



田所通博*

電力流通システムを支える技術

Technological Advancement Supporting Power System Transition

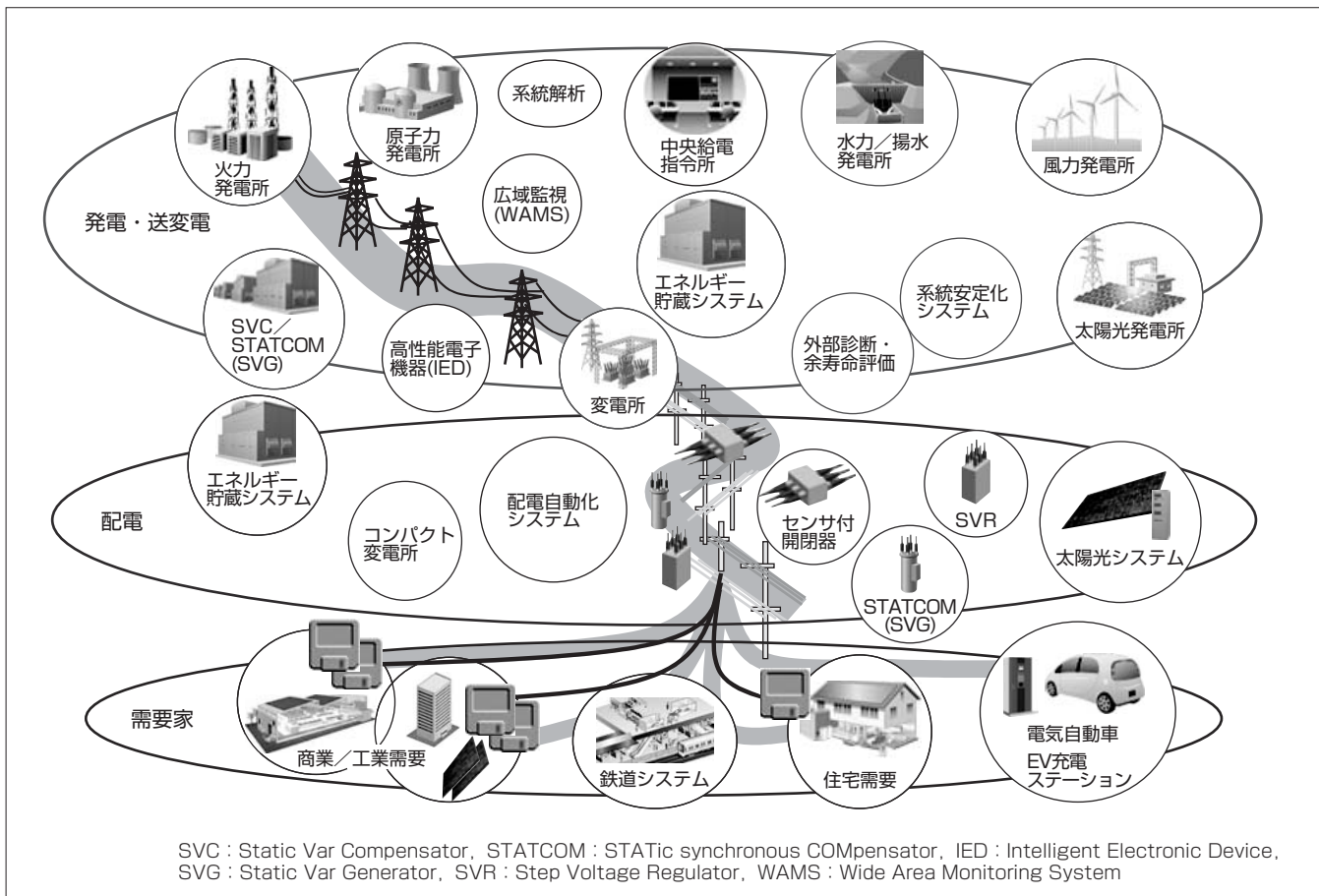
Michihiro Tadokoro

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⁽¹⁾。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、送電網を經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⁽²⁾。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。送変電・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、送発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・運用が変わってきている。図1のように、送発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、運用にかかわ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	高信頼化・保守省力化 機器センサ	1,000kV実証器	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		デジタルリレー FM/PCM電流差動リレー		
		分散型 事故波及防止リレー		中央集中形事故波及防止リレー		
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

