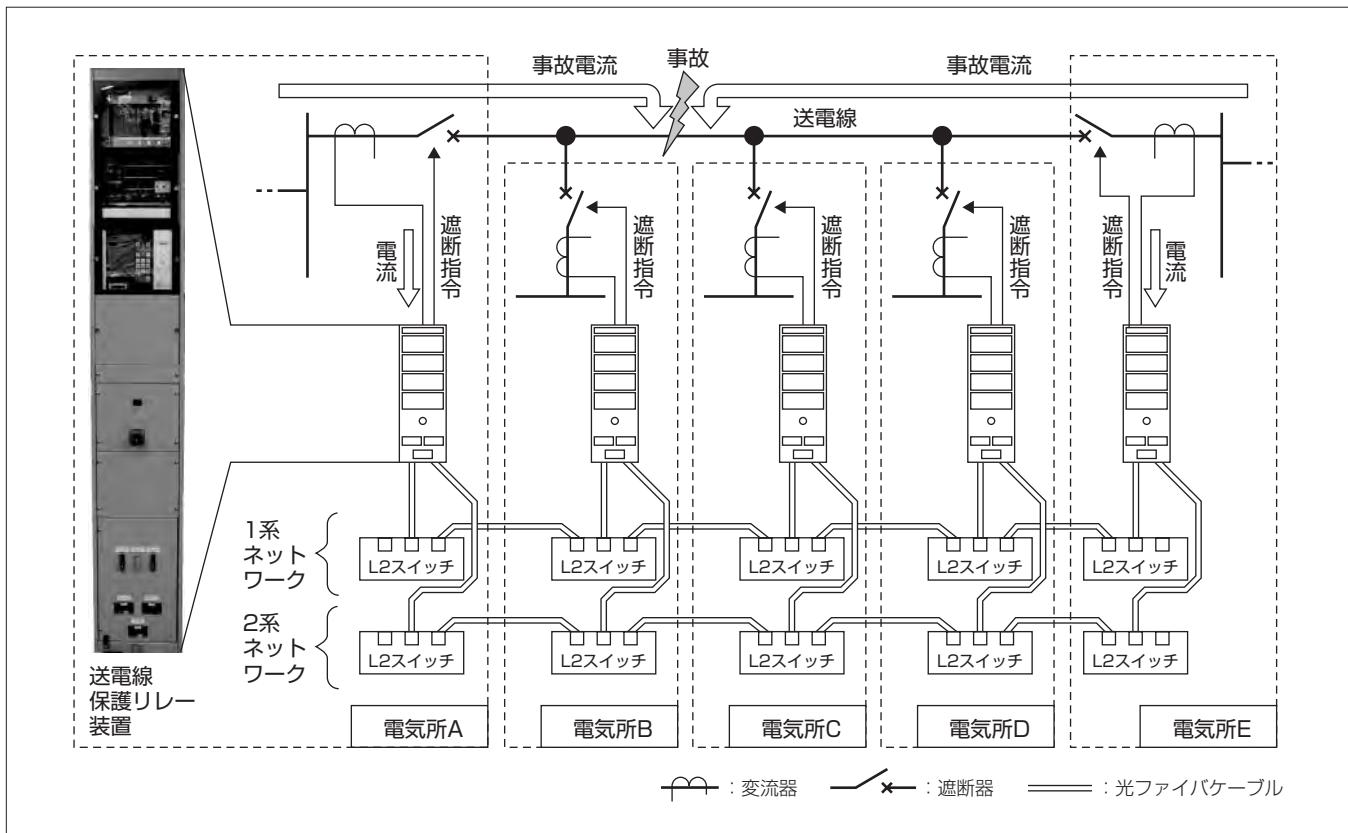
近年の著しいデジタル技術の進歩で通信ネットワークの

高容量化、高機能化が進んでおり、各分野で適用されている汎用的なイーサネット<sup>(注1)</sup>通信設備を送電線保護リレーシステム用の通信設備として適用すれば、通信設備のコストを従来に比べて大幅に削減できる。

そこで、イーサネット通信設備であるレイヤ2スイッチ（以下“L2スイッチ”という。）を適用した送電線保護リレーシステムを開発し実用化した。

なお、このシステムは、国内電力会社向け保護リレー装置“MELPRO-CHARGE 2 シリーズ<sup>(1)</sup>”を適用して製作しており、東京電力株に2015年5月に納入し、稼働中である。

（注1）イーサネットは、富士ゼロックス株の登録商標である。



## レイヤ2ネットワークを適用した送電線保護リレーシステムの構成

イーサネット通信設備であるL2スイッチを適用した送電線保護リレーシステムの構成を示す。送電線を保護するために各電気所に設置した送電線保護リレー装置は、光ファイバケーブル・L2スイッチに接続される。また、信頼性を高めるために、ネットワークは2系列で構成している。

## 1. まえがき

送電線保護リレーシステムの役割は、送電線の事故を検出し、事故区間を瞬時に切り離すことである。送電線保護リレーには高度な信頼性が要求される一方、昨今の電力供給事情から、電力設備コストの一層の削減が求められている。変電所間通信を利用した送電線保護リレーシステムは、専用の通信設備が適用されているため、システム全体が高コスト化する問題がある。

近年、デジタル技術の進歩は著しく、通信ネットワークの高容量化、高機能化が進んでおり、各分野で適用されている汎用的なイーサネット通信設備を送電線保護リレーシステム用の通信設備として適用すれば、通信設備のコストを従来に比べて大幅に削減できる。

そこで、イーサネット通信設備であるL2スイッチを適用した送電線保護リレーシステムを開発し実用化した。

本稿では、今回開発した送電線保護リレーシステム及びその検証結果について述べる。

## 2. 送電線保護リレーシステム

### 2.1 システム構成

送電線保護リレーシステムは、1つの電気所だけで構築可能なシステムと、複数の電気所間でデータ伝送するシステムに分類される。データ伝送するシステムでは、各電気所を通過する電流の瞬時値を相互に授受し、キルヒホフ第一法則によって電流差動演算を行い、保護区間内の事故を検出する電流差動リレーが主流である。図1に電流差動リレーの動作原理を示す。内部事故発生時には $I_A + I_B$ が増大するため、保護区間内の事故を検出可能である。

L2スイッチを用いた送電線保護リレーシステムの構成を図2に示す。このシステムでは、各電気所間のデータ伝送に光ファイバケーブル・L2スイッチで構成された通信ネットワークを使用する。また、信頼性を高めるために、通信ネットワークは2系列で構成し、送電線保護リレーは、1系ネットワーク、2系ネットワークの両方で電流データを授受する。

### 2.2 ネットワーク構成

このシステムのパケット配信方式を図3に示す。イーサネットのパケット配信方式には、ユニキャスト(単一相手へ送信)、マルチキャスト(特定複数相手へ送信)、ブロードキャスト(全ての相手へ送信)の3方式があるが、送電線保護リレーシステムでは、同一の送電線に接続された全電気所の電流瞬時値を相互に授受する必要があるため、1パケットの送信で全電気所にデータ送信ができるブロードキャストを採用した。ただし、ネットワークを他のシステムと共にする場合にブロードキャストを用いると、他のシステムに不要なパケットが届いてしまう。この課題を解決するため、図4に示すようにL2スイッチに仮想LAN

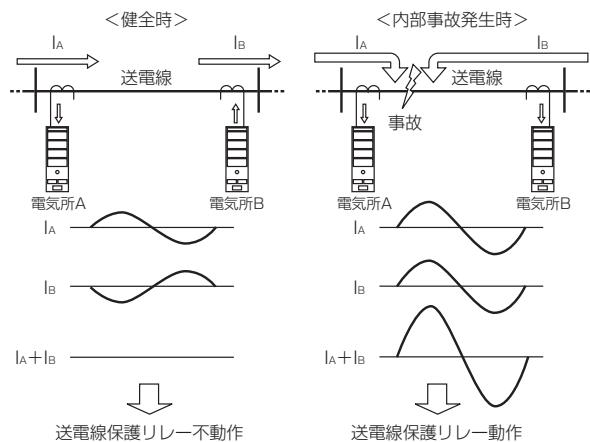


図1. 電流差動リレーの動作原理

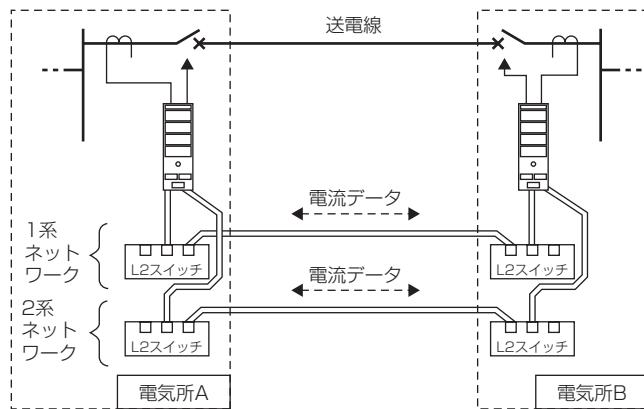
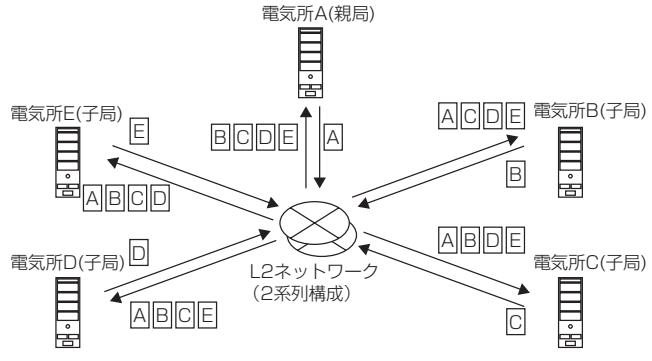


図2. L2スイッチを用いた送電線保護リレーシステム



各電気所から送信するパケット : A B C D E

図3. パケット配信方式

(Virtual Local Area Network : VLAN)を設定する。

図4に示すような平行2回線の送電系統では、1L送電線、2L送電線を保護するために、1電気所に2台の送電線保護リレー装置を配置している。送電線保護リレー装置からはVLANグループ番号を付加したパケットを送出するとともに、L2スイッチの各ポートに対して、通過可能なVLANグループ番号を設定する。これによって、仮想的にグループ分けが可能となり、他回線のシステムに不要なパケットが届かなくなる。

このシステムでデータ授受に用いるイーサネットのパケットフォーマットは、図5に示すように、宛先MAC(Media Access Control)アドレス、送信元MACアドレス、VLANタグ、タイプ、データ、CRC(Cyclic Redundancy

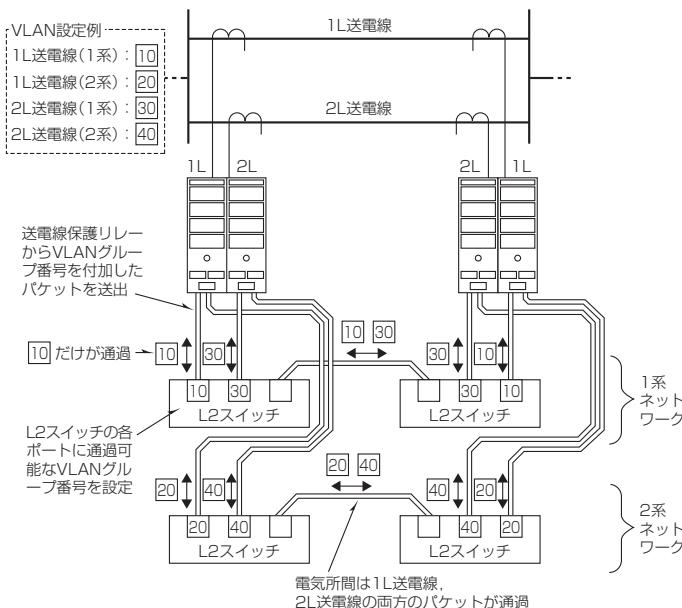


図 4. VLAN設定

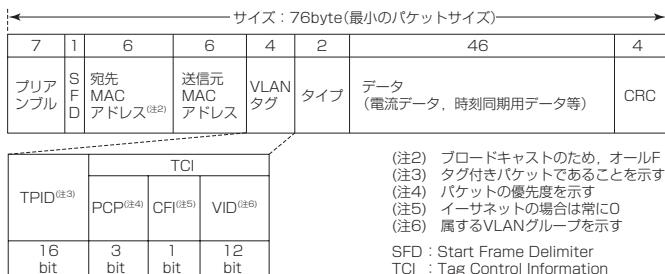


図5. パケットフォーマット

Check)で構成する。IEEE802.1Q準拠のVLANタグを採用しており、VLANタグ内のVIDによって、同ネットワークに接続される他システムからの影響を軽減するためにグループ分けを実施する。また、PCPによって、2.3節で述べるサンプリング同期の時刻同期用データを送信するパケットだけを高優先度として、サンプリング同期精度を向上させている。なお、ネットワークの負荷を軽減するために、パケットサイズは最小の76バイト(データ部分は46バイト)として、データ部分で自電気所の電流データ・時刻同期用データ等を送信している。また、このパケットの送信間隔は、従来の送電線保護リレーシステムと同様の電気角30度(1.66ms ÷ 1/50Hz × 30/360度)ごととした。

## 2.3 サンプリング同期方式

電流差動リレーでは、保護区間内の事故を検出するため同時にサンプリングした電流データが必要である。ここでは、各電気所の電流サンプリングタイミングの同期制御方法について述べる。図6にサンプリング同期制御の概念図を示す。親局から各子局にパケットを送信する。親局からのパケットは伝送遅延時間  $T_d$  後に子局に届く。子局では、親局からのパケット受信タイミングと自端の送信タイミングから  $TS$  を算出する。同様に、親局でも子局からのパケット受信タイミングと自端の送信タイミングから  $TM$  を算出する。  $TM - TS$  が親局と子局のサンプリングタ

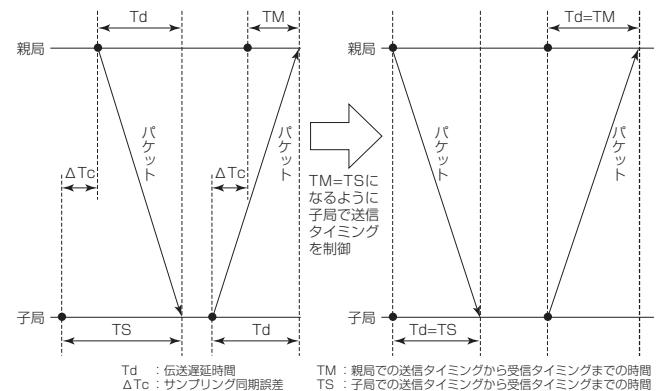


図 6. サンプリング同期制御

タイミングの差となるため、子局で  $TM = TS$  になるように送信タイミングを制御し、各局の同期をとる。

このサンプリング同期方式は従来の送電線保護リレーシステムと同様であるが、イーサネットはパケット通信であるため、パケットの衝突、渋滞及び通信装置の遅延時間変動などを考慮する必要がある。このシステムでは次の(1)～(3)を実施することによって、電流差動リレーに要求されるサンプリング同期誤差20μs以下<sup>(2)</sup>の性能を確保している。

(1) 通信速度 1 Gbps

送電線保護リレー装置が使用するデータ量に対して通信路の十分な帯域を確保するために、L2スイッチの通信速度を1 Gbpsとする。

## (2) VLANによるグループ分け、及び優先度設定

送電線保護リレー装置から出力するパケットにVLANタグを付加することによって、他ネットワークからのデータを分離し、パケットの衝突、渋滞を軽減する。また、一定間隔で出力する時刻同期用データを付加したパケットの優先度を上げることによって、同期精度を向上させている。

### (3) サンプリング同期制御の平均化

ネットワークの負荷状況が変化して一時的に伝送遅延時間が変動することを想定して、複数回の計測結果でサンプリング同期制御の補正值を決定する。

## 2.4 2系列構成の通信ネットワーク

このシステムでは、1か所の伝送不良が発生した場合でも送電線保護リレーシステムが継続して運用可能なように、光ファイバケーブル及びL2スイッチを2系列構成としている。電流差動演算は1系列としており、1系受信データと2系受信データのいずれか伝送不良がない系列の受信データを演算に用いる。伝送不良が発生すると、瞬時に健全なもう片方の受信データを使用する方式としている。図7に、通信ネットワーク2系列構成に関係する送電線保護リレーシステムの処理を示す。送電線保護リレーに入力された電流は、アナログ入力部でサンプリング信号のタイミングで取り込まれた後、アナログ/デジタル変換回路でデジタル変換される。デジタル変換された電流データは1系送信回路、2系送信回路を介して他電気所へ送信される。他

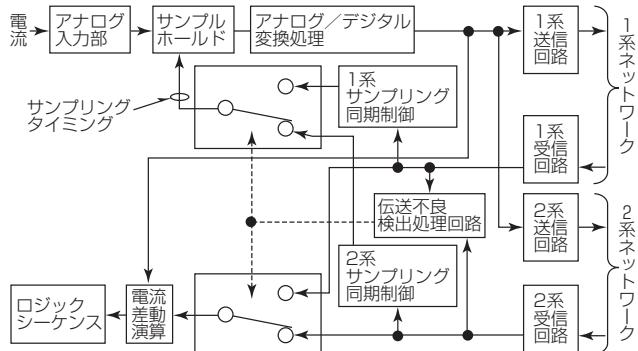


図7. 伝送不良時の切換え回路

電気所から受信したパケットは1系受信回路、2系受信回路に取り込まれた後、伝送不良検出回路に入力される。伝送不良検出回路では、パケット内のデータ誤りを検出するためのCRC符号の検定・パケット受信間隔の確認等を行うことで、受信パケットの健全性を判定する。この判定結果から、次回の電流差動演算に1系受信データ、2系受信データのいずれを使用するかを瞬時に切り換える処理を実施している。なお、サンプリング同期制御は1系、2系個別に設けて常にサンプリング同期補正值を算出しているが、アナログ入力部は1系列のため、電流差動演算と同様に1系、2系のどちらのサンプリング同期制御の補正值を使用するかを切り換える処理を実施している。この切換え処理によって、伝送不良が発生した場合でも電流差動演算に用いるデータ及びサンプリング同期制御を瞬時に切り換えることが可能であり、送電保護リレーの動作は遅延しない。

### 3. 検証結果

#### 3.1 サンプリング同期制御試験

今回開発した保護リレーシステムを用いて、サンプリング同期制御の確認試験を実施した。試験時のシステム構成を図8に示す。送電線保護リレーシステムは5端子構成として、2系列の光ファイバケーブル・L2スイッチで検証試験を実施した。イーサネットはパケット通信であるため、ネットワークに流れるデータ量によってパケットの衝突・渋滞及び遅延時間変動などが発生する。そのため、伝送負荷発生装置によって、ネットワークに負荷を印加した場合について検証を実施した。伝送負荷発生装置からL2スイッチに通信帯域の100%の負荷を印加した場合でも、サンプリング同期性能の目標値である20μs以下を満足することを確認した。また、伝送遅延発生装置によって任意のパケットを0~5ms遅延させた場合にも、所望の性能を満足することを確認し、良好な結果を得た。

#### 3.2 総合動作試験

電力系統を模擬したリアルタイムシミュレータを用いて総合的な試験を実施した。ネットワークは図8の試験構成を適用している。図9に伝送不良と系統事故を同時に発生させた場合の試験結果を示す。系統事故の発生とともに、

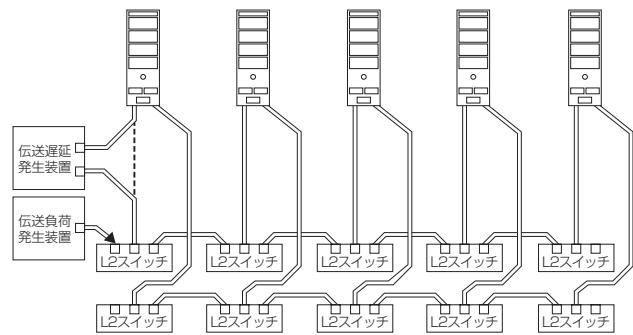


図8. サンプリング同期制御試験時のシステム構成

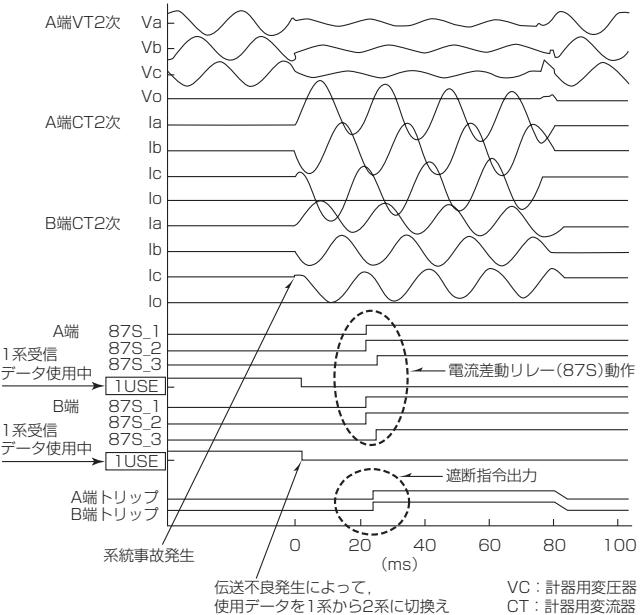


図9. 伝送不良と系統事故同時発生時の試験結果

使用する受信データを1系から2系に瞬時に切り換えることによって、送電線保護リレーの電流差動要素(87S, 87G)が遅延なく動作することを確認できた。

### 4. むすび

汎用のL2スイッチを2系列用いた通信ネットワークを適用した送電線保護リレーシステム及びその検証結果について述べた。従来は、専用の通信設備が必要であった送電線保護リレーシステムに、汎用のL2スイッチが適用可能であることを確認した。これによって、システム全体のコスト低減が可能となった。なお、このシステムは、国内電力会社向け保護リレー装置MELPRO-CHARGE 2シリーズを適用して製作しており、東京電力(株)に2015年5月に納入し、稼働中である。

### 参考文献

- (1) 匠田猛雄, ほか: 新型デジタルリレー“MELPRO-CHARGE 2”, 三菱電機技報, 86, No.9, 494~497 (2012)
- (2) 電気学会調査専門委員会: 保護リレーにおける通信利用技術の現状と高度化, 電気学会技術報告, 第1276号 (2013)

# 過渡安定度向上を目的としたSVG

SVG for Transient Stability Improvement

Kenji Masaki, Daisuke Yamanaka, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura

正城健次\* 西村和敏\*\*  
山中大輔\*  
貞廣光紀\*\*

## 要 旨

電力系統には、系統安定度や電圧変動といった系統問題がある。FACTS(Flexible AC Transmission Systems)機器は、安価で効率的に系統問題への対策が可能であり、最近では、様々な系統問題を解決する手段として、FACTSの適用が広がっている。

