

# 三菱電機技報

11

2018

Vol.92 No.11

環境負荷低減と電力の安定供給に貢献する電力流通技術



## 目 次

特集「環境負荷低減と電力の安定供給に貢献する電力流通技術」  
持続可能な社会に向けての電力流通システム…… 巻頭言 1  
中野直広

電力供給を支える送変電機器の技術展望…… 巻頭論文 2  
皆川忠郎

HVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境 …… 7  
宇田涼介・今田倫行・藤澤昂征

FACTS適用による北米系統の安定化 …… 12  
松田明洋・山中大輔・土谷多一郎

高電圧直流送電向け直流遮断器 …… 16  
常世田 翔・稲垣卓志・亀井健次・藤田大輔

再生可能エネルギー電源の大量導入に対応した  
系統安定化システム …… 21  
草場健一郎・久留島智博・佐々木孝志・西野 宏・前田 徹

高経年変電機器のライフマネジメント …… 26  
伊東啓太・北山匡史・宮田秀樹・近野智規

油入変圧器の異常診断技術の高度化 …… 30  
加藤福太郎・近野智規・網本 剛・柏野敦彦

縮小形300kVガス絶縁開閉装置 …… 34  
中内慎一朗・中村泰規

ポリマー適用機器のシリーズ開発 …… 39  
齋藤弘樹・木佐貴 治

高生分解性を持つ植物基材の絶縁油を使用した変圧器 …… 44  
西村亮岐・西村 豪・中山孝一・近藤大輔

鉄道車両用走行風利用自冷式主変圧器 …… 47  
速水賜基・小林伸匡・野田敏広・新庄孝基

IEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステム …… 51  
鍋野恭宏・久村大作・島田洋輔・西澤 研・上楽康智

Power Transmission Technology for Reducing the Environmental Load and Stabilizing Power Grid  
Power Transmission System for Sustainable Society  
Naohiro Nakano

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

Simulator Test Facility for HVDC Control and Protection Equipment  
Ryosuke Uda, Noriyuki Imada, Takayuki Fujisawa

Power System Stabilizing within USA by Application of FACTS Devices  
Akihiro Matsuda, Daisuke Yamanaka, Taichiro Tsuchiya

DC Circuit Breaker for High Voltage DC Systems  
Sho Tokoyoda, Takashi Inagaki, Kenji Kamei, Daisuke Fujita

Special Protection Systems Adapted for Large-scale Renewable Energy Sources Installation  
Kenichiro Kusaba, Tomohiro Kurushima, Takashi Sasaki, Hiroshi Nishino, Toru Maeda

Life Management of Aged Substation Equipment  
Keita Ito, Masashi Kitayama, Hideki Miyata, Tomonori Chikano

Enhancement of Fault Diagnostic Technique on Oil-immersed Transformer  
Fukutaro Kato, Tomonori Chikano, Tsuyoshi Amimoto, Atsuhiko Kashino

Compact 300kV Gas Insulated Switchgear  
Shinichiro Nakauchi, Yasunori Nakamura

Series Development of Polymer Application Equipments  
Hiroki Saito, Osamu Kisanuki

Transformer Using Vegetable-oil-based Dielectric Fluid Having High Biodegradable  
Ryoki Nishimura, Takeshi Nishimura, Koichi Nakayama, Daisuke Kondo

Natural Air Cooling for Traction Transformer  
Shiki Hayamizu, Nobumasa Kobayashi, Toshihiro Noda, Koki Shinjo

Transmission Line Protection Relay System Based on IEEE C37.94 Communication Standard  
Yasuhiro Nabeno, Daisaku Kumura, Yosuke Shimada, Ken Nishizawa, Yasutomo Johraku

## 関連拠点紹介 …… 55

### 特許と新案

「車両用変圧器」  
「系統安定化制御システムおよび系統安定化制御方法」 …… 57  
「直流遮断器」 …… 58

## スポットライト

### デジタル形保護継電器新型MELPRO-Dシリーズ

## 表紙：HVDC システム

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(High Voltage Direct Current)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設備強化が進められている。

この事業環境に対し、三菱電機は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、送電線を持たない直流送電システム(Back to Back: BTB)検証設備を建設しており、2018年下期に稼働開始、各種の検証試験、次機種開発を行う予定である。



巻/頭/言

持続可能な社会に向けての電力流通システム

Power Transmission System for Sustainable Society



中野直広  
Naohiro Nakano

“今、電力流通システムに求められていること”

従来、消費地から離れた沿岸部に発電所が建設されることが多く、消費地までの長い距離を送電線で電気を運んでいました。その電気を運ぶ技術が関わる業界に大きな変化が訪れています。

一つは電力自由化で、電力系統がつながっている限り、発電された電気を全国どこからでも買える仕組みが導入されました。大量の電力を必要とする需要家にとっては、より安価に電気を買い求めることができるようになった反面、電気を作る事業者(以下“発電事業者”という。)は複数候補の中から選ばれ、運ぶ事業者(以下“送電事業者”という。)は原則論として電源を選べないという、より厳しい競争市場となります。送電事業者に設備を提供するメーカーにも、この変化への対応が求められます。また、2020年には発電送電分離という、発電事業者と送電事業者を分離する局面が訪れます。発電事業者にはいかに効率良く電気を発電するかが求められますが、送電事業者には発電された電力をいかに効率良く運ぶかが求められることとなります。限られた設備で質の高い電力を、効率的に伝達することが迫られることになり、過剰な設備の投資は抑制されることが予想され、設備を提供するメーカーにとっては更に厳しい局面を迎えることとなります。

もう一つは低炭素社会の実現に向け、よりクリーンなエネルギーである再生可能エネルギーの導入が加速され、その影響に伴う課題が顕在化しています。再生可能エネルギーの代表的なものは、太陽光発電や風力発電となりますが、これらは天候に左右される性質があるため、天候の状況によって発電量が大きく増減することで、電力の需給バランスにずれが生じる可能性があります。需給バランスのずれは周波数の上昇又は低下を引き起こし、一定以上のずれが生じると発電機を停止せざるを得ない状況に追い込まれます。最悪の事態としては、停電に至るおそれを含んでいます。このような電力系統では、ずれを予測して吸収・調整することで安定化させる運用が求められています。

“より効率の良い、環境に配慮した設備で”

効率の良い設備で電気を運ぶためには、その投資をミニマムに抑える必要があり、よりコンパクトで、高性能な設備が求められます。コンパクトな設備で同じ機能を実現することで、製造に必要とする部材の低減、質量低減につながり、設備を作るために投入する資源を抑制するという環境配慮を通じて世の中に貢献できます。また、設備の提供に当たっては環境に優しい部材で構成される設備、環境負荷を低減する設備が求められています。温暖化係数の高いガスの使用と排出を極小化した設備(縮小形GIS(Gas Insulated Switchgear)など)、自然由来の材料を使用した設備(植物油入変圧器)など、省エネルギーに貢献し、より効率良く電気を伝えることが可能な設備などでこれらのニーズに応えることができます。

“より安心で、安定した電力品質を維持するために”

電力系統の運用状況に応じ、系統の安定化に寄与する装置(STATCOM(STATIC synchronous COMPensator), SVC(Static Var Compensator)など)のニーズが高まっています。また、不安定な状況が拡大することを防ぐために、その事態を検知し、大きな影響を与える設備を電力系統から切り離す装置(系統安定化装置)のニーズも増えています。

一方、再生可能エネルギーの一つである風力発電を海上に設置する計画が進んでいます。発電された電気を効率良く安定的に陸上まで運ぶ目的で、交流に代わり直流で運ぶ設備(HVDC(High Voltage Direct Current)など)が望まれています。そのため、交流と直流を自由に変換し、直流で電気を運ぶための設備が新たなニーズとなっています。

このような事業環境変化に対し、三菱電機は電力流通システムの効率化と環境負荷低減に向け、従来機種(開閉器、変圧器など)によってコンパクトで、高性能な設備を提供することで持続可能な社会の実現に貢献します。

また、電力品質の安定化に向け、付加価値を向上させた新たな設備(STATCOM, 系統安定化装置, HVDCなど)を提供することで電力流通システムの進歩に貢献していきます。



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

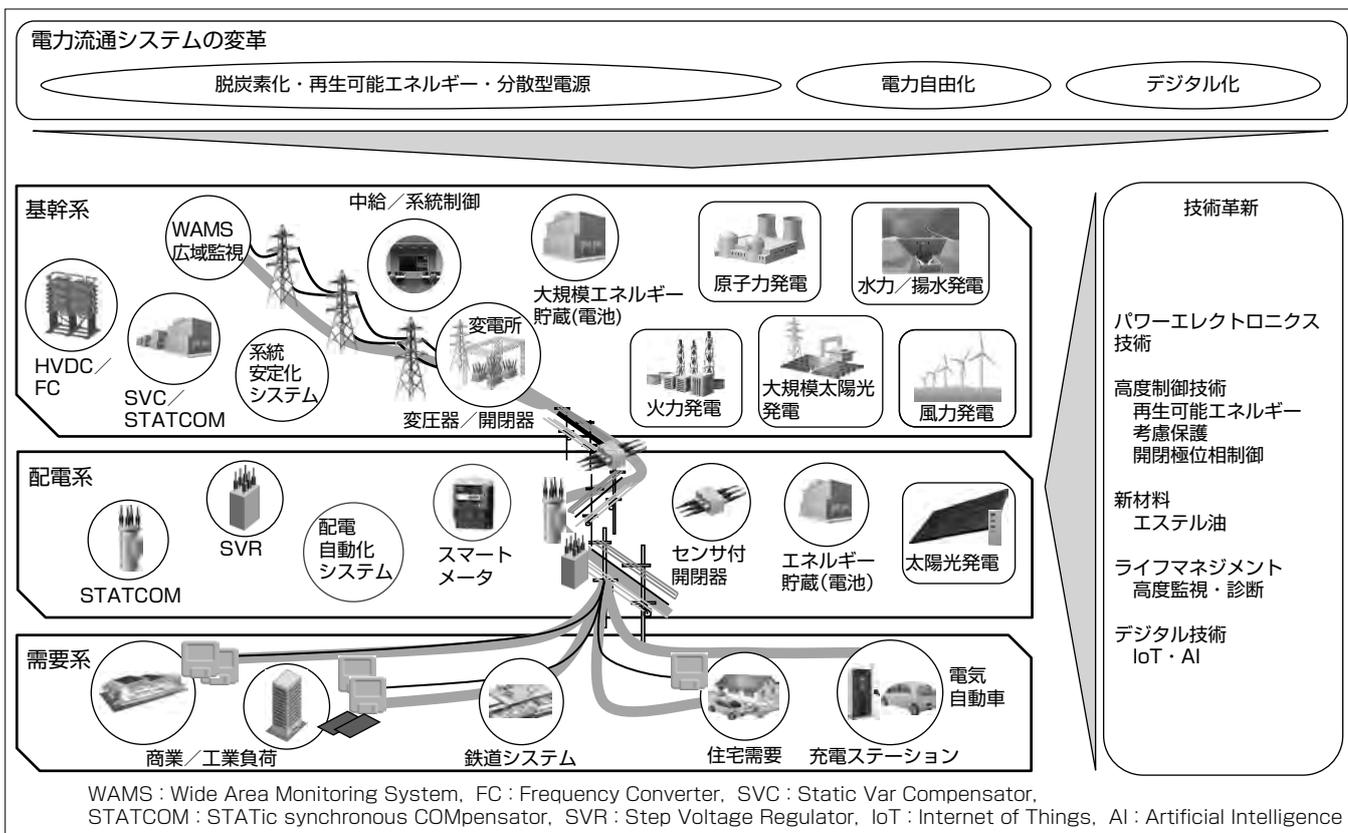
## 要旨

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、電力流通システムの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<sup>(1)</sup>。

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<sup>(3)</sup>。

表1. 日本での電力流通システムと送変電機器の変遷<sup>(2)</sup>

	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	
							☆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		☆機器センサ		☆開閉極位相制御		
							☆アセットマネジメントシステム		
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結国会議)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、

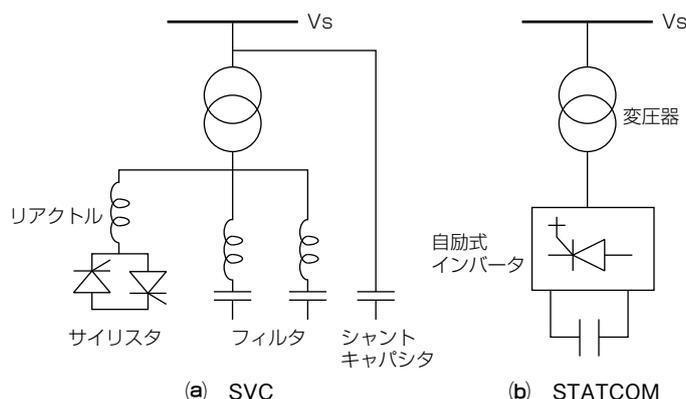


図1. SVCとSTATCOMの回路構成例



図2. HVDC検証設備

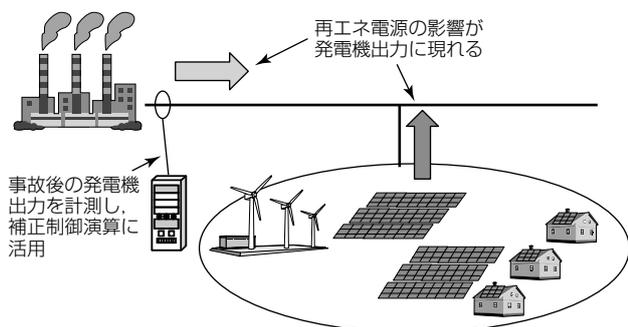


図3. 再生可能エネルギーを考慮した安定化制御

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)<sup>(4)</sup>では、地球温暖化ガスであるSF<sub>6</sub>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SF<sub>6</sub>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<sup>(5)</sup>。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

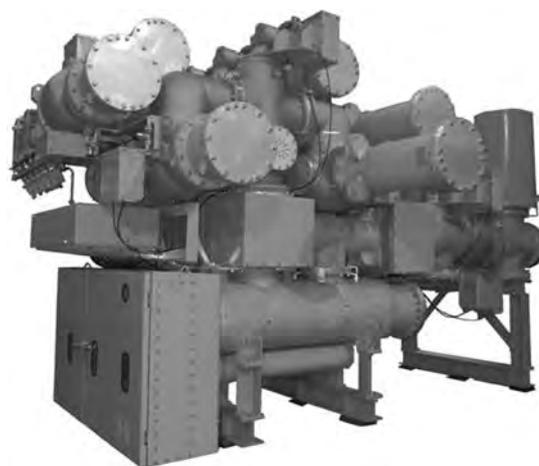


図4. 420kV GIS



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

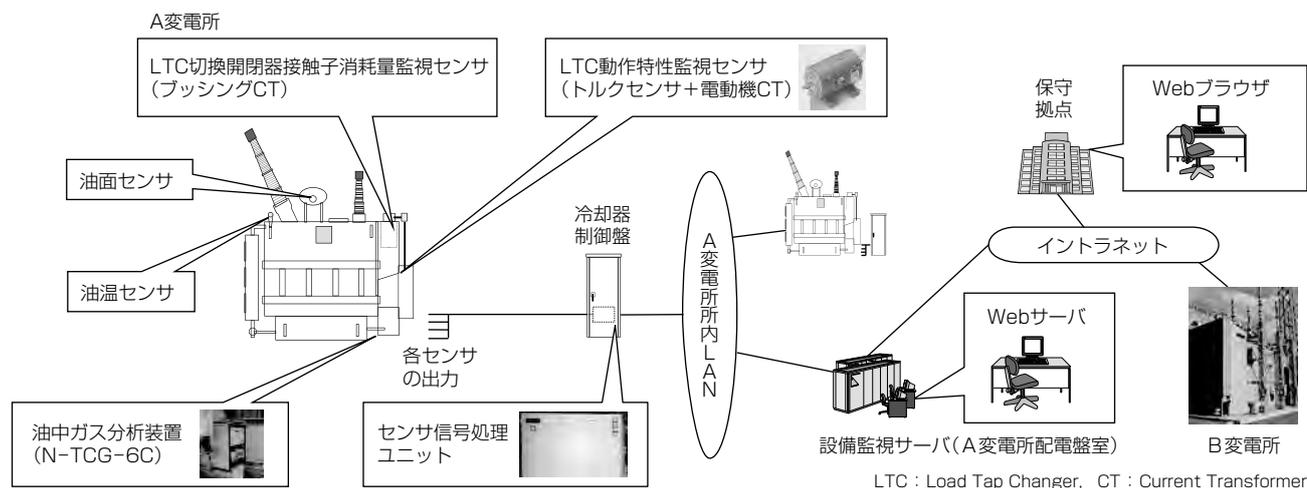


図6. 変圧器監視システム

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SF<sub>6</sub>ガス取扱基準, 電気協同研究, **54**, No.3 (1998)

# HVDC制御保護装置のシミュレータ 検証環境

宇田涼介\*  
今田倫行\*  
藤澤昂征\*

## Simulator Test Facility for HVDC Control and Protection Equipment

Ryosuke Uda, Noriyuki Imada, Takayuki Fujisawa

### 要旨

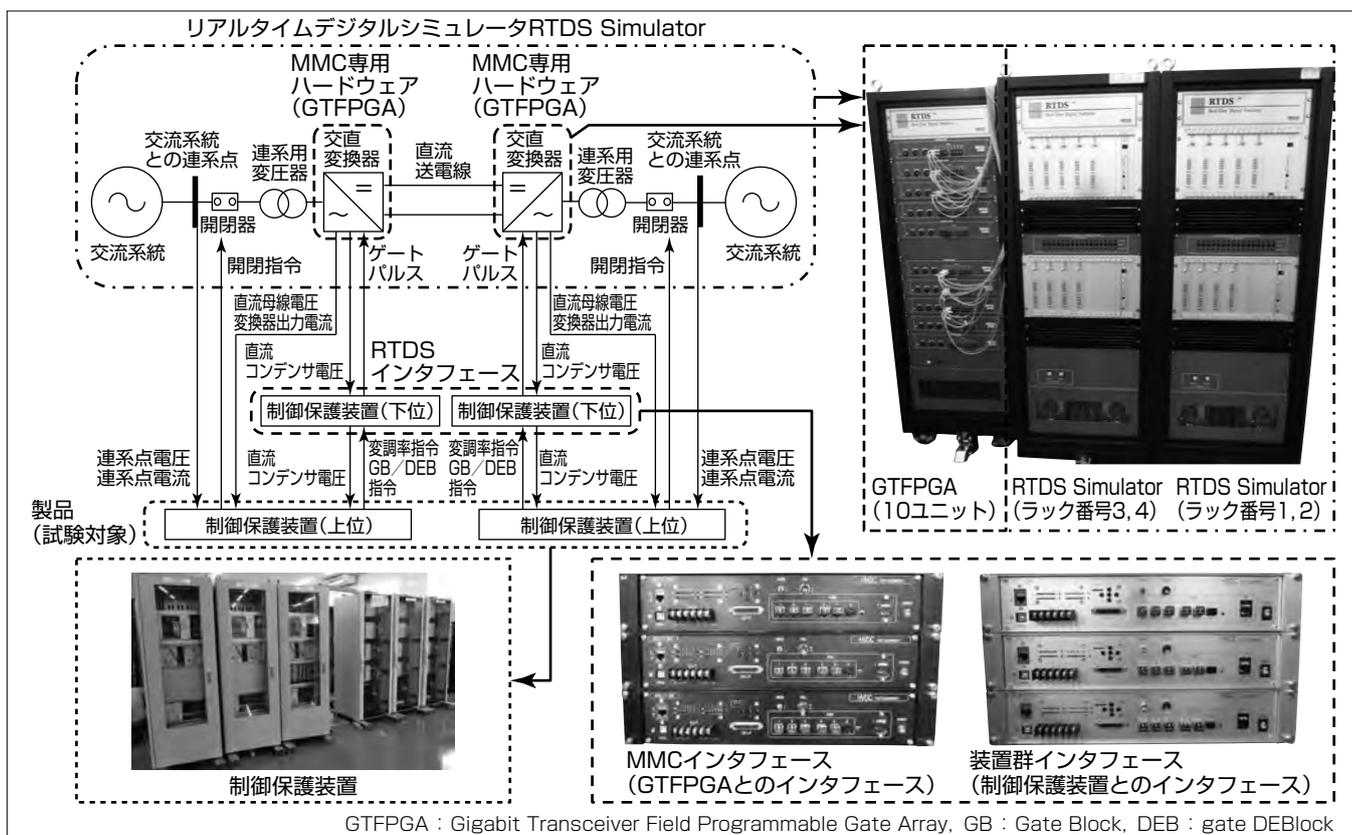
近年、洋上風力発電を始めとした再生可能エネルギーの電力系統への大量導入が世界的に進められている。直流送電(High Voltage Direct Current : HVDC)システムが長距離送電に適している理由の一つに送電線コストがあり、特に長距離海底ケーブル送電を必要とする洋上風力発電にHVDCシステムが多く適用されている。また日本国内では、東日本大震災以降、非同期・異周波数連系が可能なHVDCシステムによる周波数変換設備の強化が検討されている。

三菱電機はHVDCシステム事業への参入を目指し、MMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式交直変換器を適用したHVDCシステムの開発を進めてきた。HVDCシステムに対しては、有効・無効電力の高速制御

機能や交流系統事故に対する運転継続性能など、様々な機能や性能が要求されるが、これらの機能・性能の検証には、リアルタイム電力系統シミュレータを用いたHVDCシステムの制御保護装置の検証試験が不可欠である。これを実現するため、HVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境を構築した。

シミュレータ検証環境は、HVDC制御保護装置の基本機能を確認するためのハイブリッドシミュレータによる検証環境と、製品検証を目的としたリアルタイムデジタルシミュレータRTDS<sup>(注1)</sup> Simulatorによる検証環境の二つからなる。

(注1) RTDSは、Manitoba Hydro International Ltd.の登録商標である。



### HVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境

HVDC制御保護装置のリアルタイムデジタルシミュレータRTDS Simulatorによる検証環境の構成を示す。交流・直流系統やHVDCシステムの主回路部(交直変換器、連系用変圧器など)はリアルタイムデジタルシミュレータで模擬される。特にMMC方式の交直変換器は専用ハードウェア(GTFPGA)で詳細模擬される。また当社製品である制御保護装置とRTDS Simulatorとのインタフェース装置であるRTDSインタフェースを開発・適用している。

\*系統変電システム製作所

### 1. ま え が き

近年、洋上風力発電を始めとした再生可能エネルギー電源の電力系統への大量導入が進んでいる。直流送電(HVDC)システムが長距離送電に適している理由の一つに送電線コストがあり、特に長距離の海底ケーブル送電を必要とする洋上風力発電へのHVDCシステムの適用が進んでいる。また国内でも、HVDC適用による周波数変換所設備強化の検討が進められている<sup>(1)</sup>。

当社はMMC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きた。HVDCシステムには有効・無効電力の高速制御機能や、交流系統事故に対する運転継続性能などが要求される。これらの機能・性能を検証するため、リアルタイム電力系統シミュレータを用いた当社HVDCシステムの制御保護装置の検証環境を構築した。

本稿では、当社HVDCシステムの概要や今回構築したシミュレータ検証環境について述べ、さらにこのシミュレータ検証環境を用いた検証試験の一例について述べる。

### 2. HVDCシステムの概要

当社HVDCシステムの構成を図1に示す。HVDCシステムの構成要素は大きく二つに分けられる。一つ目は交流-直流の電力変換を行う交直変換器や交流系統と連系するための連系用変圧器などの主回路部であり、二つ目はHVDCシステムが所望の運転状態で安定動作するように交直変換器の出力電圧を制御する制御保護装置である。主回路部での交流系統電圧や変換器出力電流などの計測信号が制御保護装置に伝送され、制御保護装置はそれらの計測信号を用いて、HVDCシステムが所望の動作をするように交直変換器の出力電圧を制御する役割を持つ。また、システム内外での故障を検出し、機器を適切に保護する役割を持つ。

交直変換器については、MMC方式の自励式変換器を適用した。MMC方式の交直変換

器の構成を図2に示す。MMC方式ではサブモジュールと呼ばれる単位変換器を複数個直列接続した構成である。複数のサブモジュールの半導体素子を適切にスイッチングすることで、図2に示すような高調波の少ない、正弦波に近い交流電圧を出力することが可能である。また、多数のサブモジュールを直列接続することで、直流母線電圧を容易に高くできるので、送電損失の少ない長距離送電が可能である。

### 3. 制御保護装置のシミュレータ検証環境

制御保護装置は、HVDCシステムに要求される性能、例えば指定された交流系統電圧・周波数の変動範囲内で所望の有効電力・無効電力を出力可能であることや、交流系統で故障が発生した際にもシステムが解列することなく運転を継続可能であることを実現する上で非常に重要な役割を担う。したがって、工場試験で制御保護装置の機能・性能を十分に検証することが不可欠である。しかしながら、工場試験の段階で図1のシステムを構成して検証試験を行うことは、現実的にはほぼ不可能である。

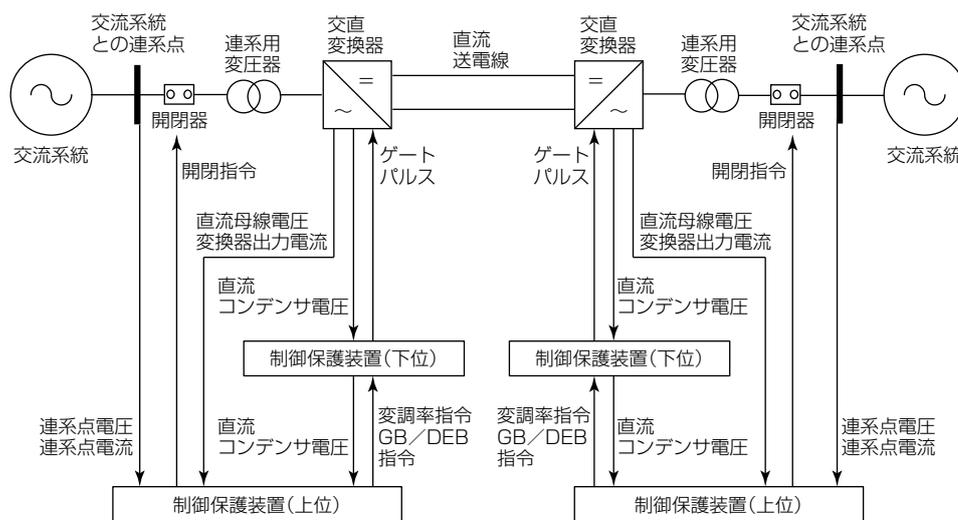


図1. HVDCシステムの構成

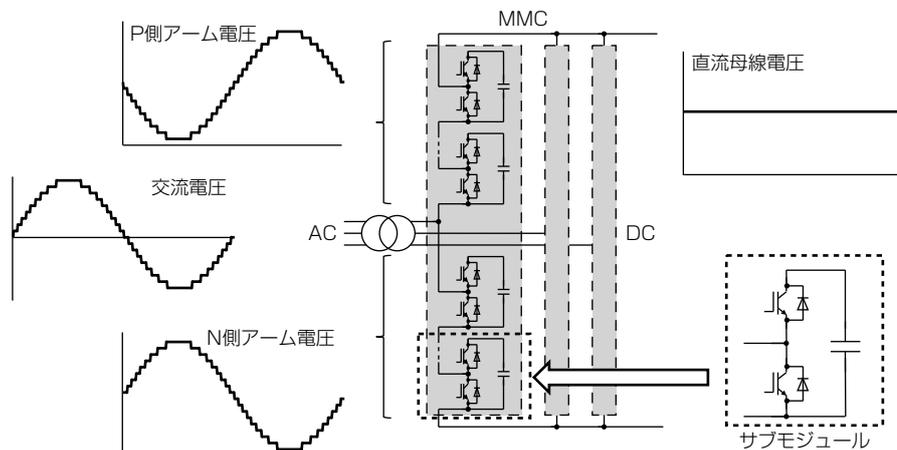


図2. MMC方式の交直変換器の構成

このような背景から、当社は工場試験で制御保護装置の検証を行うためのシミュレータ検証環境を構築した。シミュレータ検証環境では、工場試験の段階では利用できないHVDCシステムの主回路部やHVDCシステムが連系する交流システムをリアルタイムシミュレータと呼ばれる電力システムの諸現象を実時間で再現する装置で模擬し、実機(製品)の制御保護装置と相互接続することで、HVDCシステムの挙動を再現し、制御保護装置の機能・性能を検証できる。