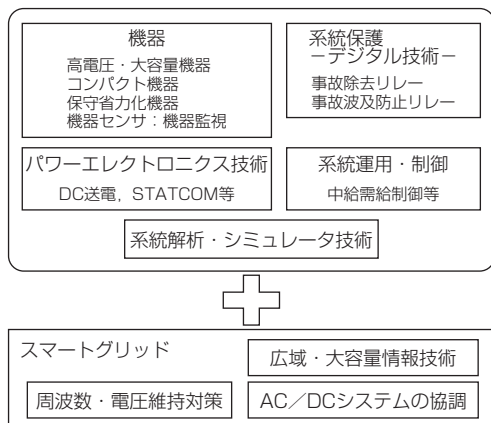


図1. 電力流通システムの構成の変化

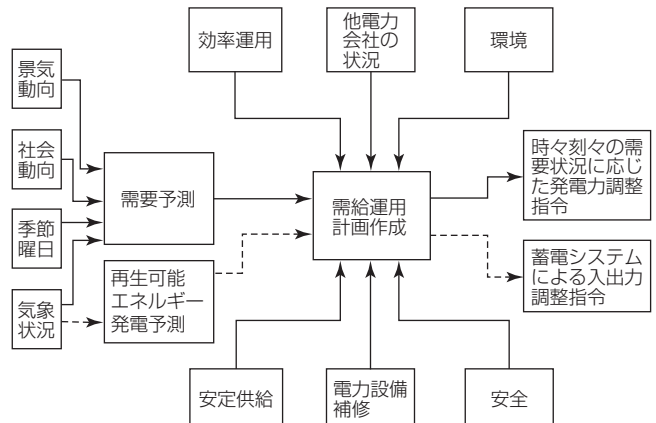


図2. 需給運用

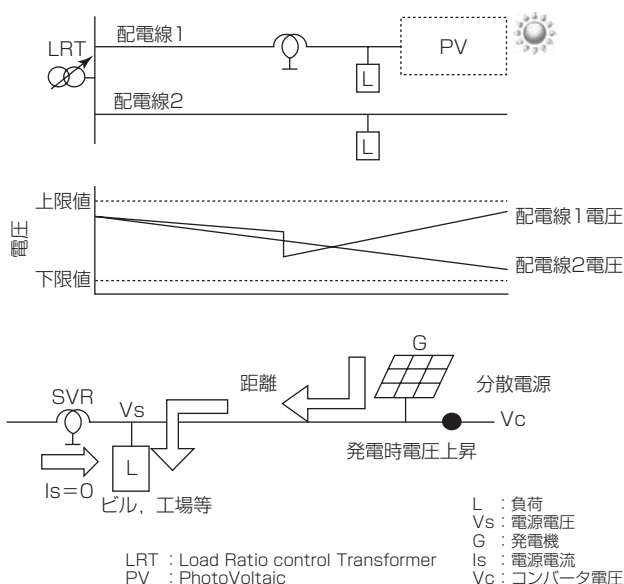


図3. 分散電源導入による電圧変動

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 配電システムへの影響

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、配電システムに分散して接続される。従来、配電システム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システムを構成し、運用されてきた。しかし、配電線の途中で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

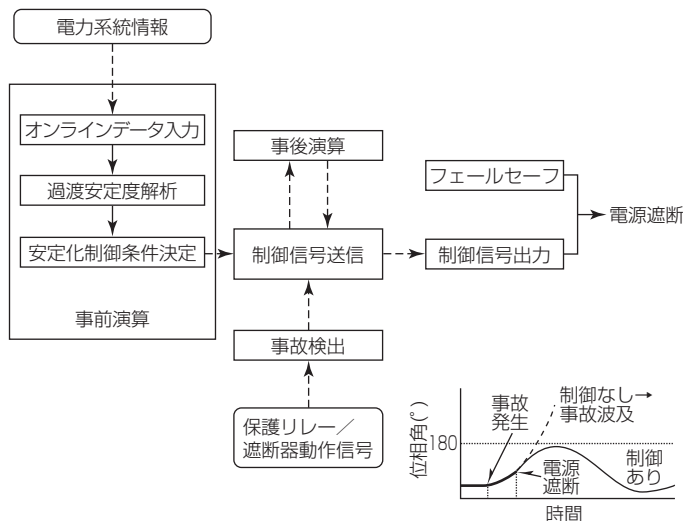


図4. 事故波及防止リレーの構成例

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、これからの系統保護リレーに求められるニーズに応じていく。