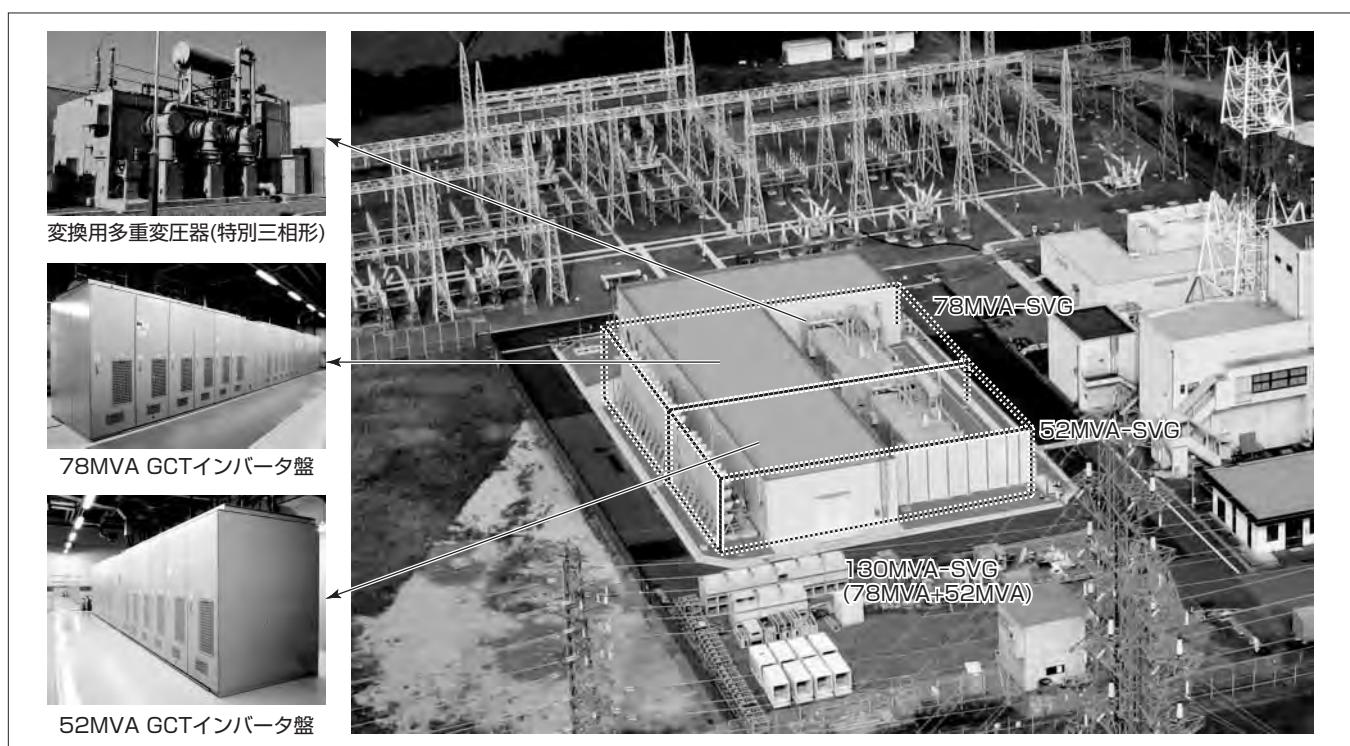
三菱電機は、1991年に世界で初めて静止型無効電力補償装置SVG(Static Var Generator)<sup>(注1)</sup>を関西電力(株)の犬山開閉所に納入した。このSVGの目的は、水力幹線系統の定態安定度の向上であった。その後、関西電力(株)神崎変電所に電圧安定性の向上を目的としたSVGを設置した。

近年、電力会社では経済性や供給信頼性を考慮した送電系統の再構築が行われ、三菱電機はその中で生じる様々な系統問題を解決する手段として、より高度な系統要求である過渡安定度向上機能で事故時の発電機脱調防止を可能にするSVGを開発した。

2013年に三菱電機は世界に先駆けて過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGを関西電力(株)犬山開閉所に納入した。

定態安定度向上に対する冗長性を持つ78MVA-SVGと52MVA-SVGの2系並列システムである。SVGが連系する水力幹線系統を詳細に模擬したリアルタイムシミュレータで、系統事故時の過渡安定度向上性能検証試験を実施して、発電機の脱調を防止することを確認した。フィールド試験では、SVGによって定態安定度を向上させ、送電可能容量が全発電機連系時の最大潮流まで増加することを確認した。また、運転開始後に得られた系統事故時の実測波形から、SVGが良好な運転継続性能を持ち、適正に動作することを確認した。

(注1) SVGを欧米ではSTATCOM(STATIC synchronous COMPENSATOR)と称する。



## 関西電力(株)犬山開閉所の130MVA GCT-SVG

定格容量130MVAのSVGであり、2013年6月から運用を開始している。GCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタを適用したインバータをPWM(Pulse Width Modulation)制御して、無効電力を進相から遅相まで高速かつ連続に補償することができる。この装置には、無効電力補償によって定態安定度を向上させる従来機能に加え、系統事故による発電機脱調を防止する過渡安定度向上機能を世界で初めて搭載しており、水力幹線系統の安定化に寄与している。

## 1. まえがき

三菱電機は、関西電力株式会社犬山開閉所に水力幹線系統の定態安定度の向上、送電可能電力量の増大を目的として、1991年に80MVAのSVGを世界で初めて納入し、水力エネルギーの安定供給に20年以上寄与してきた。

近年、経済性や供給信頼性を考慮した送電系統の再構築が行われ<sup>(1)</sup>、その中で、系統の様々な問題を解決する手段として、安価で効率的に対策が可能なSVGに対する要求も高度化し、新たに過渡安定度の向上による事故時の発電機脱調防止が期待されていた。

三菱電機は、従来の系統要求である定態安定度向上に加え、より高度な系統要求である過渡安定度向上を可能にするSVGを開発し、関西電力株式会社犬山開閉所の80MVA-SVGを世界初の過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGに更新した。

本稿では、その過渡安定度向上SVGについて、システム仕様、主回路技術、過渡安定度向上制御技術、電力系統シミュレータによる検証試験、系統連系試験、運転開始後の系統事故時の運転実績について述べる。

## 2. システム概要

### 2.1 目的

SVGが設置されている水力幹線系統は、図1のように水力発電所群からの潮流が154kV長距離送電線を介して約250km離れたB変電所、C変電所まで送電される。そのため、重潮流時は定態安定度が厳しくなり、発電機全台分の出力が送電できなくなる。また、重潮流時は過渡安定度も厳しくなり、154kV系統以外での過酷な系統事故に対して発電機が脱調するおそれがある。

これらの系統問題を解決するため、系統解析によって定態安定度向上及び過渡安定度向上に必要となるSVGシステムを求めたところ、過渡安定度向上に130MVA-SVGが必要であるため、定態安定度向上に対する冗長性を考慮して78MVA-SVGと52MVA-SVGの2系並列システムを導入

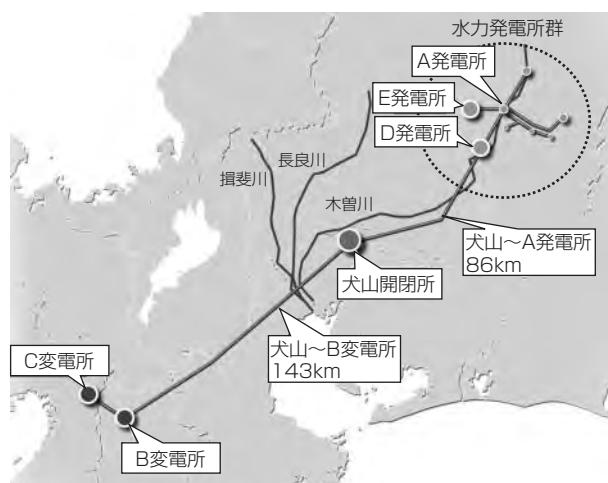


図1. 水力幹線系統

することとした<sup>(2)</sup>。また、SVG設置場所は、定態安定度及び過渡安定度の向上に最も効果的な基幹系統と水力発電機群の電気的中間地点に当たる犬山開閉所とした。

### 2.2 主回路構成

130MVA-SVGの主回路構成を図2に示す。主回路は単相3レベルインバータを適用し、多重変圧器で直列接続している。78MVA-SVGは3段直列多重構成、52MVA-SVGは2段直列多重構成であり、それぞれ多重変圧器で154kV系統と接続している。主回路素子にスナバレスの大容量6kV-6kA GCTサイリスタを用いることで、高信頼性、コンパクト化、低損失を実現することができる。表1に過渡安定度向上SVGの主な仕様を示す。

### 2.3 過渡安定度向上制御

#### 2.3.1 基本構成

図1の水力幹線系統は送電距離が長いため、重潮流時は同期化力と制動力が弱くなる。そのため、定態安定度と過渡安定度が低くなり、それらを向上させるためには系統の同期化力と制動力を向上させる必要がある。

そこで、SVGの系統制御の基本構成は、図3に示すように系統の同期化力向上を図るAVR(Automatic Voltage Regulator)制御、制動力向上を図るPSS(Power System Stabilizer)制御及び重潮流時に所定の無効電力を出力して定態安定度向上と送電ロス軽減を図るQバイアス制御で構成した<sup>(3)</sup>。

#### 2.3.2 過渡安定度向上制御

AVR制御とPSS制御によって過渡安定度が向上するが、更に過渡安定度を向上させるために系統事故時の系統状態

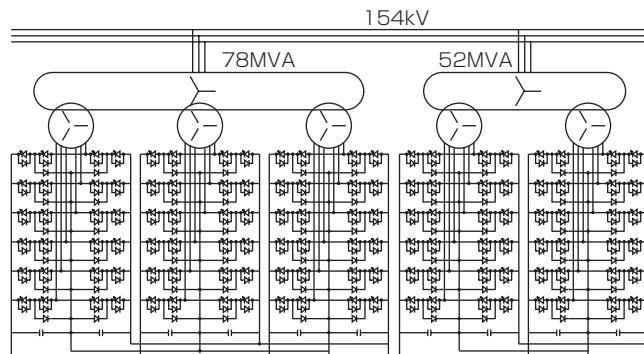


図2. 主回路構成

表1. 過渡安定度向上SVGの主な仕様

系構成	78MVA側	52MVA側
定格容量	$\pm 130\text{MVA}$ (78MVA+52MVA)	
定格交流電圧	154kV	
インバータ仕様	素子 3レベル×三相×3段	3レベル×三相×2段
	PWM制御 5パルス	
	定格交流電圧 3,846V(相電圧)	
	定格交流電流 2,253A	
	定格容量 1次: 78MVA 2次: 26MVA×3段	1次: 52MVA 2次: 26MVA×2段
多重変圧器 変換用	結線 1次: 星型, 2次: 開放星型	
	定格電圧 1次: 154kV, 2次: $3,846\text{V} \times \sqrt{3}$	

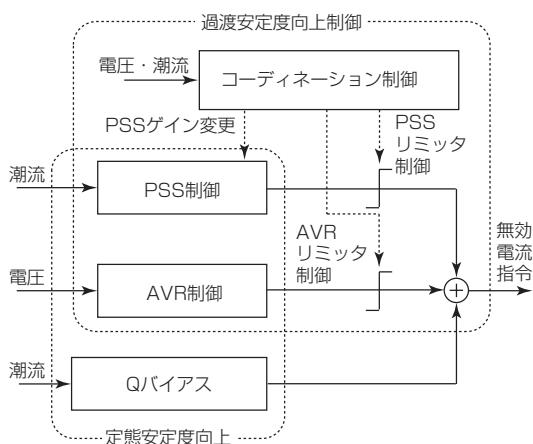


図3. 過渡安定度向上の制御方式

に応じてAVR制御とPSS制御の協調を図るコーディネーション制御を採用した。

まず過渡安定度向上の対象となる系統事故を検出すると、系統事故中のPSS制御出力を制限して、系統事故中のSVGの無効電力出力をAVR制御が支配することで同期化力向上効果を高め、過渡一波脱調を防止する。

さらに、重潮流で過渡安定度が厳しい系統断面では、事故が除去された後は、AVR制御及びPSS制御のリミッタを調整するとともに、更に制動力を向上させるため、PSSゲインを上げる。二波目以降の系統動搖に対してPSS制御による制動力向上効果を高めることで発電機の脱調を防ぐ。

このSVGでは、このようなコーディネーション制御によって過渡安定度向上効果を最大限に高めている。

### 3. 性能検証試験

#### 3.1 シミュレータ試験

図1の水力幹線系統を詳細に模擬したリアルタイムシミュレータに130MVA-SVGミニモデルを接続し、様々な系統事故を発生させたときのSVGの動作を検証した<sup>(4)</sup>。図4にシミュレータ試験構成を示し、図5に安定化対象事故のうち最過酷事故時のシミュレータ試験結果を示す。

系統事故が発生すると、SVGはコーディネーション制御によってPSS制御の出力を制限し、AVR制御による同期化力向上効果を高め、進相無効電力をフル出力して過渡一波脱調を防止している。事故が除去されると、AVR制御、PSS制御のリミッタが大きく開くとともにPSSゲインを高くすることで制動力向上効果を高め、二波目以降の系統動搖を抑えて発電機の脱調を防止できていることが分かる。また、事故中、SVG接続母線電圧は0.7pu程度まで低下しているが、SVGはGB(Gate Block)せず運転継続しており、過渡安定度向上効果が確認できた。

#### 3.2 系統連系試験

系統連系試験では、送電容量の向上確認試験や1回線開放時の系統動搖抑制試験を行い、SVGによる定態安定度向上効果を確認した<sup>(5)</sup>。

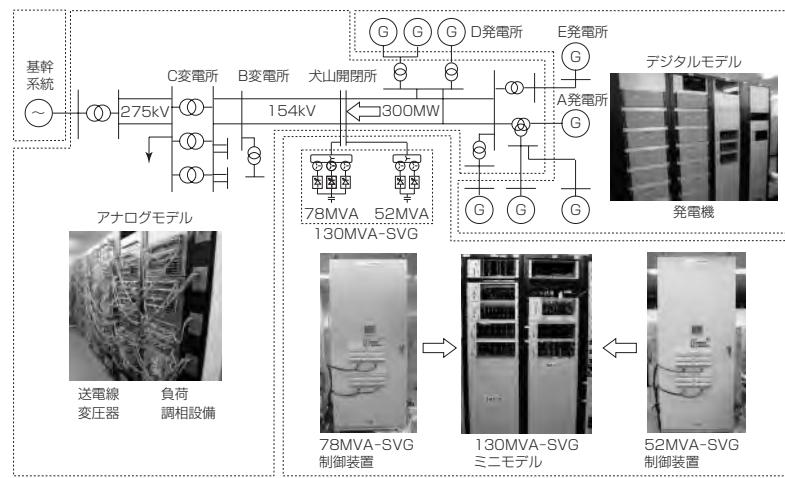


図4. シミュレータ試験の構成

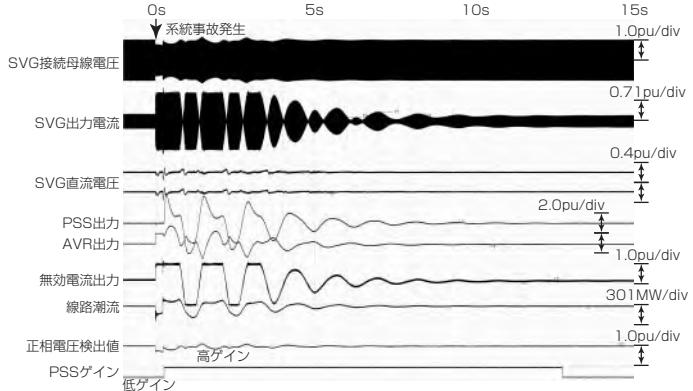


図5. シミュレータ試験の結果

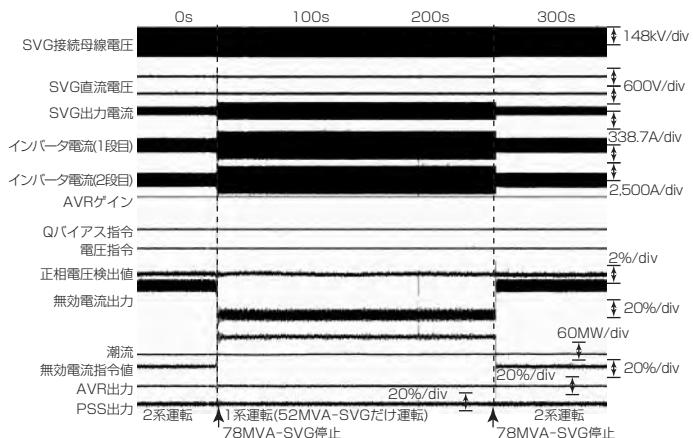


図6. 送電容量向上確認試験の結果

#### 3.2.1 送電容量向上確認試験

図1に示す水力発電機群からC変電所までの送電線を全て2回線として水力発電機群の出力を徐々に増加させ、安定して送電できる電力の限界値がSVGによって水力発電機群の全台定格出力時の最大潮流まで増加することを検証した。最大潮流時の試験結果を図6に示す。

最大潮流でも系統電圧や潮流、SVGの無効電流出力は安定であり、SVGによって定態安定度が向上して最大潮流まで送電容量を向上できることを確認した。容量が小さい52MVA-SVGだけで定態安定度を維持できるため、冗長性も確認できた。

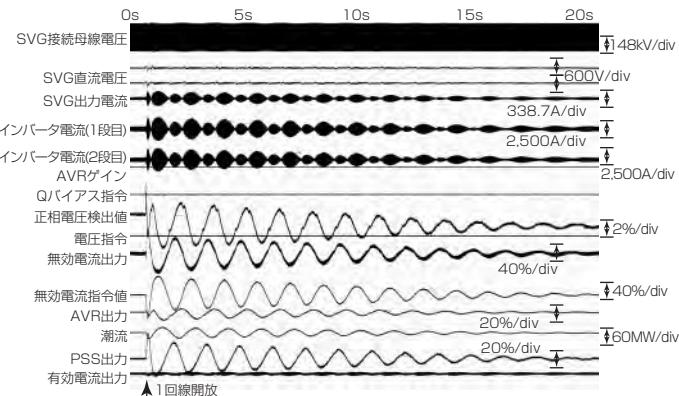


図7. 系統動揺抑制効果確認試験の結果

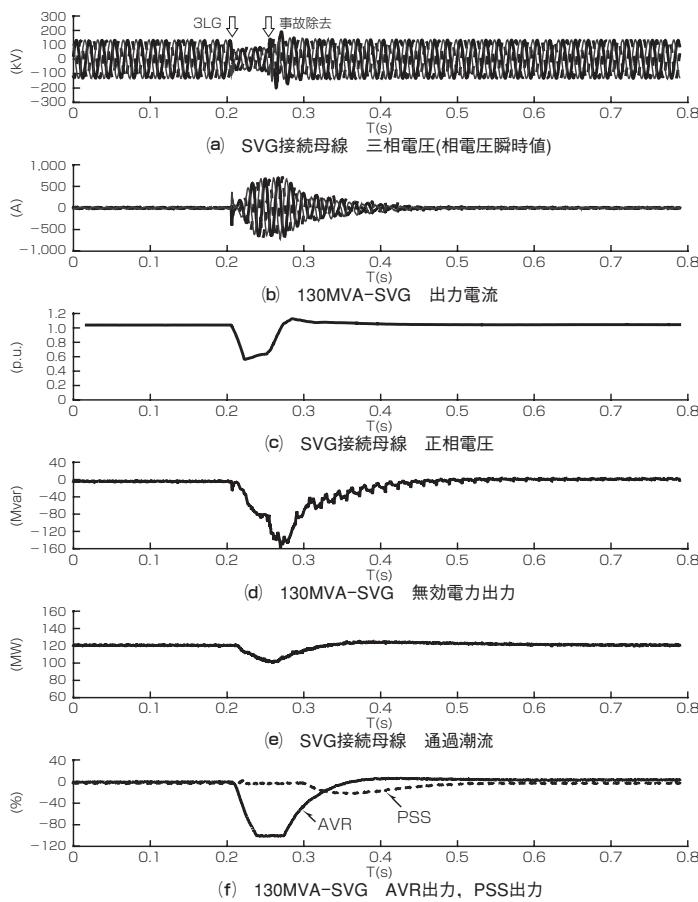


図8. 1回線三相地絡事故時の実測結果

### 3.2.2 系統動揺抑制効果確認試験

犬山開閉所からB変電所までの送電線を1回線開放して系統に動揺を発生させ、その動揺をSVGが十分抑制して定態安定度を維持することを検証した。SVGは2系のうち容量の小さい52MVA-SVG 1台の運転とした。試験結果を図7に示す。

1回線開放によって系統インピーダンスが急増し、水力発電機群の相差角が拡大して系統動揺が発生する。SVGがない場合は、系統の同期化力と制動力が不足して脱調にいたるケースであるが、52MVA-SVGで動揺が抑制されて1回線停止時の定態安定度を確保することが確認できた。

### 4. 運転実績

130MVA-SVGは、2013年6月から運転が開始され、一相地絡事故、二相地絡事故、三相地絡事故といった様々な系統事故の実測波形が得られた<sup>(6)</sup>。図8にB変電所からC変電所までの送電線で発生した1回線三相地絡事故時の実測波形を示す。

三相地絡事故でSVG接続母線電圧は60%以下まで低下したが、事故発生時や除去時の急峻(きゅうしゅん)な電圧変化にも耐え、SVGはGBせず運転を継続した。

SVGは、系統事故を検出すると、系統事故発生から除去までの間、コーディネーション制御でPSS制御出力を制限している。AVR制御で系統事故による電圧低下を抑制するために、SVGは安定に進相無効電力100%出力を実行しており、事故中の系統電圧を10%程度高めている。SVGは、復電を検出すると二波目以降の系統動揺に備え、PSS制御の制限を解除して系統の制動力向上を図っている。

130MVA-SVGが良好な運転継続性能を持ち、かつ過渡安定度向上制御が適正に動作することを確認できた。

### 5. むすび

世界初の過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGに適用した技術及びその性能検証について述べた。