当社は次の二つの検証環境を構築した。一つ目は開発した制御保護装置の基本確認を目的とした、ハイブリッドシミュレータによる検証環境であり、二つ目は製品検証を目的とした、多数のサブモジュールに対応したリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境である。それぞれのシミュレータ検証環境について次に述べる。

3.1 ハイブリッドシミュレータによる検証環境

開発した制御保護装置の基本機能を確認するためのハイブリッドシミュレータによる検証環境を構築した。システム構成を図3に、シミュレータ検証設備の外観を図4に示す。交流システムや交直変換器を除くHVDCシステム主回路は、当社が所有するハイブリッドシミュレータで模擬される。ハイブリッドシミュレータは電力システムの構成要素のうち、送電線、変圧器、負荷などはアナログモデルで模擬し、発電機などの交流電源をデジタルモデルで模擬する。交直変換器については、MMC方式の交直変換器のミニモデル(MMCミニモデル)を製作した。制御保護装置については、上位機能を担当する装置群は製品相当の実機を使用した。下位機能を担当する装置は、サブモジュールの内部に組み込まれるため、全く同等の機能をMMCミニモデルに組み

込む構成とした。

この検証設備は、対応可能なサブモジュール数に制限はあるが、MMC方式の交直変換器の挙動を詳細に再現でき、HVDCシステムの基本動作の検証や、3.2節で述べるリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境自体の検証に大いに貢献した。

3.2 リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境

制御保護装置の製品検証を目的とした、より多数のサブモジュールに対応したリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境を構築した。システム構成を図5に示す。HVDCシステムの主回路部と交流システムはリアルタイムデジタルシミュレータ(RTDS Simulator)で模擬される。特に、MMC方式の交直変換器の模擬に専用ハードウェア(GTFPGA)を適用したことによって、多くの演算量を必要とするMMC方式の交直変換器を詳細に模擬できるのが

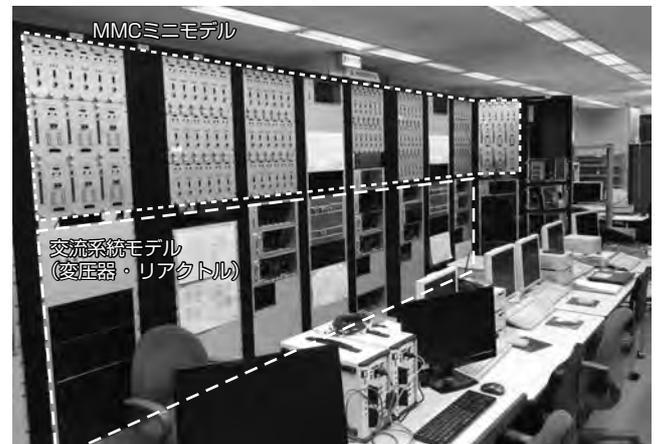


図4. シミュレータ検証設備の外観

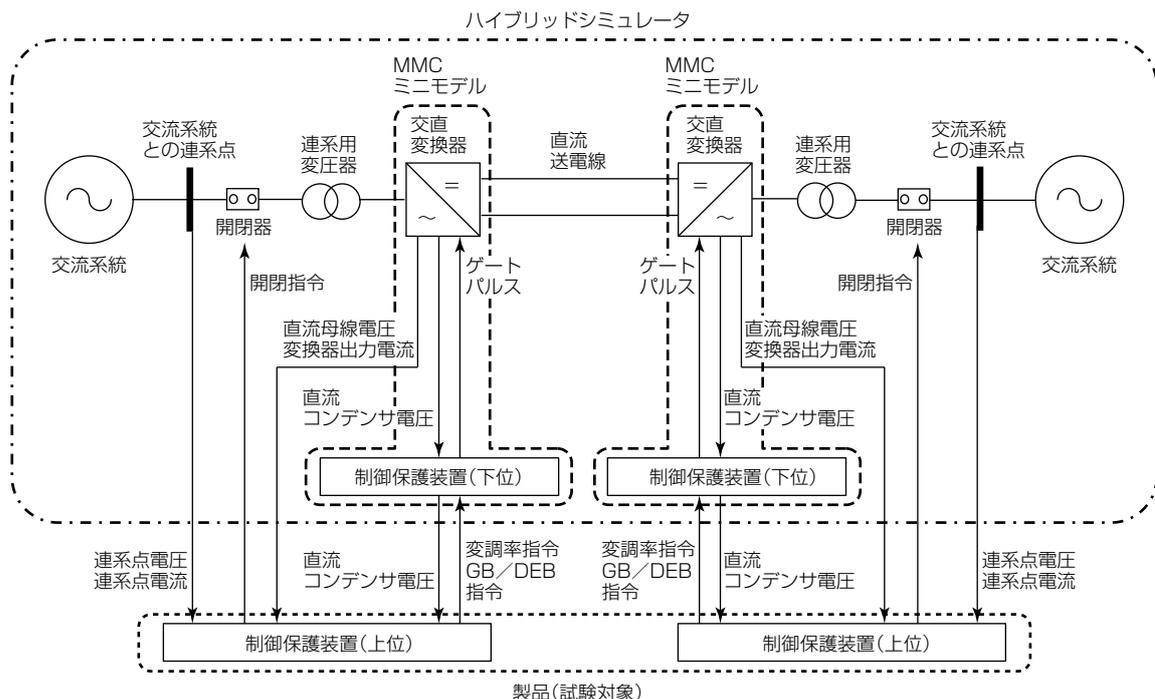


図3. ハイブリッドシミュレータによる検証環境のシステム構成

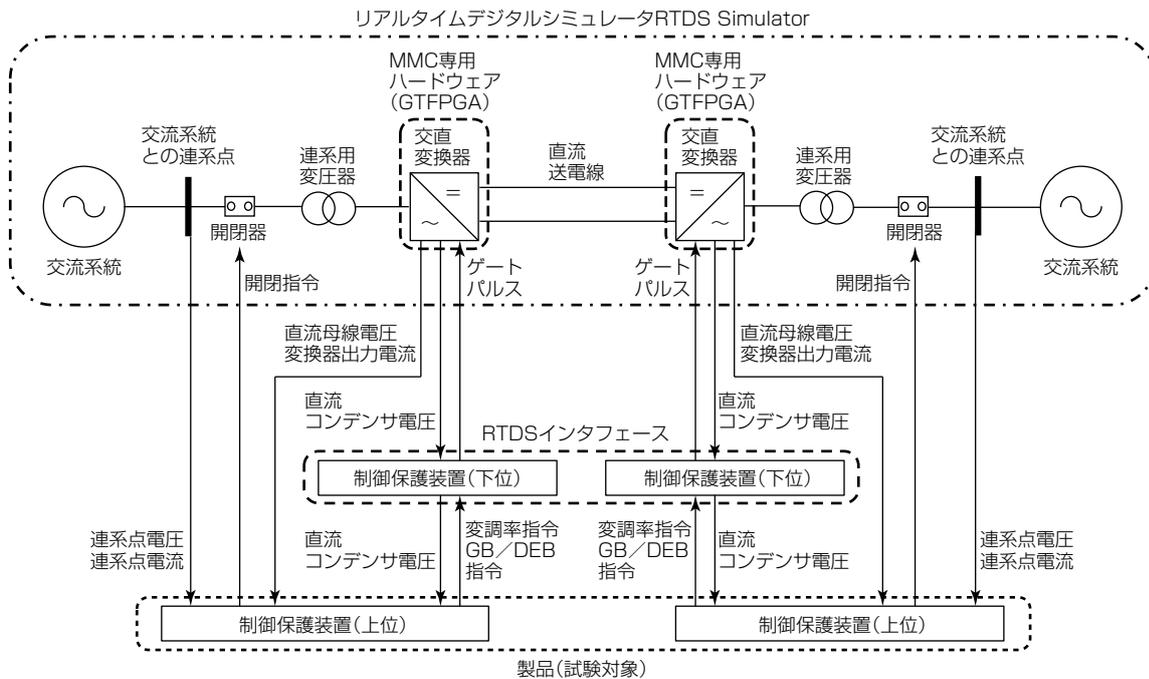


図5. リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境のシステム構成

特長である。制御保護装置については、その上位機能を担当する装置群を検証試験の対象とした。制御保護の下位機能を担当する装置は、サブモジュールの内部に組み込まれるため、その数量が非常に多くなることから、実機(製品)そのものではなく、全く同等の機能を持つインタフェース装置(RTDSインタフェース)で模擬する構成とした。またインタフェース装置はMMC専用ハードウェアと制御保護装置との間の高速通信のインタフェース機能を具備している。

### 3.2.1 RTDS Simulator

このシミュレータ検証環境のリアルタイムデジタルシミュレータには、カナダのRTDS Technologies社が製造・販売するRTDS Simulatorを採用した。RTDS Technologies社は電力系統リアルタイムデジタルシミュレータのトップメーカーで、RTDS Simulatorは世界各国の多くの電力会社や重電機器メーカー、研究機関、大学などで採用実績がある<sup>(2)</sup>。

このシミュレータ検証環境のRTDS Simulatorの外観を図6に示す。RTDS Simulatorは演算用プロセッサ基板18枚、アナログ入出力基板14枚、デジタル入出力基板4枚で構成され、発電機や送電線、変圧器等を含む詳細な交流系統やHVDCシステムの主回路を模擬できる。また、MMC方式の交直変換器を詳細模擬可能な専用ハードウェアであるGTFPGAを10ユニット具備しており、最大512個/アームのサブモジュールを持つ交直変換器を2端子分、詳細模擬することが可能である。

### 3.2.2 RTDSインタフェース

制御保護装置と交直変換器とのインタフェースは光通信を採用している。一方、このシミュレータ検

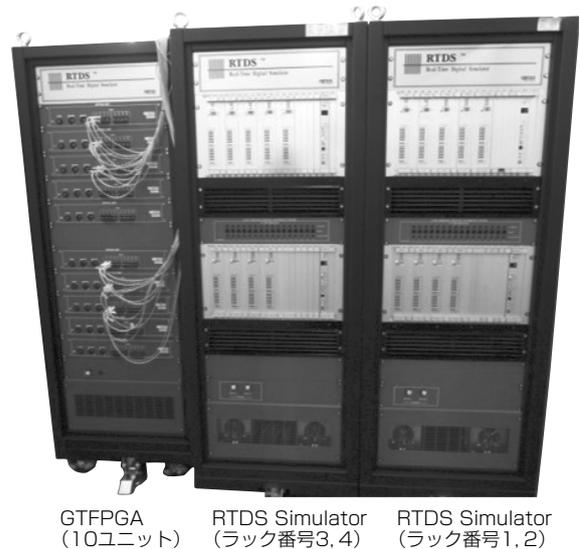
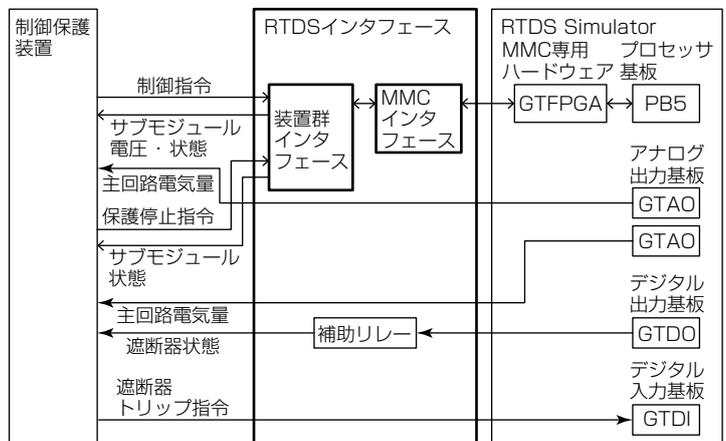


図6. RTDS Simulatorの外観



→ 電気信号  
 → 光信号

PB : Processor Board  
 GTA0 : Gigabit Transceiver Analog Output  
 GTDO : Gigabit Transceiver Digital Output  
 GTDI : Gigabit Transceiver Digital Input

図7. RTDSインタフェースの構成

表 1. RTDSインタフェースの主な機能

項目	主な機能
装置群インタフェース	・制御保護装置の通信プロトコルへの適応 ・各装置からのデータ集約
MMCインタフェース	・GTFPGAの通信プロトコルへの適応 ・制御保護の下位機能(PWM(Pulse Width Modulation)など)の模擬

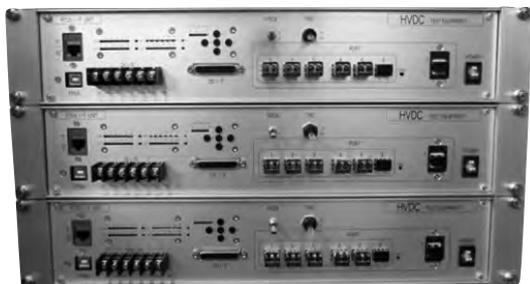


図 8. 装置群インタフェースの外観



図 9. MMCインタフェースの外観

証環境で交直変換器を模擬するMMC専用ハードウェア(GTFPGA)も同様に光通信を採用している。しかしながら、両者の光通信仕様は全く異なるため、制御保護装置とGTFPGAを相互接続するためのインタフェース装置(RTDSインタフェース)を開発した。RTDSインタフェースの構成を図7に示す。RTDSインタフェースは制御保護装置と接続される装置群インタフェースと、GTFPGAと接続されるMMCインタフェースで構成される。それぞれの主な機能を表1に示す。また、それぞれの装置外観を図8、図9に示す。

#### 4. 検証試験の例

ここまで述べてきたとおり、当社ではHVDCシステムの制御保護装置の機能や性能を検証するためのシミュレータ検証環境を構築し、本設備を用いて制御保護装置の検証を行っている。ここではその検証試験結果の一例について述べる。

図10は、リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境でHVDCシステムを起動し、定常運転した時の、片端変換器の電圧・電流波形を示している。上から交流系統との連系点の電圧・電流波形、直流母線の電圧・電流波形、サブモジュール直流コンデンサ電圧のアーム平均値の

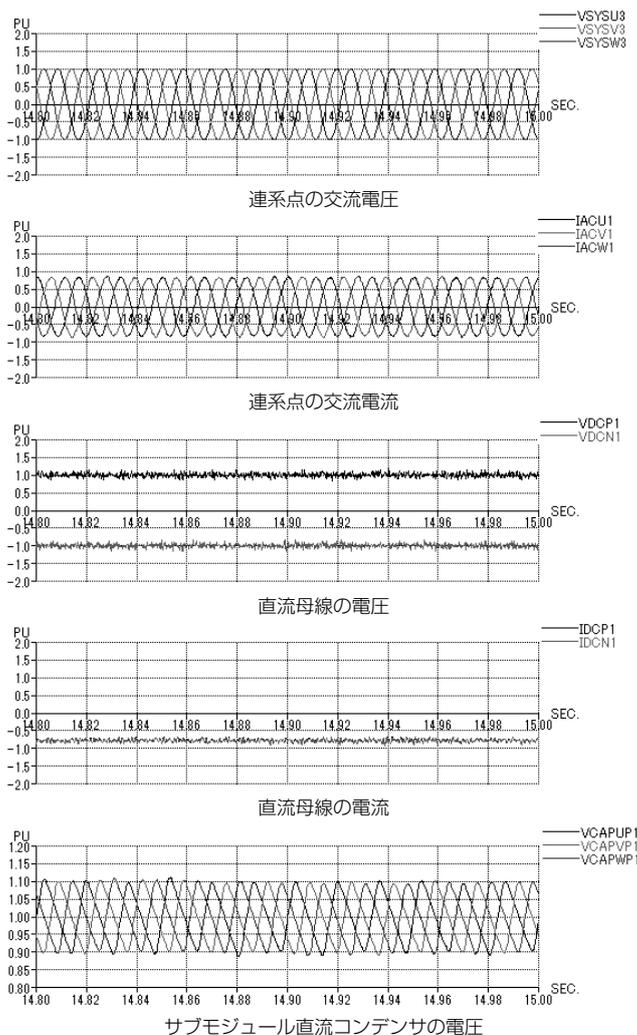


図10. 検証試験結果の一例

波形である。これらの波形から、HVDCシステムが所望の運転状態で安定に運転できていることが確認できる。

#### 5. む す び

当社はHVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境を構築した。本稿では、構築した二つのシミュレータ検証環境について述べた後、検証試験結果の一例を示した。今後はHVDCシステム事業へ参入するために、シミュレータ検証環境を活用して当社HVDCシステムの検証試験を進めていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 宜保直樹, ほか: 直流送電技術, 電気設備学会誌 (2012)
- (2) ㈱JPビジネスサービス: RTDS社製品に関する国内独占代理店(電力系統解析シミュレータ)  
<http://www.jpbs.co.jp/it/products/product03.html>

# FACTS適用による北米系統の安定化

松田明洋\*  
 山中大輔\*  
 土谷多一郎\*\*

Power System Stabilizing within USA by Application of FACTS Devices

Akihiro Matsuda, Daisuke Yamanaka, Taichiro Tsuchiya

## 要旨

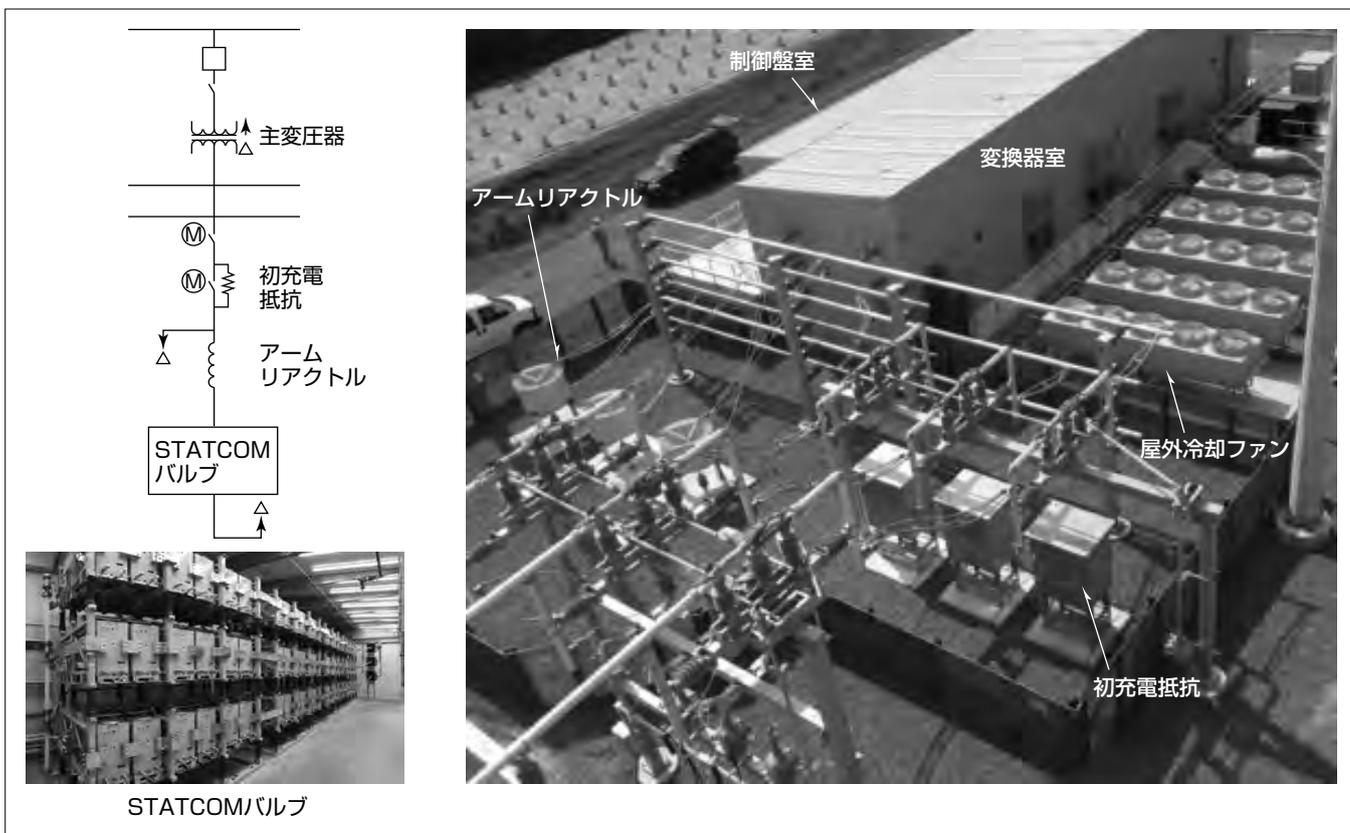
1990年代半ば以降、北米の電力系統システムの規制緩和や発電と送電の分離によって、電圧安定性の問題が表面化し、無効電力の制約条件が電力会社にとって懸念材料となってきた。近年は、石炭火力発電所の廃止と再生可能エネルギー普及率の増加によって、電力系統の安定性問題が更に悪化しているが、その有効な対策として、FACTS (Flexible AC Transmission System)が適用されている。FACTSの代表機種として、SVC(Static Var Compensator)とSTATCOM(STATIC synchronous COMPensator)があり、三菱電機は、Mitsubishi Electric Power Product Inc.(以下“MEPPI”という。)と協調し、これまで多数のSVCとSTATCOMを北米系統に設置してきた。

三菱電機FACTSの代表的適用例として、Indianapolis

Power & Light社のSouthwest-SVCとDominion Energy社のColington-STATCOMが挙げられる。

Southwest-SVCの設置目的は、石炭火力発電所の廃止に伴い、系統事故発生に伴う電圧回復遅れ現象(Fault Induced Delayed Voltage Recovery : FIDVR)への対策であった。

Colington-STATCOMの設置目的も、誘導機比率の大きな夏季負荷によるFIDVRへの対策であった。なお、Colington-STATCOMは、三菱電機の初号機となるMMC (Modular Multilevel Converter)方式である。SM(Sub-Module)と呼ばれる小型変換器を直列接続する方式であり、SM単位で冗長性を持たせているという特長がある。



## Dominion Energy社のColington-STATCOM

SMと呼ばれる小型変換器を直列接続した三菱電機の初号機となるMMC方式のSTATCOMであり、2017年6月から運用が開始されている。SMには、三菱電機製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用しており、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できる。

1. ま え が き

電力会社は、発電事業者や需要家の両者が許容する電力システムを構築する必要があり、電力システムシステムのセキュリティ、信頼性を妥当なコストで実現しなければならない。しかしながら、1990年代半ば以降、北米の電力システムシステムの規制緩和や発電と送電の分離によって、電圧安定性の問題が表面化し、無効電力の制約条件は、電力会社にとって懸念材料となってきた。

北米の電力システムで、さらに近年、図1に示すように、炭素排出量の低減の観点から、老朽石炭火力発電所の廃止と配電システムの再生可能エネルギー増加の傾向がある。これによって、同期発電機を用いた火力発電所の減少で弱まった系統に、インバータ接続の再生可能エネルギー源を連系させることになり、電力システムの電圧安定性を悪化させる一因となっている。

その一例として、テキサス西部では風力発電設備の導入が進められているが、シェールガスオイルの掘削処理に伴って電力負荷が急増しており、無効電力補償による系統電圧安定度の向上が急務となっている。

このような電力システムの電圧安定性対策として、新たな送電線網の建設は、非常に高コストになる。また、遮断器開閉の調相設備機器は、操作遅れ・離散の制御・開閉回数寿命制約などによって、系統事故を含む過渡的な系統安定性問題に対して、有効な対策にはならない。そこで、FACTSの代表機種であるSVCとSTATCOMが、定常時及び過渡時の無効電力制御を高速に行えることによる電力システムの電圧安定性向上対策として広く適用されている。

本稿では、SVCとSTATCOMについて、特性と適用例について述べる。

2. SVCとSTATCOMの特性

FACTS機器であるSVCとSTATCOMの導入は、既存の送電容量を増加させて系統電圧の安定制御に寄与するため、電力会社にとっては電力システムシステムの広範囲な要求に対する費用対効果が高い解決策となっている。一般的なSVCとSTATCOMの特性について、その比較を表1に示す。

SVCは、スイッチング素子として、サイリスタが適用される。系統電圧によって電流を転流させるため他励式と呼ばれる。主な構成機器は、TCR(Thyristor Controlled Reactor)、TSC(Thyristor Switched Capacitor)、高調波

フィルタである。TCRの出力電流には、高調波が含まれているため、高調波フィルタが必要となる。またSVCの出力可能電流は、TCR、TSC、及び高調波フィルタのインダクタンス、キャパシタンスが固定値であるため、系統電圧の低下に比例して小さくなる。

STATCOMは、スイッチング素子として、GCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタやIGBTなどが適用される。素子自体が電流遮断して転流させるため自励式と呼ばれる。STATCOMの発生高調波は一般的に小さく、高調波フィルタが不要であり、SVCよりも据付面積が小さくなる。またSTATCOMの出力可能電流は、系統電圧の低下に関係なく一定であるため、電圧低下時の無効電力補

