



皆川忠郎*

電力供給を支える送変電機器の技術展望

Technical Trend of Transmission and Distribution Equipment Contributing to Electric Power Supply

Tadao Minagawa

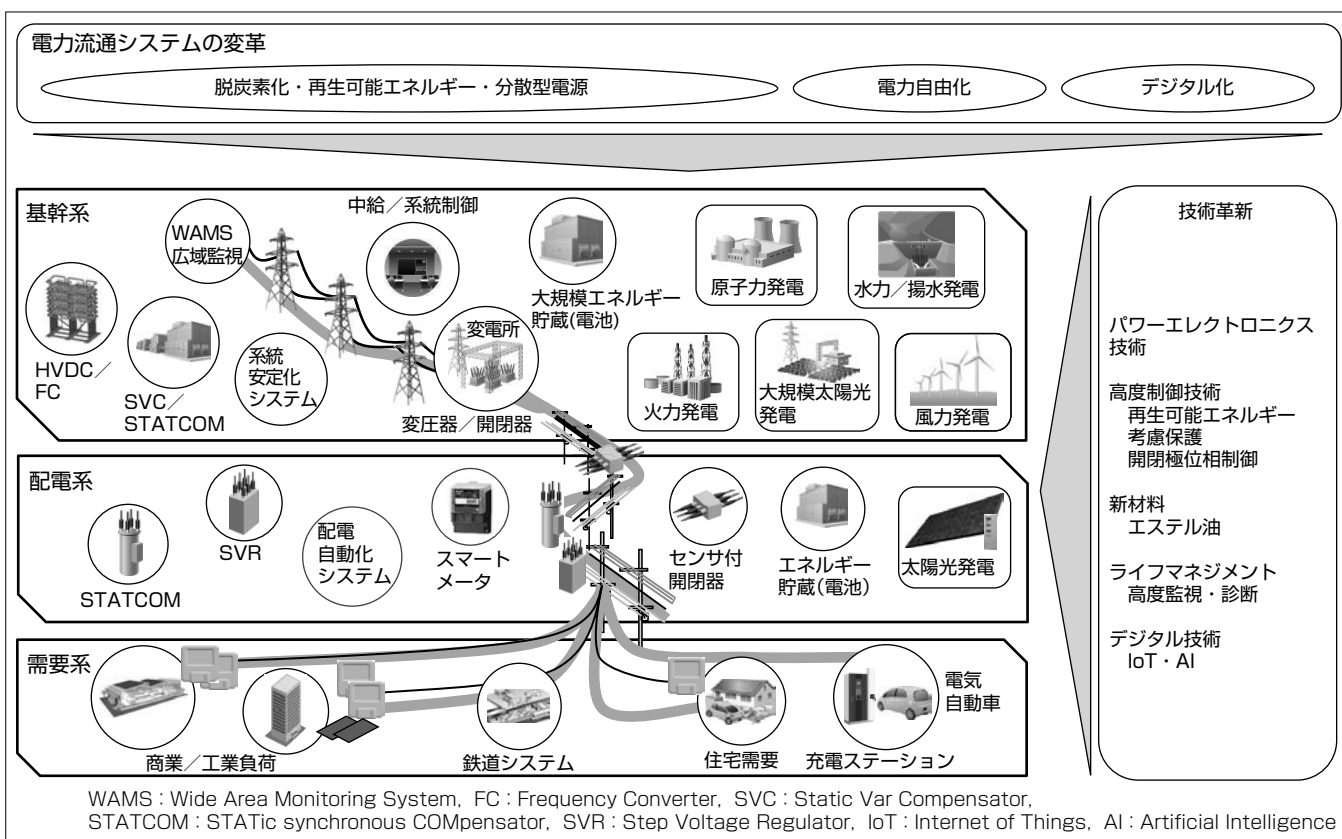
要旨

現代の最も重要なインフラの一つとして、日常生活から産業活動まで社会のあらゆる活動と発展を支えてきた電力流通システムは、今日これまでにない大きな転換点を迎えている。脱炭素化に向けた再生可能エネルギーの導入とそれに伴う電源の分散化とともに、第4次産業革命と言われ、他産業で急速に導入が進展している革新的デジタル化技術の波が、電力流通システム分野にも押し寄せている。加えて日本では、電力市場自由化に向けた改革が実行されており、これらの変化が同時並行で進行している。これらは環境負荷が低く持続可能な社会を実現し、安定した電力供給と電力料金の抑制に向けた変革であるが、従来にはない課題が顕在化して新たな技術開発が必要となっている。