電力系統を取り巻く環境の変化に伴い顕在化する系統問題に対して、SVGなどのFACTS機器はますます重要な役割を担うことが期待される。

### 参考文献

- (1) Yagi, M., et al: Methodology of Power System Redesign Aimed at Reducing Capital Investment and Maintenance Costs for Aged Assets, Proc. of 2006 CIGRE, C1-107 (2006)
- (2) 松下義尚, ほか: 過渡安定度向上機能を有する130MVA-SVG設置計画, 平成25年電気学会電力エネルギー部門大会論文集, 152 (2013)
- (3) 岩崎慎也, ほか: 130MVA-SVGの制御方式検討, 平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 153 (2013)
- (4) 今西隆夫, ほか: 過渡安定度向上SVGの制御装置検証試験, 電気学会電力技術研究会資料. PE, No.110, 1~4 (2013)
- (5) 藤井俊成, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)の運転前試験その2~系統連系試験~, 平成26年電気学会全国大会講演論文集, 6-187 (2014)
- (6) 今西隆夫, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)における系統事故時の運転実績, 平成26年電気学会電力エネルギー部門大会講演論文集, No.111 (2014)

# 関西電力(株)犬山開閉所向け SVG用変圧器の完成

中嶋陽一\* 貞廣光紀\*\*  
西田 剛\* 西村和敏\*\*  
東 武志\*

Completion of Transformer for SVG(STATCOM) in Inuyama Switching Station of Kansai Electric Power Company, Inc.  
Yoichi Nakashima, Tsuyoshi Nishida, Takeshi Higashi, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura

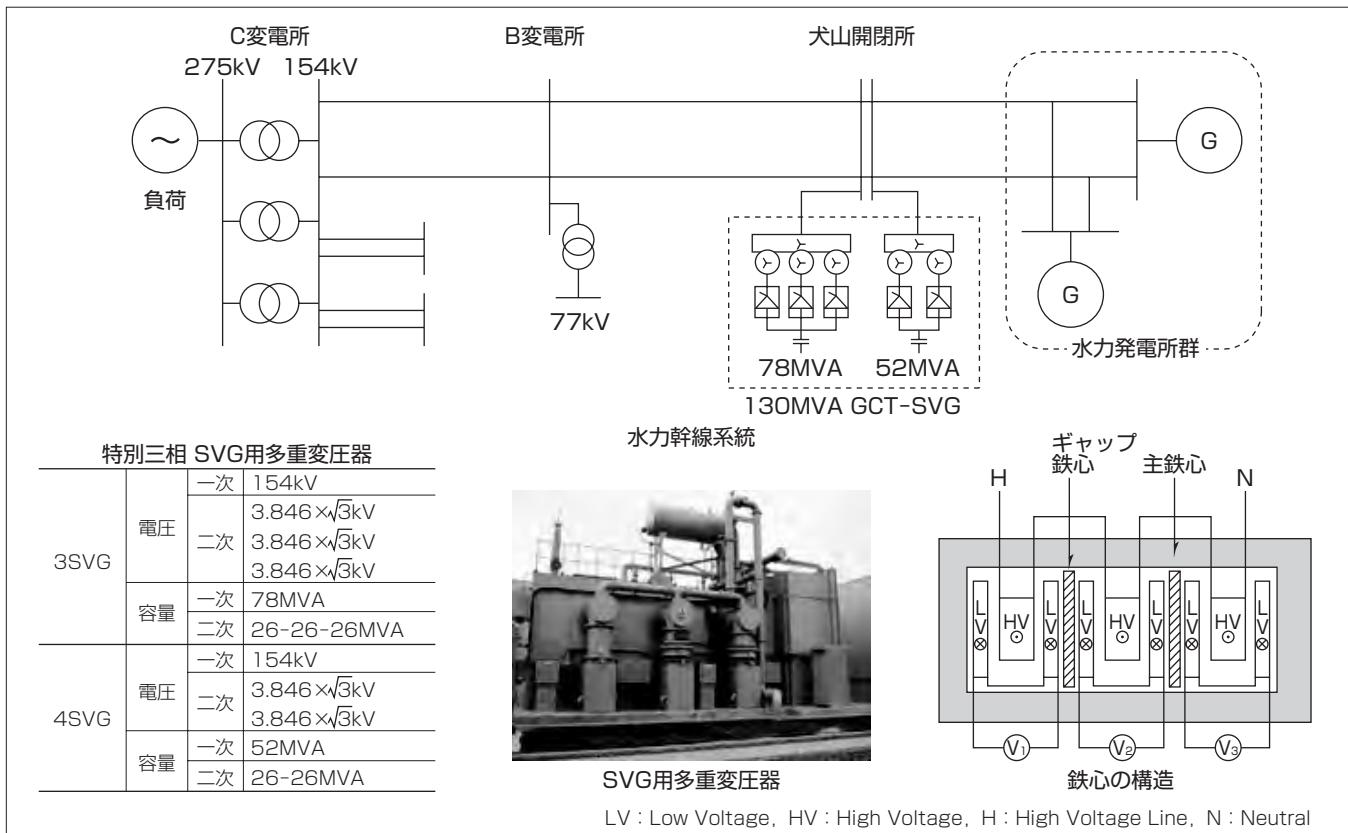
## 要 旨

関西電力(株)犬山開閉所では、系統の安定度向上を目的に、1991年から運用していた80MVA GTO(Gate Turn-Off)-SVG(Static Var Generator)<sup>(注1)</sup>から過渡安定度向上機能を付加した130MVA GCT(Gate Commutated Turn-off)-SVGへ更新し、2013年6月から運転を行っている。

SVGシステムは、系統の監視及び無効電力の供給を調整するインバータ制御装置と、系統電圧へ昇圧するSVG用変圧器から構成されている。今回のSVGシステムは、3段多重構成78MVA-SVGと2段多重構成52MVA-SVGの2系並列のシステム構成であるため、SVG用変圧器を

2種類納入した。SVG用変圧器は、一般的な変圧器と異なり商用周波数波形ではなく矩形(くけい)波の電圧が印加されるため、技術的な課題も一般的な変圧器とは異なる。さらに、変圧器の低圧側に接続されるインバータが複数あるため、インバータの出力を同時に系統へ供給するには、複数の変圧器を設けるか、又は同一鉄心内に複数の巻線を配置する多重変圧器とする必要がある。今回は、三菱電機製外鉄形変圧器の巻線配置の特長を生かしてコンパクトに仕上げるために、多重変圧器を採用した。

(注1) SVGを欧米ではSTATCOM(STATic synchronous COMPensator)と称する。



## 関西電力(株)犬山開閉所向けSVG用変圧器

定格容量78MVAと52MVAのSVG用変圧器を関西電力(株)犬山開閉所に納入した。同一鉄心内に複数の巻線を配置する多重変圧器を採用し、コンパクト化を図った。2013年6月から運用を開始している。

## 1. まえがき

SVG用変圧器は、低圧側から印加される複数の矩形波を高圧側で合成し、正弦波に近い波形を得る(図1)。そのため、インバータ1台に対して1組の低圧巻線と高圧巻線が必要である。したがって3段多重構成の場合は3組の低圧巻線と高圧巻線が必要であり、2段多重構成の場合は2組の低圧巻線と高圧巻線が必要である<sup>(1)(2)</sup>。さらに、SVG用変圧器特有の要求仕様と印加波形に含まれる高調波に対する対策も必要である。

本稿では、矩形波の電圧が印加されることによる様々な技術課題に対してどのように対処したか、及び外鉄形変圧器が多重変圧器にどのような利点を持っているかについて述べる。

## 2. SVG用変圧器への技術的要件

### 2.1 仕様面の要求

SVG用変圧器に要求される機能は、①1組ごとの低圧巻線と高圧巻線間のインピーダンスが各組とも同じであることと、②それぞれの低圧巻線間のインピーダンスを大き

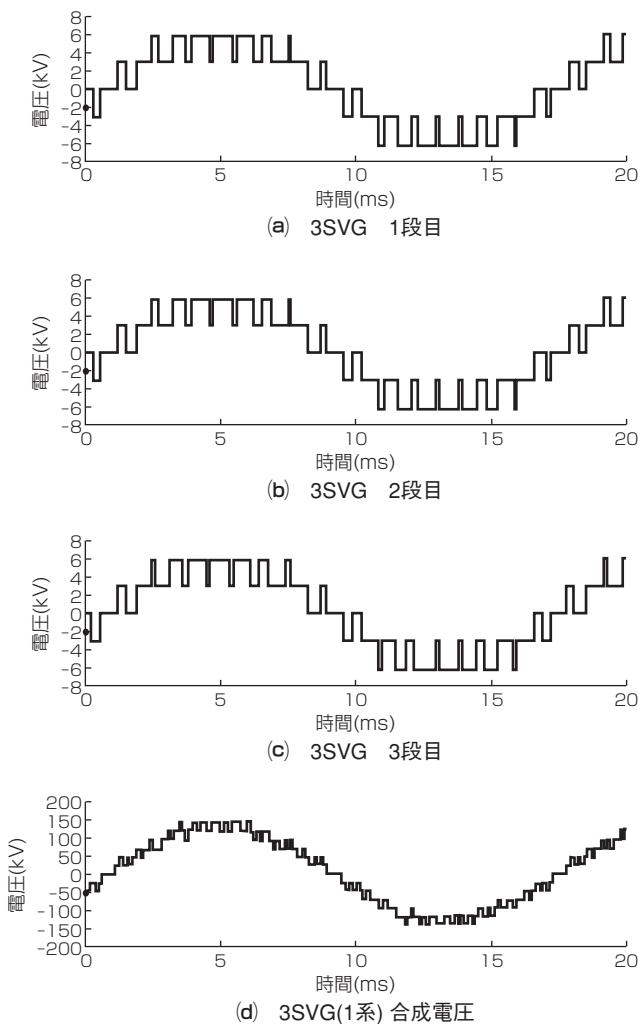


図1. 多重変圧器の矩形波の合成

くすることである。①は、各組のインピーダンス電圧を同じにするためである。②は、SVG用変圧器は低圧巻線に印加される矩形波が各段によって異なるため、その電位差によって低圧巻線間に循環電流が流れ、この循環電流が大きいとインバータへ悪影響を及ぼすためSVG用変圧器では低圧巻線間のインピーダンスを大きくすることが要求される。これらの2つの機能を満足する手法の1つとして、1組ごとの低圧巻線と高圧巻線に鉄心を分離する方法がある(図2)。しかし、この方法では質量・設置面積・コストが過大になる。そこで、今回のSVG用変圧器では外鉄形変圧器の特長を生かし、低圧巻線と高圧巻線の組みを複数重ね合わせる構造を採用した(図3)。外鉄形変圧器では、多重化は低圧巻線と高圧巻線の組みを複数重ね合わせることで容易に可能である。これは、外鉄形変圧器が内鉄形変圧器のように円筒形巻線を同心円状に組み合わせる構造ではなく矩形平板の巻線を重ね合わせる構造で、複数の巻線を同一鉄心で構成しても容易にインピーダンスを合わせることが可能なためである。また、低圧巻線間のインピーダンスを大きくするために、ギャップ鉄心と呼ばれる構造(図3)を採用している。ギャップ鉄心を低圧巻線と高圧巻線の組みの間に挿入することで、それぞれの低圧巻線間のインピーダンスを大きくできる。この構造を採用することで、鉄心を分離する構造と比較して据付面積が約40%，質量が約20%削減可能となった。

### 2.2 矩形波の電圧印加による技術的課題と対策

商用周波数波形ではなく、矩形波の電圧が印加されることによる変圧器の技術的課題は、①無負荷損失の増加、②漂遊損失の増加、及び③騒音の増加の3点が挙げられる。

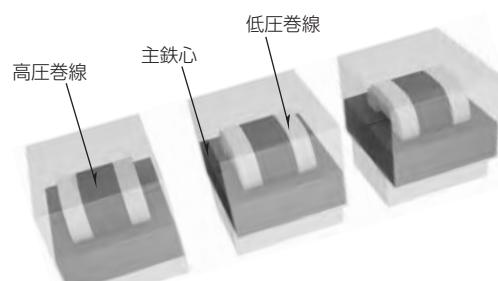


図2. 分離鉄心を採用した構造(1相分)

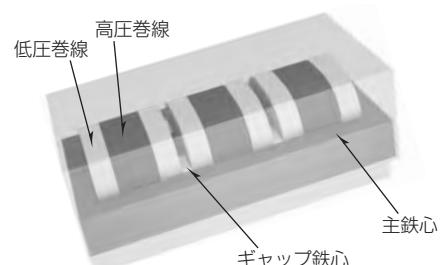


図3. ギャップ鉄心を採用した構造(1相分)

①は“周波数に比例して磁束密度の約2乗に比例するヒステリシス損失”と“周波数の2乗に比例して磁束密度の2乗に比例する渦電流損失”的和で構成される。矩形波は、商用周波数波形と比較して高調波成分が多量に含まれているため、それら高調波が無負荷損失に及ぼす影響を考慮する必要がある。今回の多重変圧器では、過去のモデル試験で得られたデータを基に無負荷損失の増加率を推定し、損失設計と冷却設計に反映させた。

②は変圧器の巻線に電流が流れると生じる磁束が巻線やタンクなどの金属構造物に鎖交することで生じる損失であり、巻線に流れる電流の“周波数の約2乗”と“絶対値の約2乗”に比例する。SVG出力電流のFFT(Fast Fourier Transform)結果の例を図4に示す。高調波電流の各次含有率は1%以下と基本波に対し十分小さいものの、40次以上の高次高調波を含んでいるため漂遊損失に及ぼす影響は無視できない。そのため、漂遊損失は、SVG出力電流に含まれる各高調波電流を解析し、それぞれの周波数ごとに漂遊損失を計算した。この漂遊損失の増加も、損失設計と冷却設計に反映させた。

③は主鉄心の磁歪(じわい)現象によって発生する励磁騒音と通電時に巻線に発生する電磁力によって発生する電磁騒音がある。SVG用変圧器では、高調波電流の絶対値は基本波電流と比べて非常に小さいため電磁騒音の増加は無視できるレベルであるが、インバータ電圧に含まれる高調電圧の各次含有率は10%程度の大きさを持っているため、励磁騒音の増加は無視できない。高調電圧の含有率の一例を図5に示す。

今回のSVG用変圧器に印加される波形が励磁騒音に及ぼす影響を検証するため、図6に示す変圧器のミニモデルを製作し、印加波形の違いによる騒音値の変動を検証した。その結果、商用周波数波形の印加時と比較して騒音が増加

することが確認された。また、測定した騒音波形から周波数特性を解析した結果を図7に示す。図から、高周波領域(約1,200Hz以上)で騒音が増加することを確認した。高周波領域の騒音増加対策として、今回のSVG用変圧器では防音タンク構造を採用した。防音タンクの効果は周波数が高い領域で顕著になるため、防音タンク構造の採用によって高周波領域の騒音増加を抑えている。

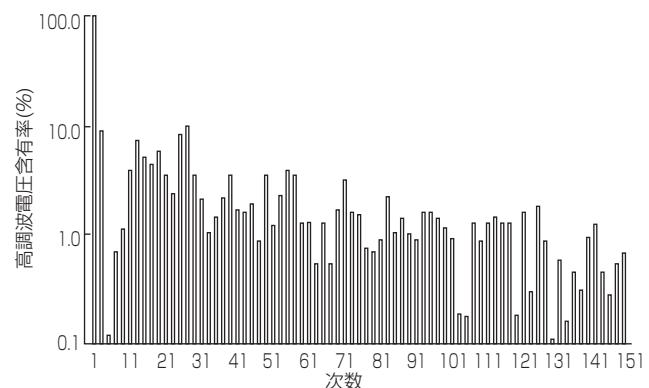


図5. インバータ電圧に含まれる高調波電圧含有率

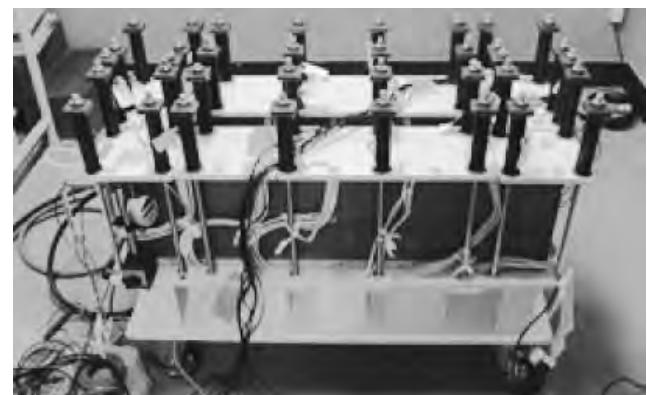


図6. 騒音検証用変圧器のミニモデル

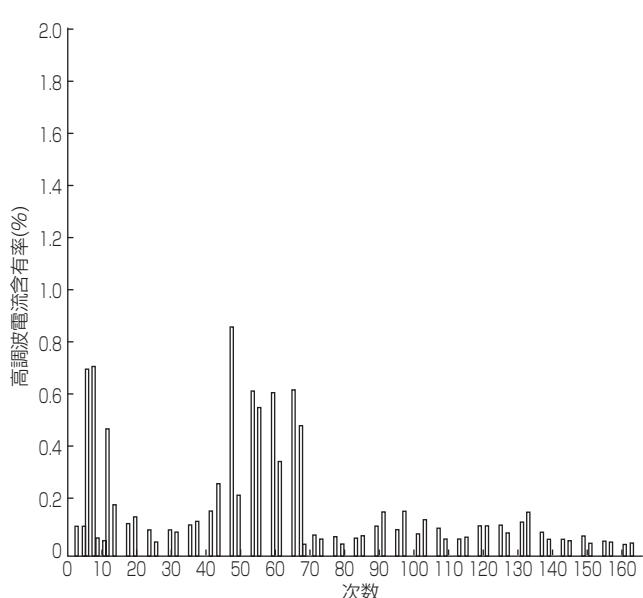


図4. SVG出力電流に含まれる高調波電流含有率

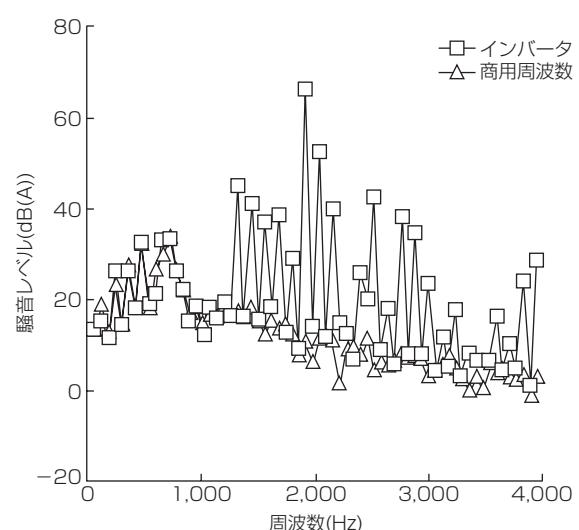


図7. インバータ波形と商用周波数波形の騒音特性比較



図8. シキ1000形貨車の3両連結輸送形態



図10. 基礎据付状態



図9. 低床トレーラーでの変圧器輸送

### 3. 変圧器の輸送と据付け

大型変圧器の据付地までの輸送は、据付地の最寄り港まで海上輸送して、最寄り港から低床トレーラーに積み替えて輸送する方式が一般的である。しかし、今回の犬山開閉所は内陸に所在しているため、最寄り港から据付地までの距離が長いという問題があった。そこで、開閉所の最寄り駅まで貨車輸送する方式を採用した。変圧器を貨車輸送する場合、トンネルや駅構内を通過するため輸送寸法(高さと幅)に制約が発生する。また、最寄り駅から現地まではトレーラー輸送が必要であり、今回は特別三相方式を採用した。

特別三相方式とは、単相構造の変圧器を上部タンクで一体化する方式である。主な利点は、普通三相方式と比較して輸送質量及び寸法の縮小が可能であり、さらに、単相方

式と比較して据付面積の縮小が可能なことが挙げられる。

最寄り駅まで輸送する貨車は、シキ1000形貨車を採用した。シキ1000形貨車は同時に3両まで連結して運行することが可能であるが、1両当たり55tという積載質量制約がある。今回の変圧器は、質量低減設計を実施することで55t以下を満足した。図8にシキ1000形貨車を3両連結編成した輸送形態を示す。

最寄り駅から開閉所までは図9に示すような低床トレーラーを利用し、変圧器を1相ずつ夜間輸送した。

低床トレーラーで据付地まで輸送された変圧器は、コロ引き工法で基礎上まで運ばれ、ジャッキアップ方式で基礎上に配置された。図10に基礎へ据付後の変圧器の状態を示す。基礎に据え付けた後は、上部タンク・防音タンク及び外装品を取り付け、変圧器の据付を完了した。

### 4. む す び

関西電力株犬山開閉所向けSVG用変圧器の構造的特徴とSVG用変圧器特有の技術的検討内容について述べた。今後も系統安定化にSVGシステムが貢献していくものと思われる。その貢献を少しでも大きくできるよう、外鉄形変圧器技術の有効活用性を検討していきたい。

### 参考文献

- (1) 今西隆夫, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)における系統事故時の運転実績, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 111 (2014)
- (2) 岩崎慎也, ほか: ルート断による系統分離時の零相過電圧拡大および機器への影響に関する検討, 平成27年電気学会全国大会, 6-221 (2015)

中嶋陽一\*  
小林研二\*  
中島正貴\*

# 油入変圧器の保守軽減技術の動向

*Trends of Maintenance Mitigation Techniques for Oil-immersed Transformer*

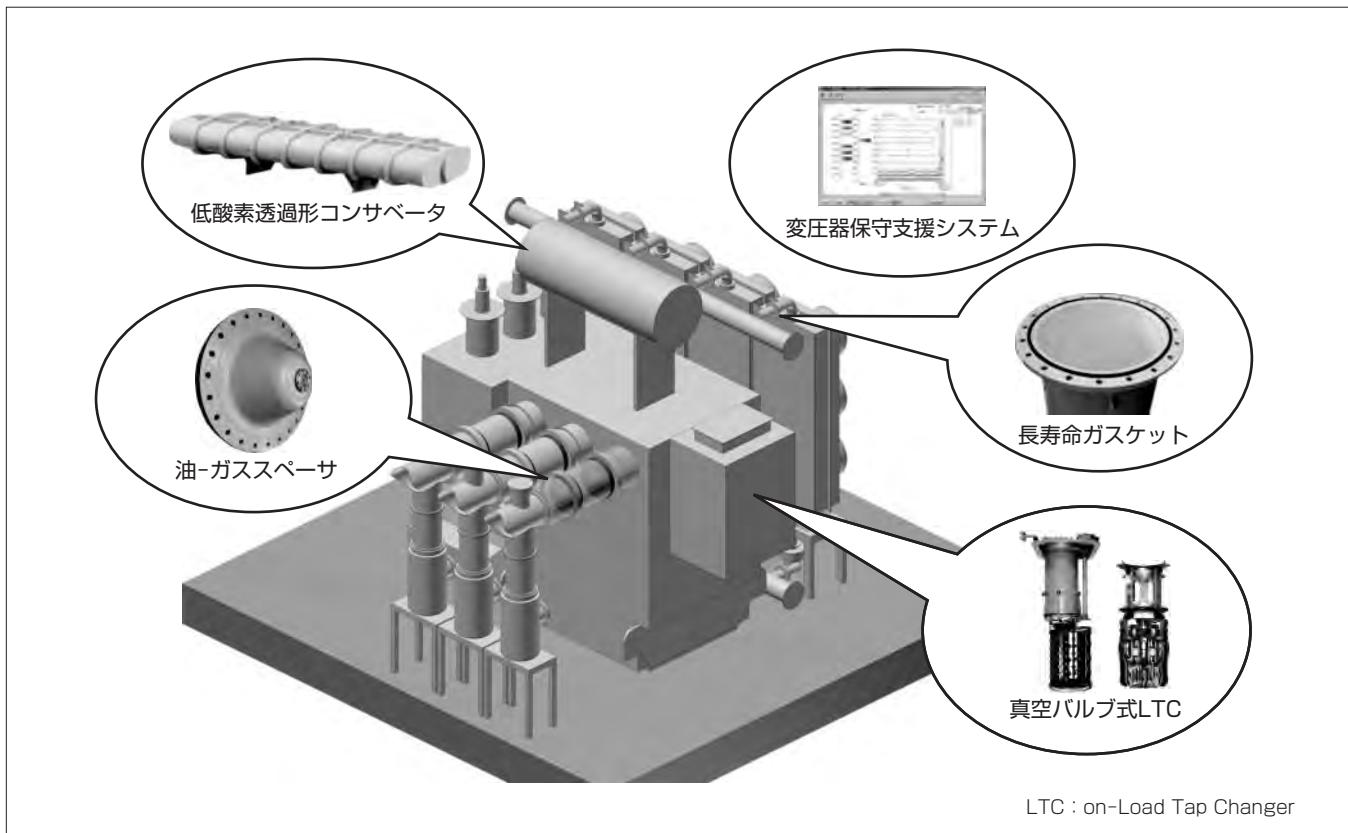
Yoichi Nakashima, Kenji Kobayashi, Masaki Nakajima