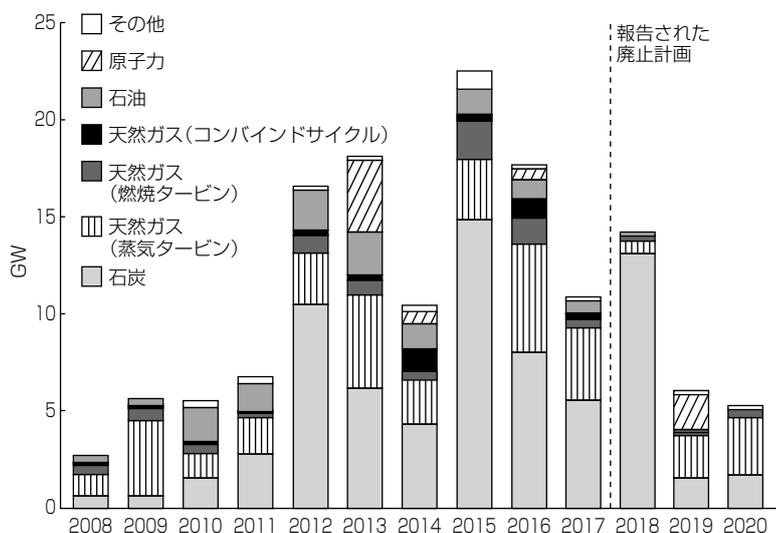


図1. 北米の電力会社での発電所廃止計画<sup>(1)</sup>

表1. SVCとSTATCOMの特性比較

	SVC	STATCOM
出力電流特性		
高調波	TCR位相制御によって、高調波大	多重インバータ制御によって、高調波小
損失特性		
据付け面積	大：高調波フィルタが必要のため	小

償特性はSVCより優れる。

三菱電機は、MEPPIと協調し、これまで多数のSVC、STATCOMを北米系統に設置してきた。その適用例を次章に示す。

### 3. FACTSの適用例

#### 3.1 SVCの適用例

2016年5月、Indianapolis Power & Light社(以下“IPL社”という。)のSouthwest S/S(SubStation)-SVC(+300/-100Mvar)の運用が開始された。

SVCの設置目的は、138kV系統事故発生に伴うFIDVRの対策である。環境保護局(Environmental Protection Agency; EPA)は、2016年までに、IPL社の138kV系統の石炭火力発電のほとんどを廃止、又は天然ガス発電への変更を要求した。結果として、2016~2017年に多くの石炭火力発電所が廃止され、新たにコンバインドサイクル天然ガス発電所が2017年に運転開始した。しかしながら、系統解析では、系統事故発生による電圧挙動が、運用指標を満足しておらず、FIDVRによって系統負荷が脱落するという結果が示された。対策として、機械式シャントキャパシタ(300MVA)の適用をまず検討したが、FIDVRに対して有効性を確認できなかった。そこで応答の速いFACTSの適用を検討することになり、SVC(+300/-100Mvar)、又はSTATCOM(+250/-100Mvar、短時間過負荷125%)の適用によって、FIDVR対策となることを確認でき、スペースに余裕があること、系統側が高調波に対して余裕があること、低コストなどからSVCが選択された。

三菱電機が納入したSouthwest-SVCの単線図を図2に示す。TCR=0~-200Mvar、TSC=+200Mvar、高調波フィルタ(5次、7次)=+100Mvarで構成している<sup>(2)</sup>。

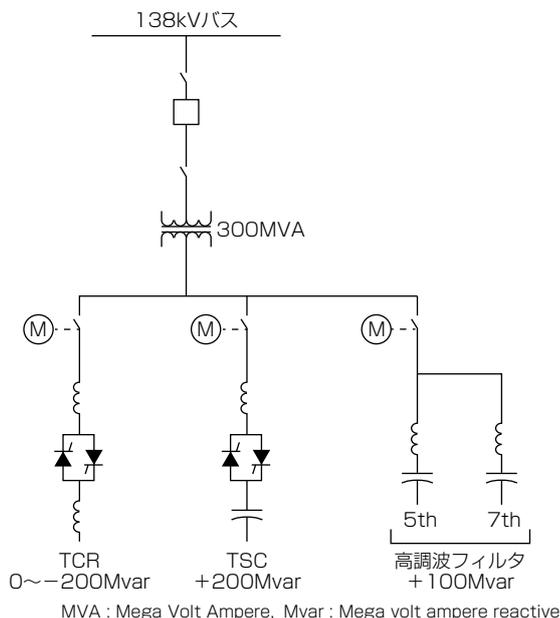


図2. Southwest-SVCの単線図

#### 3.2 STATCOMの適用例

2017年6月、Dominion Energy社のColington S/S-STATCOM(+/-125Mvar)の運用が開始された。

STATCOM設置目的は、115kV系統事故発生に伴うFIDVRの対策である。Colington S/Sが位置する地域は、200マイル(約320km)超の砂洲(さす)で形成されており、末端系統側に位置する。また亜熱帯気候に属し、夏季には、人口が3~5倍程度に増大する観光名所である。そのため、夏季での空調負荷の条件下で、N-1-1(1設備停止中での更なる1設備故障)の系統事故を想定し、PJM(Potomac-Jersey-Maryland)系統運用指標に沿って、事故後2.5sec以内に70%まで系統電圧を回復させる条件として検討された。特に弱い系統であったため系統への高調波影響抑制を重視してSTATCOMが選択され、定格は、+/-125Mvar(短時間過負荷125%)となった。

なお、Colington S/Sには、FIDVR対策として、他社製SVC(+167/-30Mvar)が1997年から運転されていたが、約20年の運転になり、交換部品を考慮した運転信頼度、屋外機器の塩害状況、安定化性能向上などから、STATCOMへ更新された。図3、図4に、更新前SVC及び更新後STATCOMの上空写真をそれぞれ示すが、STATCOMの方が、敷地面積が小さいことが分かる。

三菱電機はGCT素子を用いて、米国では2001年からリアクトル並列方式<sup>(3)</sup>、国内では1990年から変圧器多重方



図3. 更新前Colington-SVCの上空写真



図4. 更新後Colington-STATCOMの上空写真

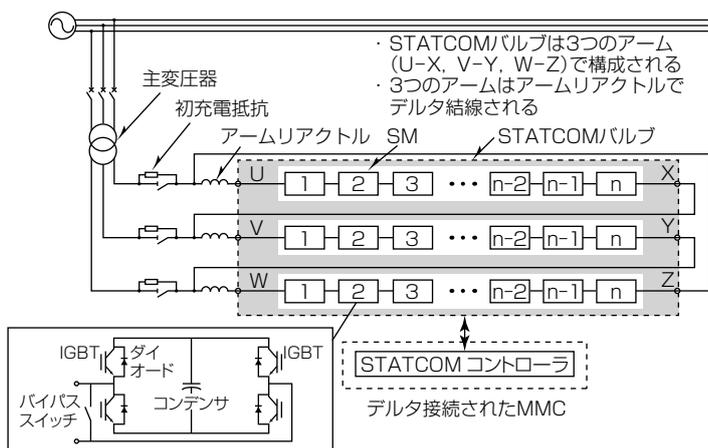
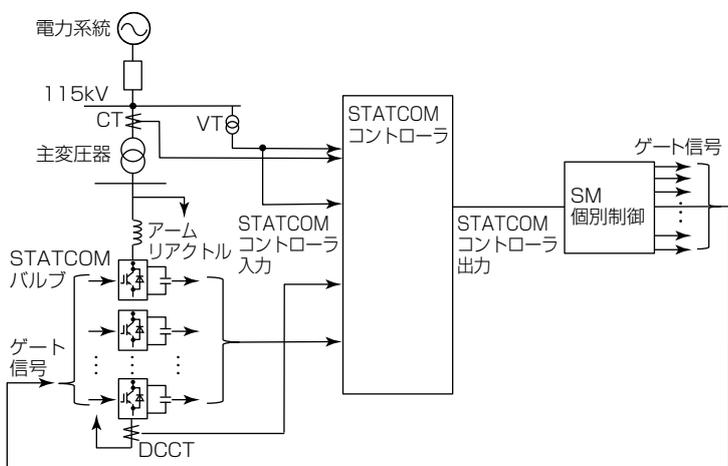


図5. Colington-STATCOMの主回路構成図



CT : Current Transformer, VT : Voltage Transformer, DCCT : DC Current Transformer

図6. Colington-STATCOMの制御構成図

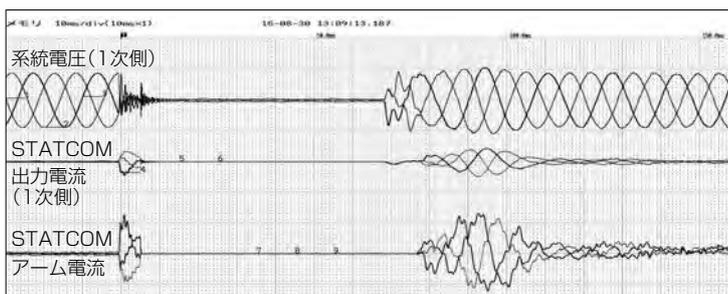


図7. 制御シミュレータ試験波形の一例

式<sup>(4)(5)(6)</sup>のSTATCOM納入実績があるが、Colington-STATCOMは、三菱電機の初号機となるMMC方式のSTATCOMである。MMC方式は、SMと呼ばれる小型変換器を、図5に示すように直列接続する方式である。スイッチング素子は、IGBT(三菱電機製)を適用している。また各SMには、SM故障時に閉じられるバイパススイッチ(三菱電機製)が配置されており、SM単位で冗長性を持たせている。

Colington-STATCOMの制御では、図6に示すよう

に、系統1次側の電圧、電流、及び系統2次側のSTATCOMのアーム電流、各SMの直流電圧が、制御盤に入力される。系統電圧制御、無効電力制御、直流電圧制御等によって計算されたゲートパルスが、各SMにそれぞれ出力され、IGBTがOn/Offすることで運転する。

Colington-STATCOMの制御装置の試験では、RTDS Technologies社のRTDS(Real Time Digital Simulator)<sup>(注1)</sup>を適用した。その試験波形の一例として、至近3相地絡故障模擬の波形を図7に示す。故障除去後、負荷遮断で電圧上昇するケースであり、STATCOMが無効電力を吸収することで電圧変動を抑制し、正常に動作していることが分かる。

(注1) RTDSは、Manitoba Hydro International Ltd.の登録商標である。

#### 4. む す び

SVCやSTATCOM等のFACTS機器は、電力システムの安定性問題の対策として導入されている。三菱電機はMEPPIと協調し、これまで多数のSVCやSTATCOMを北米系統に設置しており、本稿では、その適用例を示した。また中東にもSVCの納入実績がある。今後も、欧州、中東、アジアを含め、FACTSビジネスを展開していく。

#### 参 考 文 献

- (1) US Energy Information Administration (eia) website, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34452>
- (2) Grainger, B., et al. : Technical Requirements and Design of the Indianapolis Power & Light 138kV Southwest Static Var Compensator, IEEE PES T&D Conference and Exposition (2016)
- (3) 竹田正俊, ほか : 並列冗長形自励式無効電力補償装置の開発, 電気学会論文誌B, 124, No.9, 1147~1153 (2004)
- (4) 長谷川泰三, ほか : 系統安定化用大容量自励式無効電力補償装置の開発, 電気学会論文誌D, 111, No.10, 845~854 (1991)
- (5) 森口聡一, ほか : 450MVA GCT-STATCOMの系統連系試験, 平成25年電気学会全国大会論文集, No.6, 435~436 (2013)
- (6) 藤井俊成, ほか : 犬山開閉所新SVG(STATCOM)の運開前試験その2 ~系統連系試験~, 平成26年電気学会全国大会論文集, No.6, 349~350 (2014)

# 高電圧直流送電向け直流遮断器

常世田 翔\* 藤田大輔\*  
 稲垣卓志\*  
 亀井健次\*

## DC Circuit Breaker for High Voltage DC Systems

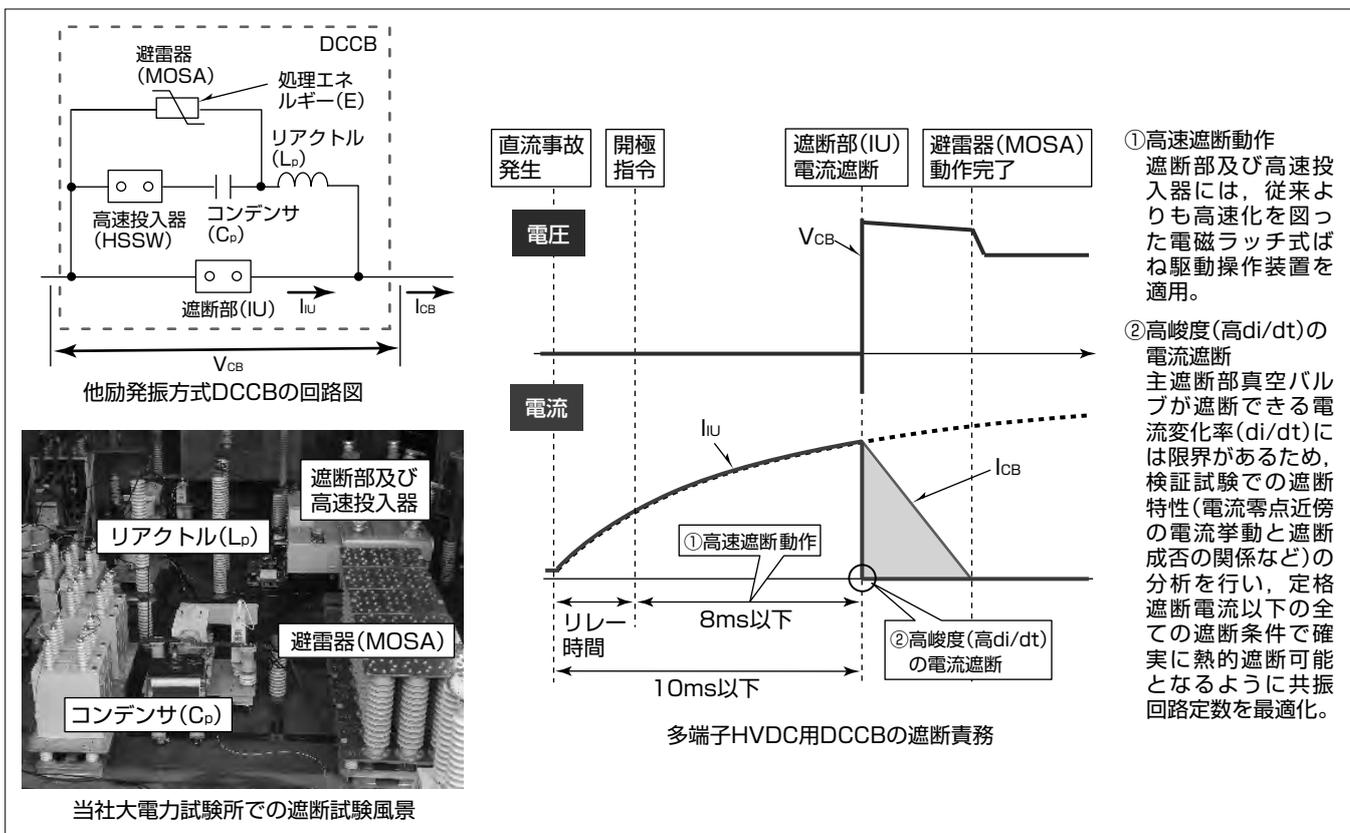
Sho Tokoyoda, Takashi Inagaki, Kenji Kamei, Daisuke Fujita

### 要 旨

複数の変換所とDC送電線路から構成される多端子送電が現在主に欧州や中国で計画されている。多端子高電圧直流(High Voltage DC : HVDC)送電の場合、健全回線への事故の波及を防ぐために、各変換所の送電端に直流遮断器(DCCB(DC Circuit Breakers))を設置して、事故電流を除去する必要がある。この多端子HVDC系統に適用されるDCCBの遮断責務は、CIGRE(国際大電力システム会議)などで多端子HVDC系統モデルを用いた解析検討と調査が行われ、地絡・短絡事故が発生すると、事故発生から約10ms後に、10kA以上の事故電流が流れることが分かっている。このとき、事故によるDC電圧低下が継続す

ると、多端子HVDC系統を構成する隣接変換所の変換器も停止に至る広域停電の可能性があることから、DCCBには事故電流を10ms以内に除去する高速遮断が要求される。また、DC事故電流は、AC事故電流と異なり、自然電流零点が存在しないことから、これを高速遮断するためには、速やかに電流零点を形成する必要がある。

三菱電機は、これらの要求仕様を満たす他励発振方式(高周波逆極性電流重畳による電流零点形成法)機械式DCCBの80kVクラスのプロトタイプ供試器を開発し、当社大電力試験所での直流遮断試験を実施した。



### 80kVクラス他励発振方式の機械式DCCBのプロトタイプ供試器

多端子HVDC用DCCBに要求される主な仕様として、①高速遮断動作と②高峻度(しゅんど)(高di/dt)の電流遮断が挙げられる。①については、当社独自技術である電磁ラッチ式ばね駆動操作装置を高速化改良して適用することで実現した。②については、遮断試験で遮断部(真空バルブ)の遮断特性を把握し、これに基づいて共振回路定数を最適化することによって、定格遮断電流以下の全ての遮断条件での遮断を可能にした。

1. ま え が き

各国で導入が増加している高電圧直流(HVDC)送電は、二地点のAC/DC変換所間を架空送電線又はケーブルで接続した二端子送電がこれまでの主流であったが、再生可能エネルギー(太陽光、洋上風力)による分散電源を統合する、多国間連系を視野に入れた、複数の変換所とDC送電線路から構成される多端子送電が現在主に欧州や中国で計画されている。二端子HVDC送電の場合、DC線路事故を変換所に接続される交流遮断器(ACCB)を遮断することで事故除去が可能であるが、多端子HVDC送電の場合、健全回線への事故の波及を防ぐために、各変換所の送電端に直流遮断器(DCCB)を設置して、事故電流を除去する必要がある(図1)。

多端子HVDCシステムに適用されるDCCBの遮断責務については、CIGRE(国際大電力システム会議)などによる多端子HVDCシステムモデルを用いた解析検討と調査が行われてきた<sup>(1)(2)</sup>。その結果、自励式HVDC送電で、地絡・短絡事故が発生すると、事故発生から約10ms後に、10kA以上の事故電流が流れることが分かっている。このとき、AC/DC変換器の高速応動(電圧、電流変化に対して敏感

に反応)に起因して、事故によるDC電圧低下が継続すると、多端子HVDCシステムを構成する隣接変換所の変換器も停止に至る広域停電の可能性があることから、DCCBには事故電流を10ms以内に除去する高速遮断が要求される(84kVクラスの交流VCB(Vacuum Circuit Breaker)、GCB(Gas Circuit Breaker)の場合、定格遮断時間50ms程度)。また、DC事故電流は、AC事故電流と異なり、自然電流零点が存在しないことから、これを高速遮断するためには、速やかに電流零点を発生する手段が必要となる(図2)。

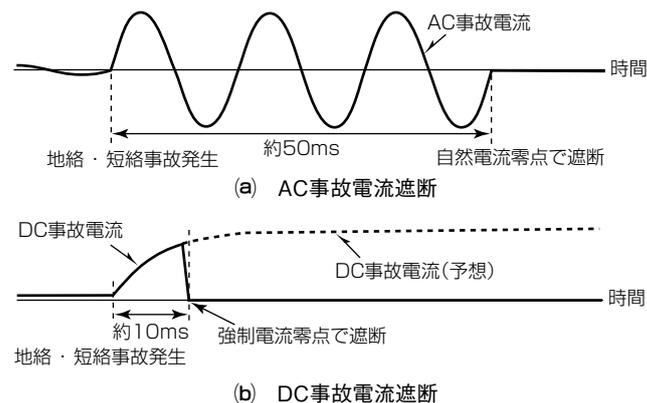


図2. AC遮断とDC遮断の違い

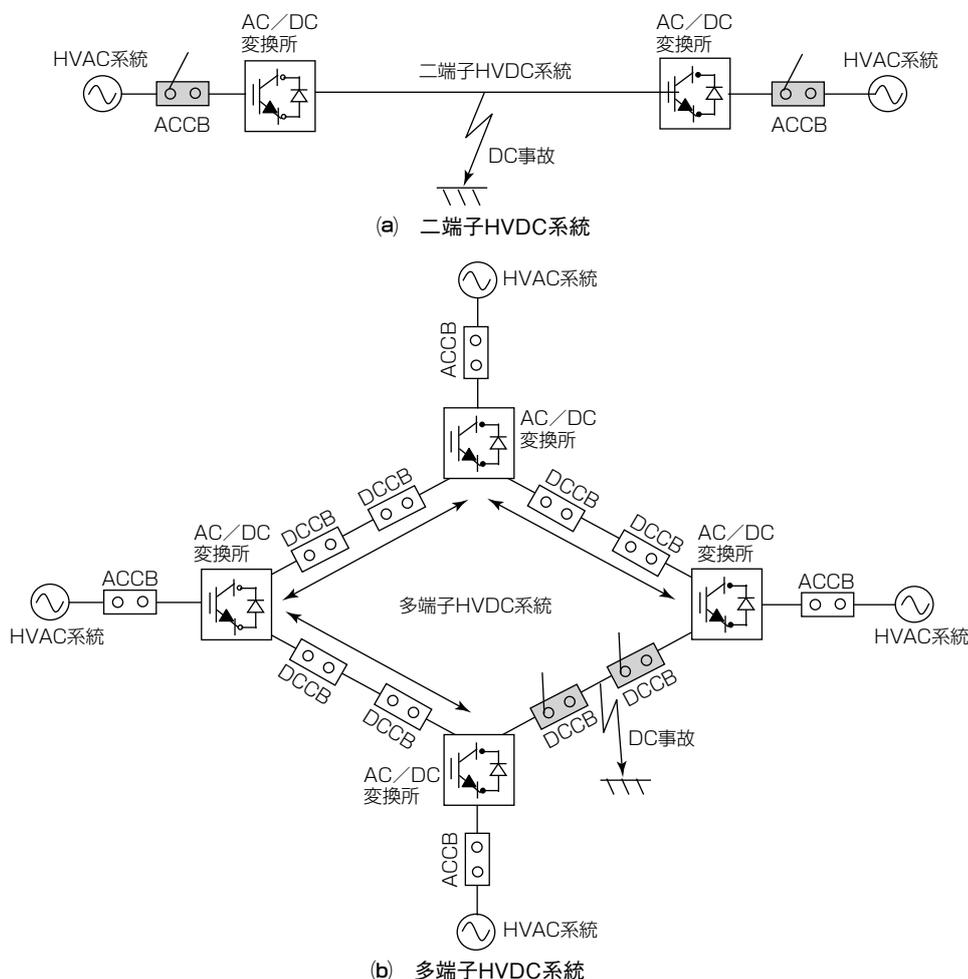


図1. 二端子及び多端子HVDCシステムのイメージ

これらの背景から当社は、事故発生から10ms以内で10kA以上の事故電流の高速遮断が可能であり、さらに低損失・低コストの長所を持つ、他励発振方式(高周波逆極性電流重畳による電流零点形成法)の機械式DCCBを開発した。

本稿では、そのDC 80kVクラスのプロトタイプ供試器の開発及び当社大電力試験所での直流遮断試験について述べる。

## 2. 他励発振方式の機械式DCCBの遮断原理と遮断責務

### 2.1 遮断原理

交流遮断は周期的に現れる自然電流零点で電流遮断できるが、直流では自然零点が存在しないため、何らかの方法で強制的に電流零点を形成して遮断する必要がある。例えば、低電圧クラスではアーク限流方式や、国内の二端子HVDC送電システムでの帰線用直流遮断器(MRTB)のような自励振動方式が実用化されている<sup>(3)</sup>。しかしながら、これらの直流遮断方式は、いずれも10ms以内での事故電流遮断が困難であり、今回適用を想定する多端子HVDCシステムの要求仕様である高速遮断を満たすことができない。また、いずれの方式も遮断原理上、高電圧化に限界がある。そこで、これらの要求仕様に対応可能な、他励発振方式の機械式DCCBを開発した。図3の破線内にその回路構成を示す。この遮断方式は外部電源又は系統電圧で充電されたコンデンサ(C<sub>p</sub>)とリアクトル(L<sub>p</sub>)からなる共振回路が遮断部と並列に接続される。これを高速投入器によって放電して主遮断部に流れる直流電流に逆極性の高周波電流を重畳することによって、強制的に零点を形成して遮断するものである(図4)。遮断部は高峻度(高di/dt)の電流遮断能力に優れた真空バルブを適用する。

### 2.2 遮断責務

多端子HVDCシステムでの事故電流遮断過程では、主に次の三つのストレスがDCCBに課せられることが解析検討結果から明らかになっている。

- (1) 遮断部に流れる事故電流(I<sub>IU</sub>)
- (2) 遮断部電流遮断後のDCCB極間電圧(V<sub>CB</sub>)
- (3) MOSAの処理エネルギー(E)

ここで(3)は、DC電流遮断時にシステムのインダクタンスに残留する電磁エネルギー(1/2・L・I<sup>2</sup>)に起因してDCCB極間に発生する過電圧を避雷器(MOSA)が抑制する際にMOSAが吸収するエネルギーである。

現在、高電圧DCCBの規格は国内外共に存在しないが、これまでのCIGRE及び当社での遮断責務の調査検討結果を参考にし、今回開発を行った80kVクラスのDCCBの仕様として、開極指令入力から主遮断部が電流遮断完了までの遮断器動作時間(Breaker operation time)を8ms以下(リレー時間を2msと仮定)、I<sub>IU</sub>の最大を16kA、V<sub>CB</sub>

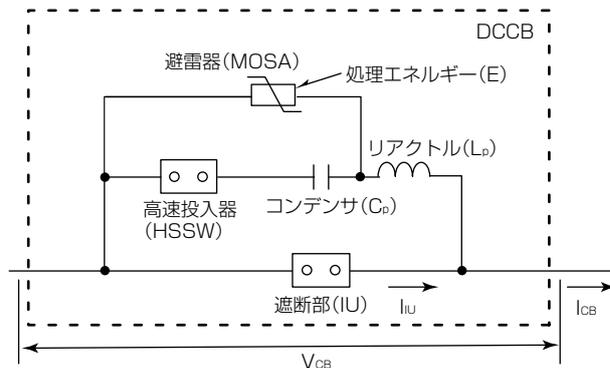


図3. 他励発振方式DCCBの回路図

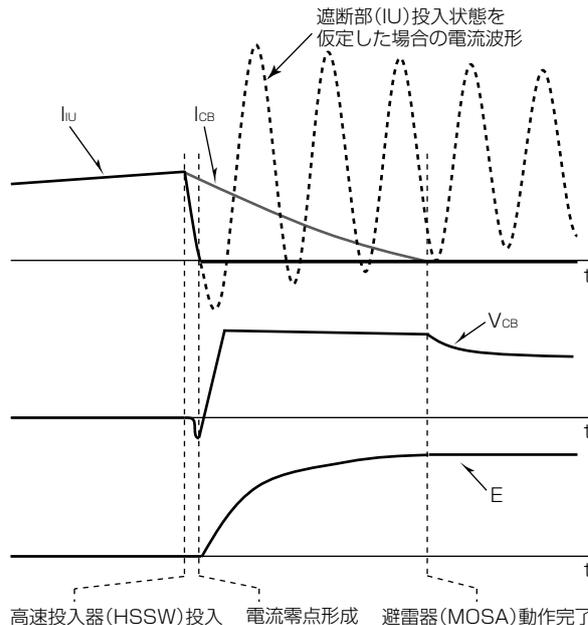


図4. 他励発振方式DCCBの遮断原理

の波高値を120kV(系統電圧の1.5倍と仮定)、MOSAの最大処理エネルギーを6MJ連続2回と仮定し、プロトタイプ供試器の設計と検証試験を行った。

## 3. プロトタイプDCCB

### 3.1 操作装置の高速化

2.2節で述べた遮断器動作時間(Breaker operation time)の仕様8ms以下を達成するため、主遮断部及び高速投入器の駆動操作装置には、従来よりも高速化を図った電磁ラッチ式ばね駆動操作装置を適用した。この操作装置の動作特性は、各種電流遮断条件での電流遮断後の絶縁回復特性の推定値、遮断成功に必要な極間距離、及びアーク時間に基づいて設定された。