例えば天候によって出力が大きく変化する太陽光・風力

発電等の再生可能エネルギー電源が電力流通システムに大量に接続されると、その変化に耐える堅固なシステムが必要となるため、FACTS(Flexible AC Transmission System)やHVDC(High Voltage DC)などのパワーエレクトロニクス技術を活用した製品や、新たな保護・制御システムの開発が行われている。また開閉装置や変圧器などの従来の変電機器でも、新たに生ずる課題に応える技術開発が求められている。

三菱電機では、長年培ってきた基盤技術に加え、デジタル化技術などの革新的技術を取り入れた技術開発に取り組み、高品質の製品・サービスの提供を通じて電力流通システムの革新に貢献していく。



電力流通システム

電力流通システムについて、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。環境負荷を低減する再生可能エネルギー電源の大量導入と電力自由化やデジタル化などの電力流通システムの変革を推進する送変電機器の技術革新に貢献していく。

1. ま え が き

電力流通システムは、これまで電力需要の伸びに対応して拡張、高度化の進歩を続け、現代での最も重要なインフラとして、日常生活から産業活動まで社会のあらゆる活動と発展を支えてきた。適用される送変電機器では、必要とされる電力システムに対応した高電圧化・大容量化と、系統安定化技術の開発を継続してきた。その電力流通システムで、これまでにない大きな変革が現在同時並行的に進行している。送変電機器には、その過程で生ずる新たな課題を解決して、将来にわたって引き続き安定した電力供給の実現に貢献することが求められている。

本稿では、変貌する電力流通システムでの課題解決に貢献できる技術として、FACTSやHVDCなどパワーエレクトロニクスを活用した製品や、新たな系統安定化システム、開閉装置や変圧器など従来の変電機器に適用される新技術、さらには増加する高経年の変電機器の合理的管理を支援する技術など、電力供給を支える送変電機器の技術展望について述べる。

2. 電力流通システムを取り巻く環境

2.1 これまでの電力流通システムと送変電機器の開発

現代の最も重要なインフラの一つである電力流通システムの発展は、大規模電源開発と長距離送電及び電力システムの安定運用によるものであった。その実現には高電圧・大容量の送変電技術及び系統保護技術が不可欠であり、日本では1950年代後半から275kV、1973年から500kV送電の運用を開始し、さらに1990年代には1,000kV送電のための機器開発と実証試験が実施されている。また電源と電力システムの増強に伴って増加する事故時の短絡電流に対応するため、遮断器では高電圧化とともに遮断電流向上の開発も進

められた⁽¹⁾。

表1に示すように当社では、開閉装置としては1976年に550kVフルGIS(Gas Insulated Switchgear)を実用化し、さらに1990年代には油圧操作1点切550kVガス遮断器(Gas Circuit Breaker : GCB)とGISを開発した。また近年には機器の状態を監視するためのセンサや、投入・遮断の位相を制御して行うための開閉極位相制御など高機能化開発にも精力的に取り組んできた。

変圧器についても高電圧化・大容量化の要求に対応する開発が進められ、当社では1970年代から500kV器を国内外に納入し、1980年代には765kV器を輸出し、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切るとともに、2002年には三相器として世界最大容量の1,510MVA器を製作・納入している。

電力システムの安定運用に不可欠な系統保護リレーは、コンピュータや通信伝送系の性能向上を活用してデジタルリレーが開発され、アナログ静止形リレーから置き換わっていった。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、その後もデジタル技術の発展に追従した最新化の開発を継続し、製品を供給している。