## 要 旨

変圧器は、電圧を変換する機能を持つ機器で、発電所や変電所に設置されており、電力流通で重要な役割を担っている。1970年代の高度経済成長期には電力需要の増加に伴い数多くの変圧器が設置されたが、昨今、これらの変圧器は高経年期を迎え、変圧器使用者は細密点検や部品の交換等の保守工事、又は変圧器全体の更新工事を行っている。

三菱電機は、変圧器使用者の各ニーズに応えるため、保守(部品交換やオーバーホール)による更なる使用期間の延

伸化やセンシング技術を導入した保守の軽減化を図っている。また、更新工事では別の場所で仮組みして既設器の撤去と並行して工事を進め、停止期間の短縮化を図るなどの技術開発に取り組んでいる。更新に際しては、将来の保守を見据え、新しく製造する変圧器に対して保守の軽減やインターバル延伸を図ることが可能な技術を納入当初から採用する事例も多い。



## 油入変圧器の保守軽減技術

油入変圧器の保守軽減やインターバル延伸を図ることを可能にした各種保守軽減技術を示す。

## 1. まえがき

油入変圧器を長期にわたり使用するためには、適切な保守を適切な時期に行う必要がある。当然、保守には多くの費用と時間(停止期間)が必要であるため、変圧器使用者からはこれらを削減するニーズが高い。そのため、当社では保守の軽減やインターバルの延伸を図ることが可能な新しい技術開発に取り組んでいる。

本稿では、油入変圧器の昨今の保守軽減、及び長寿命化に関する技術動向について述べる。

## 2. 長寿命ガスケット

### 2.1 ガスケットの現状

油入変圧器は、冷却と絶縁のためにその内部は絶縁油で満たされているが、変圧器のタンク接合部や油配管接合部の各所には、油密性を保つためガスケットを使用している。現在、フィールドで使用されている経年変圧器にはコルク製やニトリルゴム製のガスケットが多く使用されているが、ガスケットは変圧器が運転される過程で紫外線や雨水、運転中の温度によって経年劣化していく<sup>(1)</sup>。劣化が進展すればガスケットのシール性能の低下につながり、接合部からの漏油発生の可能性が増大する。漏油を未然に防止するには劣化したガスケットを取り替えれば良いが、ガスケットの取り替えには数か月の工期と停電期間を要するため、実際のところ容易ではない。そのため、新たに製造する変圧器では、保守のインターバルを延伸するために耐熱性と耐候性に優れたフッ素ゴムガスケットが採用されている。

### 2.2 フッ素ゴムガスケット

長寿命化・保守軽減が期待できるフッ素ゴムガスケットは、耐熱性や耐候性だけでなく機械的特性も優れている。例えば、耐熱性ではニトリルゴムの耐熱温度120℃に対してフッ素ゴムは250℃と優れています。変圧器の使用温度域60℃で従来のニトリルゴムガスケットと比べて約3倍の寿命が期待できる。また、機械的特性に関しては圧縮永久歪率、引張強さともにニトリルゴムと同程度以上の特性を持っている。これによって、これまでニトリルゴムガスケットでは15年ごとに取り替えが必要であったが、フッ素ゴムガスケットの採用によって約3倍の取替え周期の延伸を可能とした。

## 3. 油-ガススペーサ

変圧器とガス開閉装置(GIS)を接続する場合には、従来主に油-ガスブッシングが用いられてきた。この油-ガスブッシングの代わりとして、当社はエポキシ樹脂製の油-ガススペーサを開発した。油-ガススペーサは、当社が30年以上にわたり蓄積した変圧器用油-油スペーサ技術とGIS用ガススペーサ技術を融合したもので、ブッシングと

は異なり保守が不要である。当社では、2014年に500kV及び220kV変圧器へ初適用して納入した。

### 3.1 油-ガススペーサの構造と特長

図1に油-ガススペーサの構造を、図2にその外観を示す。

油-ガススペーサは、次の特長を持っている。

- (1) 油-ガススペーサに適用している絶縁スペーサは、長年実績のあるGIS用のエポキシ樹脂製のスペーサを適用。
- (2) 万が一、油中間室で内部地絡事故が発生した場合、油中間室の破裂防止や変圧器側への影響回避の設計思想によって、GIS側の油-ガススペーサが変圧器側の油-油スペーサよりも先に破裂し、GISタンク内へ避圧する構造を採用し、事故時の早期復旧を考慮。
- (3) 油-ガススペーサは劣化進展の低いエポキシ樹脂製であるため、ブッシングと異なり内部診断が不要。

### 3.2 コンパクト化、保守省力化

表1に、従来の油-ガスブッシングと新開発した油-ガススペーサの比較を示す。油-ガススペーサの中間室を含む寸法は、従来の油-ガスブッシングと比較して約1/3にコンパクト化した。さらに、従来の油-ガスブッシングはブッシング内部絶縁物と絶縁油が経年劣化するため、健全性確認のために定期的な内部診断が必要であり、健全性確認の結果次第ではブッシングの取替えも必要となる。一方、油-ガススペーサは、適用しているエポキシ樹脂製の絶縁スペーサ自体は油-ガスブッシングに比べて劣化進展が低いため、保守点検は不要となる。

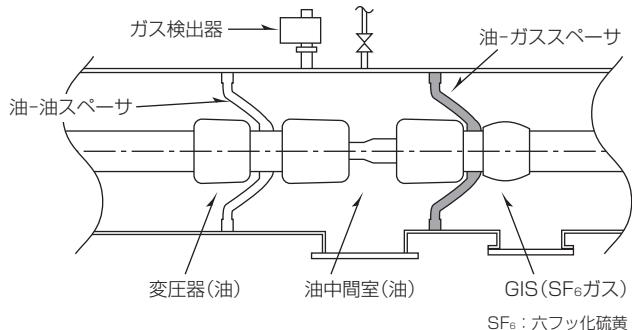
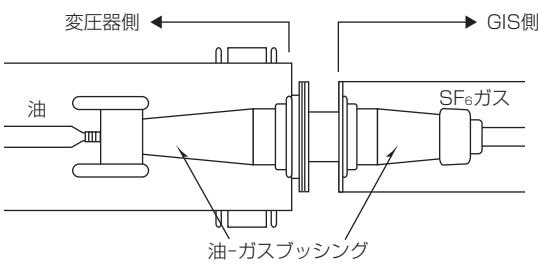
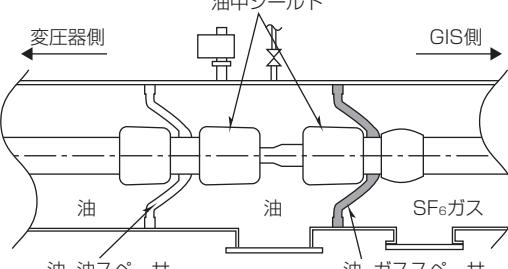


図1. 油-ガススペーサの構造



図2. 油-ガススペーサ

表1. 油-ガスブッシングと油-ガススペーサの比較

	油-ガスブッシング	油-ガススペーサ
構造		
コンパクト性 (シールド間寸法)	△ (約4.0m)	○ (約1.5m)
保守性	△ (15年ごとの内部診断が必要)	○ (内部診断が不要)
経済性	△	○

#### 4. 真空バルブ式負荷時タップ切換器

##### 4.1 油中接点式LTCから真空バルブ式LTCへの移行

油入変圧器には、電圧をきめ細かく調整するため、負荷時タップ切換器(LTC)が用いられている。負荷時タップ切換器は、タップを選択するタップ選択器と選択されたタップに回路を切り換える切換開閉器で構成される。従来数多く使用してきた油中接点式LTCは、切換開閉器が変圧器本体油とは別の油中容器内に設置されているが、切換接点部で油中アーカ放電を生じながらタップを切り換えるため、切換開閉器室内の絶縁油は汚損する。そのため、油中接点式LTCは絶縁油浄化のための活線浄油機の設置が必要である。また、切換開閉器室内の清掃や切換接点の状態点検等、定期的な保守が必要である。

当社では、汚損・劣化の要因であった油中アーカ放電を生じない長寿命、保守省力化が可能な真空バルブ式LTC(図3)を2010年から油入変圧器用として適用を開始した。

##### 4.2 真空バルブ式LTCの特長

真空バルブ式LTCは、従来の油中接点式LTCとは異なり油中でアーカ放電を生じない構造であるため、アーカ放電によるカーボンスラッジの発生がなく、接点消耗粉の油中拡散がない。そのため、機構は清浄な油中状態で動作することになり高い信頼性を維持することができる。さらに、切換開閉器室内の活線浄油機が不要であるため、活線浄油機を省略することができる。また、油中接点式LTCは、主接点と抵抗接点との接触子の消耗量の差を起因とするアンバランス消耗による不具合が生じることがあるため、切換回数と通過電流(負荷率)を管理する必要があったが、真空バルブ式LTCの場合は、接触子の消耗量が少なくアンバランス消耗の保守管理は不要となる。耐用年数と推奨点検周期はともに延伸され、点検費用及び停止回数の削減など保守点検の省力化が可能となる(表2)。

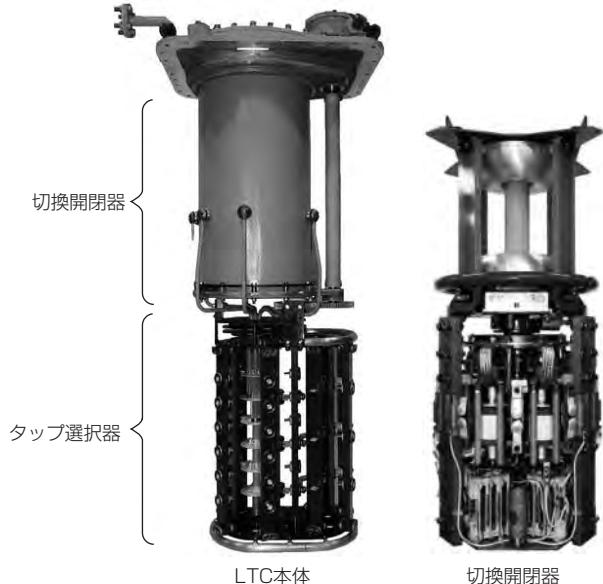


図3. 真空バルブ式LTC

表2. 耐用切換回数と推奨点検周期(大容量器)

	項目	油中接点式LTC (当社製MRT形)	真空バルブ式LTC (独MR社製VRF形)
耐用切換回数	電気的回数	20万回	60万回
推奨点検周期	機械的回数	80万回	120万回
	動作回数	7万回 (発電所は5万回)	30万回
	経過年	7年ごと (発電所は5年ごと)	20年ごと
活線浄油機	必要	不要	不要
アンバランス消耗の配慮	必要	不要	不要

MR社 : Maschinenfabrik Reinhausen GmbH

次に、真空バルブ式LTCの特長をまとめると。

- (1) 活線浄油機の設置が不要であり、さらに設置時に要する活線浄油機のメンテナンスが不要
- (2) アーカ放電によるカーボンスラッジの発生がないため、絶縁油の劣化進展や通電性能低下を抑制可能

表3. 変圧器保守支援システム

保守支援システム	監視部位	概要
油中ガス監視システム	変圧器本体	油中ガス分析装置とデータ管理システムの構成。6種類の可燃性ガス濃度の自動測定、データ収集、トレンド管理可能
LTC動作特性監視センサ	LTC駆動機構部	負荷時タップ切換器の各部位の駆動機構の異常現象を駆動軸トルク、電動機電流波形を用いて監視・検出
LTC接触子消耗量監視センサ	LTC切換開閉器接触子	運用情報(負荷電流、切換回数等)を基に切換開閉器の接触子の消耗量を算出・監視
油面監視センサ	変圧器本体 LTC エレファン	油面位置を常時監視し、油面変位で異常判定を行う。漏油検出が可能
油温監視センサ	変圧器本体	油温度を常時監視し、内部異常に起因する油温度変化を管理

- (3) 接触子のアンバランス消耗への保守点検が不要
- (4) 耐用年数延伸による長寿命化
- (5) 推奨点検周期の延伸による保守点検の省力化
- (6) 油中接点式LTCとの互換性を持たせることによって、既設変圧器への真空バルブ式LTCの採用が可能

### 5. 酸素透過率低減コンサベータ

油入変圧器で使用しているコンサベータは、変圧器の負荷変化、気温の変化による変圧器タンク内の絶縁油の体積変化(膨張収縮)を吸収する機能を持つ。絶縁油は、空気と接触すると空気中の酸素や水分によって劣化が進展し、絶縁性能など電気的特性の劣化につながる。

さらに、絶縁油の劣化は経年性流動帶電の発生要因の1つであることが知られており、一般社団法人電気協同研究会で保守管理基準が策定されている<sup>(2)</sup>。そのため、近年では、従来のゴム袋よりも更に酸素透過率の低いゴム袋を採用したコンサベータが開発されており、経年性流動帶電の更なる抑制に貢献している。

### 6. 変圧器保守支援システム

高度成長期に設置された油入変圧器は、設計想定寿命30年を超えて今なお運用されている。この高経年変圧器は順次更新がされているものの、残存の高経年変圧器は継続して保守管理をしていかなければならなく、数多くある機器を抱えている状況で管理は容易ではない。当社の変圧器保守支援システムは、表3に示すように機器の状態に応じて保

守点検や更新計画を実施する状態把握保全(CBM)を主体として、保守管理の効率化を指向としたシステムを提供している。変圧器保守支援システムは、これまでの人による巡回点検での機器状態の情報入手管理から、センシング技術を活用したオンライン・自動化による保守拠点からの遠隔常時監視が可能となった。また、常時監視によって機器の異常兆候の迅速な検出や事故の未然防止が可能である。これらの保守支援システムは、高経年変圧器への導入や新たに製造する変圧器にこれらの機能を組み込むことで、保守管理に係るランニングコストの低減に貢献できる。

### 7. む す び

油入変圧器の保守軽減技術の動向について述べた。2016年4月から電力自由化がスタート、後に発送電分離が計画されており、電力市場は大きな環境変化を迎えてより一層効率性が求められる時代に突入する。当社としても保守軽減技術を提唱し、更なる保守省力化、長寿命化に対応した技術を組み込んだ変圧器を提供する。今後も、市場ニーズを見極め社会インフラの発展に寄与していく。

### 参 考 文 献

- (1) 日本電機工業会：油入変圧器付属品の更新推奨時期、JEM-TR197 (1996)
- (2) 電気協同研究会：電力用変圧器改修ガイドライン、65, No. 1 (2009)

中内慎一朗\*  
塚尾康宏\*  
貞國仁志\*

# 保守性・更新対応性を向上させたGIS

Gas Insulated Switchgear Improving Maintainability and Renewability

Shinichiro Nakauchi, Yasuhiro Tsukao, Hitoshi Sadakuni

## 要旨

1968年に三菱電機がガス絶縁開閉装置(GIS)を実用化して以来、多くのGISが適用されてきた。

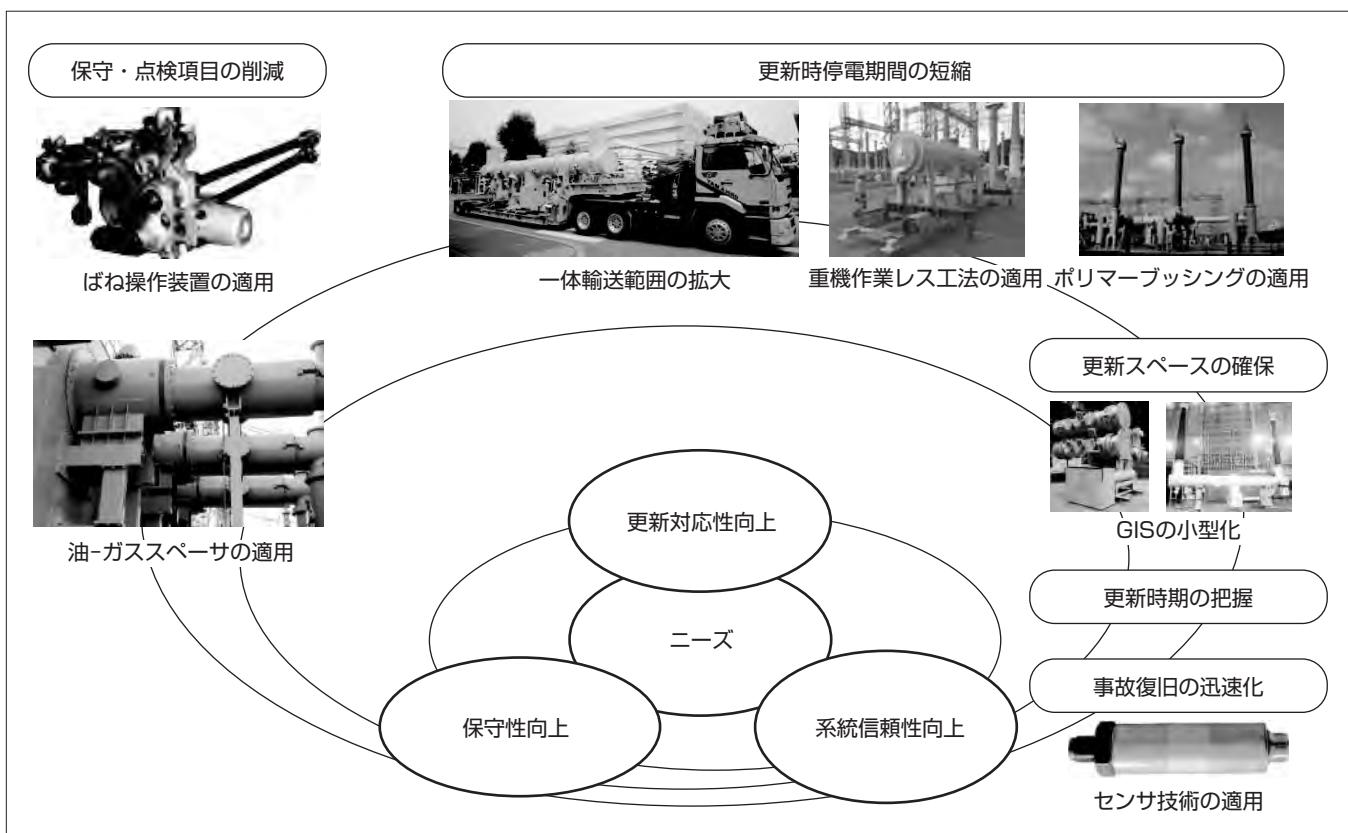
現在、日本では設計想定寿命の30年を超えるGISが増加し、2020年以降は設備全体の40%強に達する見込みである。それらの高経年GISを取り巻く様々な課題を整理すると、次のとおりである。

- (1) 経年劣化による機器の信頼性低下、事故・障害率の増加に伴う保全費用の増加、旧形設計構造機器を熟知した技術者・技能者の減少や部品の生産中止等に対する保全対応力の低下
- (2) 高経年GISの更新計画に当たり、更新時期の集中に伴う生産負荷の平準化や生産能力の確保、更新スペースの確保・停電期間の短縮など

(3) 更新後のGISに対する保守にかかる負担を軽減するための保守・点検項目の削減と保守の効率化、系統信頼性向上のための事故時対応力の強化など

当社は、これらの課題に対応可能なGISを開発しており、その概要は次のとおりである。

- (1) 遮断器(GCB)のばね操作化、グリスレス化などによる保守・点検項目の削減と保守の効率化
- (2) 機器の小型化(高ガス圧化、磁気アーケ駆動の断路器(DS)／接地開閉器(ES)などの最新技術適用)、GISの小型化などによる据付面積の縮小、更新工期の短縮(一体輸送範囲の拡大)
- (3) 最新監視装置・故障点標定装置適用による高経年GISの状態監視と更新時期の適正化、及び事故復旧の迅速化



## GISの保守性・更新対応性・系統信頼性を向上させる技術

今後増加するGISの更新需要に対応して、GISの保守性・更新対応性・系統信頼性を向上させる技術を開発・適用してきた。ばね操作装置、油-ガススペーサ、一体輸送範囲の拡大、重機作業レス工法、ポリマーブッシング、GISの小型化、センサ技術などがある。これらを適用することで、保守・点検項目の削減と保守の効率化、更新時停電期間の短縮、更新スペース確保、更新時期の把握、事故復旧の迅速化などのメリットがある。

## 1. まえがき

当社は、1968年に84kVガス絶縁開閉装置(GIS)を実用化し、1973年に世界に先駆けて550kV GISの製品化を行った。その後、GIS技術は仕様の合理化、遮断器・避雷器など構成機器の小型・高性能化、センサ・監視装置の高度化など各種技術進歩を取り入れて、信頼性・経済性向上と保守点検の省力化を図り、絶え間なく進歩してきた。現在、日本では設計想定寿命の30年を超える機器が増加し、2020年以降には設備全体の40%強に達する見込みである。それらの高経年GISを取り巻く様々な課題を整理すると次のとおりである。