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

電力システムでは、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		

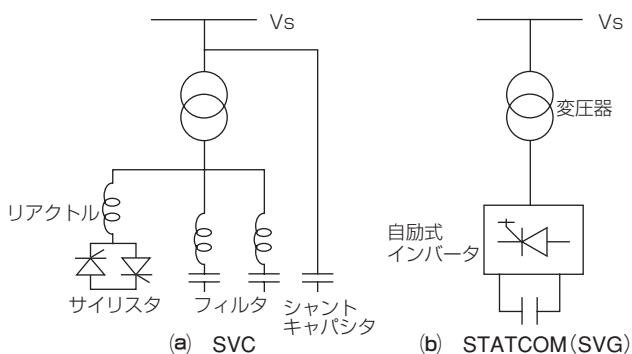


図 5. SVC/STATCOMの回路構成例

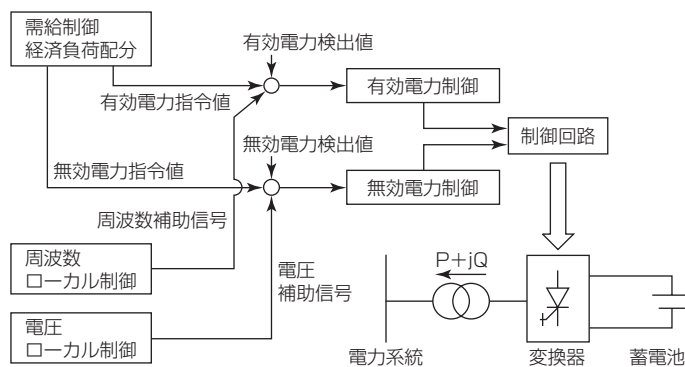


図 6. 蓄電システムの制御構成

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揺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

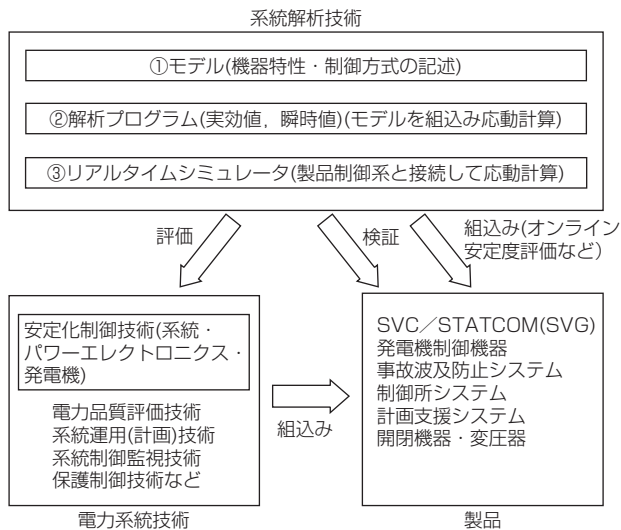


図7. 系統解析技術



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

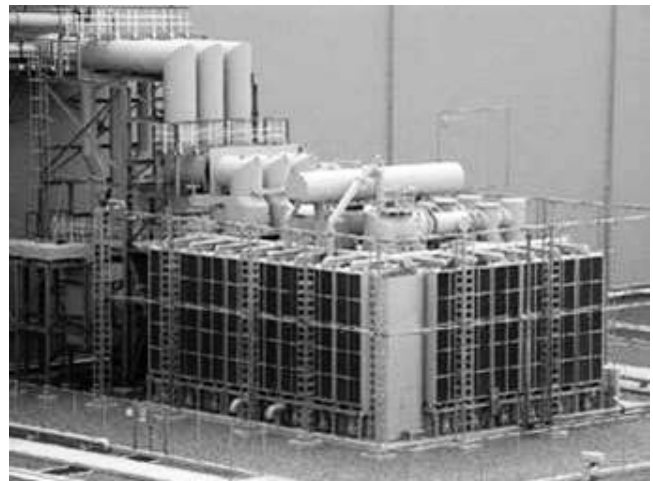


図9. 1,510MVA変圧器

求される場合に外鉄形を、標準的の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

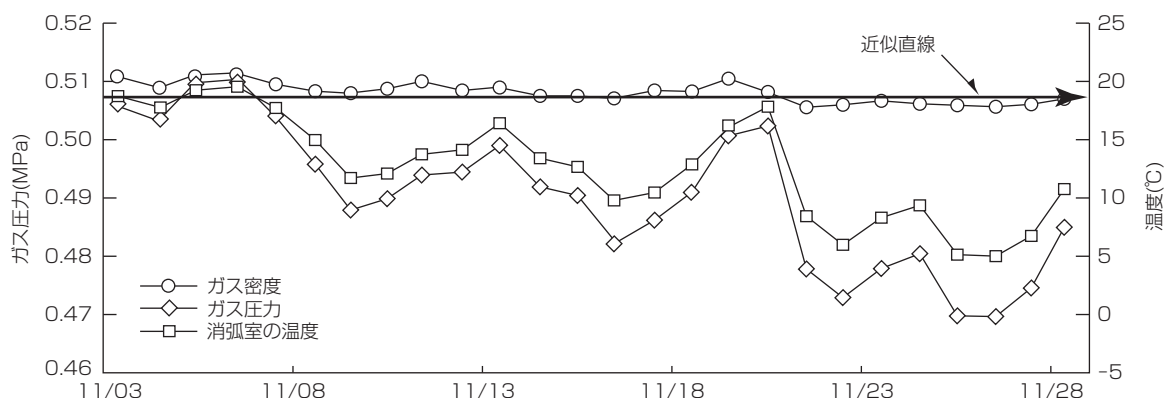


図10. 高経年GCBのガススローク計測例

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-ガススペース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(Condi-

tion 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られる。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) 鈴木浪平：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)