2.2 電力流通システムの変革

電力流通システムで、これまでにない大きな変化が進行している。脱炭素化に向けた再生可能エネルギーの導入とそれに伴う電源の分散化、全世界で急速に進展するデジタル化技術革新と第4次産業革命の波が押し寄せている。また日本では電力市場の自由化に向けた改革も進行中で、さらに人口減少と過疎化に伴う電力需要とインフラ維持のバランスも課題となる。これらは電力事業に影響を与える“五つのD(Depopulation, Decarbonization, Decentralization, Deregulation, Digitalization)”として指摘され、送変電機器の技術革新によって解決が期待される課題である⁽³⁾。

表1. 日本での電力流通システムと送変電機器の変遷⁽²⁾

	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	
	高度成長期		安定成長期		低成長期		第4次産業革命		
電力システム改革							☆広域的運営推進機関設立	☆小売全面自由化	
							☆發送電分離		
送電安定化					☆STATCOM	☆紀伊水道HVDC	☆450MVA STATCOM	☆HVDC検証棟	
電力系統保護	アナログ静止形リレー		デジタルリレー						
	位相比較リレー		FM/PCM電流差動リレー					再生可能エネルギー考慮	
	分散形事故波及防止		中央集中形事故波及防止					系統保護システム	
開閉機器遮断器GIS	高電圧・大容量化		☆550kVフルGIS	☆1,000kV実証器		☆420kVばね操作1点切			
			高信頼化・保守省力化		☆開閉極位相制御		アセットマネジメントシステム		
			☆機器センサ						
変圧器	高電圧化		☆500kV器	☆1,000kV実証器		☆植物油入変圧器			
	大容量化		☆分解輸送器(CGPA)		☆三相器1,510MVA	アセットマネジメントシステム			
			☆77kVガス絶縁変圧器	☆275kVガス絶縁変圧器					

FM : Frequency Modulation, PCM : Pulse Code Modulation, CGPA : Coil Group Packed Assembly

2.2.1 脱炭素化・再生可能エネルギーと電源分散化

2015年のCOP21(第21回気候変動枠組条約締約国会議)でのパリ協定の採択が後押しとなり、脱炭素化に向けた取組みが世界的に活発化し、電力システムでは再生可能エネルギーの導入と電源分散化が加速している。日本では“第四次エネルギー基本計画(2014年)”で2030年度の再生可能エネルギーの導入目標を22~24%に設定し、“第五次エネルギー基本計画(2018年)”ではさらに、2050年に向けて“主力電源化を目指す”ことが示された。再生可能エネルギーは環境負荷低減の長所を持つ反面、天候によって大きな出力変動を生ずることが最大の課題とされるが、この解決のため送変電機器に期待される技術革新としては、洋上風力発電の長距離ケーブル系統でのHVDC適用や、過酷事故時の電源制限等の高速制御などがあり、世界的に活発に技術開発が進められている。

2.2.2 電力自由化

2016年に電力小売完全自由化を完了し、2020年には電力会社の発電事業と送電事業を分離する発電送電分離が予定されている。この施策によって低コストの送変電機器が期待されるとともに、より合理的で透明性の高い設備導入、維持管理が求められるものと考えられる。

2.2.3 デジタル化

第4次産業革命と呼ばれるデジタル化・IoT技術は、著しい速度で進展し、既に今日様々な産業に強いインパクトを与えている。電力流通システム分野でも、これらを活用した新たな製品・システムの開発が世界的に活発化しており、送変電機器の革新的技術の創出が期待される。

3. 新たな課題に応える送変電機器開発

2.2節で述べた電力流通システムの変革に伴って生ずる課題の解決に向け、当社が取り組む技術開発を次に述べる。

3.1 FACTS

大容量長距離送電の送電安定化や、再生可能エネルギーの大量導入に起因する電圧不安定の対策が求められている。パワーエレクトロニクスを活用したFACTS機器であるSVCやSTATCOMは、無効電力を制御することで、これら課題の解決を可能にし、今日世界的に導入が加速されている。STATCOMやSVC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1にSVCとSTATCOMの回路構成例を示す。当社は1991年に定態安定度向上を目的とした80MVA STATCOMを納入した。また、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目的とした130MVA STATCOMを納入した。