- (1) 経年劣化による機器の信頼性低下、事故・障害率の増加に伴う保全費用の増加、旧形設計構造機器を熟知した技術者・技能者の減少や部品の生産中止等に伴う保全対応力の低下
- (2) 高経年GISの更新計画に当たり、更新時期の集中に対する生産負荷の平準化や生産能力の確保、更新スペースの確保・停電期間の短縮など
- (3) 更新後のGISに対する保守にかかる負担を軽減するための保守・点検項目の削減と保守の効率化、系統信頼性向上のための事故時対応力の強化など

## 2. 保守性向上への取組み

今後、機器構造を熟知した熟練技能者の減少が見込まれる状況に対して、更新のための新規納入GISには保守・点検項目の削減や保守の効率化が要求される。その要求に対応可能な技術を適用し、保守費用の低減を図った。

### 2.1 ばね操作GCBの適用

550kVまでのばね操作GCBシリーズを完成させ、漏油・油圧ポンプ運転状態確認などの点検項目の削減、油圧系部品(圧力計、圧力スイッチ他)の排除、定期的な機構部へのグリスアップ・補機試験(油圧スイッチ動作確認ほか)の省略などの保守項目を削減することで保守の効率化を図った。その結果、従来の油圧操作GCBに対して保守・点検費用を60%削減し、大幅なコストダウンを図った(図1)。

### 2.2 油-ガススペーサの適用

変圧器とGISを直結する油-ガス絶縁区画部位に、GISで幅広く適用している注型絶縁物に油中での密封技術を取り入れた300kV、550kV用油-ガススペーサの開発・製品化<sup>(2)</sup>を行った。従来の油-ガスブッシングで必要であった漏油・油面計確認などの点検項目を省略するとともに、15年程度ごとの定期的な交換が必要であった油密封用パッキンを排除し、GISと同様の30年以上の設計想定寿命を実現した(図2、図3)。

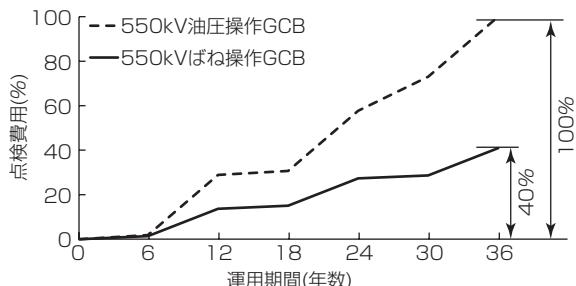
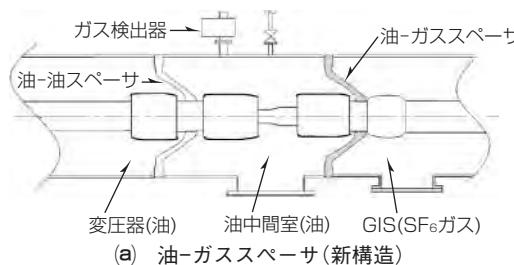
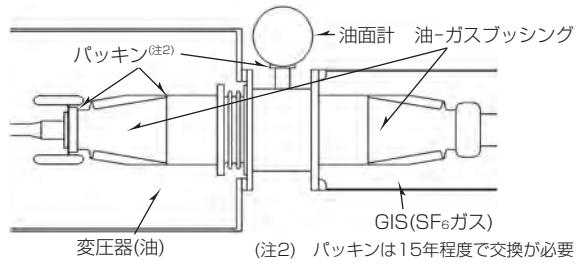


図1. 保守コストの比較<sup>(1)</sup>



(a) 油-ガススペーサ(新構造)



(b) 油-ガスブッシング(従来構造)

図2. 油-ガススペーサの構造<sup>(2)</sup>



図3. 油-ガススペーサの適用例<sup>(3)</sup>

## 3. 更新対応性向上への取組み

高経年機器の更新に対しては、更新スペースの確保・停電期間の短縮等の様々な課題があり、これらに対して、機器の小型化(高ガス圧化、磁気アーケーク駆動DS/ES適用などの最新技術適用)、GISの小型化などによる据付スペースの削減、更新工期の短縮(一体輸送範囲の拡大)による更新対応性向上を図った。

### 3.1 一体輸送範囲の拡大

図4は、300kV H-GIS(Hybrid-GIS)の例である。高ガス圧化、複合一体化などの機器小型化によってガスブッシングを除くユニット部分の高集積配置化を図り、ユニット

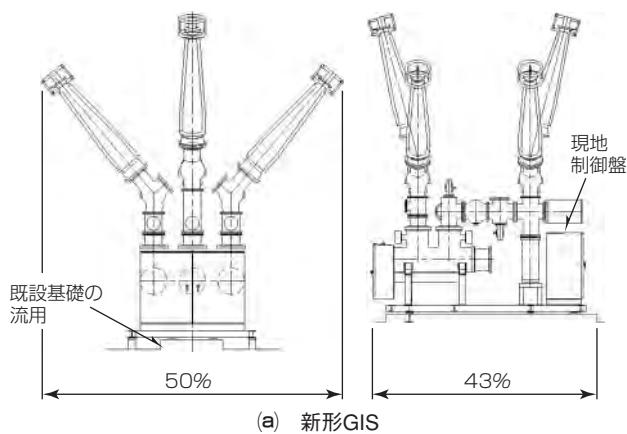


図4. 300kV H-GIS

一体輸送を実現することで現地据付工期短縮による停電期間の短縮と、高信頼度化を達成した。

具体的には、ブッシング以外の輸送分割が従来は現地制御盤と本体各相の4分割であったものを、新形では一体化して現地での本体と制御盤間の結線作業をなくしたことによる現地据付・結線作業の縮減効果によって、停電期間を20%短縮した2週間以内での対応が可能となった。

### 3.2 フレキシブル連結機構適用による据付面積の縮小

断路器(DS)と接地開閉器(ES)に、機器本体と操作装置間をワイヤ接続するフレキシブル連結機構を適用することによって、操作装置の配置自由度を向上させ、従来のユニット側面配置からユニット前面に集約することを可能とした。これによって、ユニット間寸法の25%縮減、変電所据付面積の75%縮小を達成し、従来と同一の狭隘(きょうあい)なスペースへの元位置更新を可能とし、更新対応性の向上を図った(図5)。

また、DS・ES本体の小型化を図るため、電流遮断方式として最新技術である永久磁石で遮断時のアーケを駆動して遮断する磁気アーケ駆動方式<sup>(4)</sup>を適用している。

### 3.3 重機作業レス工法の適用

高経年GISの延命使用を図るため、GIS劣化評価結果を基に電流開閉動作による劣化進展度が高いGCB部分だけを先行更新する部分更新という手法が採られている。

例えば、550kV初期形GIS用二重圧力式(油圧操作)GCBをばね操作GCBに更新する例を図6に示す。この更新のた

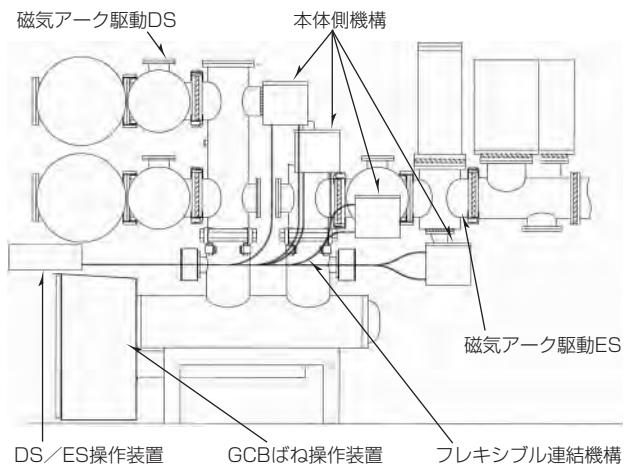
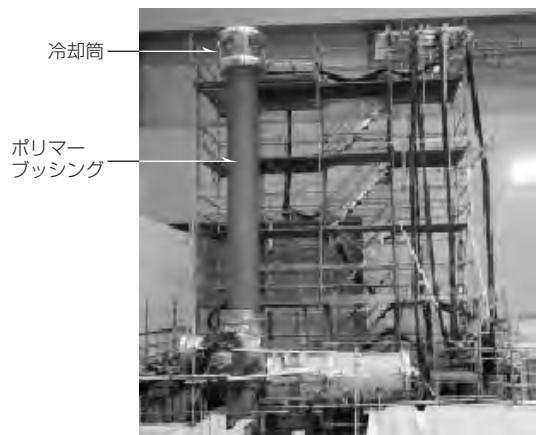


図5. 300kV GISへのフレキシブル連結機構適用例

図6. 重機作業レス工法<sup>(5)</sup>図7. 8,000Aポリマーブッシングの試験状況<sup>(6)</sup>

めの工法として、図に示すように、GCBを搬送台車で移動することによって重機を使用しないレッカーレス工法を採用し、母線無停電でのGCB更新を実現している<sup>(5)</sup>。

### 3.4 550kVポリマーブッシングの適用

1973年から550kV GISが適用されてきたが、この時期に納入したブッシングは油入コンデンサブッシングを適用している。これらは経年30年以上となり、2.2節で述べた油-ガスブッシングと同様にパッキン劣化による油漏れなどが発生しており、今後計画的な更新が望まれる。これら

のブッシングの部分更新には、耐震性に優れたポリマーブッシングが有効である。

550kVポリマーブッシングは、磁器ブッシングに対して質量比20%と大幅な軽量化が可能で、耐震性向上によって架台・基礎の簡素化が図れる。海外では、防爆性・耐震性の目的から、1990年代初期から10,000本を超える適用実績を持っているが、国内での製品適用はわずかであった。近年の耐震性向上のニーズから、国内でも一般社団法人 電気協同研究会でポリマーブッシング適用に向けた検討が行われており、当社もその動向に対応し、ユーザーと設計・検証仕様面の検討を加えながら、8,000Aまでのシリーズ化を達成した(図7)。

このポリマーブッシングは2016年に据付予定の新設550kV GISへの適用を予定している。

#### 4. 高経年GISの状態監視による更新時期の適正化と事故復旧の迅速化への取組み

高経年機器の延命化使用、更新後の機器の系統信頼性向上などの市場ニーズに対して、最新監視装置・故障点標定装置適用等による高経年GISの適正な状態監視と事故復旧の迅速化を図った。

##### 4.1 ガス圧力センサの適用

高経年GCBを対象としたガス漏れ(ガススローリーク)監視実測結果を図8に示す。約1か月間の取得データからガス密度の変化を近似直線で評価し、日常の巡視点検では

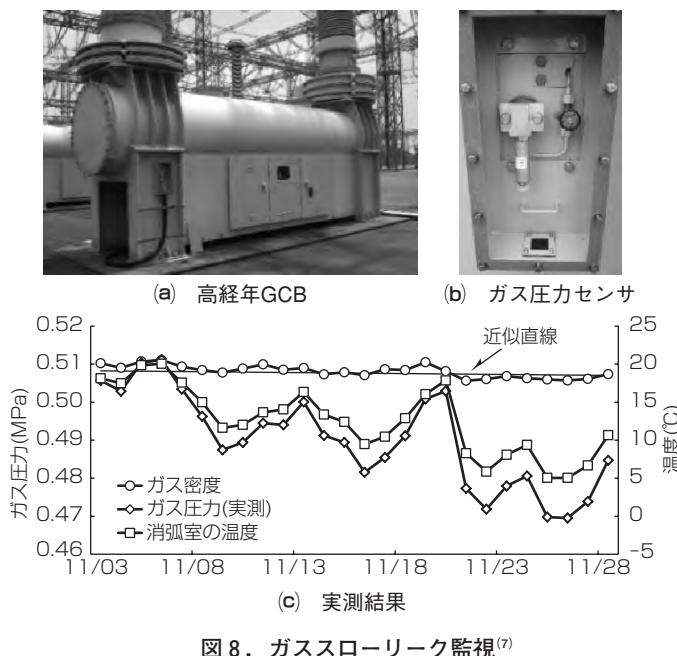


図8. ガススローリーク監視<sup>(7)</sup>

表1. ガス圧力センサの仕様<sup>(8)</sup>

	現行品	従来品
分解能	10Pa(100dB)	1,000Pa(60dB)
精度	±0.1%	±0.5%
寿命	40年以上	10~15年
長期安定性	±0.004%/年	±0.1%/年
総合誤差(10年以上)	0.15~0.25%/年(<0.5%/年)	1~2%/年(>0.5%/年)

確認ができないような微小なガス漏れを検知している。具体的には、図8の年間1%程度に相当するガス密度の変化を検出しており、このような高感度・高精度なガス圧力センサを活用すると、最長で20年後にガス漏れ警報が発令されるようなガススローリークの発生を1か月程度で検出できる。

表1に示すとおり、現行品センサは高い検出性能と安定性を兼ね備えていることから、常時はガス漏れ検出用に活用し、万一の事故時にはアークエネルギーによって過渡的に発生する圧力上昇を検出して事故部位を特定するなど複数の用途に共用可能であり、事故復旧の迅速化が図れるとともに監視診断システムの簡素化によってシステムコスト低減にも寄与している。

#### 5. むすび

当社は、高経年GISを取り巻く様々な課題に対応可能なGISを開発しており、その概要は次のとおりである。

- (1) GCBのばね操作化、グリスレス化などによる保守・点検項目の削減と保守の効率化
- (2) 機器の小型化(高ガス圧化、磁気アーク駆動DS/ESなどの最新技術適用)、GISの小型化などによる据付面積の縮小、更新工期の短縮(一体輸送範囲の拡大)
- (3) 最新監視装置・故障点標定装置適用による高経年GISの状態監視と更新時期の適正化、及び事故復旧の迅速化

#### 参考文献

- (1) 谷垣秀一, ほか: 550kV 63kA ばね操作単体GCBの開発, H25年電気学会全国大会, 6-203 (2013)
- (2) 木佐貫治, ほか: 500kV及び275(220)kV油-ガススペーサの開発, 電気学会 放電/開閉保護/高電圧合同研究会, ED-13-111, SP-13-034, HV-13-072 (2013)
- (3) 永野 誠, ほか: 高経年500kV変電機器の最新技術適用による更新工事完成, H27年電気学会電力・エネルギー部門大会, 8-310 (2015)
- (4) 柏木紘典, ほか: 磁気アーク駆動遮断方式接地開閉器の開発, H23年電気学会全国大会, 6-284 (2011)
- (5) 柳井健人, ほか: 高経年550kV GCBのばね操作GCBへの更新, H26年電気学会全国大会, 6-278 (2014)
- (6) 中内慎一朗, ほか: 大容量550kV縮小形GISの開発, H27年電気学会電力・エネルギー部門大会, 7-291 (2015)
- (7) 永田慎一, ほか: 高経年ガス遮断器の劣化診断へのスローリーク監視の適用性に関するフィールド評価, H24年電気学会電力・エネルギー部門大会, 6-315 (2012)
- (8) Kamei, M., et al.: Influence of Sensor Information Accuracy on Condition-Based Maintenance Strategy for GIS/GCB Maintenance, IEEE Trans. Power Delivery, 26, No. 2, 625~631 (2011)

# 保守性・更新対応性を向上させたGCB

芳友雄治\* 吉田大輔\*  
谷垣秀一\*  
森 智仁\*

Gas Circuit Breaker Improving Maintainability and Renewability

Yuji Yoshitomo, Shuichi Tanigaki, Tomohito Mori, Daisuke Yoshida

## 要 旨

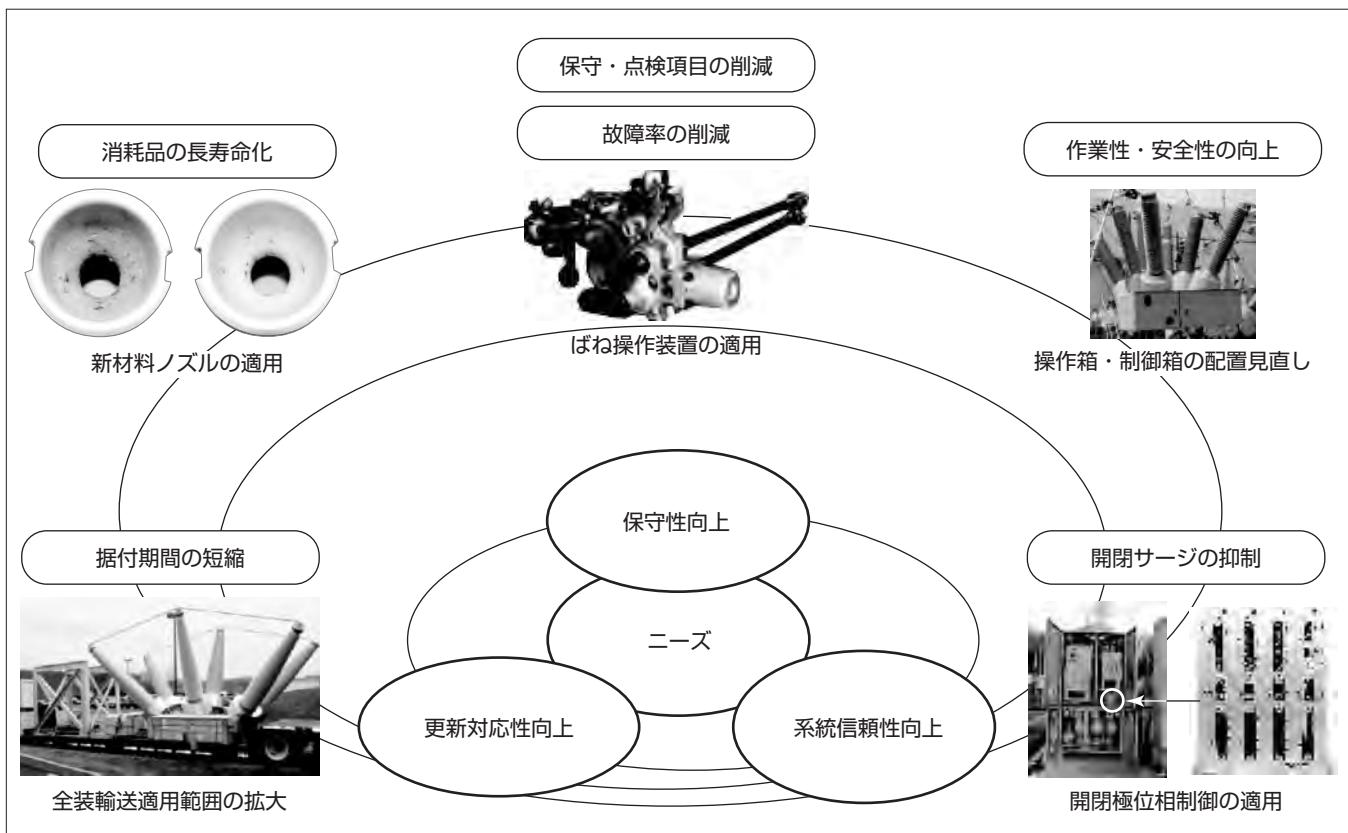
電力系統の保護機器であるガス遮断器(GCB)は、信頼性の確保とともに送変電系統の拡充と経済性追求というニーズに応えるべく大容量・小型化が進められてきた。三菱電機は、1965年に国内の先駆けとなるGCBを納入以来、国内外への定格電圧72kVから1,100kVの単体GCB及びガス絶縁開閉装置(GIS)用GCBを3万台以上という豊富な納入実績を持ち、半世紀にわたって電力用開閉機器の業界をリードする新技術・製品を開発・実用化してきた。

一方で、現在、設計想定寿命の30年を超える機器が増加しており、2020年以降には市場の40%強にも達することを鑑みて、近年のユーザーニーズであるGCBのコストダウン・環境負荷低減はもとより、経年機器の更新工事費用削

減や長期使用に対応するために、変電所の運用に関わる保守・更新対応性・系統信頼性の向上につながる新機種を開発している。

近年のGCB新機種の開発概要は次のとおりである。

- (1) ばね操作装置・新材料ノズルの適用による保守・点検項目の削減、点検周期の延伸化、操作箱・制御箱の配置見直しによる作業性・安全性の向上
- (2) 全装輸送適用範囲の拡大と制御箱の一体輸送化による据付期間の短縮
- (3) ばね操作装置の適用による故障率の削減と、開閉極位相制御適用による系統信頼性の向上



## GCBの保守性・更新対応性・系統信頼性を向上させる技術

近年のユーザーニーズに応えるため、GCBのコストダウン・環境負荷低減はもとより、新材料ノズル・ばね操作装置の適用、操作箱・制御箱の配置見直しによる保守・点検項目の削減、点検周期の延伸化、点検性の向上、全装輸送適用範囲の拡大と制御箱の一体輸送化による据付期間の短縮による更新対応性の向上、ばね操作装置の適用拡大による故障率の削減と、開閉極位相制御適用による系統信頼性の向上を図っている。

## 1. まえがき

当社は、1965年に国内の先駆けとなるGCBを納入以来、電力系統の送電容量・短絡容量増大に伴い、1遮断点当たりの電圧及び電流の大容量化を目的としたGCB開発を行ってきた。

現在、国内外に定格電圧72kVから1,100kVの単体GCB及びGIS用GCBとして3万台以上の納入実績を持っているが、近年、設計想定寿命の30年を超える機器が増加し、2020年以降には設備全体の40%強に達する見込みであり、GCBでもGISと同様に①経年劣化による機器の信頼性低下、保全費用の増加、旧形設計構造機器に対する保全対応力の低下、②生産能力の確保、停電期間の短縮、③保守・点検項目の削減と保守の効率化や、系統信頼性向上といった課題があるが、特に比較的頻繁に発生する操作装置部分やタンク内の消弧室に対する保守・点検作業の削減及び作業性向上が求められている。当社では、この課題に対する解決策として、保守・点検作業を削減できるばね操作装置の高出力化とばね操作GCBの適用拡大等を進めてきた。

図1に、ばね操作GCBと従来の油圧操作GCBの適用機種の変遷を示す。国内では高出力を要求される超高压・超々高压GCBには油圧操作装置、比較的小出力の特高GCBにはばね操作装置が適用されていたが、ばね自身の運動にかかるエネルギーを極小化でき、コイルばねに比べて高出力化に有利なトーションバーをばねとして用いた操作装置を1988年に製品化し、消弧室の高性能化・軽量化による所要操作力の低減によって高電圧クラスへの適用拡大を図ってきた。2011年には更なる消弧室の所要操作力の低減とトーションバー式ばね操作装置の高出力化によって、550kVばね操作GCBを製品化し<sup>(1)</sup>、国内全電圧クラスへのばね操作装置