### 3.2 直流遮断試験

#### 3.2.1 交流短絡発電機法を用いた直流遮断試験

図5に交流短絡発電機法を用いた試験法の試験回路図を示す。この試験法ではHVDCシステムでの直流事故電流の上昇を商用又は低減周波(今回の試験では30Hz)短絡電流の上昇期間で模擬する(図6)。交流電流源には短絡発電機を

用いた<sup>(4)</sup>。

この試験法を用いてDCCBの80kVクラスのプロトタイプ供試器の性能検証試験を実施した(図7)。遮断電流は仕様での最大電流の10%条件である1.6kAから100%条件の16kAまでとした。図8及び図9に試験結果の代表波形例を示す。図8は今回の試験での最大電流遮断条件16kAを遮断成功した結果、図9は小電流遮断条件1.6kAを遮断成功した結果である。この方式のDCCBによる小電流遮断時は、電流零点での電流変化率(di/dt)が大電流遮断時よりも高い上に、遮断直後の共振回路コンデンサ(Cp)に初期充電電荷の大部分が残留することから、負極性に急峻

(きゅうしゅん)かつ高波高値の過渡回復電圧(TRV)が発生するため、厳しい遮断責務であるが、共振回路の定数最適化等によって第一電流零点での遮断を可能にした。

### 3.2.2 熱的遮断性能の向上

主遮断部真空バルブが遮断できる電流変化率(di/dt)には限界がある。今回の開発では、検証試験での遮断特性

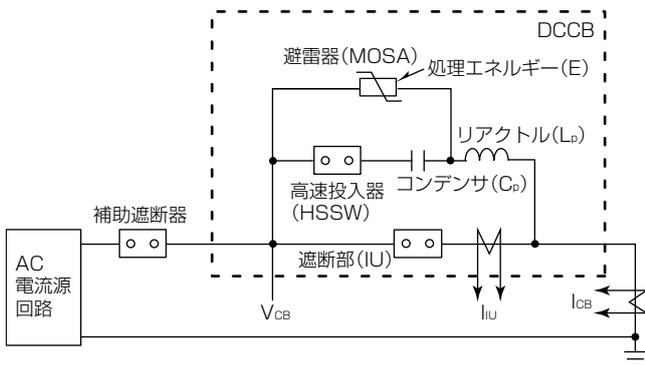


図5. 交流短絡発電機法による直流遮断試験回路

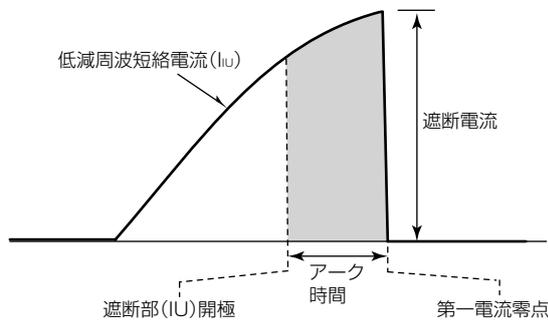


図6. 交流短絡発電機法による試験電流波形のイメージ

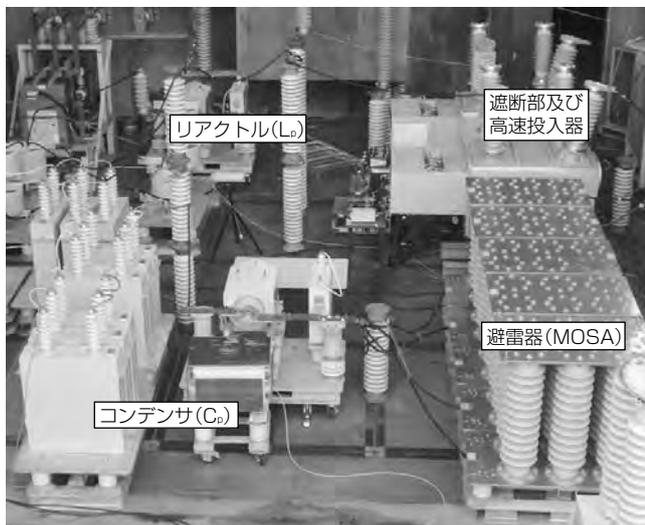


図7. 当社大電力試験所での遮断試験風景

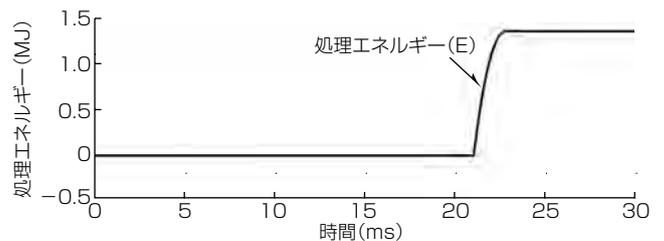
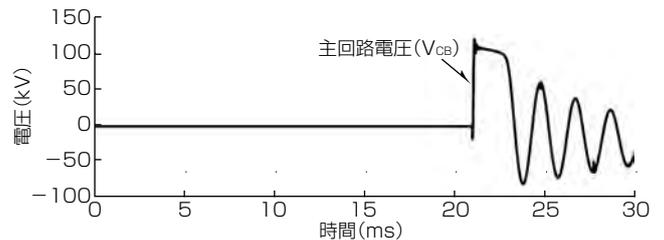
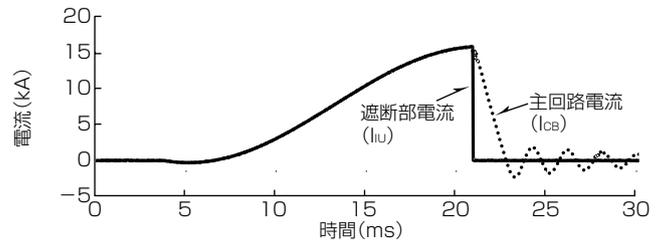


図8. 16kA遮断条件での試験結果波形

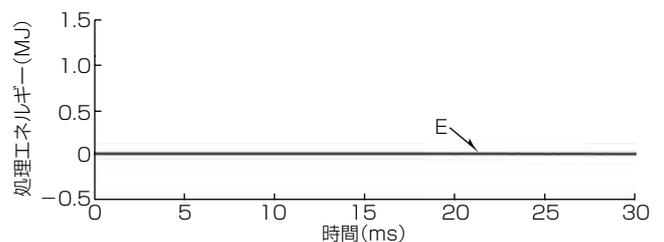
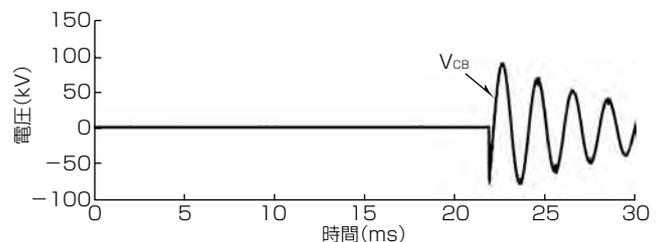
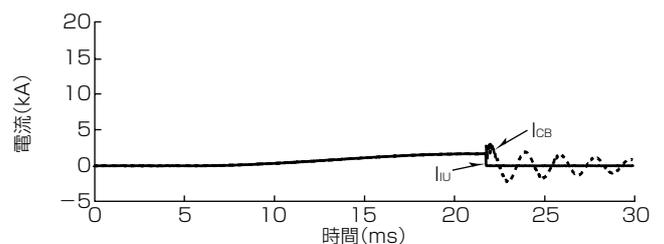
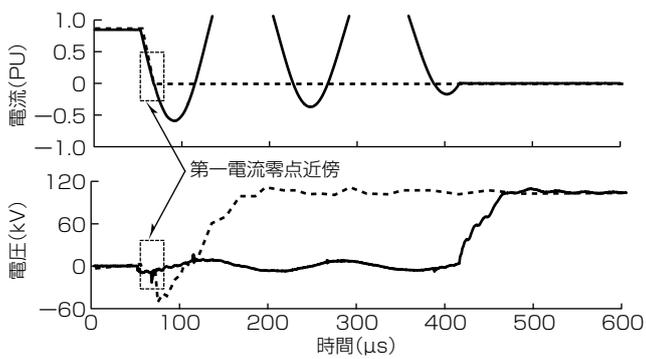
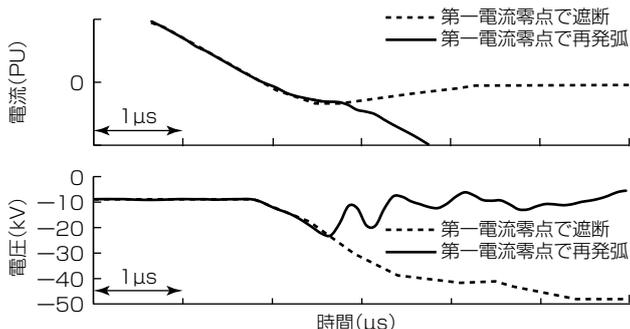


図9. 1.6kA遮断条件での試験結果波形



(a) 全体波形



(b) 第一電流零点近傍拡大

図10. 熱的遮断成否比較

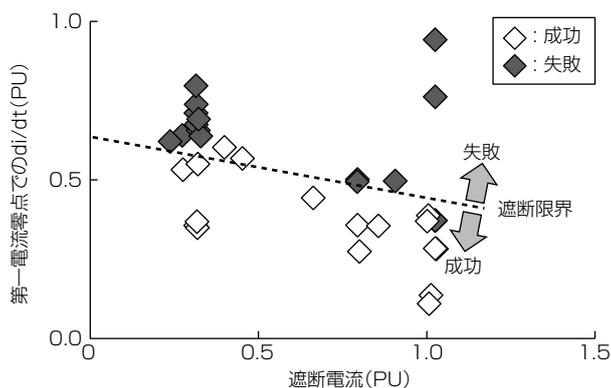


図11. DC遮断時の主遮断部真空バルブの遮断限界特性

(電流の零点近傍の挙動と遮断成否の関係など)の分析を行い、定格遮断電流以下の全ての遮断条件で1回目の電流零点(第一電流零点)で確実に熱的遮断可能となるように共振回路定数を最適化した。図10及び図11に遮断限界 $di/dt$ の実測波形例及び分析結果例を示す。図10は同じ試験条件

での二回の試験のうち一方で遮断成功し、もう一方は第一電流零点で遮断失敗したものである。図11は遮断電流に対して、上記のように得られた遮断限界条件をまとめたグラフである。

#### 4. むすび

HVDC向けDCCBのプロトタイプ供試器製作及び性能検証を行った。今回述べた供試器は、オランダ国際認証試験機関DNV-GL KEMAにおいて世界初(注1)となる高電圧直流遮断器を用いた遮断試験を実施し、遮断電流責務16kA、避雷器エネルギー責務3.6MJまでの試験に成功した(5)。また今回開発した80kVクラスのプロトタイプ供試器をユニットとして直列多点接続することで高電圧化が可能である。

(注1) 2017年10月19日現在、当社調べ

#### 参考文献

- (1) CIGRE JWG A3/B4.34 : Technical Requirements and Specifications of State-of-art HVDC Switching Equipment, CIGRE Technical Brochure, TB683 (2017)
- (2) Tokoyoda, S., et al. : DC circuit breakers for HVDC grid applications HVDC and Power Electronics technology and developments, CIGRE SC A3 & B3 joint colloquium Nagoya, No.122 (2015)
- (3) Hara, S., et al. : Fault protection of metallic return circuit of Kii channel HVDC system, IEE AC-DC Power Transmission, 132~137 (2001)
- (4) Tokoyoda, S., et al. : Interruption characteristics of vacuum circuit breaker and the application to DCCB, IET ACDC 2017, B4.1 (2017)
- (5) Horizon2020 PROMOTioN official HP press release (2017)

[https://www.promotion-offshore.net/news\\_events/news/detail/eu-project-promotion-successfully-demonstrates-ac-short-circuit-generator-based-test-environment-for/](https://www.promotion-offshore.net/news_events/news/detail/eu-project-promotion-successfully-demonstrates-ac-short-circuit-generator-based-test-environment-for/)

# 再生可能エネルギー電源の大量導入に対応した系統安定化システム

草場健一郎\* 西野 宏\*  
久留島智博\* 前田 徹\*  
佐々木孝志\*

Special Protection Systems Adapted for Large-scale Renewable Energy Sources Installation

Kenichiro Kusaba, Tomohiro Kurushima, Takashi Sasaki, Hiroshi Nishino, Toru Maeda

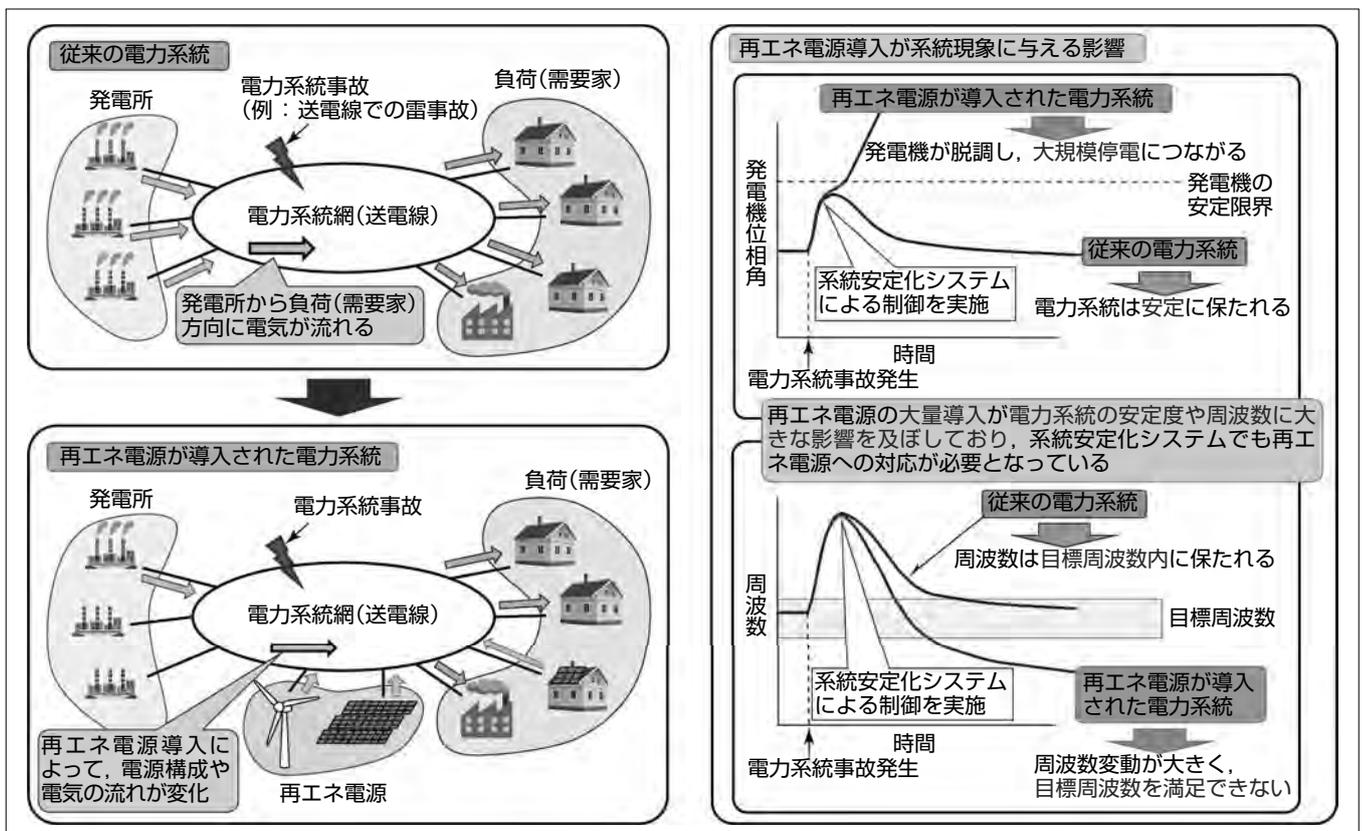
## 要 旨

系統安定化システムは、電力系統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である。三菱電機では、半世紀にわたって系統安定化システムを開発・製作し、電力会社に納入している。

近年、太陽光発電に代表される再生可能エネルギー電源（以下“再生エネルギー”という。）の電力系統への連系が増加しており、今後も更なる導入量拡大が予想される。これに伴い、再生エネルギーの挙動（出力変化や系統事故時の電力系統からの脱落、復帰）が系統の安定度や周波数に及ぼす影響が大きくなっており、系統安定化システムで再生エネルギーの挙動を踏まえた制御演算を行うことが喫緊の課題となっ

ている。再生エネルギーの出力は、時々刻々と変化する気象条件に影響され、また、系統事故時の挙動は、FRT (Fault Ride Through) 機能や単独運転防止機能等、再生エネルギーが搭載する機能によって異なることから、これらの特性を考慮した系統安定化システムを構築することが求められている。

当社では、再生エネルギーの大量導入に対応した系統安定化システムとして、中部電力(株)向け基幹系統合型系統安定化システム（基幹系ISC(Integrated Stability Control system)）、及び四国電力(株)向け500kV緊急制御装置(Emergency Control System : ECS)を開発・製作している。



## 再生エネルギーの電力系統への影響

近年、再生エネルギーの増加によって、電源構成や電気の流れが変化するとともに、系統事故時に再生エネルギーが電力系統の安定度や周波数に与える影響が大きくなっている。

\*系統変電システム製作所

1. ま え が き

電力系統で過酷事故が生じた場合、発電機脱調や周波数の大幅な変動が生じ、大規模停電に至る可能性がある。系統安定化システムとは、このような過酷事故時に電源制限(以下“電制”という。)等の制御を高速に実施することで大規模停電を回避するためのシステムである。電力会社には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重要なシステムの一つとなっている。

近年、再エネ電源の増加が、電力系統の安定度や周波数に大きな影響を及ぼしており、再エネ電源の更なる導入拡大に伴って系統安定化システムでもその対策が必要不可欠となってきている。

本稿では、再エネ電源の大量導入に対応可能な系統安定化システムとして、当社が製作している中部電力(株)向け基幹系統合型系統安定化システム(以下“基幹系ISCシステム”という。)と、四国電力(株)向け500kV ECSについて述べる。

2. 中部電力(株)向け基幹系ISCシステム<sup>(1)</sup>

2.1 開発の背景

中部電力(株)では、電力安定供給の確保、及び低廉な電気料金を実現するため、これまで様々な系統安定化システムを開発・導入してきた。これらのシステムは、構築後20年余りを経過し、経年による劣化更新時期を迎えている。また、近年の電力系統は、再エネ電源の大量導入等、シス

テム構築時と比べて系統状況が大きく変化している。こうした状況変化に対応し、かつ、従来過渡安定度維持対策用と周波数維持対策用で別々に構築していたシステムを一つに統合化した基幹系ISCシステムを新たに開発・導入した。

2.2 システムの特長及び構成

基幹系ISCシステムの全体構成を図1に示す。基幹系ISCシステムは、親局装置(ISC-P(Processing equipment)), 子局装置(ISC-C(Control equipment)), 故障検出装置・計測装置(ISC-S(Sensing equipment)), 転送遮断装置(ISC-T(Transfer trip equipment))の4種類の装置から成り、親局装置は産業用計算機、子局・故障検出・計測・転送遮断装置はデジタルリレー装置で構成される。装置間はマイクロ回線やIP(Internet Protocol)網で結合され、制御に必要な情報をやりとりし、親局装置を他メーカー、子局装置以下を当社が担当しており、約220面の大規模システムである。

基幹系ISCシステムは、過渡安定度維持(Transient Stability Control : TSC)機能と周波数維持(System Stabilizing Controller : SSC)機能の大きく二つの機能を具備する。本稿では、TSC機能について述べる。

2.3 TSC機能

TSC機能は、電力系統での過酷な事故によって生じる過渡安定度問題に対して、電制を実施することによって、電力系統を安定的に保ち、大規模な停電に至ることを未然に防止する。TSC機能では、事前演算による第1段制御と事後演算による補正制御の2段階の制御によって、電

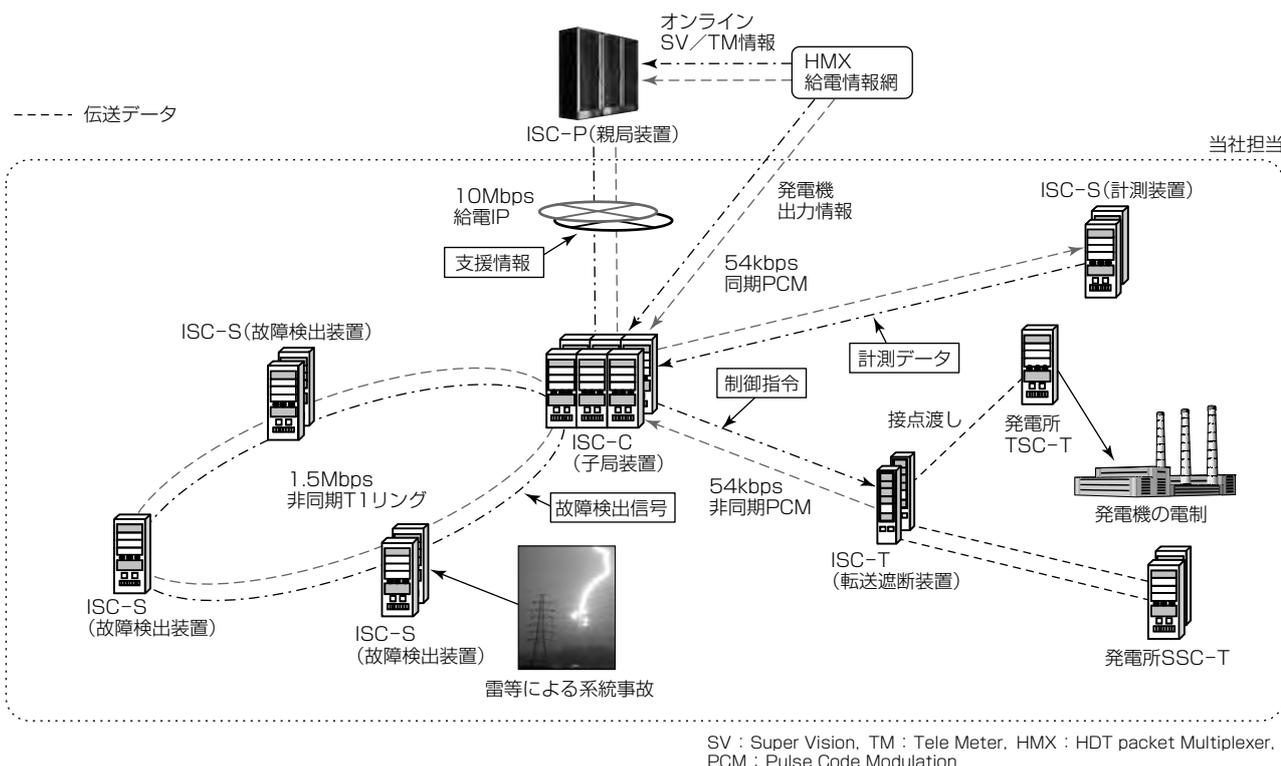


図1. 基幹系ISCシステムの全体構成

力系統の確実な安定化を図る。

過渡安定度問題に対する制御は、事故発生から制御までの時間が短いほど、制御量(遮断する発電機)を減らすことができるという利点がある。そこで、基幹系ISCシステムでは、高速な制御として第1段制御を導入している。第1段制御は、ISC-Pで系統オンラインデータを基に詳細安定度計算を行い、第1段制御で遮断する発電機の制御テーブルをあらかじめ決定してISC-Cへ送信する。ISC-Cは、電力系統で事故が発生した場合にISC-S(故障検出装置)で検出した事故情報に基づいて起動判定を行い、事前に決定した制御テーブルに従ってISC-Tへ制御指令を送信することで高速な第1段制御を実現している。

一方、近年の電力系統では再エネ電源の導入が拡大しており、系統現象に与える影響も大きくなっている。第1段制御で、ISC-Pは30秒周期でオンラインデータを収集して制御テーブルを決定するが、出力が変化しやすい再エネ電源の大量導入に伴い、30秒間の潮流変動が大きくなると、制御テーブル決定時点から系統状態も大きく変化する。その結果、第1段制御だけでは不足制御となり安定化できないおそれがある(図2)。その対策として、あらかじめ潮流変動を最大限想定して制御テーブルを決定する方法もあるが、必要以上の制御を行うことになる。そのため、第1段制御に加え、事故発生直後の潮流計測情報に基づき安定

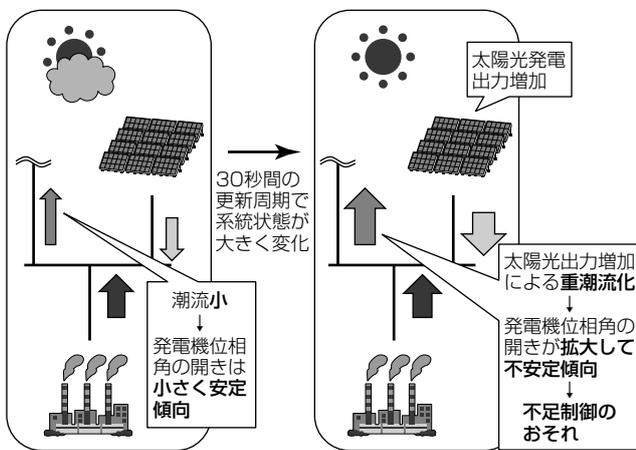


図2. 再エネ電源の出力変動

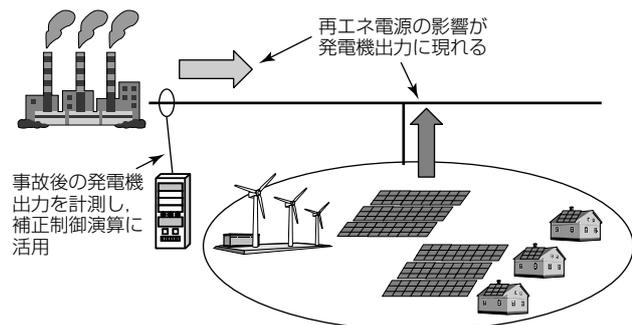


図3. 再エネ電源の考慮

判別を行い、追加の補正制御を実施することで、必要最小限の制御量で安定化を図ることができ、需給運用への影響緩和や電圧・周波数変動幅の抑制等も実現している。

電力系統での事故発生後の発電機の安定度は、事故後の発電機出力変化に現れる。事故後の発電機出力を用いた補正制御を適用することで、系統事故時の再エネ電源の特性を考慮した安定化を可能としている(図3)。