3.2 HVDC

同じくパワーエレクトロニクスを適用して再生可能エネルギー大量導入に伴う課題解決に寄与できる技術として、HVDCシステムが着目されている。特に送電線コストが小さいなどの理由から長距離送電で優位であり、洋上風力発電用の長距離の海底ケーブル系への適用が活発化している。また国内ではHVDCを適用して50Hzと60Hzを連系する周波数変換所の設備強化が進められている。当社は、2000年に四国と本州の連系強化を目的に設置された紀伊水道直流連系設備で、他励式変換器を含む機器を納入したが、現在MMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムの開発を進めている。その実用性を実器によって検証することを目的として、当社工場敷地内に、容量50MWの送電線を持たない直流送電システム(Back To Back: BTB)検証設備(図2)を建設しており、2018年下期に稼働開始して、各種の検証試験と次機種開発を行う予定である。

また現在は、交流系統同士を1対1で接続する2端子構成が世界でも大部分であるが、将来必要になる多端子HVDCシステムのための技術開発も進めている。多端子HVDCで新たに必要となる技術の一つに、直流遮断器(DCCB)がある。直流での電流遮断では、交流と異なって自然電流零点が存在しないことから、電流零点を形成するための手段が必要になる。当社では外部共振回路によって強制的に電流零点を形成し、VCB(Vacuum Circuit Breaker)を適用した遮断部で直流電流の遮断を行う方法を開発した。これまでに80kVクラスのプロトタイプを完成し、16kAの直流電流を10ms以内で高速に遮断可能であることを確認している。

3.3 システム安定化システム(系統保護リレー)

既述のとおり、これまで系統保護リレーは最新のデジタル技術を適用した開発を継続してきたが、電力システムでの過酷事故発生時に、電源制限等の制御を高速に実施することで系統全体への事故の波及を防止し、大規模停電を未然に防止するシステム安定化システム(系統保護リレー)についても、