適用を達成した。

図2(a)、図2(b)に550kVばね操作GCB及びこれに適用したトーションバー式ばね操作装置の外観を示す。

本稿では、近年当社で行ってきたばね操作の適用拡大を始めとした、GCBの保守性、更新対応性、系統信頼性の向上に向けた取組みについて述べる。



(a) 550 kVばね操作GCB



(b) トーションバー式ばね操作装置

図2. 550kVばね操作GCB及びトーションバー式ばね操作装置

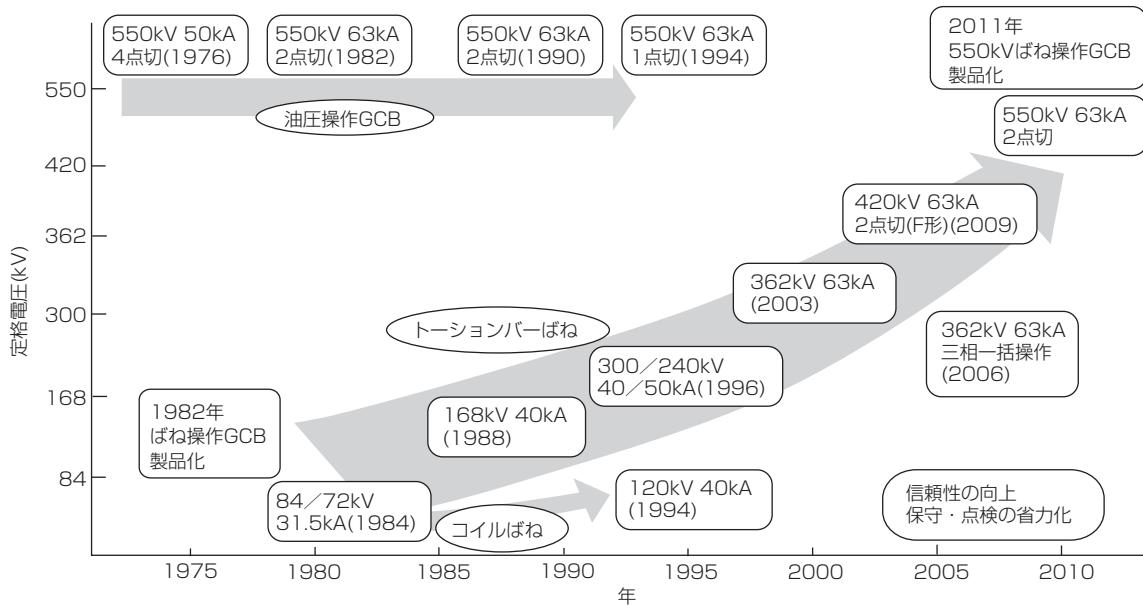


図1. ばね操作GCBと油圧操作GCBの適用機種の変遷

## 2. 保守性の向上

### 2.1 ばね操作装置の適用による保守・点検項目の削減

#### 2.1.1 保守削減のための適用技術

ばね操作装置は、空気圧操作や油圧操作などの流体圧力を用いる操作方式と異なり、操作エネルギーが固体(金属)の弾性エネルギーとして蓄えられているため、操作エネルギーの保持という観点からは本質的に長期安定性に優れている。

一方、動作の制御指令を機械系の回転や摺動(しゅうどう)によって伝達するため、部品相互の摩擦力の変化に対する配慮が、ばね操作装置の長期安定性や保守性を向上させる上で重要な課題となる。当社は、小勢力部の軸受には異物の混入防止及びグリースの流出防止を目的に密封式ベアリングを採用するとともに、蓄勢機構の歯車には乾性被膜潤滑剤の焼付けを行うことで、保守時のグリース塗布作業を不要とし、メンテナンスフリーとした。表1に当社のばね操作装置への適用技術と効果を示す。

#### 2.1.2 保守点検項目・費用の削減

メンテナンスフリーのばね操作装置の適用によって、保守点検項目・測定項目を油圧操作装置の半分程度に削減した。

表2に油圧操作GCBとばね操作GCBで必要となる電装品等の定期交換部品の点数及び点検・測定項目数の比較を示す。油圧操作GCBで必要となる油圧圧力スイッチ及び油圧計等の補器がばね操作GCBでは不要となることから、部品点数及び定期点検時の点検項目を60%に、測定項目を40%に削減できる。

ばね操作GCBの点検費用も、油圧操作GCBに比べて大幅に削減できる。一例として、図3に12年ごとに開放点検を実施する条件で試算した550kV GCBの油圧操作GCBとばね操作GCBの保守コストの比較を示す。ばね操作GCB適用によって、36年間で保守コストを油圧操作GCBの約

表1. ばね操作装置への適用技術と効果

適用技術		効果
大出力化	駆動源にトーションバーを適用	・高速化、簡素化の達成 ・振動、衝撃の抑制
	平歯車方式のばね蓄勢機構を採用	・蓄勢効率の向上 ・蓄勢動作の安定化
信頼性向上	全箇所に転がり軸受を採用	・摩擦影響の極少化による動作信頼性の向上
保守点検性向上	歯車に乾性被膜潤滑剤を焼付け	・摩擦損失の低減 ・グリース再塗布不要
	シール付軸受を採用	・グリースの流出防止 ・防塵(ぼうじん)効果

表2. 油圧とばねの部品点数、点検・測定項目数の比較<sup>(1)</sup>

	油圧操作GCB	ばね操作GCB
交換部品点数	100%	60%
点検項目数	100%	60%
測定項目数	100%	40%

40%に削減可能である。

#### 2.2 点検周期の延伸

##### 2.2.1 新材料ノズルの適用

電流遮断に伴い交換が必要となるノズルについても、消耗を低減できる材料を適用することで開放点検周期の延伸を可能とした。

GCBの電流開閉は、消弧室のアークコンタクト間に発生したアークにノズルによって制御されたガス流を吹き付けることで行われるが、この時のアークから発せられる放射光によって、ノズル内面に炭化による消耗が発生するため、一定の遮断回数経過後に交換する必要がある。この消耗を軽減するため、ノズルには無機質材料が充てんされているが、この充てん材の分散度を制御することで、ノズルの消耗を更に低減することを可能とした。図4に従来材料及び新材料ノズルの多数回電流遮断後(25kA×10回遮断後)の様相を示す。新材料の適用によってノズル内面の炭化の度合いが低く抑えられていることが分かる。

新材料適用によるノズルの消耗量の抑制によって、電流遮断回数による解放点検の周期を大幅に延伸した。表3に従来ノズルと新素材ノズルとの点検周期の比較を示す。新材料ノズルの適用によって、負荷電流開閉では5,000回、無負荷小電流開閉では10,000回の点検周期にすることができ、従来に比べ2倍の延伸を可能とした。

##### 2.2.2 開閉極位相制御の適用

系統電圧・電流位相に合わせて開閉タイミングを制御する開閉極位相制御は、調相用設備や変圧器用開閉時の過電

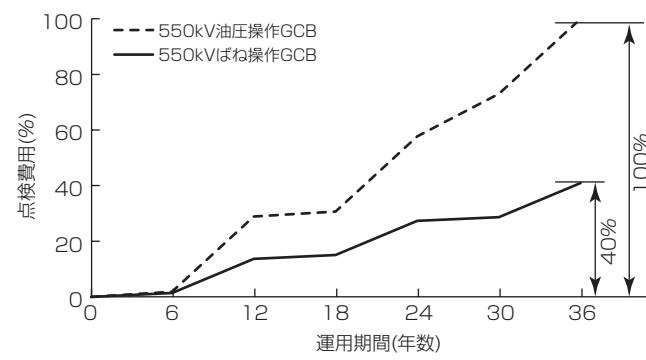


図3. 保守コストの比較<sup>(1)</sup>

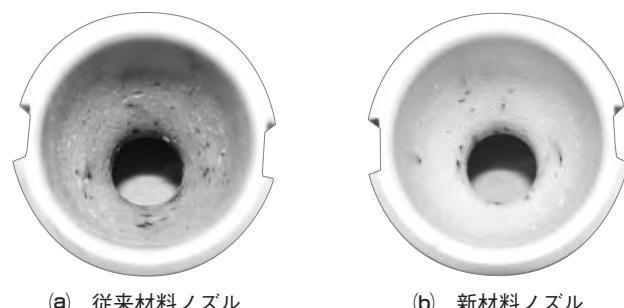


図4. 多数回電流遮断後のノズルの様相<sup>(2)</sup>

表3. 従来材料ノズルと新材料ノズルとの点検周期の比較

	従来材料ノズル	新材料ノズル
負荷電流開閉	2,000回	5,000回
無負荷小電流開閉	5,000回	10,000回

表4. 開閉極位相制御の適用有無による点検周期の比較

	制御なし	制御あり
進み小電流負荷開閉	2,000回	4,000回
リアクトル負荷電流開閉	2,000回	4,000回

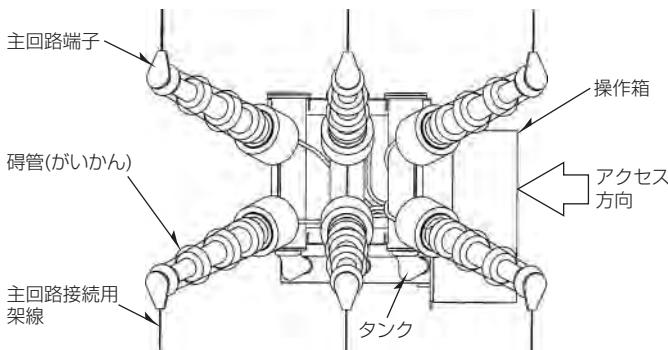


図5. 168kV GCBの操作箱アクセス方向

圧や過電流を抑制するために適用されているが、投入時のプレアーカや開路時の再発弧を抑制できることから、GCB極間のアークコンタクトやノズルの消耗を抑制し、開放点検周期の延伸が可能である。表4に開閉極位相制御の適用有無による点検周期の比較を示す。開閉極位相制御の適用によって、進み小電流負荷開閉及びリアクトル負荷電流開閉では2,000回から4,000回に点検周期が延伸可能である。

### 2.3 操作箱点検性の向上

充電部の地上高の低い特高GCBでは、保守・点検時に点検員が作業する操作箱をタンク側面に配置することで、主回路接続用架線下での点検作業を排除し、保守・点検時の作業性・安全性の向上を図っている<sup>(3)</sup>。

図5に168kV GCBを上方から見た外形を示す。主回路接続用架線の接続方向に対して、操作箱へのアクセス方向を90°とすることで、日常点検で架線下へ入り込む点検作業を不要にできるよう配慮した。

### 3. 据付期間短縮による更新対応性向上

ブッシングを含めたガス封入部分を全て工場で組み立て、現地まで輸送する全装輸送を行うことで、現地据付時のタンク開放作業が不要となり、工場の管理された環境下で組立て・試験された状態の維持を図っている。これによって、機器の信頼性を向上させるとともに、輸送及び現地作業の極小化が図れ、現地据付期間を短縮することができる。

また、全装輸送可能なGCBでも大型の制御箱を適用する場合は、制御組立可倒式として現地据付作業及び結線作業・試験の削減を可能にした。図6に362kV GCBの輸送

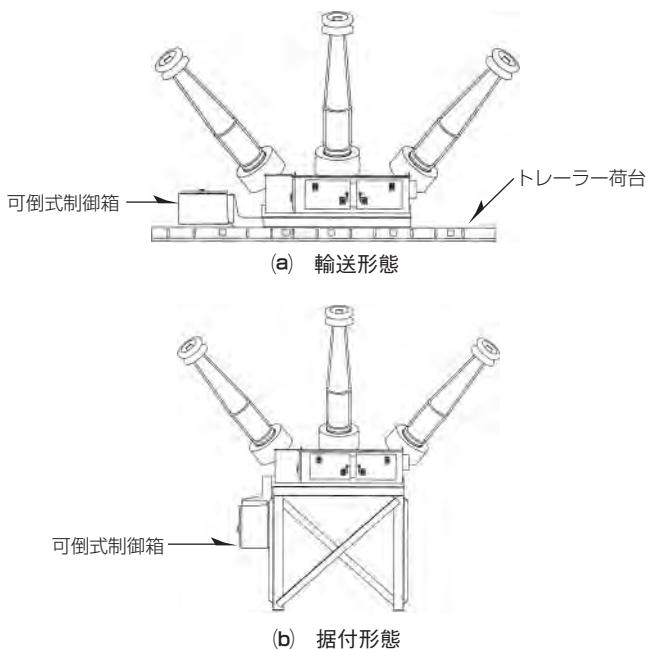


図6. 362kV GCBの輸送形態と据付形態

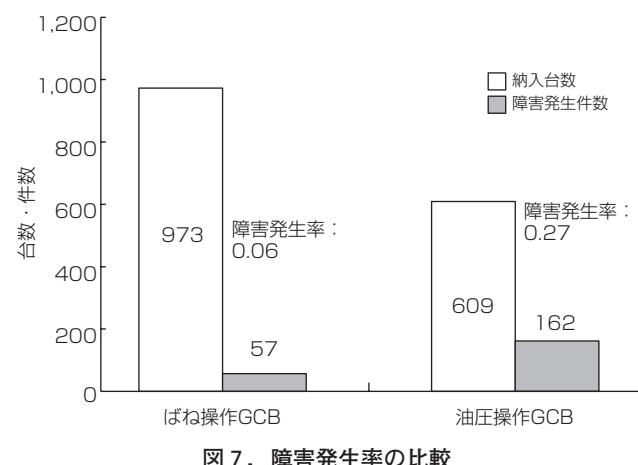


図7. 障害発生率の比較

形態と据付形態を示す。輸送時には90度跳ね上げる可倒式構造とし、現地据付時には制御箱を90度回転させるだけとして現地での結線・試験作業を不要とし、同時に保守点検時のアクセス性向上を図った<sup>(4)</sup>。

### 4. 系統信頼性向上

#### 4.1 ばね操作GCB適用拡大による故障率の削減

ばね操作GCBは油圧操作GCBより故障率が低いことから、故障や修理に伴う停止が少ない信頼性の高い運転が可能である。同様の結果がCIGRE WG A3.06を始めとした変電機器の信頼性調査結果<sup>(5)</sup>でも得られている。

図7にばね操作GCBと油圧操作GCBの納入台数と障害発生件数を比較した結果を示す。油圧操作GCBでの障害発生率(障害発生件数/納入台数)は0.27である一方、ばね操作GCBの障害発生率は0.06である。

図7に示された障害の大半は、操作装置部における軽故

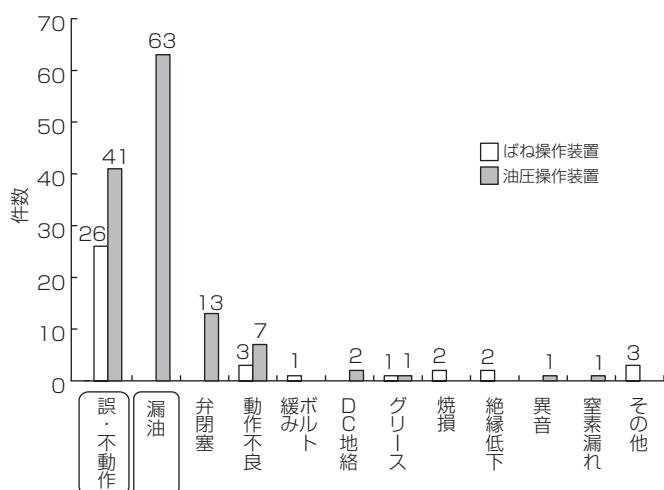


図8. 操作装置部における様相別障害件数

表5. 開閉極位相制御の適用対象と適用効果<sup>(5)</sup>

適用対象	適用の効果	
無負荷変圧器投入	励磁突入電流の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・投入抵抗の省略</li> <li>・電圧の安定性向上</li> <li>・保護リレーの誤動作防止</li> </ul>
分路リクトル投入	突入電流の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遮断器接触子損耗の低減</li> </ul>
コンデンサバンク投入	過電圧の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・絶縁レベルの低減</li> </ul>
無負荷送電線投入	過電圧の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・投入抵抗の省略</li> <li>・絶縁レベルの低減</li> </ul>
分路リクトル遮断	再発弧の防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・絶縁レベルの低減</li> <li>・GCB接触子損耗の軽減</li> </ul>
無負荷送電線・コンデンサバンク遮断	再点弧の防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・進み小電流遮断性能の信頼性向上</li> </ul>

障であり、これを様相別に分類したものを図8に示す。

ね操作装置の障害全38件中26件が誤・不動作によるものである一方、油圧操作装置での障害(全126件)は誤・不動作(41件)以外に漏油(63件)や弁閉塞(へいそく)(13件)が見られ、これらの総和(76件)が油圧操作装置とね操作装置の障害発生件数の差(88件)の大半を占めている。この発生件数の差は、ね操作装置と油圧操作装置の構造の差に起因していることが分かる。

#### 4.2 開閉極位相制御適用による系統安定性の向上

開閉極位相制御の適用によって、突入電流・過電圧等の開閉サージが抑制され、電力系統の信頼性に寄与する。表5に開閉極位相制御の適用対象と適用効果を示す。

#### 5. むすび

当社は、半世紀にわたり電力用GCBの業界をリードする新技術・製品を開発・実用化し、電力流通設備の信頼性・経済性・保守点検性向上に努めおり、その概要は次のとおりである。

- (1) ね操作装置・新材料ノズルの適用による保守・点検項目の削減、点検周期の延伸化、操作箱・制御箱の配置見直しによる作業性・安全性の向上
- (2) 全装輸送適用範囲の拡大と制御箱の一体輸送化による据付期間の短縮
- (3) ね操作装置の適用による故障率の削減と、開閉極位相制御適用による系統信頼性の向上  
今後も機器使用にかかるニーズに応えられる機器及びサービスの提供を図っていく所存である。

#### 参考文献

- (1) 谷垣秀一, ほか: 550kV 63kAね操作単体GCBの開発, H25年電気学会全国大会, 6-203 (2013)
- (2) 山下 清, ほか: ガス遮断器用低損耗ノズルの開発, H21年電気学会全国大会, 6-207 (2009)
- (3) 森 智仁, ほか: 新形168kV 40kA ね操作単体ガス遮断器の開発, H26年電気学会全国大会, 6-273 (2014)
- (4) 芳友 雄治, ほか: 362kV 63kA三相一括ね操作GCBの開発, H22年電気学会全国大会, 6-221 (2010)
- (5) CIGRE WG A3.06: Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers-Guide for Application, Part1: Electra, No.183, Part2: Electra, No. 185 (1999)

# GCBへの開閉極位相制御の適用

Application of Controlled Switching System to Gas Circuit Breaker

Tomohito Mori, Aya Yamamoto, Daisuke Yoshida

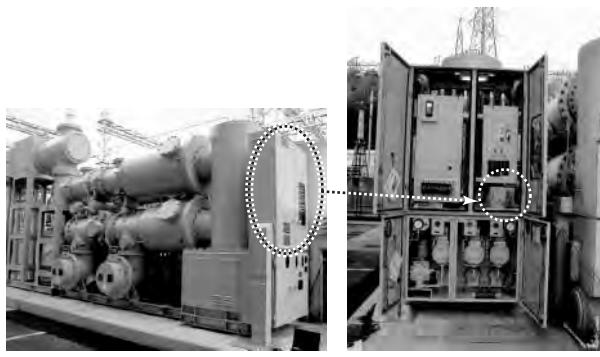
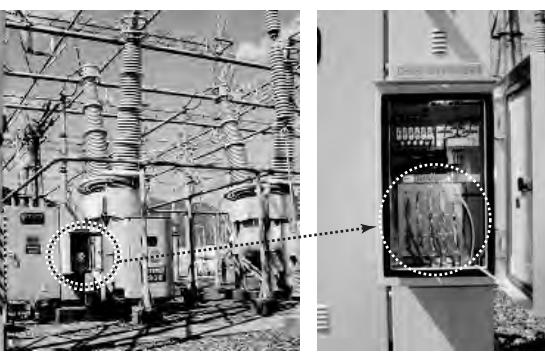
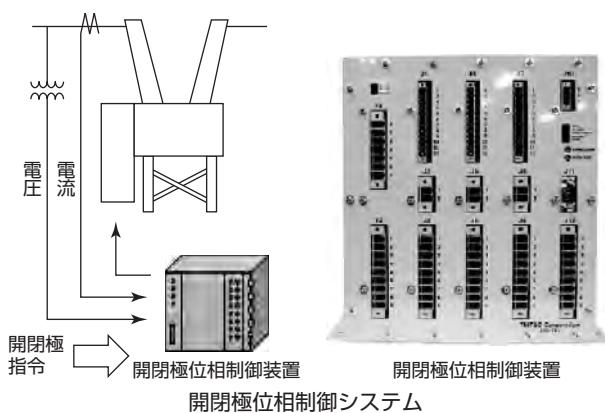
森 智仁\*  
山本 綾\*  
吉田大輔\*

## 要 旨

遮断器の開閉動作によって発生する過電圧・過電流は、機器の絶縁耐力、寿命、及び系統電圧の安定性に影響を及ぼすことから、過電圧・過電流を抑制する有効な手段として、系統電圧の特定位相で遮断器を開閉する開閉極位相制御技術が適用されている。

三菱電機は、1998年に電力用コンデンサ及び分路リクトルといった調相設備用ガス遮断器(Gas Circuit Breaker: GCB)の開閉サージと突入電流の抑制、また、接点の損耗抑制による接点部品の交換周期の延伸化を目的に開閉極位相制御装置の適用を開始した。2005年には無負荷変圧器充

電時の励磁突入電流を抑制することを目的に変圧器用GCBへの位相制御システムを開発して製品に適用し、系統電圧の瞬時電圧低下抑制と保護リレーの誤動作防止による系統安定化を実現した。また、高速再閉路責務を伴う送電線用GCBについては、電源電圧と送電線電圧を取り込み、高精度波形推定によって極間電圧が最小となる未来の時刻を予測して投入制御を行う高速再閉路動作に対応した送電線位相制御投入アルゴリズムを開発して2009年に製品化し、位相制御システムのシリーズ化を実現した。



## 開閉極位相制御システムと調相設備、無負荷変圧器への開閉極位相制御適用実績

開閉極位相制御システムの調相用設備への適用(図の右上下)による突入電流・再発弧過電圧などの有害サージの抑制とアーク接触子の損耗低減、無負荷変圧器への適用(図の左下)による励磁突入電流と系統電圧の瞬時電圧低下の抑制を実運用で確認した。また、送電線用位相制御システムを開発し、高速再閉路時の過電圧抑制効果を確認した。

## 1. まえがき

遮断器の開閉動作時に発生する過電圧・過電流を抑制することを目的に、開閉極位相制御システムを開発し、調相設備用、変圧器用、及び送電線用遮断器への適用を実現した。開閉極位相制御システムは、任意時刻に入力される遮断器の開閉極指令に対して遮断器の開閉極動作時間を予測し、系統電圧・電流を参照しながら、開閉サージを抑制できる目標開放・投入位相から予測開閉極動作時間を差し引いたタイミングで遮断器に開閉極信号を出力する。目標開放・投入位相は遮断器の適用用途ごとに異なり、例えばコンデンサバンク等の容量性負荷の場合には電圧の零点、分路リアクトルなどの誘導性負荷の場合には電圧の波高点が理想点な投入位相となる。一方、無負荷変圧器の場合には遮断器解放時に生じる変圧器鉄心の残留磁束を考慮する必要があり、また、無負荷送電線の高速再閉路の場合には遮断器開放時の送電線電圧の過渡現象を考慮することが必要である。