具体的には、事故後の発電機出力をリアルタイム計測し、それを基に電力相差角曲線(以下“P- $\delta$ 曲線”)を推定し、等面積法によって、安定度判別と制御量算出を行う手法を採用している(図4)。

再エネ電源導入に対する補正制御の安定化効果として、シミュレーション検証を実施した。第1段制御の制御テーブルでは安定(無制御)で、30秒間の潮流変動によって系統現象が変化した場合の潮流断面を用いた。図5に補正制御の適用有無による発電機位相角波形を示す。補正制御なしの場合は、発電機が1波脱調となり不安定であるのに対して、補正制御ありの場合は、補正制御で発電機が1台電制され系統は安定に維持されることが確認できる。また、

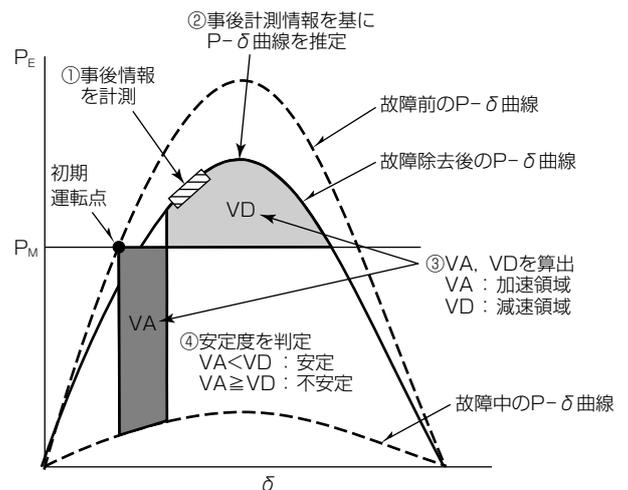


図4. 等面積法の手法

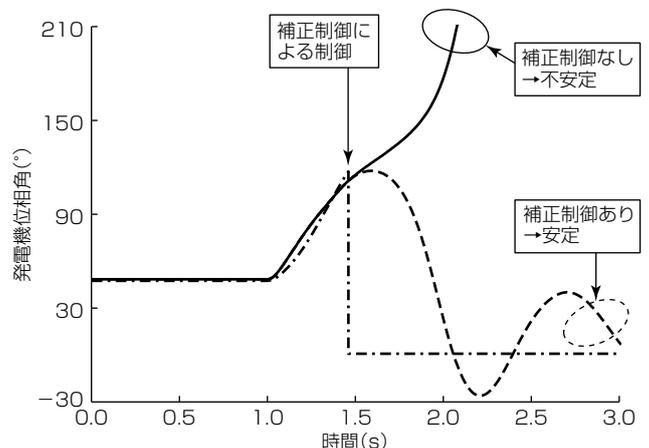


図5. 補正制御適用による安定化効果

リアルタイムシミュレータを用いた検証によって、その効果を確認した。

### 3. 四国電力(株)向けECS

#### 3.1 開発の背景

四国電力(株)では連系線ルート断事故時の四国系統周波数維持、及び大電源脱落時の中西系統周波数維持を目的として、ECSを1994年から導入している<sup>(2)</sup>。一方、近年導入拡大が進む再エネ電源のうち、特に四国系統では連系線事故時での太陽光発電設備(以下“PV(PhotoVoltaics)”という。)の応動が周波数変動に大きく影響することが確認されている。そこでこのたび、経年によるシステム更新に当たり、事故時のPVによる影響を考慮した新たなECSの開発を行うことになった(四国電力(株)及び当社で共同研究実施)。

#### 3.2 システムの特長及び構成

システム構成を図6に示す。ECSは、中央判定装置、発電所用端末装置、変電所用端末装置の3種類の装置から成り、全ての装置をデジタルリレーで構成する。また、全2系列構成であり、約50面で構築する大規模システムである。

ECSは、次の特長及び表1に示す制御機能を持つ。

- (1) 各発電機プラントの安定性を判定して制御を行うことで不要な電制を回避し、四国系統の周波数を維持(現ECSの長所踏襲)。

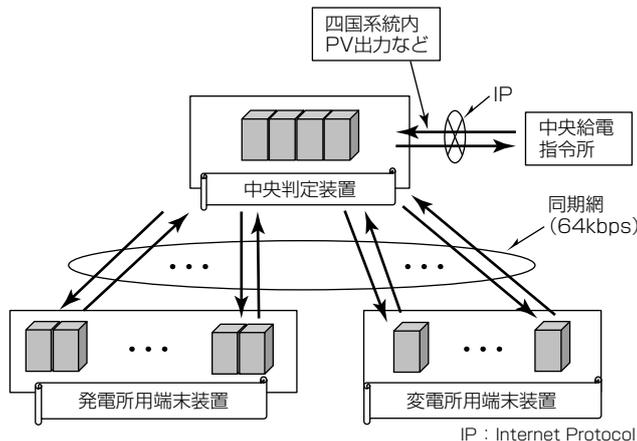


図6. ECSのシステム構成

表1. ECSの制御機能

制御目的	機能名	概要
四国系統周波数維持	地内ECS機能	連系線ルート断によって生じた四国系統の周波数維持を目的に電制、直流制御指令等を実施
	四国系統周波数低下対策	連系線ルート断によって生じた四国系統の周波数維持を目的に直流制御指令等を実施
中西系統周波数及び安定度維持	広域ECS機能	発電機複数台脱落事故時の中西系統周波数維持及び中西系統安定度維持を目的に制御を実施
発電機ローカル脱調対策	ローカル脱調検出制御機能	各発電機のローカル脱調時に電制を実施

- (2) 業界で初めて<sup>(注1)</sup>PV出力を安定化システムに取り込み、制御に反映することで、事故時のPV応動に適応。
- (3) 直流制御、発電機ランバック<sup>(注2)</sup>を活用し、制御量(電制量等)を削減。

これらの機能のうち、本稿では、PVの影響が大きい地内ECS機能(四国系統周波数上昇対策)について述べる。

(注1) 2018年7月20日現在、当社調べ

(注2) 系統周波数上昇時に発電機の出力を低下させる機能。発電機単独で制御を実施。

#### 3.3 地内ECS機能

地内ECS機能(四国系統周波数上昇対策)は、連系線ルート断時に電制、直流制御等を行うことで、四国系統の周波数を維持する。この機能は、主制御と補正制御の組合せによって実現する。

一方、近年多数導入されたPVは、事故時の電圧低下に伴って出力停止(PV脱落)して電圧復帰後に出力復帰(PV復帰)する特性がある(図7)。FRT対応PVは出力停止後1s以内に出力復帰するため、周波数の過渡的な変化に大きな影響は与えないが、FRT非対応PVについてはECSの制御で考慮が必要であり、次にその内容について述べる。

主制御は、事前計測情報に基づき、制御パターンを事前に作成しておき、連系線ルート断検出時に制御を実施する。PV脱落は電制と同様の影響を与えるため、PV脱落を考慮せず主制御を行うと、過剰制御になるおそれがある。そこで主制御では四国系統内PV出力を中給システムから伝送し、事故時のPV脱落量を想定して制御に反映することでPVの影響を考慮する。具体的には、事故時の電圧低下レベルに応じたPV脱落量を3段階想定し、制御パターンを電圧低下レベルごとに作成しておく。不足電圧リレーを用いて事故時の電圧低下レベルを検出し、レベルに応じて制御パターンを切り替えることで適切な制御を行う。PV脱落量は、FRT非対応PV脱落特性に対して設定する脱落パターンを用いて算出する(図8)。なお、主制御はあくまでも事故前に演算して制御パターンを決定しておく事前演算

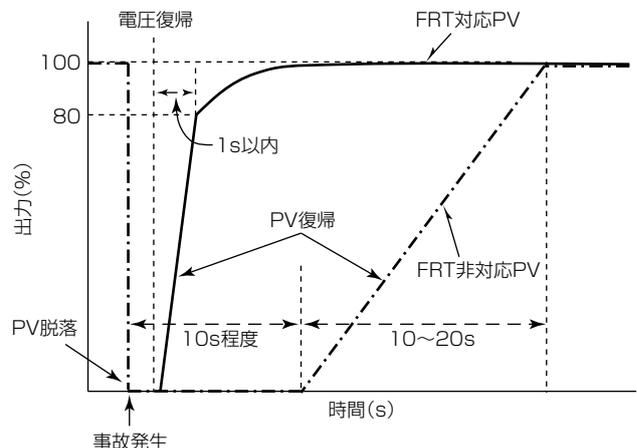


図7. 事故時のPV応動イメージ

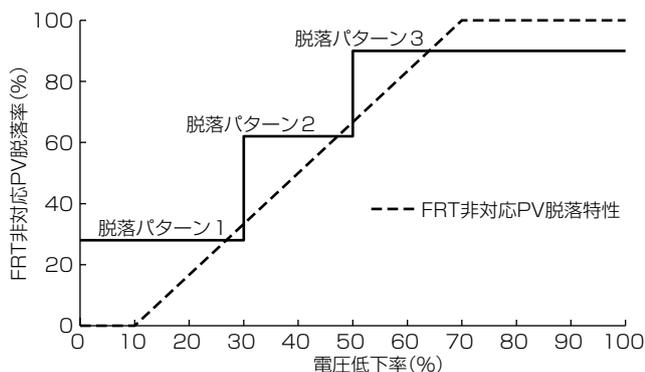


図8. FRT非対応PV脱落特性と脱落パターン設定例

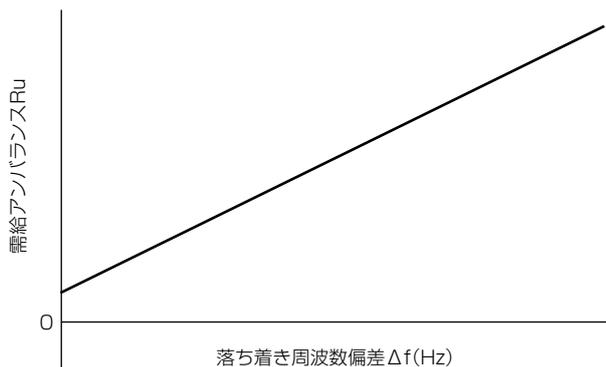


図9. 落ち着き周波数と需給アンバランスの相関イメージ

であり、事故前の想定が事故後の現象と必ずしも一致するとは限らない。ECSでは主制御のPV脱落、PV復帰の見込み違いに対して事後演算の補正制御でカバーすることにした。

補正制御では、先に述べたPV応動やその他の変動(負荷変動、発電機制御系の応動等)を含めた需給アンバランスが四国系統の落ち着き周波数偏差として現れ、線形の関係(図9)を持つことを利用する。具体的には、落ち着き周波数と需給アンバランスの相関を整定で持たせておき、計測周波数から現在の需給アンバランスを算出する。需給アンバランスと目標周波数から補正制御量を算出し、制御を行う。

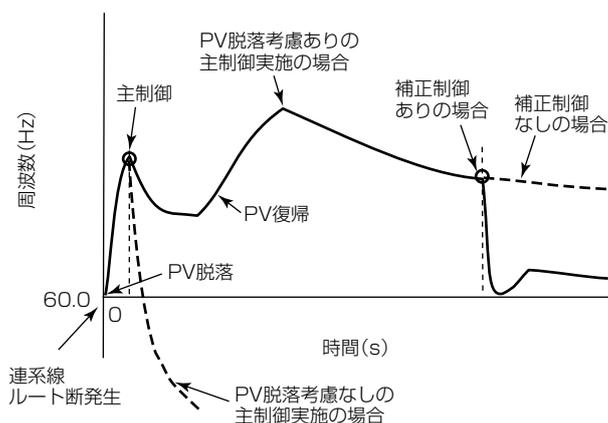


図10. 四国系統周波数上昇対策制御の実施イメージ

ECSでは、主制御と補正制御の多段制御方式にすることで事故時のPV応動に対して柔軟な制御を可能にした。図10に制御実施イメージを示す。

#### 4. む す び

再エネ電源の大量導入に対応可能な系統安定化システムとして、中部電力(株)向け基幹系ISCシステムと、四国電力(株)向けECSについて述べた。

中部電力(株)向け基幹系ISCシステムは、西部方面が2017年5月から運用開始しており、現地試験を順次進めている。東部方面は2020年5月運用開始を予定している。四国電力(株)向けECSは、現在上流設計を進めており、2021年3月運用を予定している。

#### 参 考 文 献

- (1) 吉田 央, ほか: 次世代グリッドに適応した基幹系統合型オンライン系統安定化システム(ISC)の開発, 電気学会論文誌B, 137, No.6, 434~445 (2017)
- (2) 栗本繁徳, ほか: プラント特性を考慮した新しい系統安定化方式の開発と実用化, 電気学会電力技術研究会資料, PE-94, No.88-104, 57~66 (1994)

伊東啓太\* 近野智規\*  
北山匡史\*\*  
宮田秀樹\*

# 高経年変電機器のライフマネジメント

Life Management of Aged Substation Equipment

Keita Ito, Masashi Kitayama, Hideki Miyata, Tomonori Chikano

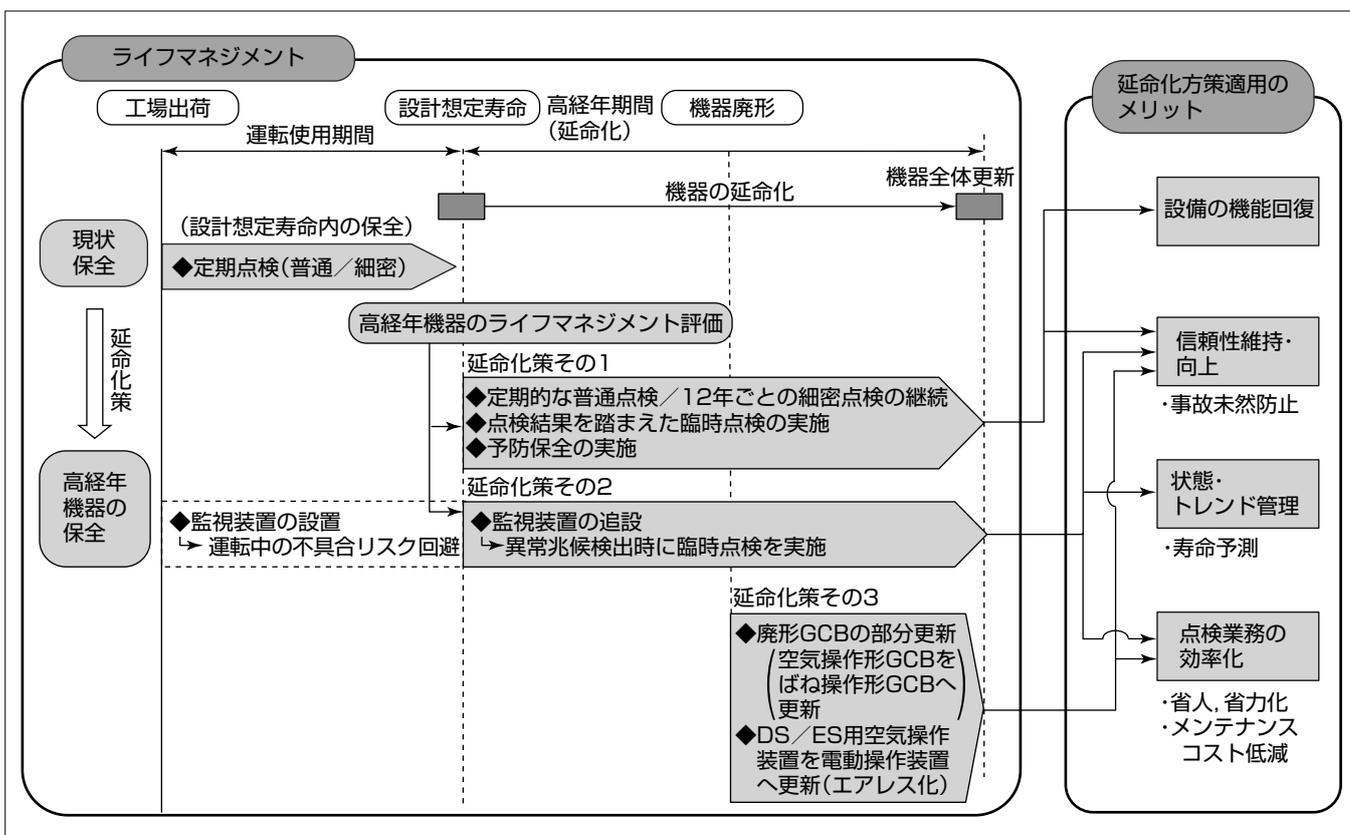
## 要旨

送配電事業への運用コスト低減の圧力の高まりを背景に、変電機器の高経年運用が常態化し、機器を極力長く使いたいが事故による供給障害は避けたい、また高経年化に伴う劣化進展による点検頻度の増加を避けたいというユーザーのニーズが高まっている。

そのため三菱電機ではGIS(Gas Insulated Switchgear)／GCB(Gas Circuit Breaker)のライフマネジメントに資する取組みを行っており、高経年GISの信頼性を向上するための方策の一つとしてGIS用の空気操作形GCBやDS(Disconnector)／ES(Earthing Switch)操作装置の部分的な更新について検討している。また、変圧器の油中ガスセンサ及びLTC(Load Tap Changer)動作特性監視センサなど

を適用したオンライン監視装置による機器状態の診断は高経年機器の不具合リスク回避に有効であり、保守点検の省力化を可能としている。

一方、やがて寿命を迎える変電機器の更新は投資金額の制約を満足させつつ物量を平準化する必要があるが、その判断で、更新を先送りにする機器の故障リスクを十分に考えて一定の判断指標に基づいて更新優先順位を決定する必要がある。今後構築されていくアセットマネジメントシステムで必要となる更新優先順位付けを支援する技術として、平準化を行う際の機器更新繰延べによる故障発生確率の増加に伴う延命リスクと機器更新コストの最適化が重要となる。



## GIS/GCBを例とした高経年変電機器のライフマネジメント

設計想定寿命までの期間は定期点検、臨時点検を実施し必要な部品交換を行うことで機器の劣化による機能低下を回復させながら運用する。その後は経年による信頼度低下に加え、取替部品の生産中止や熟練技術者の枯渇などの廃形機器の問題によって保守点検作業の維持が困難な状況となる場合があるため、監視装置設置による機器の状態診断や廃形機器の部分的な更新を行って機能・信頼度回復を図る必要がある。

### 1. ま え が き

高経年運用される変電機器がますます増加しており、潜在的に経年劣化による故障リスク、部品供給や熟練技術者不在によるメンテナンス困難などの課題を抱えながら運転しているものもあると考えられる。これらに添えていくため、機器のライフマネジメントの全体像を描き、経年劣化やメーカーの部品供給・メンテナンス対応可能者の枯渇などの環境変化に応じるための保守技術や取組みを立案することによって、機器本体を延命化させるとともに信頼性向上によって電力の安定供給に貢献する取組みが必要となる。

### 2. 高経年変電機器の延命化に対する取組み

高経年変電機器(以下“高経年機器”という。)の延命化を図るとともに安定供給への責務を果たすため、経年劣化や廃形などの環境変化に対する保守の在り方や各種の保守技術について整理して機器のライフマネジメントに取り組んでいる。その一例を次に述べる。

#### 2.1 高経年機器のライフマネジメント

図1はGIS/GCBを例とした高経年機器のライフマネジメントの概念を示す。設計想定寿命までの期間は普通点検や細密点検を実施し、必要な部品交換を行うことで機器の劣化による機能低下を回復させながら運用するが、設計想定寿命を超えた機器は、各種点検に加えて臨時点検や予防保全を行うとともに、運転中の不具合リスクを回避するために監視装置を追設して機器の状態診断を行うことが有効

と考えられる。さらに経年による信頼度低下に加え、取替部品の生産中止や熟練技術者の枯渇などの廃形機器の問題によって保守点検作業の維持が困難となる場合がある。このような状況に対応するため、図1では廃形への対応の代表例として初期形GISでの空気操作形GCBを挙げ、これを部分更新することによるGISの延命化策を示した。空気操作形GCBをばね操作形GCBに更新することで、煩雑な保守作業が要求される空気操作装置を排除できると同時にDS/ESに適用されている空気操作装置を電動操作装置に更新すれば、変電所全体のエアレス化を図ることによって保守作業の軽減を図ることが可能である。これについて2.2節で述べる。

#### 2.2 GISエアレス化への取組み

1970~1980年代に納入されたGISのGCB、DS/ESの操作装置は大半が空気操作形であるが、多数納入されたこれらの高経年機器の多くは現在も運用されている。GCB、DS/ESの可動部の駆動装置としての圧縮空気発生装置は、空気圧縮機、空気圧タンク、圧力スイッチなどが収納される制御盤から構成されている。空気系統の保守部品は約150点あり、ゴム系パッキンが多数使用されているため、経年劣化による空気漏れが多発しており、ユーザーの保守労力と費用の増大を招いている。このGCBをばね操作形GCBに更新するとともに、DS/ES用空気操作装置を電動化することで変電所全体でエアレス化が可能になり、これらの保守作業が不要になるため、メンテナンス性と信頼性を向上できる。図2は海外向けの初期形145kV GISでの空気操作形GCBとDS/ES用空気操作装置を示す。

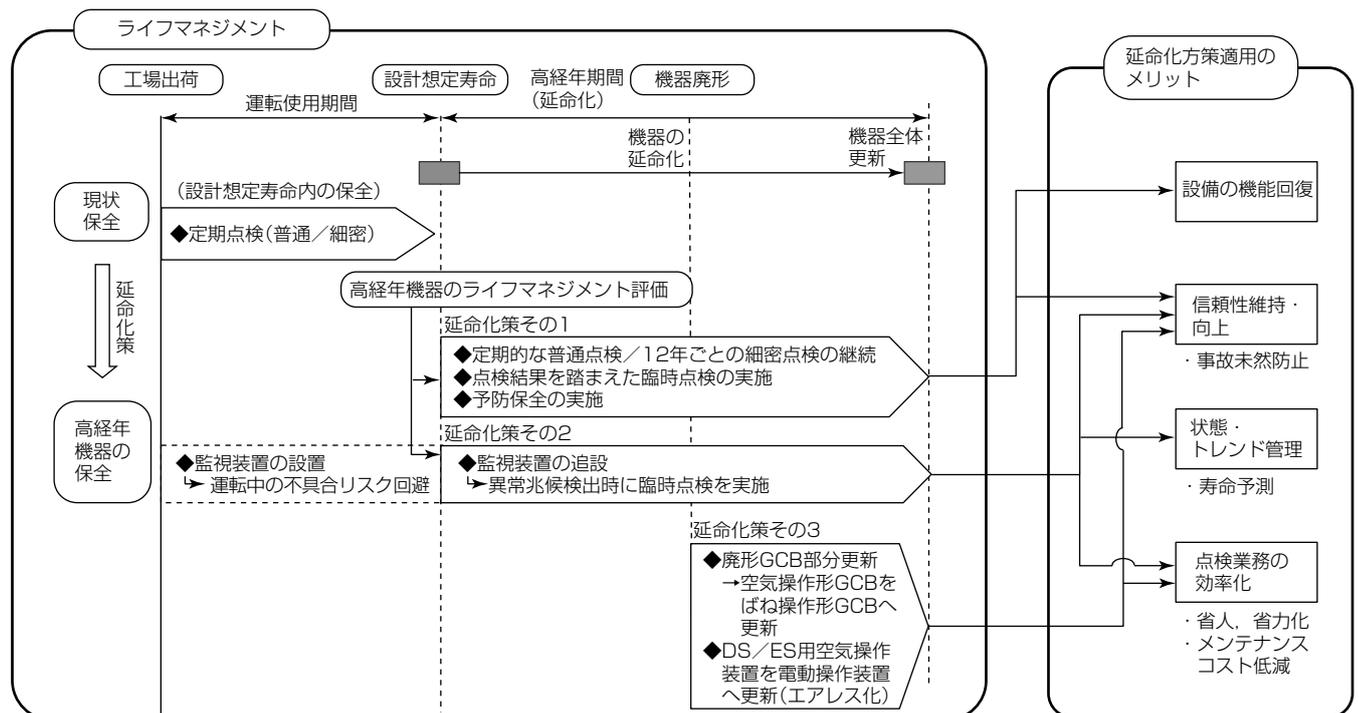


図1. GIS/GCBを例とした高経年機器のライフマネジメント

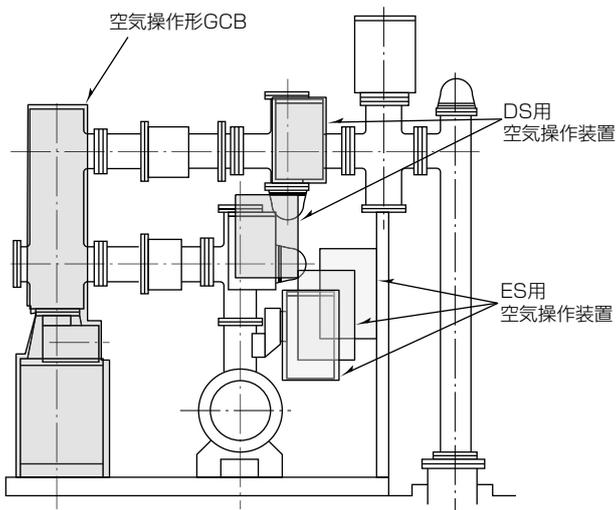


図2. 初期形145kV GISの空気操作形GCBとDS/ES用空気操作装置

表1. 変圧器監視用センサ

監視項目	適用センサ	機能
油中ガス (6成分)	熱線形半導体センサ	絶縁油に溶解しているガスを抽出し、6種類のガス成分を微量の段階で測定することによって、機器内部で発生している異常を検出し、異常の種類を推定する。
油面	磁気式ポテンシオメータ	油面を監視することで、変圧器の油漏れを検出する。
油温	測温抵抗体 (Pt100Ω)	油温上昇を監視することで、変圧器内部の異常や冷却器の異常を検出する。
LTC動作特性	駆動軸トルクセンサ モータ電流センサ 切換信号、タップ位置信号	負荷時タップ切換器の本体機構部、操作機構部の異常の前駆現象を駆動軸トルクセンサ・モータ電流波形から検出し、異常の検出と部位を標定する。
LTC切換開閉器接触子消耗量	負荷電流センサ LTC切換信号	負荷電流やLTCの切換信号を測定し、切換開閉器内接触子の累積消耗量を推定することによって、接触子残量管理限界や主接点・抵抗接点のアンバランス消耗量管理限界に対する裕度を予測し、適正な内部点検を支援する。

### 3. 監視装置による状態診断と保守点検省力化<sup>(1)</sup>

監視装置によって機器のモニタリングを行うことは、不具合リスクの回避もさることながら、アセットマネジメントで導入が進みつつある各機器状態のヘルスインデックス<sup>(注1)</sup>算出に役立つことに加え、従来の点検員による作業を自動化し、省力化するメリットがある。この章では変圧器を例に、監視装置による状態診断について述べる。