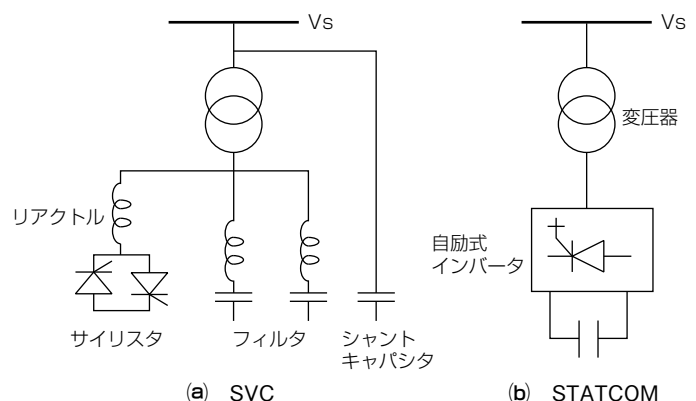


図1. SVCとSTATCOMの回路構成例

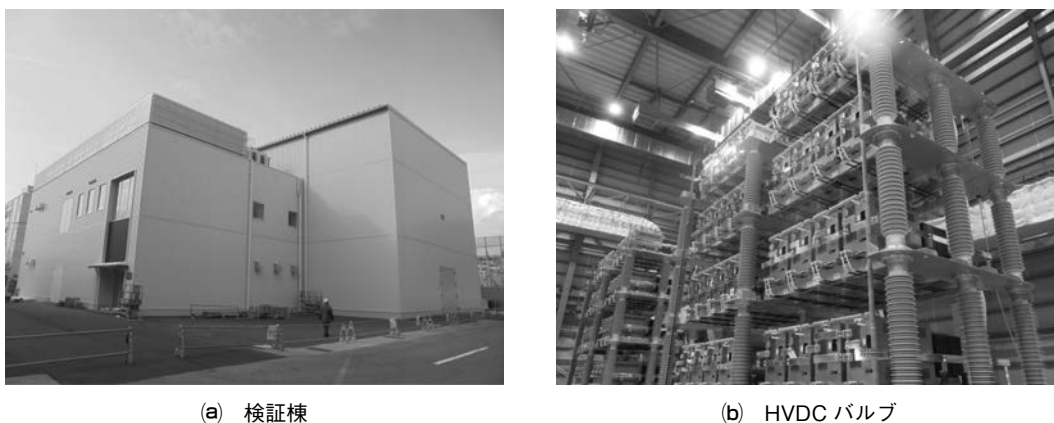


図2. HVDC検証設備

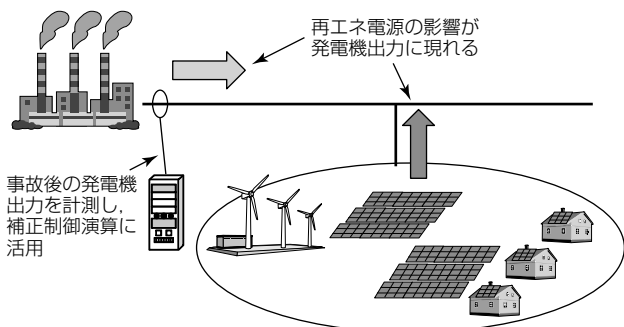


図3. 再生可能エネルギーを考慮した安定化制御

再生可能エネルギーの大量導入に対応した開発の重要性が高まっている。当社では、事故発生直後の発電機出力を測定し、短時間に大きな潮流変動を生じさせる再生可能エネルギーの影響を補正して、適切な制御を行う手法を採用したことによって、事故時の再生可能エネルギーの特性を考慮した安定化が可能になった(図3)。

3.4 GISの環境負荷低減と保守性向上

開閉装置では大幅な小型化のための機種開発を進め、先に開発済みである420kV GIS(図4)⁽⁴⁾では、地球温暖化ガスであるSF₆ガスを40%削減、今回開発した縮小形300kV GISでは20%の削減を達成し、大幅な環境負荷低減を実現した。なお環境負荷の観点では、機器からのSF₆ガス漏えい量がより重要な指標となるが、電気協同研究でのフィールド実機の調査結果から、当社GIS、GCBの漏えい量は、IEC(International Electrotechnical Commission)規格が要求する0.5%/年の1/10を下回る値であることを確認している⁽⁵⁾。またこれらGISでは、トーションバーばね操作装置適用によるメンテナンスフリー化の開発も進め、保守省力化を実現した。

3.5 変圧器での環境負荷低減

変圧器では、大豆を基材とする絶縁油を適用した環境負荷低減機種を開発し、2017年に製品を市場投入した(図5)。植物油由来であるため、カーボンニュートラルであるとともに、万一土壤に漏えいした場合でも、微生物によって分

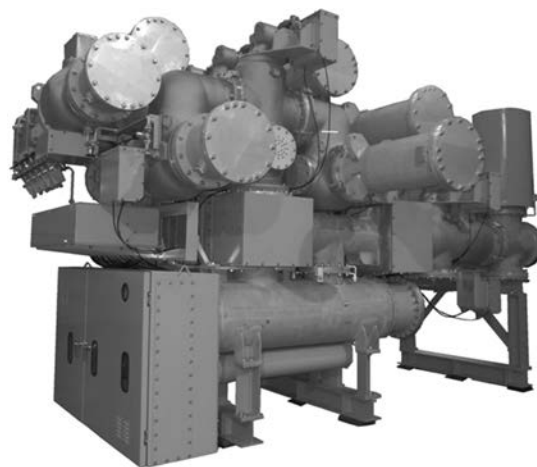


図4. 420kV GIS



図5. 植物油入変圧器

解される生分解性を持つことでも環境負荷低減が実現され、さらに使用する大豆油の高い引火点によって変圧器の火災リスク低減にも寄与している。また植物油入変圧器に適用可能な異常診断技術も開発を完了しており、従来の鉱油入変圧器と同様の保守管理を可能としている。