本稿では、各用途に応じた位相制御方法と、この方法を適用した遮断器の実系統での投入・遮断結果に基づく妥当性の評価、及びフィールドでの運用結果に基づいた開閉極位相制御システムの良好な運用実績について述べる。

## 2. 開閉極位相制御技術の適用

### 2.1 適用実績

当社の開閉極位相制御装置を搭載したGCBの納入台数の推移を図1に示す。年々、開閉極位相制御システムの需要が増加しており、今後も拡大が予想される。

### 2.2 調相設備への適用

#### 2.2.1 コンデンサバンクへの適用

最も早くから適用され、かつ多いのがコンデンサバンクへの適用である。容量性負荷となるコンデンサバンク投入時の突入電流を抑制するためには、遮断器極間の電圧が零となる位相で遮断器を投入すればよいが、実運用では、遮断器の閉極時間ばらつきや遮断器の極間絶縁耐力減少率(RDDS)に基づき遮断器コンタクトが機械的に接触する前の極間絶縁破壊によるプレアーク発生タイミングを考慮して最適な投入位相を決定する必要がある<sup>(1)</sup>。図2にコンデンサバンクの位相制御投入の結果を示す。目標閉極位相16°に対して閉極時間のばらつきは±1ms以内であり、CIGREから報告されている誘導負荷の場合の開閉極位相制御における許容動作ばらつき±2msを十分満足している<sup>(2)</sup>。

#### 2.2.2 分路リアクトルへの適用

次に多いのが分路リアクトルへの適用である。分路リアクトルは、一般的にギャップ付鉄心が採用されていることから鉄心の残留磁束は極めて小さく、定常磁束が零になる位相、つまり電源電圧の波高点で遮断器を投入すれば、鉄

心の磁束飽和及びこれに起因する突入電流を抑制することができる。図3は、位相制御投入時の投入電圧・投入位相と投入電流波高値の実測結果である。投入点のばらつきは1.2msと十分小さく、これによる投入電流の波高値もほぼ1PU(=磁束波高値)に抑制されている。一方、開極の場合も再発弧発生時の高周波電流による接点損耗を抑制する効果がある。図4は、遮断動作時のアーク時間の実測値と位相制御装置に設定された目標アーク時間との差分を示したものである。アーク時間誤差は各相とも0.2ms(3σ値)以内と目標通りである。現地での4,500回の開路動作でも

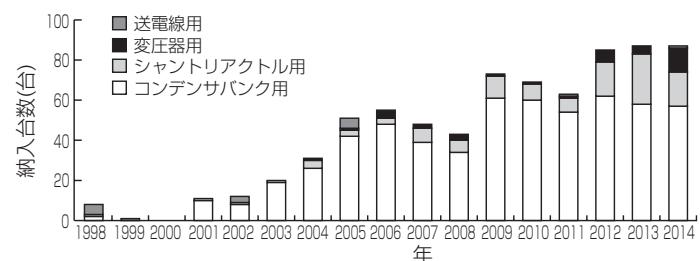


図1. 開閉極位相制御GCB納入実績

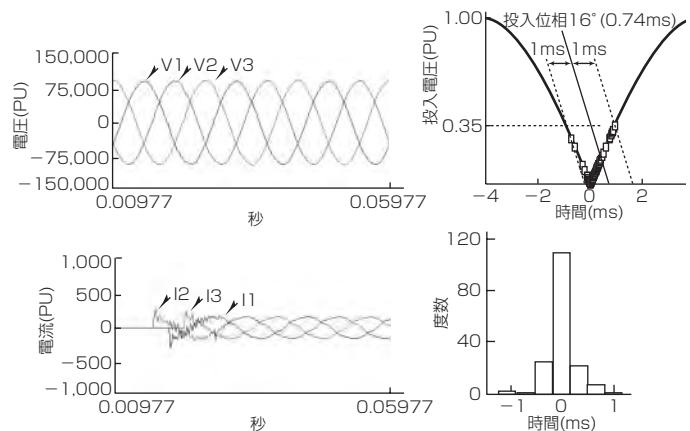


図2. コンデンサバンクへの適用実績

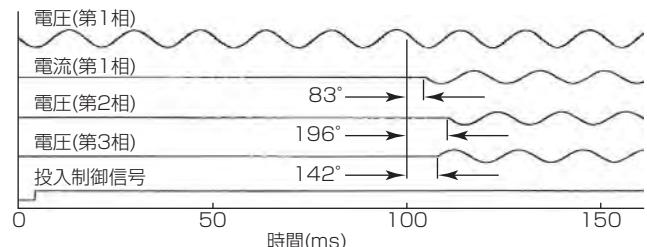


図3. 分路リアクトル位相制御投入結果

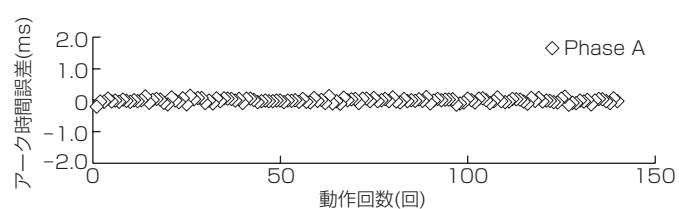


図4. 位相制御遮断時のアーク時間誤差

目標アーク時間からの逸脱による警報出力は発生せず、GCBの消耗による再発弧等も発生せず良好な運転実績を持つ。

さらに、遮断器動作回数2,300回の時点で遮断器の内部点検を実施してアーク接触子の損耗量を調査した結果、交換基準として設定している損耗量の1/4以下であることを確認している<sup>(3)</sup>。図5に消耗の抑制によるアーク時間の延伸効果を示す。これを基に、アーク接触子の交換寿命を2,000回から4,000回の約2倍に延伸した。

### 2.3 変圧器用途への適用

国内では、系統電圧の瞬時電圧低下抑制や保護リレーの誤動作防止の観点から、無負荷変圧器充電時の励磁突入電流を抑制するための変圧器用途への適用が増加している。

#### 2.3.1 各相操作形遮断器への適用

遮断器開放時の変圧器電圧を積分して残留磁束を算出し、定常状態で電源側電圧によって発生する磁束と残留磁束が一致する時刻で遮断器を投入することで、変圧器鉄心の飽和を抑制し、励磁突入電流の抑制が可能である<sup>(4)</sup>。投入位相制御を適用しない場合（三相同時投入）の実測波形例を図6に示す。1,245~2,678Aの励磁突入電流が発生し、変圧器高圧側母線電圧の低下は約11%である。

これに対して、投入位相制御を適用した場合の実測波形例を図7に示す。残留磁束最大相を第一投入相として、残留磁束と定常磁束が一致する位相（A点）で投入する。次に、第一相投入1.5サイクル後に、残り二相を第一相の電圧零点付近（B点）で投入する。位相制御投入の結果、励磁突入電流は100A以下、母線電圧の変

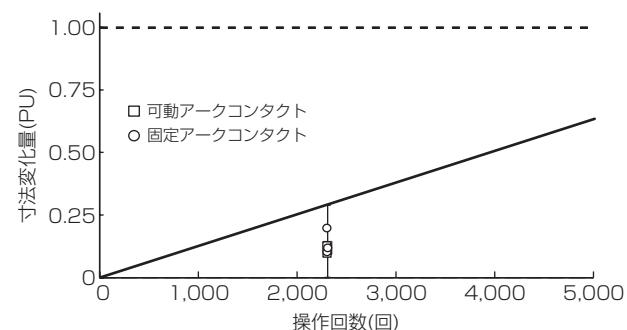


図5. 動作回数とアーク接触子損耗量の関係

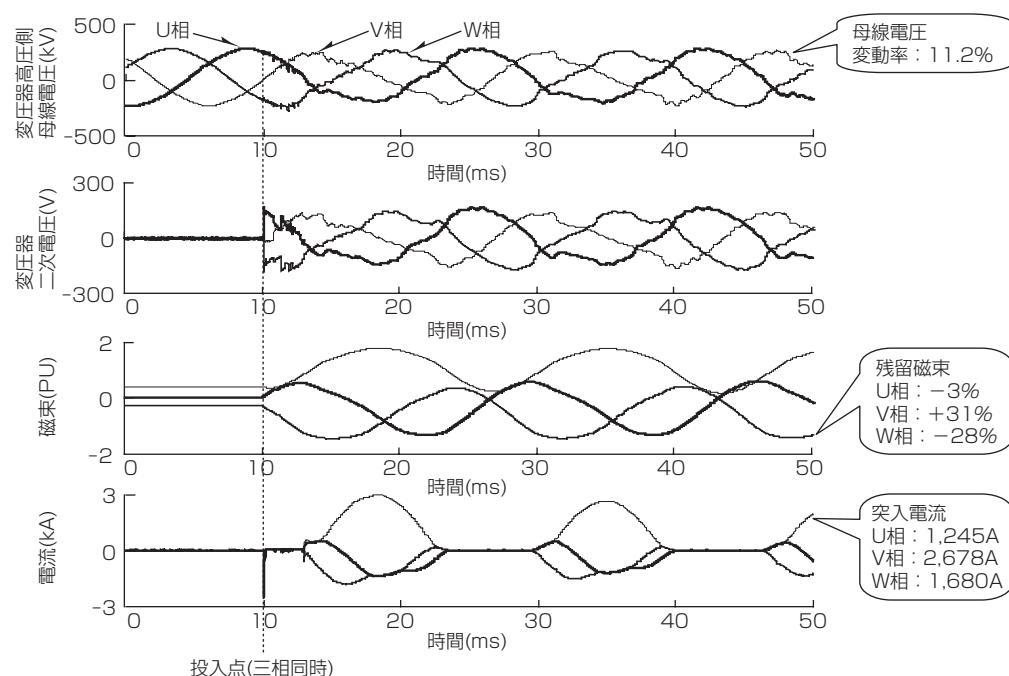


図6. 変圧器位相制御なしの実測結果

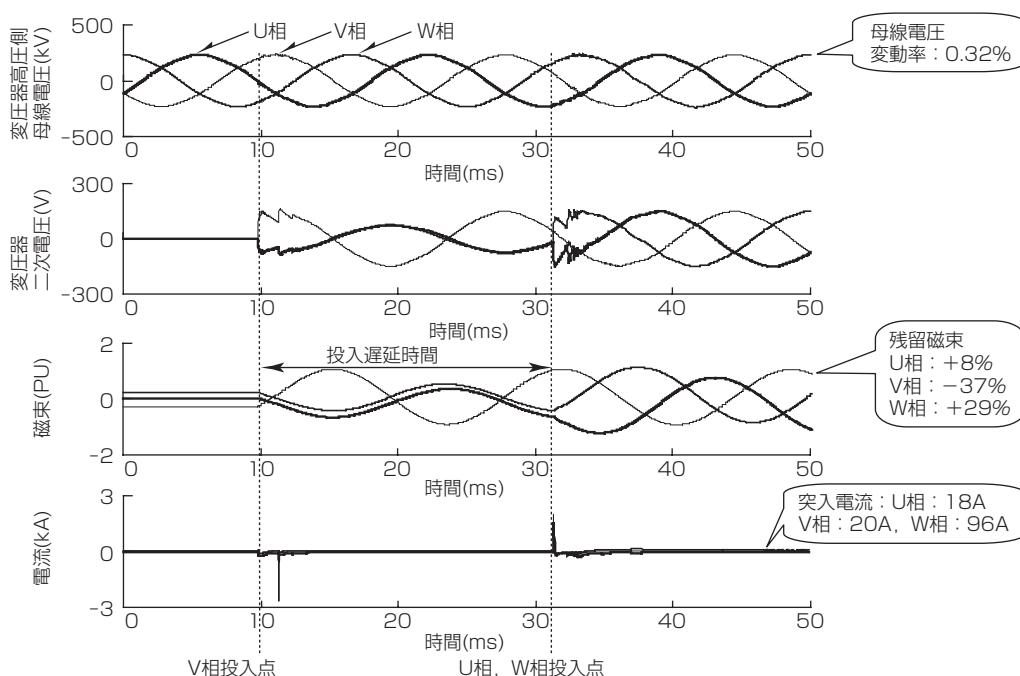


図7. 変圧器位相制御投入の実測結果

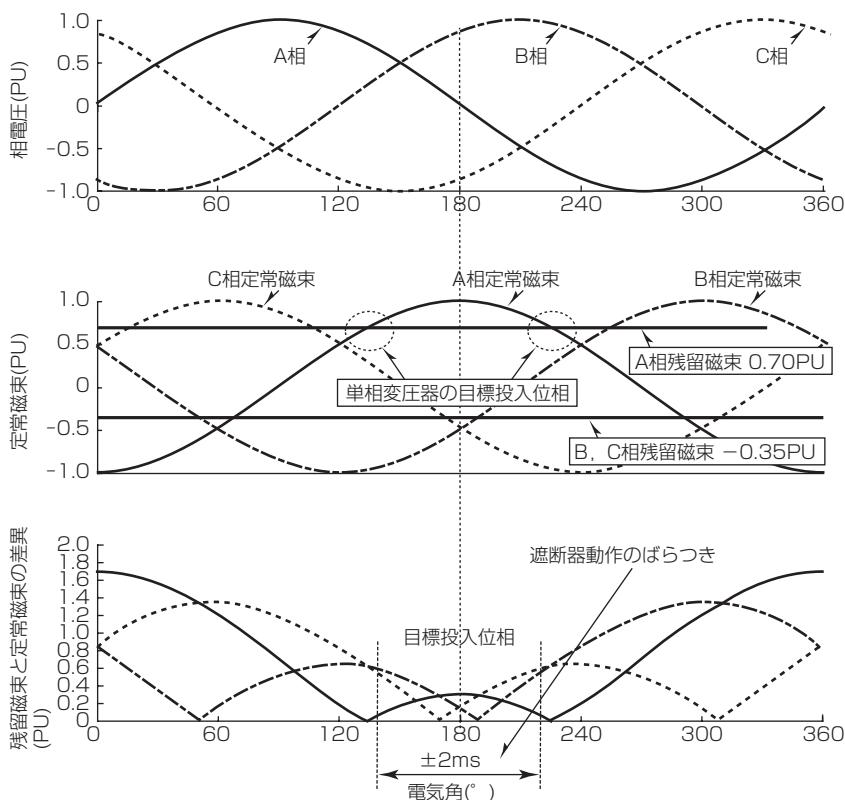


図8. 三相一括操作時の目標位相

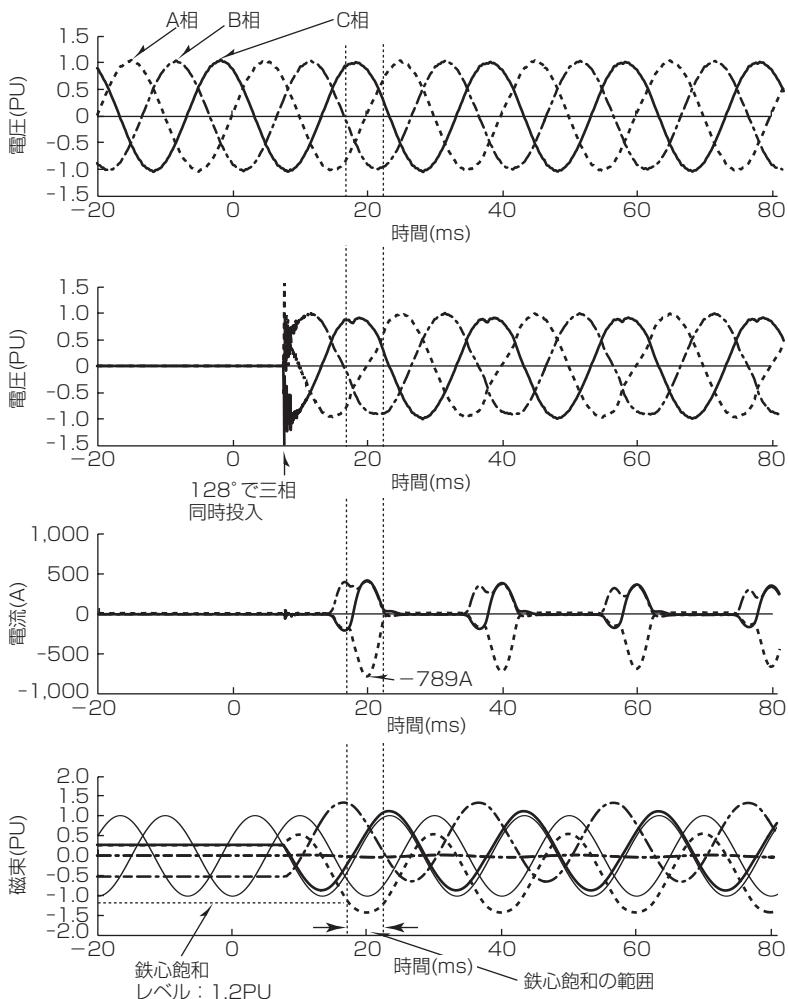


図9. 三相一括操作形遮断器の位相制御投入結果

動率は0.32%に抑制されている。

### 2.3.2 三相一括操作形遮断器への適用

通常開閉極位相制御は、各相の電圧位相に対して制御を行うため各相操作形遮断器に適用されるものであるが、変圧器位相制御では三相一括操作形遮断器に適用しても励磁突入電流を十分抑制することが可能である<sup>(5)</sup>。

三相一括操作時の目標位相 $\varphi_{Opt}$ は、式(1)で述べられる各相の変圧器鉄心内の残留磁束 $\Phi_{iRes}$ と電源電圧から推測される定格磁束 $\Phi_{iPro}$ との磁束差の絶対値の総和 $F_{ABC}$ が最小となる位相である。

$$F_{ABC} = \sum_{i=Phase A, B, C} abs(\Phi_{iRes}(\varphi_{Opt}) - \Phi_{iPro}(\varphi_{Opt})) \quad (1)$$

図8に三相一括操作時の目標位相を鉄心磁束と $F_{ABC}$ と併せて示す。 $F_{ABC}$ が極小となる160~246°が目標投入位相である。

これらの目標投入位相に基づいて、実際の変圧器で位相制御投入を行った際の電流・電圧・鉄心磁束の実測波形を図9に示す。各相の残留磁束がそれぞれ+0.26PU, -0.53PU, +0.27PUの条件での目標位相128°で三相同時投入し、鉄心磁束が飽和領域に入っているもののインラッシュ電流789Aに抑制されている。また、この位相制御投入を複数回実施して得られた励磁突入電流と鉄心磁束の実測結果を位相制御なしの場合と比較したものを図10に示す。位相制御による励磁突入電流は最大で約1,000Aであり、位相制御なしでの励磁突入電流（最大約4,000A）に対して約1/4と、各相操作形ほどではないものの十分な抑制効果が得られていることが確認できる。

### 2.4 無負荷送電線用途への適用

遮断器両端の電圧波形から未来の極間電圧波形を予測することで、リアクトル補償された送電線の高速再閉路責務を伴う遮断器へも投入サージ抑制目的として適用することができる。図11に送電線位相制御の計測・制御の構成を示す。

リアクトル補償された無負荷送電線を開路した場合、送電線電圧は複数の周波数成分が重畠された振動波形となるため、遮断器開路から再閉路までの限られた時

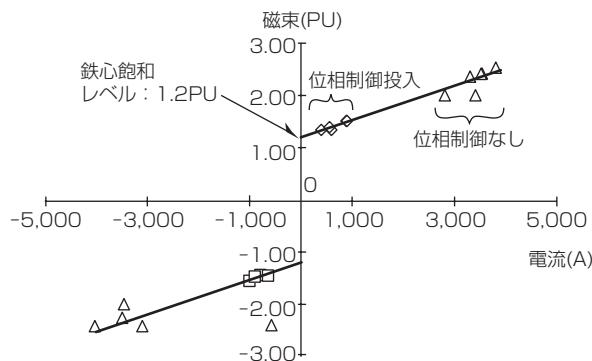


図10. 励磁突入電流と鉄心磁束の関係(実測結果)

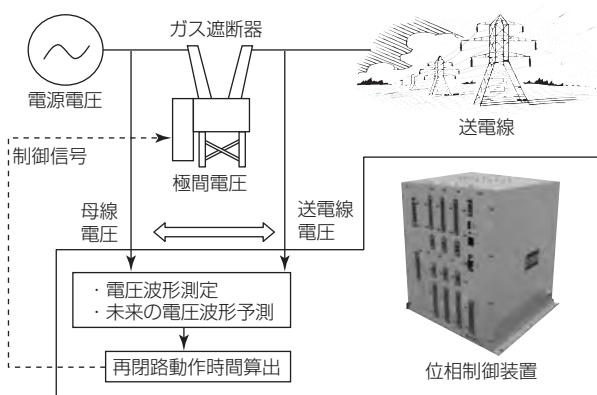


図11. 送電線位相制御システム

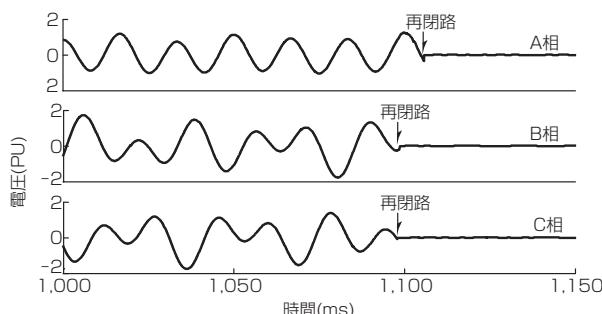


図12. 送電線位相制御投入の解析波形例

間で測定された極間送電線電圧波形を特異値分解の一手法であるMatrix Pencil法を用いて分析し、未来の極間電圧を推定することによって、極間電圧が小さくなる時刻を予測して位相制御投入している<sup>(6)</sup>。

モデル送電線で、一線地絡事故が発生した場合の高速再閉路の系統解析結果の一例を図12に示す。目標点である極間電圧の零点付近で投入されている。閉極時間ばらつきをランダムに発生させた各100回の反復試行を行い、投入過電圧の累積度数分布を得た結果を図13に示す。確率