(注1) 機器の所有者がその機器の更新計画を行うために用いる、機器状態を表す簡単な指標であることがCIGREのTechnical Brochureに記されている<sup>(2)</sup>。

#### 3.1 変圧器の監視診断

高経年機器の増加や設備投資抑制によって、従来の運転時間や動作回数をもとに点検するTBM(Time Based Maintenance)から、各種センサを用いて機器状態を把握し、保守を実施するCBM(Condition Based Maintenance)へ移行し、保守コストの削減が検討されつつある。これまでは人による巡回点検で機器の状態を確認していたが、遠隔地から変圧器の状態をオンラインで監視・診断することで機器の信頼性向上と保守コスト削減を図る変圧器保守支援システムが導入されている。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設の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。

代表的なオンライン変圧器監視用センサを表1に示す。そのうちのCBMを指向したオンラインの油中ガスセンサ及びLTC動作特性監視センサ、LTC切換開閉器接触子消耗量監視センサについて次に述べる。

##### 3.1.1 油中ガスセンサ

油中ガスによる異常診断は、変圧器内部異常の様相や進展度合いを検出・特定できることから有効な手段として採用されている。特にオンライン装置は変圧器本体と油配管

で接続され、油中ガスを周期的に自動測定し、定期的なオフライン分析では困難である異常兆候の早期検出が可能である。変圧器の停電が不要で容易に据付け可能であることも特長の一つである。

##### 3.1.2 LTC動作特性監視センサ

従来LTCは、巡視及び動作回数・経年による保守作業が行われてきた。監視装置としては、トルクセンサと電流センサによって切換中の駆動軸トルクとモータ電流波形を測定し、異常の前駆現象を検出するものである。

測定されたトルク波形から抽出されたトルクや動作時間によって異常判定を行うとともに、前回測定波形又は形式ごとの基準波形との重ね合わせによる異常の兆候、異常部位の診断を可能にしている。トルクセンサは開放点検する機会の少ないタップ選択器や転換器の診断に有効である。

##### 3.1.3 LTC切換開閉器接触子消耗量監視センサ

LTC切換開閉器の開放点検は、従来動作回数や経年による周期管理によって実施されている。この開放点検は、主に接触子の消耗量、締め付け部の緩みを点検するもので、接触子消耗量監視による内部点検周期の延伸が保守コスト削減の観点から検討されている。負荷率と切換方向などから算出される累積消耗量を推定することで、各接触子の残量や主接点、抵抗接点の不均等消耗限界に達する裕度を把握し、消耗進行度に応じた点検周期の調整が可能になる。

#### 3.2 変圧器監視システム

変圧器監視システムの構成例を図3に示す。各種センサ信号は冷却器制御盤内に内蔵したセンサ信号処理ユニットでセンサ信号の変換・異常診断を実施し、測定データ、診断結果を変電所内のネットワークを介してサーバに保存する。そのデータは遠隔の保守拠点で一元管理することによって機器の異常兆候の検出や保守管理計画の立案が容易に可能になり、保守管理に係るランニングコストの低減に貢献できる。

### 4. 更新優先順位決定のための支援技術

前章までに述べたような機器・装置の部分更新や監視装

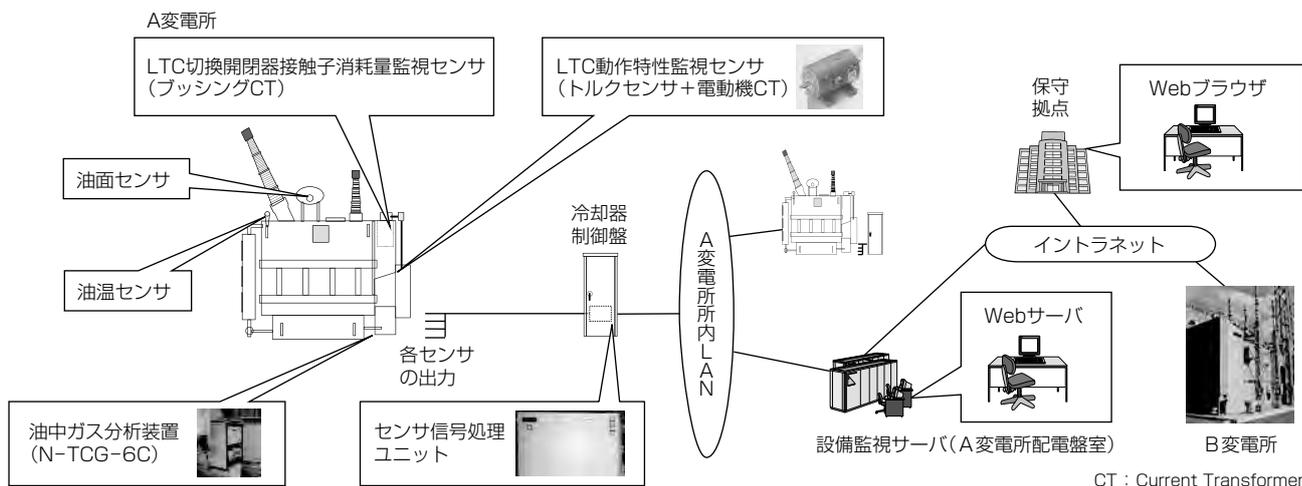


図3. 変圧器監視システム

置の設置などの様々な保守技術を用いたライフマネジメントを行うことによって変電機器をできるだけ長く運用する取組みを行う一方で、工業製品である変電機器はやがて寿命を迎える。個々の変電機器は、機器単体での診断によって劣化状態を判定した後、更新平準化のための繰延べを含めた更新時期調整に伴う機器リスクを定量化し、適切な保守・点検を行い、適切な時期に更新することが望ましい。機器更新には多くの費用・作業員を要するため経営面での制約が大きく、この制約の中で更新工事を実施する必要がある。特に、ある一定の管轄に所属する機器全体を対象とすると、多数の更新工事を特定の年度に集中することは避けて複数年度に分散して工事を行う、いわゆる平準化をすることが望ましい。

更新平準化のために更新工事を後ろ倒しすると機器を延命化することになり、劣化に伴って故障が発生する確率やそれに伴う保全コストが増加することになり、延命リスクが発生する。更新年の後ろ倒しに当たって増加する延命リスクをなるべく抑制することが望ましい。

年間更新費用をなるべく平準化することと、延命リスクの最大値をなるべく小さくすることを目的関数にした最適化問題として定式化することによって、最も望ましい更新繰延べ計画を策定することができる。更新コストのばらつきと延命リスクのばらつきは相反する要求であり、二つを同時に改善することはできない、いわゆるトレードオフの関係にあり、更新工事の計画策定者が望ましいものを選択することになる。更新計画策定は各機器の更新年を決定する組合せ最適化問題として定式化できる。

入力データは、個別機器の型式、経年や動作回数などの稼働実績、診断によって得られた故障率、機器重要度や影響度などである。制約条件としては、更新年を繰延べする場合の繰延べ上限値、同一バンクなどの複数機器を同一年に更新する一括更新などを考慮する必要がある。更新計画

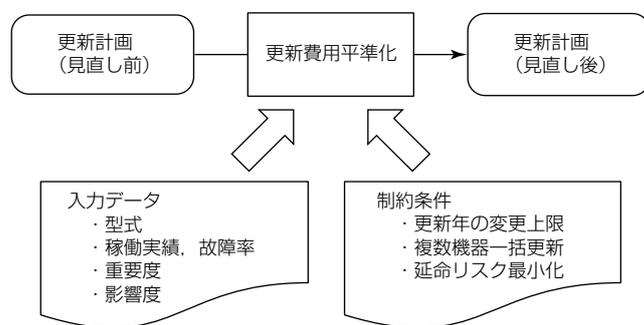


図4. 更新計画最適化の考え方

策定は制約条件を加味して、年度ごとの更新費用のばらつきが小さくなるように、個別機器の更新繰延べ年を決定することによって、個別機器の延命リスクが元の更新計画より大きくならないように平準化する更新計画に見直すことができる(図4)。

### 5. むすび

増加の一途をたどる高経年変電機器のライフマネジメントの必要性について述べるとともに、具体的な例として、GIS用の空気操作形GCB、DS/ES用空気操作装置の部分的な更新によるGIS延命化へ取組み例や、変圧器用のオンライン監視装置による機器状態診断と保守省力化の例について述べた。また今後構築されるアセットマネジメントシステムで必要となる更新優先順位付けを支援する技術として、機器更新コストと、相反する延命リスクの最適化の考え方について述べた。

### 参考文献

- (1) 篠原秀雄, ほか: IT化対応変圧器保守支援システム, 三菱電機技報, 75, No.8, 561~564 (2001)
- (2) CIGRE TB 422 C1.16, Transmission Asset Risk Management (2010)

# 油入変圧器の異常診断技術の高度化

加藤福太郎\* 柏野敦彦\*  
近野智規\*  
網本 剛\*

Enhancement of Fault Diagnostic Technique on Oil-immersed Transformer

Fukutaro Kato, Tomonori Chikano, Tsuyoshi Amimoto, Atsuhiko Kashino

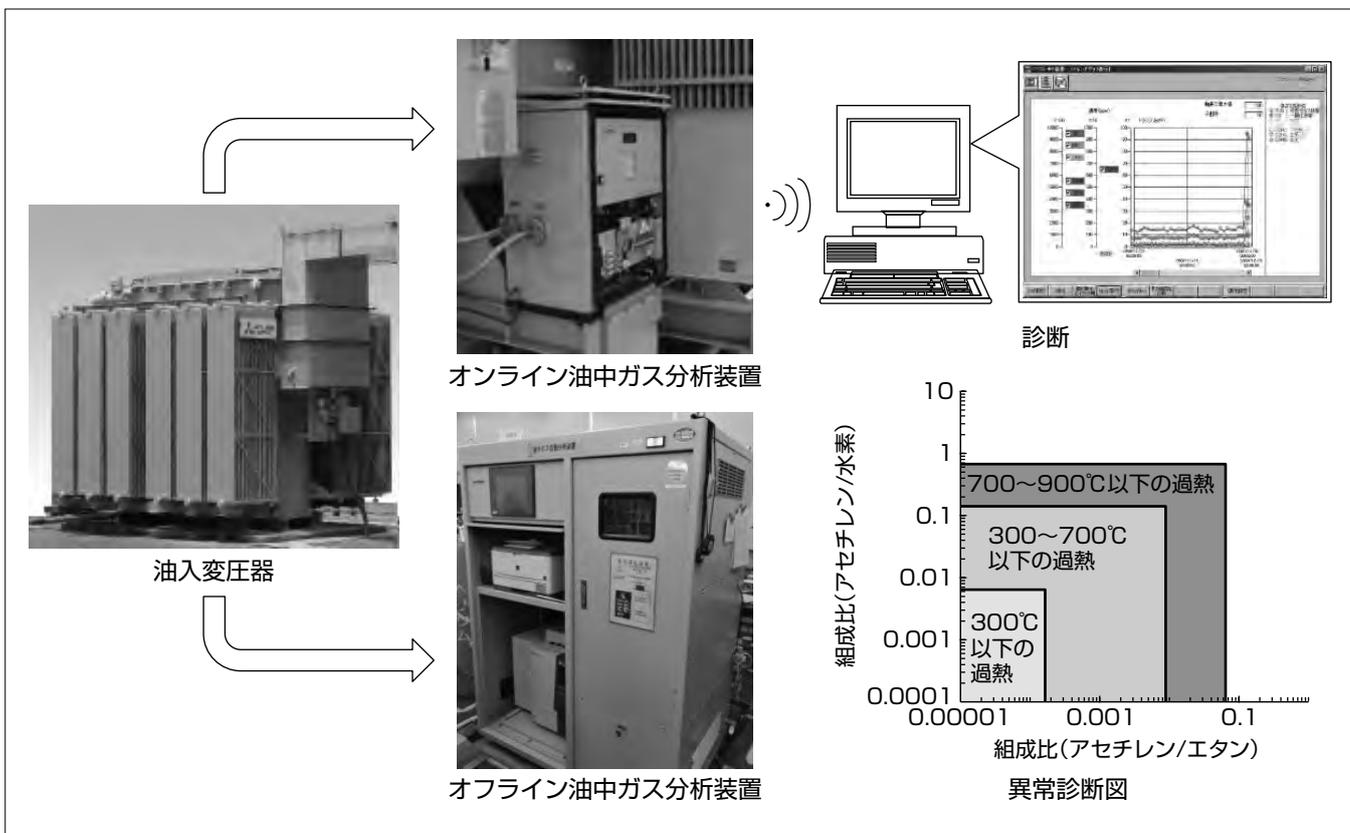
## 要 旨

高経年変圧器の増加を背景に、保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして油入変圧器の異常を診断する技術のニーズが高まっている。これまで鉱油入変圧器に関しては、変圧器の運転を停止せずに診断可能な手法として、定期的にオフラインで実施する油中に溶解するガスの分析によって異常の有無や様相を特定する技術が実用化され、鉱油入変圧器の信頼性向上に寄与してきた。

近年、鉱油入変圧器に対して、従来の油中ガス分析では診断が困難な現象を解決するための技術開発や異常を早期に検出できるオンライン診断のニーズが高まっている。ま

た、欧米を中心に防災性や環境調和性に優れた植物油入変圧器の導入が進んでおり、植物油入変圧器に対応した異常診断技術の確立が急がれる。

このような背景から、三菱電機は、鉱油入変圧器に対して高精度油中ガス分析によって異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。また、植物油入変圧器に対して、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデル試験の結果に基づいた異常診断技術を開発した。



## 油入変圧器のオンライン油中ガス分析とオフライン油中ガス分析

無線通信技術を活用したオンライン油中ガス分析によって異常を早期に発見する診断技術及び高精度オフライン油中ガス分析によって異常部位を特定する診断技術を示す。

## 1. ま え が き

設計想定寿命の30年を超える高経年鉱油入変圧器の増加を背景に、保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして油入変圧器の異常(放電、過熱)を診断する技術のニーズが高まっている。油入変圧器の内部に異常が発生した場合、変圧器を構成する絶縁物や絶縁油などの絶縁材料が分解することによって発生したガスが絶縁油中に溶解する。この絶縁油中に溶解したガスを分析することで、油入変圧器内部の異常が診断できる。油中ガス分析による異常診断技術は、油入変圧器の運転を停止することなく診断できるため、古くから技術開発が行われ、鉱油入変圧器では保守管理指針が制定され、広く適用されてきた。

近年、鉱油入変圧器に対して、従来の油中ガス分析では診断が困難な現象を解決するための技術開発や異常を早期に検出できるオンライン診断のニーズが高まっている。また、欧米を中心に防災性や環境調和性に優れた植物油入変圧器の導入が進んでおり、植物油入変圧器に対応した異常診断技術の確立が急がれる。

以上の背景から、当社は、鉱油入変圧器に対して異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。また、植物油入変圧器に対応した植物油のガス生成特性に基づいた異常診断技術を開発した。

本稿では、鉱油入変圧器の異常診断技術の高度化開発及び植物油入変圧器の異常診断技術開発について述べる。

## 2. 油入変圧器での異常

油入変圧器には、絶縁油や絶縁物などの絶縁材料が使用されており、内部で異常(放電、過熱)が発生すると、絶縁材料が損傷してガスが発生する。絶縁材料は主に炭素(C)・水素(H)・酸素(O)で構成されており、異常発生時はこれらの元素で構成されるアセチレン(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)・水素(H<sub>2</sub>)・エチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)・エタン(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)・メタン(CH<sub>4</sub>)・一酸化炭素(CO)の可燃性ガスが発生し、診断のための指標ガスとして扱われる。

油入変圧器の異常現象で発生する可燃性ガスを図1に示

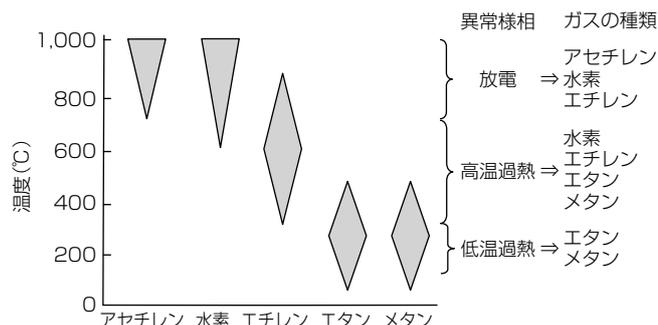


図1. 油入変圧器の異常現象で発生する可燃性ガス

す。油入変圧器の異常の様相には、放電、高温過熱、低温過熱があり、これら異常様相と発生するガスの種類・濃度比率は固有の相関関係がある。異常発生時に絶縁油に溶解したガスを分析することで、異常の有無や様相を特定できる。

## 3. 油中ガス分析による油入変圧器の異常診断

### 3.1 鉱油入変圧器の異常診断

異常の有無や異常の様相を特定することを目的として、オフラインで定期的(1~3年に1回)に採油・分析することで運用がなされてきた。近年、異常部位の特定が可能なオフライン診断及びIT技術やセンサ技術を適用したオンライン診断のニーズが高まっており、これらニーズに応える診断技術を開発してきた。具体的なオフライン/オンライン診断を3.1.1項、3.1.2項で述べる。

#### 3.1.1 高精度油中ガス分析によるオフライン診断

油入変圧器はプレスボードやコイル絶縁紙など主要な絶縁材料以外に、種々の絶縁材料が使用されており、それぞれ使用部位が異なる。絶縁材料から発生する特徴的な成分の一例を表1に示す。高精度油中ガス分析を用いたオフライン診断では、絶縁材料から発生する特徴的な成分を検知することで異常が生じている絶縁材料を発見し、異常部位を特定できることを特長とする。油入変圧器に新規適用する絶縁材料に関しては、事前に試験を行い、随時データベースの拡充を図っている。

#### 3.1.2 オンライン診断

オンライン診断は、通常の油中ガス分析装置をコンパクト化し、油入変圧器に追設することで、常時、油中ガス分析が実施できる<sup>(1)</sup>。

オンライン油中ガス分析装置は、油配管で油入変圧器と接続しており、採油・分析する。多頻度で分析するためには、油入変圧器の運転停止を伴う油の補充作業が不要のように、油を消費せず油入変圧器に返送することが重要である。また、高経年機器に適用するためには停電を必要とせず、容易に据付けが可能であることも重要である。

当社のオンライン形油中ガス分析装置“N-TCG-6C”の仕様を表2に示す。N-TCG-6Cは、IEC(International Electrotechnical Commission)や一般社団法人電気協同研究会<sup>(2)</sup>で策定されている保守管理基準に準拠した成分であるCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>及びTCG(可燃性ガス総量)を分析できる。放電発生の有無を判断する指標

表1. 絶縁材料から発生する特徴的な成分例

絶縁材料	特徴的な成分
耐熱処理紙	アンモニア, 1, 3-ジアジン
ワニス処理紙	ブタノール
ガラスエポキシ	2-メトキシエタノール
接着剤	2, 3-ジヒドロベンゾフラン, 2, 6-ジイソシアネートトルエン
接着紙	1, 3, 5-シクロヘプタトリエン, 2, 5-ジメチルフラン

ガスC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>を保守管理基準値である0.5ppmから検出できる。

無線通信方式のオンライン油中ガス分析装置のシステム構成例を図2に示す。最新のIT技術を活用した無線通信では通信線を敷設する必要がなくなり、装置据付けの工期が短縮される。さらに、装置レイアウトの制約による検討が軽減される。

オンライン油中ガス分析装置によるトレンド監視のイメージを図3に示す。高頻度の分析によるトレンド監視に

よって急激な油中ガスの変化を把握できる。これによって定期的な採油・分析では早期検出が困難であった、異常時の様相の変化をオンライン分析によって容易に検出できる。さらに、IEC、IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)等の油中ガス分析による保守管理指針では、分析結果から異常様相を診断する方法として、ガスパターン診断、ガス組成比診断等が提案されており、この装置にも客先ニーズに対応し、各種診断機能を搭載している。

油中ガスと油温、負荷電流を同時に取り込むことによってトレンドの急激な変化時の油温や負荷状況を確認できる。

3.2 植物油入変圧器の異常診断

3.2.1 植物油の変圧器への適用と現状

従来、変圧器内部の絶縁油としては石油由来の鉱油を使用しているが、近年、環境配慮や高い防災性の観点から、植物を基材とした絶縁油を変圧器に適用する動きが進んでいる。

絶縁油の特徴を表3に示す。植物油は鉱油やシリコン油に比べ、引火点が高く、生分解性があり、植物由来であることが特徴である。これら特徴を背景に、特に欧米では、植物油を使用した変圧器の納入台数は100万台を超えており(今特集号の論文“高生分解性を持つ植物基材の絶縁油を使用した変圧器”参照)、今後更なる増加が見込まれることから、植物油入変圧器の油中ガス分析による異常診断技術の確立が急がれる。

鉱油入変圧器と植物油入変圧器の絶縁油に関する規格の比較を表4に示す。新油の品質規格は制定されているものの、既設器油に対しては、フィールドデータが乏しく未制定である。鉱油と同様の保守管理指針の制定が望まれている。

3.2.2 植物油入変圧器の異常診断技術の確立

植物油入変圧器の油中ガス分析による保守管理指針の制定につながる異常診断技術を開発した<sup>(3)(4)</sup>。この診断技術は、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデル試験結果に基づいた2種類のガスの組成比(油中濃度比)を組み合わ

表2. N-TCG-6Cの仕様

項目	仕様	
一般	寸法	500(W)×360(D)×360(H)(mm)
	質量	70kg
	電源	AC単相500VA、電圧：指定電圧
ガス抽出方式	真空空間中への平衡抽出方式	
ガス検出方式	カラム+4種類ガスセンサ	
検出対象ガス	CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 及びTCG	
検出感度	TCG	20ppm
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.5ppm
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10ppm
	CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	20ppm
制御部	32ビットCPU制御部	
通信方式	RS-232C/RS-485/RS-422モデム、MODBUS <sup>(注1)</sup> 、Ethernet <sup>(注2)</sup> 、無線(無線LAN、LTE(Long Term Evolution))	

(注1) MODBUSは、Schneider Electric USA Inc.の登録商標である。  
 (注2) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

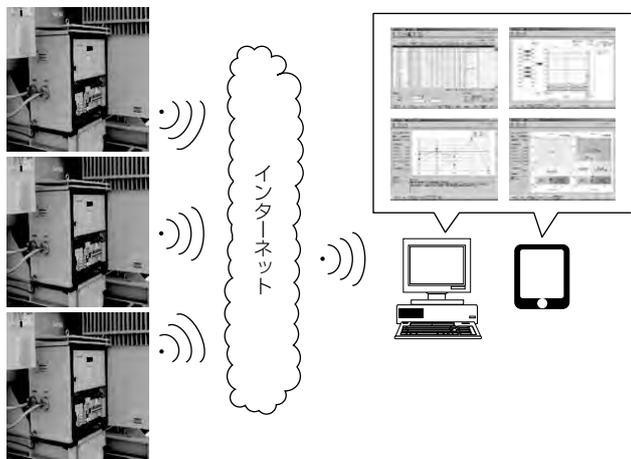


図2. オンライン油中ガス分析装置のシステム構成例

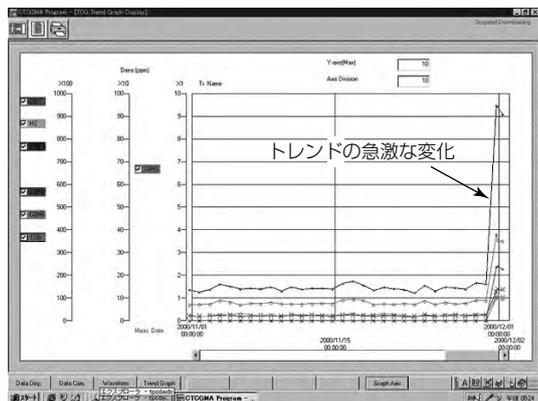


図3. オンライン油中ガス分析装置によるトレンド監視のイメージ

表3. 絶縁油の特徴

	鉱油	シリコン油	植物油
引火点(℃)	147	300	330
生分解性	低い	低い	高い
植物油由来	×	×	○

表4. 鉱油入変圧器と植物油入変圧器の絶縁油に関する規格の比較

	鉱油入変圧器	植物油入変圧器
新設器	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 60296</li> <li>ASTM D 3487-16</li> <li>JIS C 2320</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 62770</li> <li>ASTM D 6871-17</li> </ul>
既設器	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 60422</li> <li>IEC 60599</li> <li>IEEE Std C57.106-2015</li> </ul>	—

ASTM : American Society for Testing and Materials

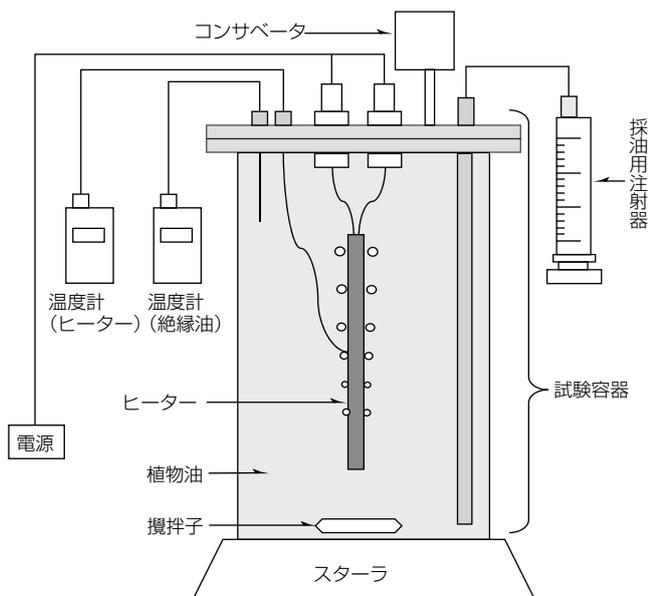


図4. 要素モデル試験装置の構成

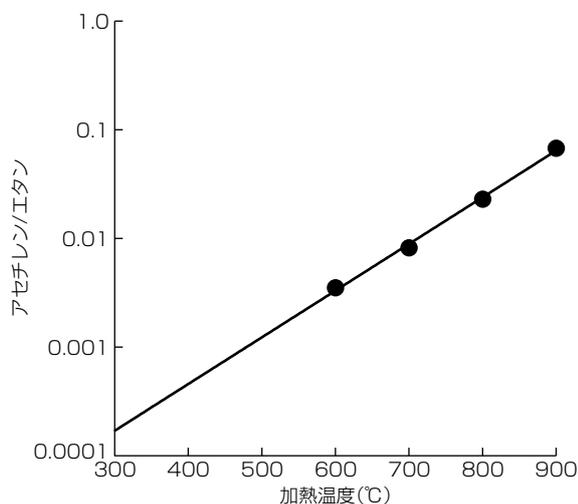


図5. 加熱温度とガスの組成比の例

せた異常診断図で診断することを特長とする。

図4に要素モデル試験装置の構成を示す。油入変圧器の過熱異常を模擬するため植物油中にヒーターを設置し、100℃から900℃まで連続的に加熱した。スターラで植物油を攪拌(かくはん)した後、採油し、加熱によって生成したガスを油中ガス分析によって検知した。試験の結果、植物油からも鉱油と同様の可燃性ガスが生成されたが、各ガスの油中濃度比率は鉱油と異なることが分かった。