3.6 送変電機器のライフマネジメント

電力自由化によって、送変電機器の維持管理コスト低減

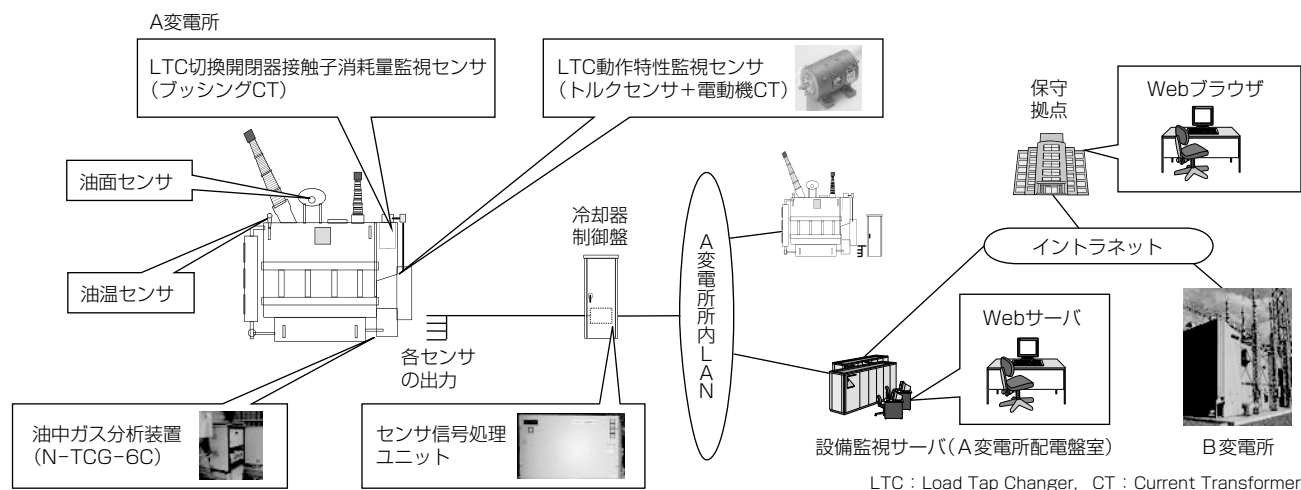


図6. 変圧器監視システム

の期待が強まる一方で、高経年運用される機器が増加しており、設備更新・保守の合理化と設備の信頼性確保の両立が非常に重要な課題となっている。そこで機器の状態を正確に把握できる各種センサを用いた監視装置とシステムの開発を行っている(図6)。このシステムでは、センサによって機器の状態を正確に把握・診断するとともに、最新のIoT・デジタル技術を適用しており、高度なアセットマネジメントシステムとして設備の包括的管理の支援が可能である。

4. む す び

環境負荷低減に向けた再生可能エネルギーの大量導入、電源分散化と電力自由化への対応に加えて、デジタル化の著しい進展など、電力流通システムが大きな変換点を迎えている。この過程においては、これまでにない様々な課題が顕在化しており、例えばパワーエレクトロニクスを適用したFACTSやHVDC、再生可能エネルギーを考慮した系統安定化システム、環境負荷を低減するとともに保守性を

向上させた開閉装置や変圧器、増加する経年機器の状態を正確に診断して合理的な設備管理を支援する監視システムなど、革新的技術による課題解決が期待されている。

これらの送変電機器の革新的技術の開発を更に進めて、より付加価値の高い、新たな電力流通システムへの発展に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Ito, H., et al.: CIGRE Green Book "Switching Equipment", Springer (2018)
- (2) 田所通博: 電力流通システムを支える技術, 三菱電機技報, **89**, No.11, 594~599 (2015)
- (3) 竹内純子, ほか: エネルギー産業の2050年Utility3.0へのゲームチェンジ, 日本経済新聞出版社 (2017)
- (4) 新形420kV GIS, 三菱電機技報, **90**, No.1, 12 (2016)
- (5) 一般社団法人 電気協同研究会: 電力用SF₆ガス取扱基準, 電気協同研究, **54**, No.3 (1998)