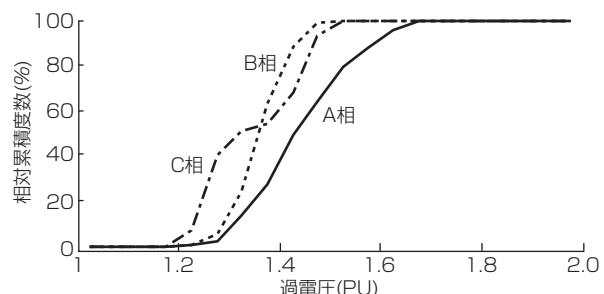


図13. 投入過電圧の累積度分布

98%での過電圧値は、健全相であるB相及びC相でそれぞれ1.48PU, 1.53PU, 事故相であるA相は1.68PUであり、500kV系統の標準的な開閉サージ耐電圧値である約2.3PUに対して十分低い。

### 3. む す び

GCBの開閉動作時に発生する過電圧・過電流を抑制することを目的に開閉極位相制御適用した調相設備用、変圧器用、及び送電線用GCBの運用実績について述べた。今後も位相制御技術の適用によって系統安定化、機器寿命の延伸化に貢献していく。

### 参 考 文 献

- 香山治彦, ほか: ガス遮断器の開閉極位相制御による開閉サージの抑制, 電気学会論文誌B, **124**, No.2, 267~273 (2004)
- CIGRE WG A3.07 : Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers – Guide for Application, Part1 : Electra, No.183, Part2 : Electra, No.185, (1999)
- 森 智仁, ほか: ガス遮断器の位相制御開閉による接点損耗の低減, H20年電気学会電力・エネルギー部門大会, 317 (2008)
- 葛田広幸, ほか: 残留磁束を考慮した変圧器位相制御投入に関する基礎検討, 電気学会論文誌B, **123**, No.6, 765~771 (2003)
- 葛田広幸, ほか: 三相一括操作形遮断器を用いた変圧器位相制御投入における最適閉極位相, H21年電気学会全国大会, 6-201 (2009)
- 小林翔一, ほか: 送電線電圧を考慮した各相操作形ガス遮断器による位相制御投入, H27年電気学会電力・エネルギー部門大会, 6-281 (2015)

# GISへのセンサ技術適用 —部分放電診断の最新技術—

田村佳之\*  
藤井茂雄\*  
西田智恵子\*

*Sensor Technologies Application to GIS—Advanced Technologies for Partial Discharge Diagnostics—*

Yoshiyuki Tamura, Shigeo Fujii, Chieko Nishida

## 要 旨

1980年代、電力会社の変電部門ではセンサを利用した機器監視システムの適用が始まり、ガス絶縁開閉装置(GIS)の絶縁異常の発見を目的として部分放電診断が導入された。導入当初は部分放電現象の研究の過渡期であり、現在の評価では比較的大きな放電電荷量である浮き電極放電(100pC以上)だけが検出できる感度であった。

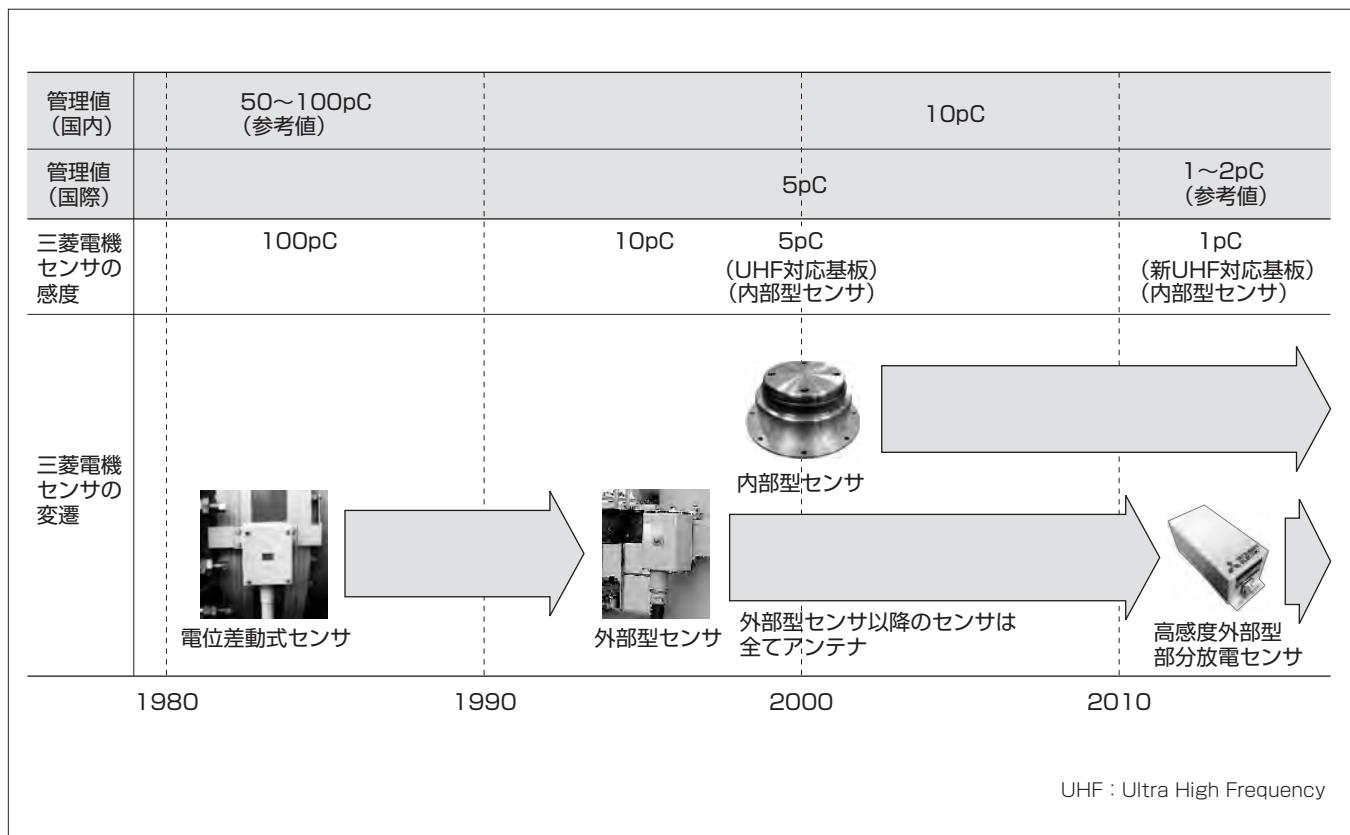
それ以降、部分放電現象の解明が継続して進められ、センサの高感度化、信号処理の高性能化開発が行われてきた。その結果、現在では電荷量1pCの放電現象まで検出することができるようになった。

管理基準・管理推奨値も部分放電現象の解明が進むにつれて強化され、2013年発行のCIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) WG D1.03 (TF09)，

“Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics”では1～2pCの放電現象の検出の必要性が提示されている。

部分放電監視技術は、単に感度の向上だけでなく、システムとしてのノイズ対策、放電発生位相確認による部分放電検出の確度向上及び放電源の推定開発も進められている。

先に述べた1pCの高感度部分放電監視システムは、内部型センサを用いたシステムであるが、既設GIS用として内部型センサとほぼ同じ感度の高感度外部型部分放電センサと吸着剤ケース一体型部分放電センサも開発した。経年30年を超えるいわゆる高経年機器が今後増加していく中で、高経年機器の絶縁診断としてもこの部分放電監視システムを活用していくことが望まれる。



## GISの絶縁性能管理値と部分放電センサの変遷

GISの部分放電はコロナフリーの考えであるが、研究によって起こり得る放電電荷量が求められ、試験規格値や管理推奨値が定められる。この値は年々小さくなっている。それに合わせた部分放電センサと信号処理の開発で、検出感度を向上させてきた。

## 1. まえがき

1980年代、機器監視システムへのセンサ技術の適用が始まり、絶縁異常の発見を目的としたセンサを用いた部分放電診断が導入された。当初は部分放電の現象が深く究明されていなかったこともあり、部分放電の現象を検出するセンサも感度の良いものではなかった。

その後、部分放電に関する様々な研究が続けられ、現象の究明、センサの開発、センサ信号処理の開発が進み、近年では1pCの部分放電現象をも検出することができるようになった。システム面でも $n \cdot q \cdot \phi \cdot t$ (n:部分放電の数、q:大きさ、 $\phi$ :発生位相、t:時間)情報から部分放電の有無と発生源をより正確に判定できるようになっている。

本稿では、2章で部分放電センサ技術と管理値の推移について、3章、4章で部分放電センサと部分放電監視システムの最新技術について述べる。

## 2. 部分放電センサ技術と管理値の推移

部分放電診断の導入期は、検出センサとして加速度センサ及び電位差動式センサが採用された。加速度センサは部分放電で発生するタンク振動を検出する目的で採用された。電位差動式センサはフランジ絶縁部両端に電極を取り付け、部分放電発生に伴うフランジ間の電位差を検出するセンサである。検出感度はともに100pC前後であったが、当時の知見では十分に部分放電の検出が可能であると考えられていた。例えば、一般社団法人電気協同研究会(電協研)1990年発行の電気協同研究第46巻第4号では、各実験による部分放電の検出事例が掲載されており、50~100pCの感度があれば十分と理解できる。

その後、電位差動式センサはより高感度を目指して、フランジ絶縁部に取り付けて絶縁部から漏洩(ろうえい)する電磁波をアンテナで検出する方式に変更した。このセンサは、後に述べる内部型センサと対比して外部型センサと称している。さらに、高感度を目指してGIS内部へのセンサ配置を検討した。分圧型センサは、GIS内部に取り付けられ、部分放電に伴う導体電位変動をコンデンサ分圧によって検出するセンサである。信号検出の帯域は広いが、信号としてUHF帯しか使用しなくなかったこと及び中間電極の抵抗接地が必要なことから、平面アンテナ式の内部型センサに置き換わった。平面アンテナ式の内部型センサは、現在の部分放電検出における標準となっている。

一方、振動を検出する加速度センサはAE(Acoustic Emission)センサに置き換えられて高感度化されたが、電磁波検出方式と比較すると感度が劣るため、主にGIS内を挙動する自由異物の検出用に役割が変化している。

センサの高感度化は、単にセンサの変更だけでは成し得ず、センサに合わせた信号処理技術の開発も必要である。

表1. 限界異物長と放電電荷量<sup>(1)</sup>

type of defect	critical defect	
	length	apparent charge according to IEC60270
moving particle	3~5 mm	2~10pC
protrusion on HV conductor	around 1 mm	1~2 pC
protrusion on enclosure	4~6 mm	2 pC
particle on insulation	1~2 mm	about 0.5pC
void	3~4 mm (diameter)	1~2 pC

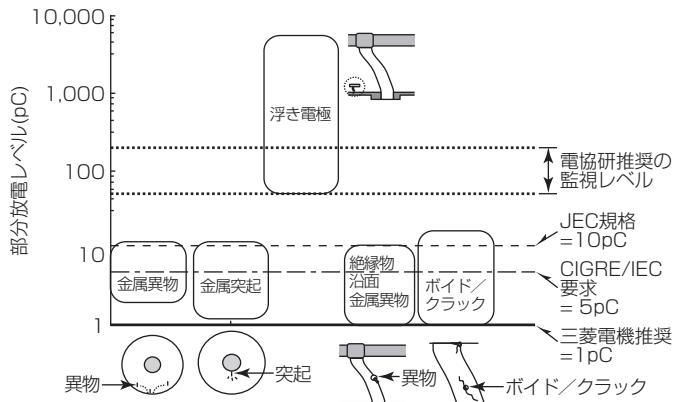


図1. 運用GISでの部分放電電荷量

センサがアンテナに変わったことによって、取り扱う信号の周波数は高くなった。電位差動式センサの場合は、信号の周波数は数MHzからVHF(Very High Frequency)帯(~300MHz)へ移行し、さらにUHF法<sup>(注1)</sup>の登場でUHF帯(500~1,500MHz)又はそれ以上の周波数へと移行している。

部分放電試験規格では、JEC2350(2005年)で従来参考試験とされていた部分放電試験が形式試験項目として規定された。この規格では、部分放電が雑音レベル以下であること、雑音レベルは10pC以下が望ましいとされている。

国際的な動向では、CIGRE報告から採用されたIEC62271-203で5pCを規定している。また、表1に示すように2013年CIGRE報告で、1~2 pCの必要性が提示されている<sup>(1)</sup>。

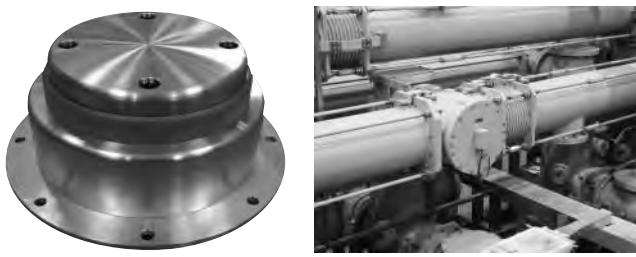
部分放電の研究が進むにつれ、管理推奨基準はより低い放電電荷量側に更新される傾向にある。

図1に、実運用されているGISの部分放電電荷量についての当社の検証結果を示す。部分放電診断導入期の検出能力である50~100pCは浮き電極放電だけを検出できる能力であったが、最新のセンサ技術では全ての部分放電を検出できるまで検出能力が向上している。

(注1) 従来のVHF帯以下の周波数は外部ノイズが多く、部分放電を検出するためにノイズの少ないUHF帯を使用するという手法

## 3. 部分放電センサ

現在は、部分放電を検出するためのセンサとしてアンテナが主流となっている。ここでは、現在の主力センサである内部型部分放電センサを述べるとともに、既設の高経年機器を対象とした外部型部分放電センサについて述べる。



(a) 内部型部分放電センサ

(b) 搭載GIS

図2. 内部型部分放電センサと搭載GIS

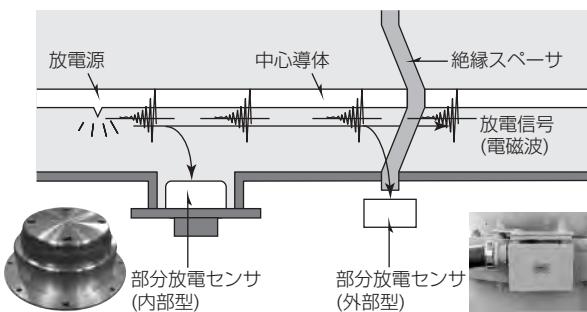


図3. 部分放電センサの検出原理

### 3.1 内部型部分放電センサ

図2(a)に内部型部分放電センサを示す。GISの枝管部に取り付け(図2(b)), 高度に部分放電信号を検出するセンサである。平面アンテナであり, 部分放電に伴うUHF帯の電磁波を検出する。分圧型センサと形状は似ているが, コンデンサ分圧で部分放電を検出するのではなく, アンテナとして部分放電を検出する(図3)。

### 3.2 既設GIS用部分放電センサ

部分放電センサをGIS内部に設置することは, 放電源に近く, かつ, 外部ノイズの影響を受けにくくことから検出感度向上が期待できる。しかし, 取付け部位を確保する必要があり, 既設GISへの適用はできなかった。このため, 既設GIS用として使用できるセンサを開発した。

#### (1) 高感度外部型部分放電センサ

部分放電による電磁波をGIS外部から検出するには, 絶縁スペーサ部にアンテナを取り付ける方法が有効である。当社もアンテナを絶縁スペーサ部に取り付け, GISの部分放電診断を行ってきたが, 内部型センサに比べると感度が落ちるため, より高感度な外部型センサを開発した。

図4に高感度外部型部分放電センサの外観を示す。センサは絶縁スペーサ部に取り付ける。アンテナ部は周波数でインピーダンスが変化しない自己補対型を採用し, フランジ部で発生する電界を効率良く検出できる構造とした。感度は, 外部型にも関わらず内部型部分放電センサとほぼ同じ値を示した(500~1,500MHzの平均実効高さの評価)。湾曲部は絶縁スペーサ部の径に合わせて加工され, ノイズの侵入を低減している。このセンサは既に海外での既設GIS用部分放電監視システムに採用されている<sup>(2)</sup>。



図4. 高感度外部型部分放電センサ



(a) 吸着剤ケース一体型部分放電センサ



(b) 搭載GIS

図5. 吸着剤ケース一体型部分放電センサと搭載GIS

#### (2) 吸着剤ケース一体型部分放電センサ

図5(a)に吸着剤ケース一体型の部分放電センサの外観を示す。GISの水分管理に必須となる吸着剤用のケースにアンテナ機能を一体化したものである。センサの取付け場所を新たに確保する必要がなく, 既設GISにも搭載が可能である(図5(b))。検出部はスリットアンテナと呼ばれるアンテナで, 感度は内部型センサに比べて80~100%の感度を持つ。構造的にGIS内部に設置されるため, 外部ノイズの影響も受けにくい<sup>(3)</sup>。

これらのセンサを用いることによって, 新設GISだけではなく既設のGISにも高感度部分放電診断システムを構築できるようになった。センサは全てアンテナであるので, 信号処理は内部型部分放電センサと同じものを適用できる。

## 4. 部分放電監視システム

当社がこれまで開発・製品化を行ってきた部分放電監視システムの構成と主要機能について述べる。

### 4.1 システム構成例

図6に部分放電監視システムの構成例を示す。部分放電監視を行う上で重要なのは, ノイズとの分別である。部分放電監視システムを据え付ける場合は, 事前に現地でのノイズ測定を実施する。ノイズ測定で確認するのは主に通信電波の有無であり, 強い通信電波が確認される変電所では, センサ信号にフィルタをかけ通信周波数だけ除去する。

センサ信号は同軸ケーブルで現地に設置されたセンサ信号処理ユニットに送られる。センサ信号処理ユニットはセンサ信号と課電電圧の位相情報を1秒ごとに部分放電の数, 大

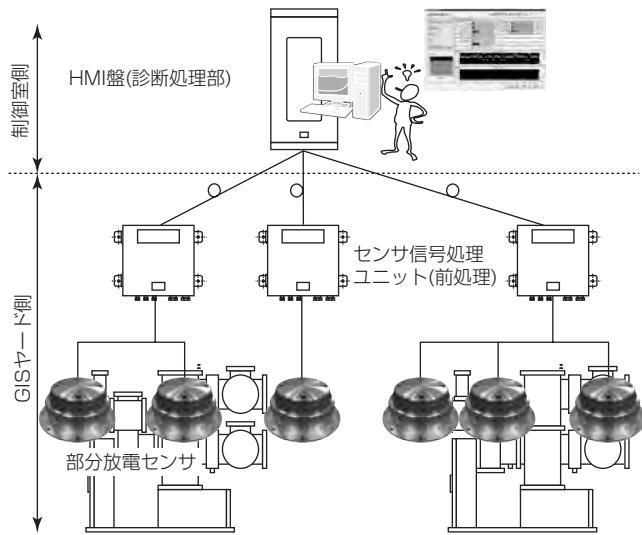


図6. システム構成例

大きさ及び発生位相の情報をデジタル信号に変換し、光通信で上位のHMI(Human Machine Interface)盤内に送る。HMI盤は、各センサで検出した部分放電信号を判定し、部分放電発生と判断した場合はアラームを出力する。HMI盤では、部分放電発生状況を様々な方法で表示し、人間の診断支援も行う。

## 4.2 機能

### (1) ノイズ対策

定常的に発生する通信電波はフィルタで除去できるが、移動無線等の一時的な通信電波に対しては、(3)のエキスパート機能の一部を活用してリアルタイムでアラーム対象から外すこともできる。

### (2) 部分放電情報表示

部分放電診断の導入期は、単に検出した信号の数だけで部分放電発生判定が行われていた。現在のシステムでは、先に述べたフィルタでのノイズ除去を実施した後、 $n-q-\phi$ 情報に $t$ (時間)情報を組み合わせて様々な形で表示することで総合的に部分放電の診断を支援可能となり、部分放電判定の信頼度は各段に向上している。図7に画面例を示す。下段は $q-\phi-t$ の組合せ、中段は $q-\phi-n$ 、上段は $n-\phi$ とF(ゆらぎ)の組合せ表示である。部分放電を、位相特性や電荷量から多角的に判断可能である。

### (3) エキスパートシステム

アラームが発生した場合に、部分放電の数、電荷量、発生位相、及びその変化傾向から、どのような部分放電が発生しているのか、及び放電源を推定することも可能である。図8に、絶縁物沿面異物での診断結果例を示す。放電源の推定は%で表示され、絶縁物沿面異物の数値が80%と最も確率が高いことを示している。

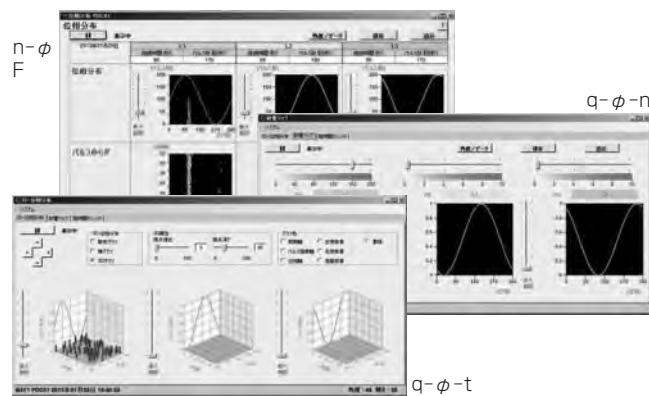


図7. 画面例

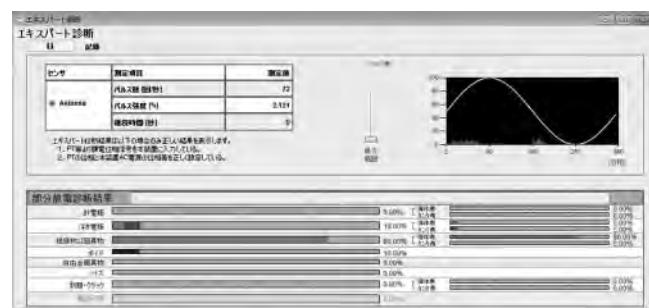


図8. エキスパートシステムの診断結果例

## 5. むすび

機器監視システムへのセンサ技術適用導入期は、浮き電極部分放電の検出能力しかなかったと考えられるが、放電現象の解明が進み、診断技術も向上した現在では1pCの検出能力を持ち、各種の部分放電を検出することができるまでになった。

部分放電信号については、放電信号の数、大きさ、発生位相などの情報からノイズとの分別や放電源の推定も行え、診断の信頼性を上げている。

既設GISに取り付け可能な高感度センサの開発も完了しており、今後増加する高経年機器の絶縁監視にも役立てることが期待される。

## 参考文献

- (1) CIGRE WG D1.03(TF09) (TB No.525) : Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics (2013)
- (2) 伊藤隆史, ほか: GIS用外部形UHF部分放電センサの開発, 電気学会全国大会予稿, 6-316 (2012)
- (3) 伊藤隆史, ほか: 吸着剤ケース一体形部分放電センサの開発, 電気学会全国大会予稿, 6-252 (2014)