図5に加熱温度とガスの組成比の一例を示す。ガス濃度は加熱温度の上昇に伴い増加した。各ガス濃度は変圧器の構造や診断のタイミングに依存する。これらの影響を受けないガスの組成比で加熱温度との相関を調査した。

図6に2種類のガスの組成比からなる異常診断図の一例を示す。フィールドの油入変圧器の場合、経年劣化など異常以外の要因で発生するガスは異常診断の妨害要因となる。これら妨害要因の影響低減のため、2種類のガスの組成比

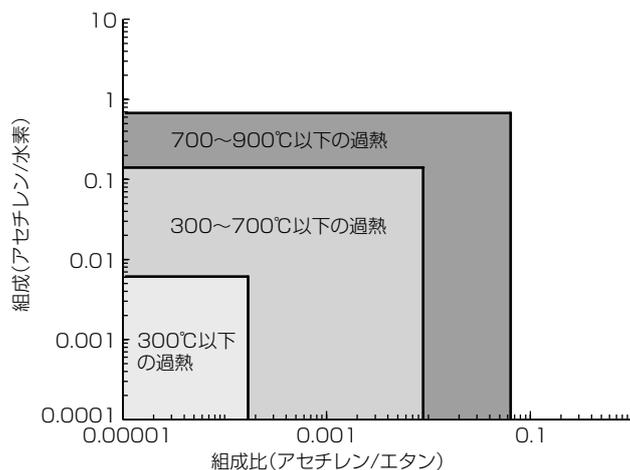


図6. 異常診断図の例

からなる異常診断図を構築した。この手法を適用することで、植物油入変圧器を高精度に異常診断できる。

これまで述べた指標となるガスは鉱油で検出されるガスと同種である。2種類のガスの組成比を組み合わせることで診断する異常診断図のアルゴリズムを採用し、鉱油入変圧器の診断用センサ技術を活用・カスタマイズして、植物油入変圧器へオンラインの診断機能を拡充していく計画である。

#### 4. む す び

鉱油入変圧器に対して、高精度油中ガス分析によって異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。

植物油入変圧器に対して、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデルの試験結果に基づいた異常診断技術を開発した。

高度化した鉱油入変圧器の異常診断技術及び新規開発した植物油入変圧器の異常診断技術を、油入変圧器の保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして役立てていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 内藤貞夫, ほか: 変圧器内部診断用油中ガス分析装置, 三菱電機技報, 79, No.12, 773~776 (2005)
- (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)
- (3) 栗山遼太, ほか: 非鉱油系絶縁油の異常診断技術の開発, 石油学会 第36回絶縁油分科会研究発表会 (2017)
- (4) Kuriyama, R., et al.: Investigation of Indicator Gas for Internal Fault on Ester Oil-immersed Transformer, International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (2017)

# 縮小形300kVガス絶縁開閉装置

中内慎一朗\*  
中村泰規\*

Compact 300kV Gas Insulated Switchgear

Shinichiro Nakauchi, Yasunori Nakamura

## 要旨

縮小形300kVガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear : GIS)は、従来形GISに対し一層の据付工期短縮と保守省力化を図り、環境負荷低減に貢献する最新形GISである。三菱電機ではこれまで半世紀にわたって培ってきたGIS技術に各種新技術を付加し、更なる小型・構造簡素化、メンテナンスフリー、SF<sub>6</sub>ガス使用量の極小化などを実現した最新形GISを開発・製品化した。その主な特長は次のとおりである。

### (1) 据付工期短縮

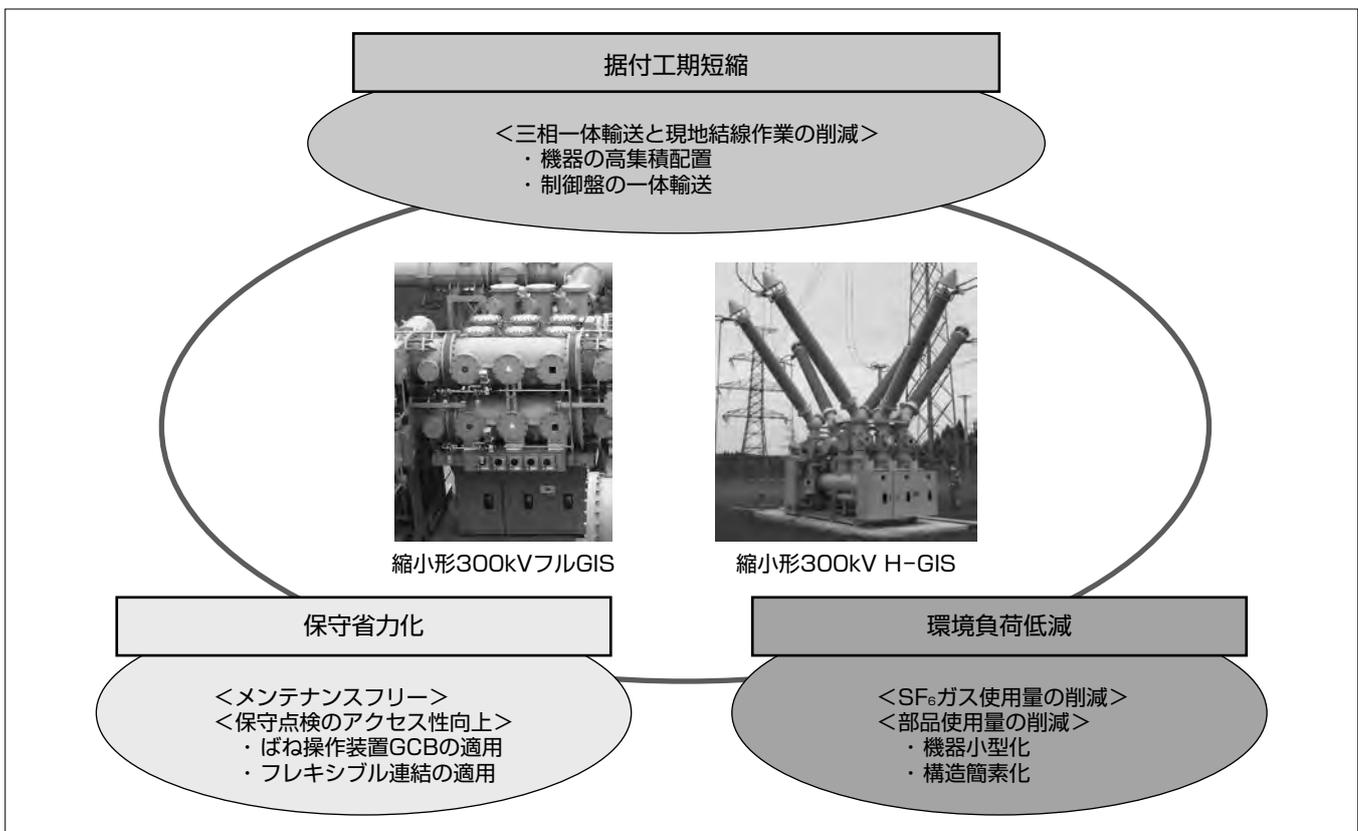
GISの高集積配置によってブッシングを除くGISの三相一体輸送を可能にした。さらに制御盤も含めた一体輸送とすることで現地結線作業を削減し、据付工期の短縮による経済性の向上を図った。

### (2) 保守省力化

ガス遮断器(Gas Circuit Breaker : GCB)は、ばね操作装置を適用し、歯車部への乾性潤滑皮膜適用によってグリスアップを不要にし、メンテナンスフリーを実現している。また、断路器(Disconnecting Switch : DS)・接地開閉器(Earthing Switch : ES)と電動操作装置をワイヤで連結する方式(フレキシブル連結)にすることで、DS・ES操作装置をGCB操作装置と同一面、又は制御盤内への一体配置を実現し、保守点検時の作業性改善を図った。

### (3) 環境負荷低減

最新形のGIS構成機器の適用によってGCB・避雷器・DSのタンク径を縮小し、部品使用量の削減とSF<sub>6</sub>ガスの使用量の削減を図った。



## 縮小形300kV GISの特長

縮小形300kV GISはGIS全体を高集積配置にすることで、制御盤を含めたGISユニットの三相一体輸送を実現し、据付工期の短縮を図った。また、GCBへばね操作装置を適用することで保守省力化を図り、DS・ES操作装置にフレキシブル連結を適用することで保守面と統一して作業性の改善を図った。また、GCBタンク径を縮小し、縮小形避雷器を適用することでGIS構成機器を小型化し、SF<sub>6</sub>ガス使用量を削減して環境負荷低減を図った。

### 1. ま え が き

GISは、その優れた性能と特長から電力用開閉装置として広く国内外に適用されている。当社ではこれまで半世紀にわたって培ってきたGIS/GCB技術をベースに新しい技術を付加することによって、一層の経済性、信頼性、保守点検性の向上及び環境負荷低減を図るために、新機種の開発と製品化に努めている。

本稿では、その代表例である縮小形300kV GIS<sup>(1)(2)</sup>の特長と適用技術について述べる。

### 2. 定格事項と基本構造

縮小形300kV GISの定格事項と基本仕様を表1に示す。定格短時間耐電流(定格遮断電流)は63kA、定格電流は6,000Aまで対応している。定格ガス圧は機器サイズの小型化を図るため、0.6MPa(従来0.5MPa, 以下ゲージ圧)にしている。DSとESは電流遮断方式に磁気アーク駆動方式を採用することで低操作力の電動操作にしている。また、DS・ES操作装置にフレキシブル連結を適用し、操作装置の配置自由度を向上させている。

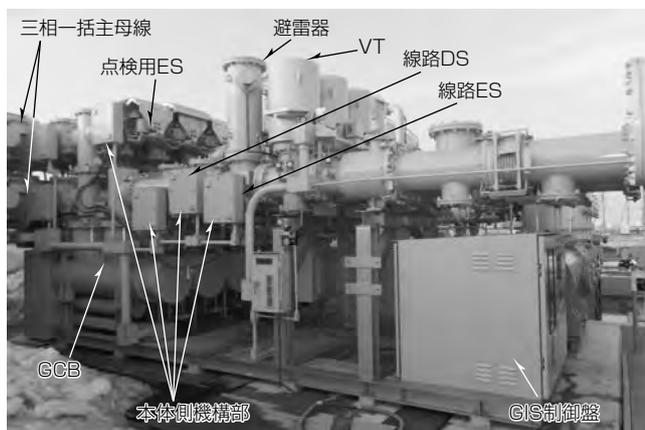
図1と図2に、主母線まで含めてガス絶縁としたフルGISの外観を示す。GCB横形配置とし、GCBの上部に三

相一括主母線・DS・ESを積層配置している。このような積層配置にすることによって、線路側に設置されたGIS制御盤も含めて、GISの三相一括でのユニット一体輸送を実現した。また、DS・ES操作装置はフルGISでは全てGCBのばね操作装置側に集約して配置し、一方向からの機器操作を可能にした。

図3に、主母線を気中絶縁とし、それ以外をガス絶縁と

表1. 縮小形300kV GISの定格事項と基本仕様

		新形器	従来器
GIS 共通	定格電圧(kV)	240/300	
	定格電流(A)	2,000/4,000/6,000	
	短時間耐電流(kA)	40/50/63	40/50
	雷インパルス耐電圧(kV)	950/1,050	
GCB	定格ガス圧(MPa)	0.6	0.5
	定格遮断電流(kA)	63	50
DS	操作方式	ばね操作	
	ループ電流開閉(A)	3,200/4,000	4,000/6,000
	操作方式	電動操作 フレキシブル連結	ばね操作 ロッド連結
ES	誘導電流開閉(A)	500/600	
	操作方式	電動操作 フレキシブル連結	ばね操作 ロッド連結



VT : Voltage Transformer

図1. 縮小形300kV フルGIS (GIS制御盤側)

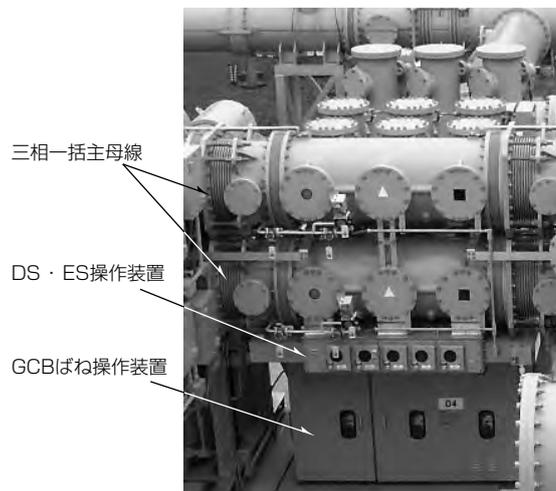
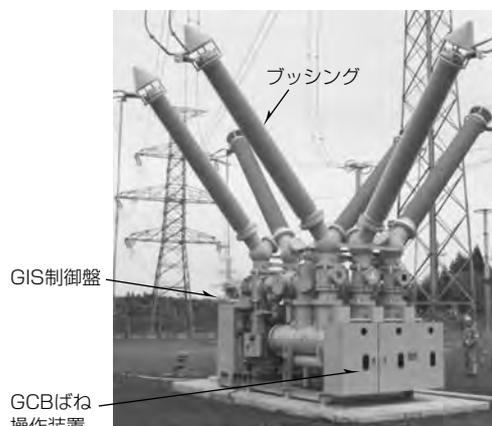
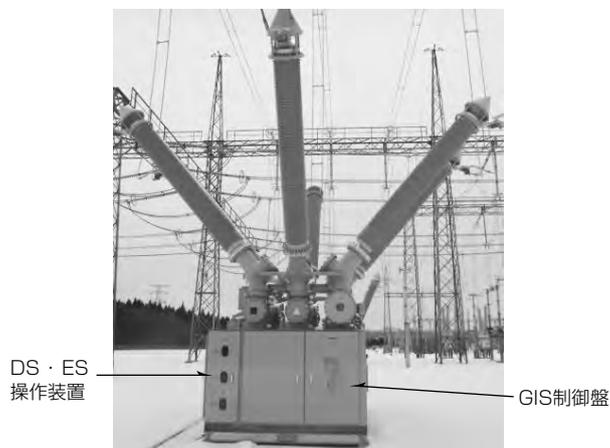


図2. 縮小形300kV フルGIS (GCBばね操作装置側)



(a) GCBばね操作装置側



(b) GIS制御盤側

図3. 縮小形300kV H-GIS

したハイブリッド形GIS(Hybrid-Gas Insulated Switchgear : H-GIS)の外観を示す。先に述べたフルGISと同じ機器モジュールを用いて三相を集中配置し、ブッシングを傾斜配置として気中絶縁距離を確保した。

### 3. 縮小形300kV GISの特長

#### 3.1 据付工期短縮

図4に300kV H-GISの新旧構造比較を示す。従来器(図4(b))は各相を個別配置としているのに対し、新形器(図4(a))は三相集中配置とし、さらにGIS制御盤をGIS本体と近接配置にしている。これによって、ブッシングを除き、GIS制御盤を含むGISユニットの三相一体輸送を可能にし、現地での制御線の配結線作業を削減した。その結果、縮小形300kV H-GISは従来器に対し、据付工期を約40%短縮した。図5に縮小形300kV H-GISの輸送状況を示す。

また、三相個別配置の従来器に比べ、三相集中配置にしたことで、新形器の外形寸法は約1/2、機器設置スペースは約1/4となり、コンクリート基礎面積を大幅に削減した。

#### 3.2 保守省力化

縮小形300kV GISは、ばね操作装置を適用することでGCB操作装置をメンテナンスフリーとし、低損耗ノズル

の適用によって、内部点検周期の延伸による保守点検の省力化を図った。点検時の作業性に関しては、フレキシブル連結を適用することで操作装置の配置自由度が高まり、保守点検時の作業性改善を可能にした。

#### 3.2.1 ばね操作装置

ばね操作装置は油圧操作装置に対して高い信頼性を持っている。ばね操作装置は油圧操作装置に比べて漏油リスクがなく、油圧系補機・計器類がないため、故障率は油圧操作装置に対して約1/5と大幅に低減される。新形器は十分な実績を持つトーションバー式ばね操作装置(図6)を適用し、歯車部への乾性潤滑被膜適用とシール付軸受の適用によって定期的なグリスアップを不要にし、操作装置としてのメンテナンスフリーを可能にした。

#### 3.2.2 低損耗ノズル

消弧室に負荷電流遮断回数5,000回まで無交換で開閉可能な低損耗ノズルを適用することで<sup>3)</sup>、内部解放点検周期を従来ノズルの2倍以上に延伸し、保守点検の省力化を図った。図7に大電流遮断後のノズルを示す。

#### 3.2.3 フレキシブル連結

母線DSと線路ESにはループ電流開閉と誘導電流開閉責務があり、従来器は抵抗限流方式と吸い込みパuffa方式を適用し、高速動作を行う電動ばね操作装置を適用していた。縮小形300kV GISでは、永久磁石の磁界によってアークを回転駆動する磁気アーク駆動方式(図8)を適用するこ

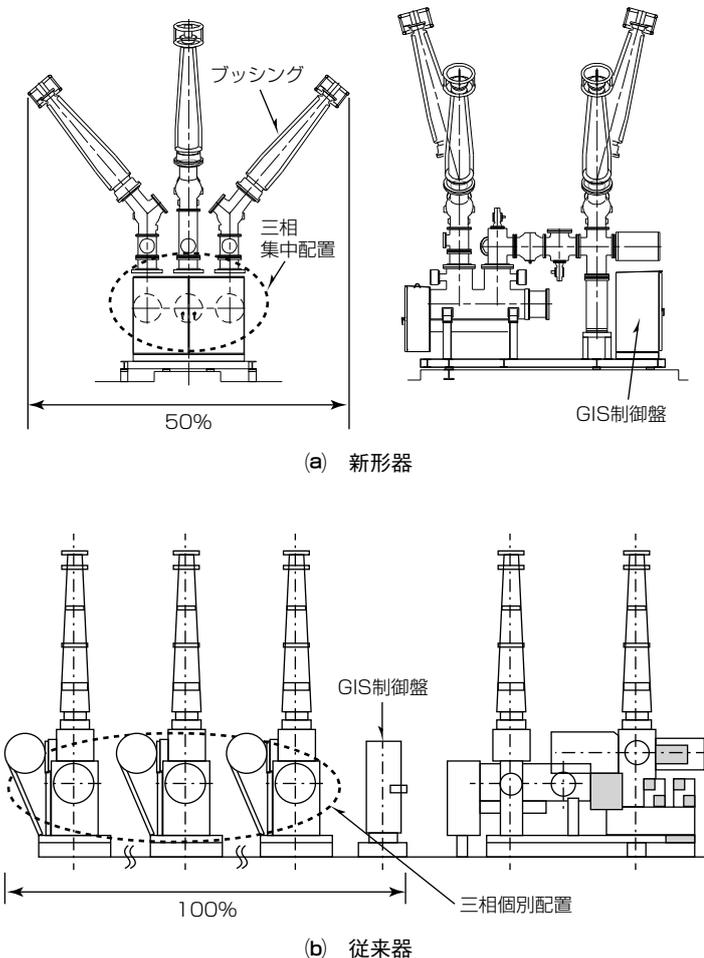


図4. 300kV H-GISの新旧構造比較



図5. 縮小形300kV H-GISの輸送状況

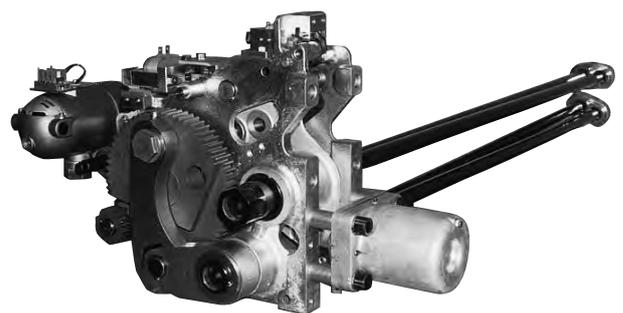
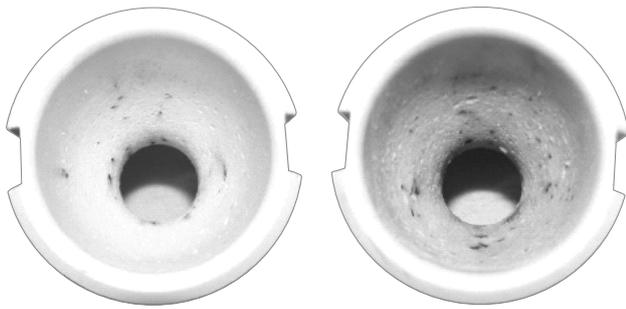


図6. トーションバー式ばね操作装置



(a) 低損耗ノズル (b) 従来ノズル

図7. 大電流遮断後のノズル

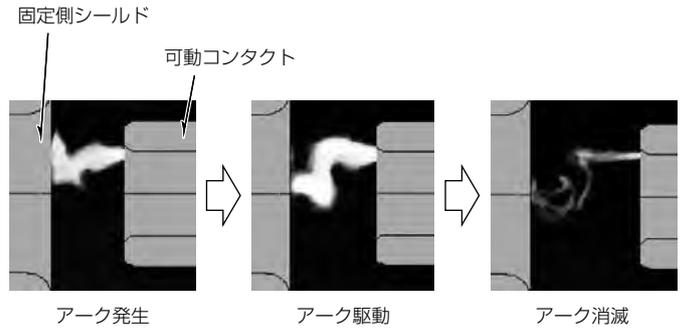


図8. 磁気アーク駆動のアーク挙動

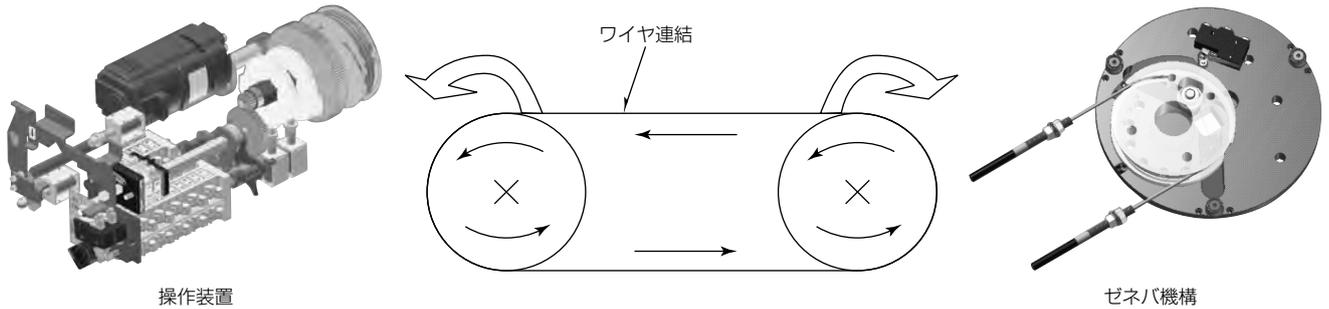


図9. フレキシブル連結構造

表2. GCB諸元の新旧比較

	新形器	従来器
タンク径(%)	75	100
GCB質量(%)	70	100
遮断速度(%)	120	100
定格ガス圧(MPa)	0.6	0.5
極間コンデンサ	なし	あり

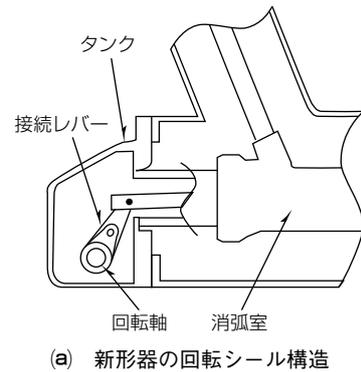
とで<sup>(4)</sup>、低速動作で遮断性能を確保し、電動操作装置の適用を可能にした。電動操作装置の適用によって、図9に示すフレキシブル連結の適用が可能になった。フレキシブル連結はDS・ES本体と操作装置それぞれに回転する円盤を設置し、それらを可とう性を持つワイヤで連結し、電動操作装置の動力をDS・ES本体に伝達する連結機構である。従来の連結ロッドはDS・ES本体に対して操作装置の配置が垂直又は水平に限定されていたのに対し、フレキシブル連結は、DS・ES操作装置の配置自由度が向上し、GCBばね操作装置の操作面、又はGIS制御盤内に集中配置することが可能になり、保守点検時の作業性改善を図った。

### 3.3 環境負荷低減

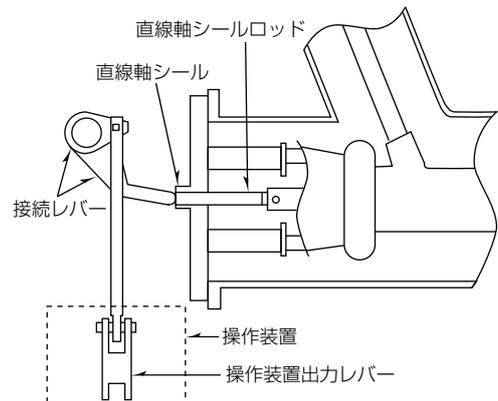
GIS構成機器の小型化・配置合理化によって、SF<sub>6</sub>ガス使用量を約20%低減した。また、機器の構造を簡素化することで部品使用量を削減した。次にGCBと避雷器の小型・軽量化技術について述べる。

#### 3.3.1 GCBの小型・軽量化

表2にGCB諸元の新旧比較を示す。新形器では、遮断速度上昇による遮断性能の向上のため、駆動部に回転シール構造を適用した。図10(a)に新形器の消弧室の回転シール構造を適用した。



(a) 新形器の回転シール構造



(b) 従来器の直線シール構造

図10. GCBのシール構造比較

ル構造を、図10(b)に従来器の消弧室の直線シール構造を示す。回転シール構造の適用によって、直線運動系に換算した可動部の等価質量を約20%軽量化し、遮断速度が10%上昇した。消弧室構造に関して、軽量化による遮断

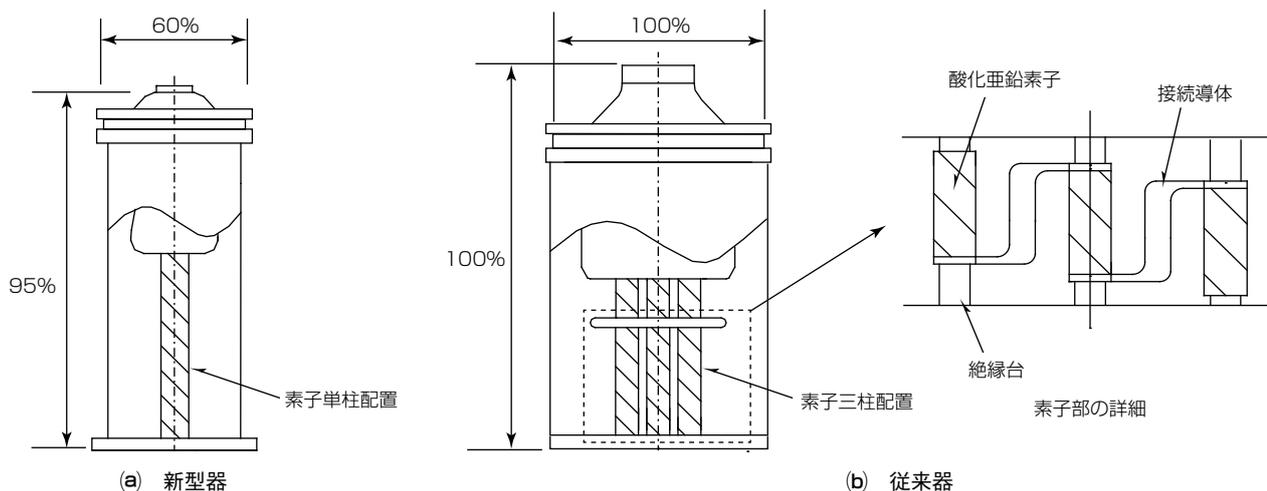


図11. 新旧避雷器の構造比較

速度上昇に伴い、パuffa径とガス流路形状の改良によって遮断性能を向上させた<sup>(5)</sup>。

回転シール構造を適用し、先に述べたパuffa径とガス流路形状を改良した消弧室と、国内外で数多くの製品実績を持つ高効率のトーションバー式ばね操作装置を用いることによって、極間コンデンサなしで定格遮断電流63kAの性能を確保した。これらによって、新形器は従来器に対して、タンク径を75%、GCB質量を70%にそれぞれ小型・軽量化した。

### 3.3.2 避雷器の小型化

縮小形300kV GISには、素子単位長さ当たりの動作開始電圧が600V/mm(従来器比1.5倍)の最新形の高抵抗素子を用いた縮小形高抵抗避雷器を適用した<sup>(6)</sup>。これによって素子数が従来器の約2/3に削減され、図11に示すように、素子配置を、従来器の三柱配置(電気的には直列接続)から単柱配置とすることができたため、素子柱構造の簡素化と部品点数を削減できた。これによって、タンク容積を従来器に対して約60%に小型化した。

## 4. む す び

電力業界を取り巻く様々な情勢変化を背景に、一層の経済性向上や保守省力化、地球環境問題への対応が要求される中、これまで当社が長年にわたって培ってきたGIS/GCB技術に加えて、研究・開発成果を反映して縮小形300kV GISの開発・製品化を行った。その特長を次に述べる。

### (1) 据付工期短縮

制御盤を含めたユニット一体輸送による現地組立工程の

削減と現地での配結線作業の削減によって、据付工期を約40%短縮した。

### (2) 保守省力化

GCBへのメンテナンスフリーであるばね操作装置の適用と、低損耗ノズル適用による点検周期延伸によって、保守省力化を図った。フレキシブル連結の適用によって操作装置の保守面を統一し、作業性を改善した。

### (3) 環境負荷低減

GIS構成機器の小型・配置合理化によって、SF<sub>6</sub>ガス使用量を約20%削減した。

## 参 考 文 献

- (1) 中内慎一郎, ほか: 縮小形300kV GISの開発, 平成28年電気学会全国大会論文集, 6-010 (2016)
- (2) 中内慎一郎, ほか: 縮小形300kV GISの開発, 平成30年電気学会全国大会論文集, 6-016 (2018)
- (3) 山下 透, ほか: ガス遮断器用低損耗ノズルの開発, 平成21年電気学会全国大会論文集, 6-207 (2009)
- (4) 柏木紘典, ほか: 永久磁石を用いた磁気アーク駆動遮断方式断路器の開発, 平成22年電気学会全国大会論文集, 6-200 (2010)
- (5) 芳友雄治, ほか: 362kV 63kA三相一括ばね操作GCBの開発, 平成22年電気学会全国大会論文集, 6-221 (2010)
- (6) 齋藤弘樹, ほか: 275/500kV新形ガス絶縁タンク形避雷器の開発, 平成27年電気学会全国大会論文集, 6-064 (2015)

# ポリマー適用機器のシリーズ開発

齋藤弘樹\*  
木佐貫 治\*

Series Development of Polymer Application Equipments

Hiroki Saito, Osamu Kisanuki

## 要 旨

送変電機器の気中絶縁支持物には従来重量物である磁器製のがいし・がい管が使用されてきたが、近年ではFRP（繊維強化プラスチック）と、外被材としてシリコンゴムなどの有機材料を組み合わせたポリマーがいし・がい管が国内外で適用されている。ポリマーは磁器に比べ軽量かつコンパクトなため、耐震性・施工性に優れていることや、外被ゴムが持つ撥水（はっすい）性によって優れた耐汚損性能を持っているなどの特長があり、海外では広く適用されている。一方、国内ではガス絶縁機器のブッシングや避雷器などの変電機器に限定的に適用されてきたが、2016年に電気協同研究第72巻第4号“ポリマーがい管の設計基準・試験法の標準化”が発行されたことを受け、今後ますますの適用拡大が見込まれる。

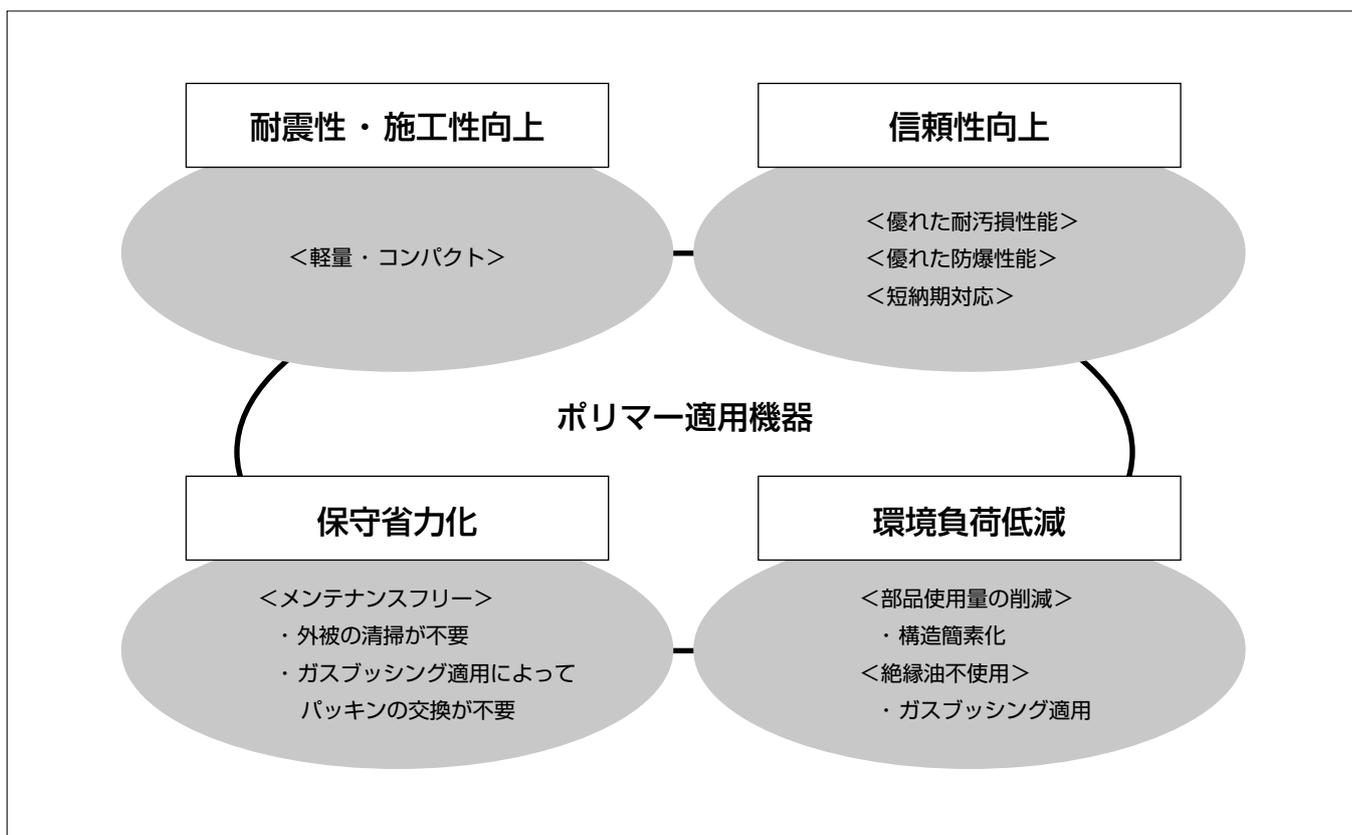
三菱電機ではポリマー適用に加えて最新の要素技術を取り入れることで、保守省力化や環境負荷低減にも寄与するポリマーブッシングとポリマー形避雷器のシリーズ開発を推進している。

### (1) ポリマーブッシング

ポリマーがい管を用いたガス絶縁ブッシングの適用によって、大幅な軽量化と耐震性向上を図り、GIS(Gas Insulated Switchgear)／GCB(Gas Circuit Breaker)及び変圧器用への適用を進めている。

### (2) ポリマー形避雷器

内部要素を直接ポリマー材料でモールドする構造の採用によって軽量・コンパクト化を図り、変電機器に限らず多用途への適用を進めている。



## ポリマー適用機器のメリット

ポリマー適用に加えて最新の要素技術を取り入れることで、ポリマー適用機器のシリーズ開発を推進している。ポリマー適用機器のメリットは、①軽量・コンパクトによる“耐震性・施工性の向上”，②優れた耐汚損性能・防爆性能や短納期対応による“信頼性向上”，③メンテナンスフリーによる“保守省力化”，④部品点数削減や絶縁油不使用による“環境負荷低減”である。

## 1. ま え が き

送変電機器の気中絶縁支持物には、これまで重量物である磁器製のがいし・がい管が広く使用されており、当社でも磁器がい管を使用したブッシングや避雷器などを製造してきた。一方、近年では磁器製のものだけでなく、FRPと外被材にシリコーンゴムなどの有機材料を使用したポリマーがいし・がい管が国内外で適用されている。ポリマーは磁器に比べ軽量かつコンパクトなため、耐震性・施工性に優れていること、防爆性に優れていること、また、外被ゴムが持つ撥水性によって優れた耐汚損性能を持っているなどの特長があることから、海外では1980年代後半から適用されている。一方、国内では1990年代中頃からガス絶縁機器のブッシングや避雷器などの変電機器に一部適用されているが、ポリマーがい管には統一された設計基準や試験法が確立されていなかったことや、外被ゴムやポリマー機器の劣化評価方法や保守点検項目が設定されていなかったことから、その適用は限定的であった。そのため電気協同研究会で国内での適用拡大に向けた検討が行われ、2016年にポリマーがい管の設計基準・試験方法や保守点検項目などがまとめられた電気協同研究(以下“電協研”という。)第72巻第4号“ポリマーがい管の設計基準・試験法の標準化”が発行された。今後は、国内でもポリマー機器のますますの適用拡大が見込まれる。

このような状況から、当社ではポリマー適用に加え、最新の要素技術を取り入れることによって、保守省力化や環境負荷低減にも寄与するポリマーブッシングとポリマー形避雷器のシリーズ開発を推進している。

本稿では、各機器シリーズの開発状況や適用状況について述べる。

## 2. ポリマーブッシング

従来の変電機器用ブッシングには磁器がい管を用い、内部には絶縁油を封入した油入ブッシングが適用されていた。JEC(電気規格調査会)-124-1952で初めて規格化が行われ、その後JEC-183-1971で耐震性能が規定され、JEC-183-1984でがい管の汚損仕様(L, M, H号)が規定された。そしてJEC-5202-2007で、センタークランプブッシングの耐震構造、及びSF<sub>6</sub>ガスを適用したガスブッシングが規格化された。

1960年代後半からGIS/GCBが運用されてきたが、この時期に納入した油入ブッシングは経年50年を迎え、パッキン劣化による油漏れやPCB(ポリ塩化ビフェニール)の問題があるため、今後計画的な更新が必要である。これらブッシングの更新には、軽量のポリマーガスブッシングが有効であり、また近年の耐震性向上のニーズから、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

行われた。現在、電協研第72巻第4号の発行を受け、ポリマーブッシングの規格化が検討されており、2019年にJEC-5202が改定される予定である。

### 2.1 GIS/GCB用ポリマーガスブッシング

定格550kVのブッシングの場合、ポリマーガスブッシングは、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あり、これによって耐震性が向上し、GIS/GCBの架台・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があるが、国内での製品適用はわずかであった。そのため電気協同研究会で、国内での適用拡大に向けた検討が行われた。

この流れに対応して当社では設計・検証仕様面の検討を加えながら、GIS/GCB用として8,000Aまでのシリーズ化を完了し、2016年に新設550kV GISに適用した(図1)。これまでに定格500kV用で130本のポリマーガスブッシングを納入済みである。

### 2.2 変圧器用ポリマーガスブッシング

変圧器用ブッシングには、これまで磁器がい管を使用したコンデンサタイプ、ダイレクトモールドタイプのブッシングが適用されてきた。ポリマーガスブッシングを変圧器に適用する場合、変圧器は油絶縁のため、変圧器内部に差し込まれる部分には油とSF<sub>6</sub>ガスを区分する絶縁物が必要になる。

これにGIS/GCBで適用されているエポキシ注型絶縁物を適用することによって、ブッシングの軽量化及び絶縁性能の確保を図りつつ、従来ブッシングと同等の取合いが可能な構造を確保した、新しい構成の変圧器用ポリマーガスブッシングを開発した(図2)。

気中側の主回路と大地間の絶縁支持にはGIS/GCBと同じポリマーがい管、油中側の絶縁支持にはGIS/GCBや変圧器-GIS直結部に適用している油ガススペーサ<sup>(2)(3)</sup>と同様のエポキシ注型絶縁物を適用した。さらに耐震性向上の



図1. 550kV GISへのポリマーガスブッシングの適用例<sup>(1)</sup>

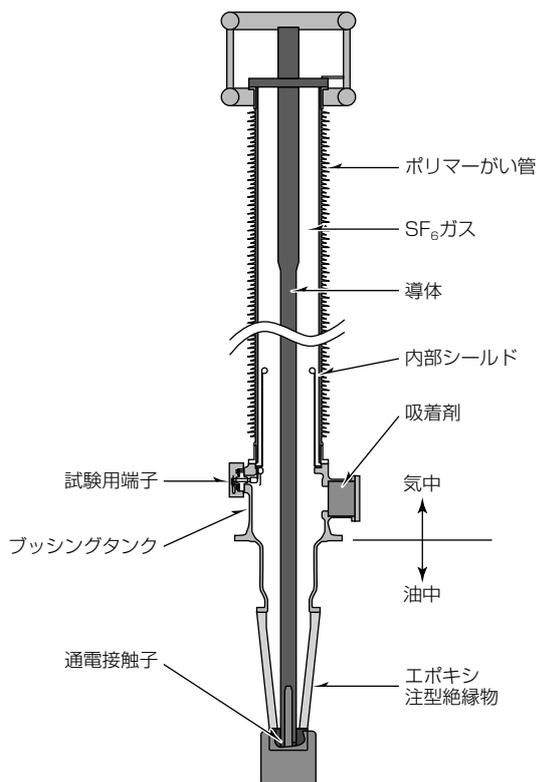


図2. 変圧器用ポリマーガスブッシングの構造

ため、内部をガス絶縁にして軽量化した。変圧器に取り付けられる油中部分の寸法構成は、JEC-5202-2007に記載の標準取合寸法に準拠しており、従来のコンデンサブッシングとの互換性を確保した。また、油とガスは区分されているため、将来ポリマーがい管の取替えなどが必要になった場合でも、変圧器の抜油を行うことなく、ブッシングのガス処理だけで組み替えることが可能である。図3に275kV変圧器への適用例を示す。

性能評価については、GIS/GCB用ポリマーガスブッシングと同様にJEC-5202に準拠した。また電協研第72巻第4号で形式試験項目に追加された試験についても実施し、性能を確認した。表1に形式試験項目を示す。なお追加された形式試験項目はJEC-5202の改定版にも反映される。

### 3. ポリマー形避雷器

ポリマー形避雷器は、1980年代から米国やヨーロッパなど海外で適用が始まった。ポリマー材料の進歩によって撥水性が持続するシリコンゴムが外被材として用いられると、磁器がい管を用いた磁器がい形避雷器に比べ、小形・軽量で耐震性や防爆性、耐汚損性に優れることから、配電系統用から発電所用避雷器へと普及してきた。近年では送電用避雷装置や鉄道車両用など多用途へ適用が拡大している。次に各用途での技術動向や適用例を示す。

#### 3.1 発電所用避雷器

ポリマー形避雷器の構造は、図4に示すポリマーがい管に放圧装置を備えるタイプ(デザインA)と、酸化亜鉛素子や支持絶縁物が直接シリコンゴム等のポリマー材料でモールドされて気相がないタイプ(デザインB)に大別される。国内では、2000年頃からデザインAが適用され、現在では、より小形・軽量化の効果が高く配置自由度が向上するデザインBが主流となり、275kV系統用まで広く実フィールドに適用されている。2011年3月11日の東日本大震災では、多くの被害を受けた磁器がい形避雷器と比較してポリマー形避雷器は単独での折損がなかったことが報告されている。

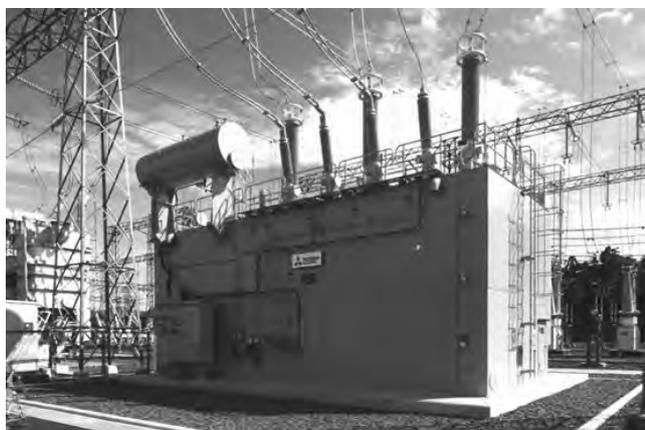


図3. 275kV変圧器へのポリマーガスブッシングの適用例

表1. ポリマーブッシングの形式試験項目

試験項目	準拠規格
外観検査, 寸法検査, 絶縁抵抗試験, 密封試験	JEC-5202-2007 (ブッシング)
商用周波耐電圧試験	
雷インパルス耐電圧試験	
開閉インパルス耐電圧試験	
部分放電試験	
温度上昇試験	電協研第72巻第4号
加熱試験	
可視コロナ試験	
人工汚損試験	
内部圧力試験, 曲げ試験	
耐震試験	

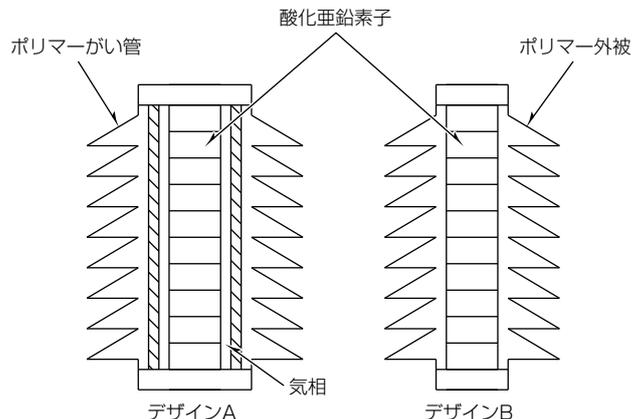


図4. ポリマー形避雷器の種類



(a) 154kV系統用



(b) 275kV系統用

図5. 変電所用ポリマー形避雷器

発電機用避雷器のIEC(International Electrotechnical Commission)規格(IEC 60099-4)では、2004年にポリマー形避雷器の試験法が規定された。この規格を参考にして国内でも2008年にJEC-TR-23002(ポリマー形避雷器)が発行され、活用されてきた。現在は、電協研第72巻第4号での検討結果や最新のIEC規格を基にポリマー形避雷器の規格化が進められており、2019年にJEC-2374(酸化亜鉛形避雷器)が改定される予定である。

当社では現在、3.3~500kV系統変電所用(図5)と、3.3~33kV発電機保護用をシリーズ化し<sup>(4)(5)</sup>、主に電力会社向けに多数納入している。

### 3.2 送電用避雷装置・直流き電回路用避雷器

送電線事故の約40%が雷に起因しており、これを抑制するための効果的な施策として、送電用避雷装置(Line Surge Arresters : LSA)が適用されている。LSAは、表2に示すように、気中ギャップと避雷要素部(素子を内蔵)からなるギャップ付送電用避雷装置(Externally Gapped Line Arresters : EGLA)とギャップなし送電用避雷装置(Non Gapped Line Arresters : NGLA)に大別される。

表2. 送電用避雷装置の種類と特長

	ギャップ付(EGLA)	ギャップなし(NGLA)
構成		
保護性能	がいし装置の耐電圧と、気中ギャップの放電特性/続流遮断性能の協調が必要。開閉サージでは動作しない。	変電所避雷器と同等性能で、開閉サージも抑制する。
サイズ	気中ギャップがあるため、避雷器要素部に系統電圧、開閉サージ、短時間過電圧がかからず、小形軽量化できる。	変電所避雷器と同等仕様になるため、大幅な小形化は難しい。
故障時の性能	気中ギャップがあるため再送電可能。	速やかな再送電のためには、切離し装置の設置が必要。

国内ではEGLAが一般的で、がいし装置に過電圧が加わると、最初に気中ギャップが放電し、がいし装置を保護する。気中ギャップと避雷要素部には、雷による放電電流が流れた後、系統電圧による電流(続流)が流れるが、酸化亜鉛素子の特性によって続流は非常に小さく(mAオーダー)絞られて半サイクル以内に気中ギャップで消弧されるため、変電所の遮断器動作はなく、系統の絶縁が回復する。常時は気中ギャップによって切り離されており、開閉サージや短時間過電圧に対して動作しないように設定されているため、避雷要素部を小形・軽量化でき、万一の避雷要素部の故障時も送電線の運転が継続できる特長がある。

一方、NGLAは、動作原理は変電所の避雷器と同じであり、開閉サージに対しても動作して抑制する。万一の故障時にも速やかに再送電ができるように、切離し装置を設けるのが一般的である。日本では、1980年代前半にNGLAの研究が行われたが、1980年代中頃から、万一の故障時の運転継続性と小形軽量化の点で優れているEGLAが主流となって急速に適用拡大しており、2009年時点で既に24万相以上が設置されている。2000年代初頭からは、架空地線の遮蔽効果から放電電流仕様が再検討されて酸化亜鉛素子の細径化が図られたことに加え、ポリマー外被や高抵抗素子の適用によって大幅に小形・軽量化した、コンパクト形EGLA(図6)が主流になっている。

当社では現在、66~187kV系統用のコンパクト形EGLAをシリーズ化し<sup>(6)</sup>、主に国内電力会社向けに多数納入している。

また、近年では変電所き電線引き出し口等に設置する地上設備用や電鉄車両用などのポリマー形を含めた直流き電回路用避雷器がIEC規格化(IEC 62848-1)されるなど、多用途への適用が拡大している。当社でも、600~1,500V直流き電回路用(図7)をシリーズ化し<sup>(7)</sup>、主に鉄道事業者向けに多数納入している。

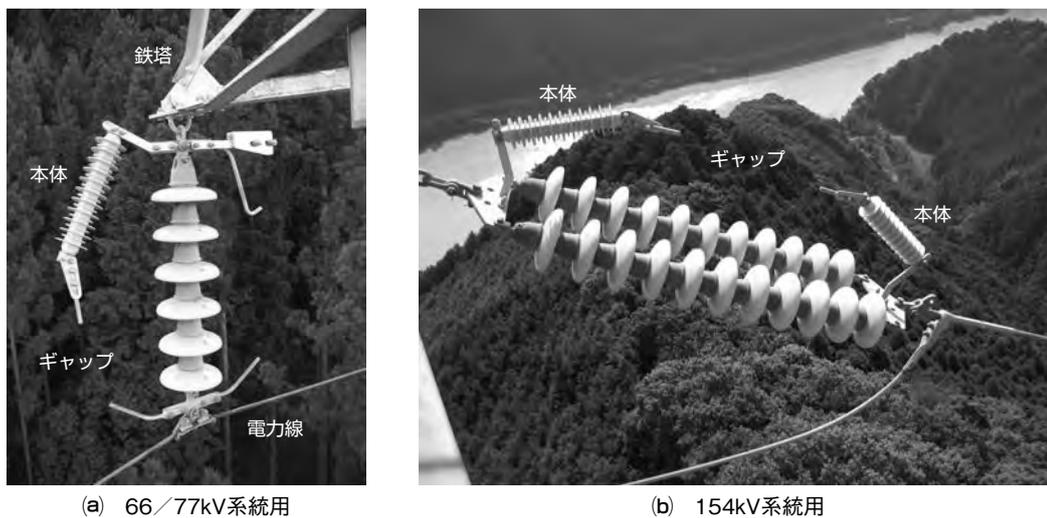


図6. コンパクト形EGLA



図7. 直流き電回路用ポリマー形避雷器

#### 4. む す び

ポリマーは磁器に比べて軽量かつコンパクトなため、耐震性・施工性が向上すること、防爆性に優れていること、また、外被ゴムが持つ撥水性によって優れた耐汚損性能を持っているため信頼性が向上するなどの適用メリットによって、国内外で適用が拡大している。当社ではポリマー適用に加え、最新の要素技術を取り入れることによって、保守省力化や環境負荷低減にも寄与するポリマーブッシングとポリマー形避雷器のシリーズ開発を推進しており、ポ

リマー機器の適用を拡大していくことによって、電力系統の信頼性向上に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 中内慎一郎, ほか: 大容量550kV縮小形GISの開発, 平成27年電気学会電力・エネルギー部門大会, 291 (2015)
- (2) 木佐貫 治, ほか: 500kV及び275(220)kV油-ガススペーサの開発, 平成25年電気学会電力・エネルギー部門高電圧研究会, HV-13-072, 13~18 (2013)
- (3) 木佐貫 治, ほか: 変圧器用ポリマーガスブッシングの開発, 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会, 330 (2016)
- (4) 楫野宏樹, ほか: 酸化亜鉛形避雷器の技術動向, 平成29年電気学会電力・エネルギー部門高電圧研究会, HV-17-046, 143~148 (2017)
- (5) 500kV系統用ポリマー形避雷器, 三菱電機技報, 91, No.1, 11 (2017)
- (6) Yamaguchi, M., et al.: Design Features and Performance of Transmission Line Arresters with Series Gap, ICEE (2008)
- (7) 齋藤弘樹, ほか: 鉄道車両用ポリマー形直流避雷器の開発, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会, 309 (2011)

# 高生分解性を持つ植物基材の絶縁油を使用した変圧器

西村亮岐\* 近藤大輔\*  
西村 豪\*  
中山孝一\*

*Transformer Using Vegetable - oil - based Dielectric Fluid Having High Biodegradable*

*Ryoki Nishimura, Takeshi Nishimura, Koichi Nakayama, Daisuke Kondo*

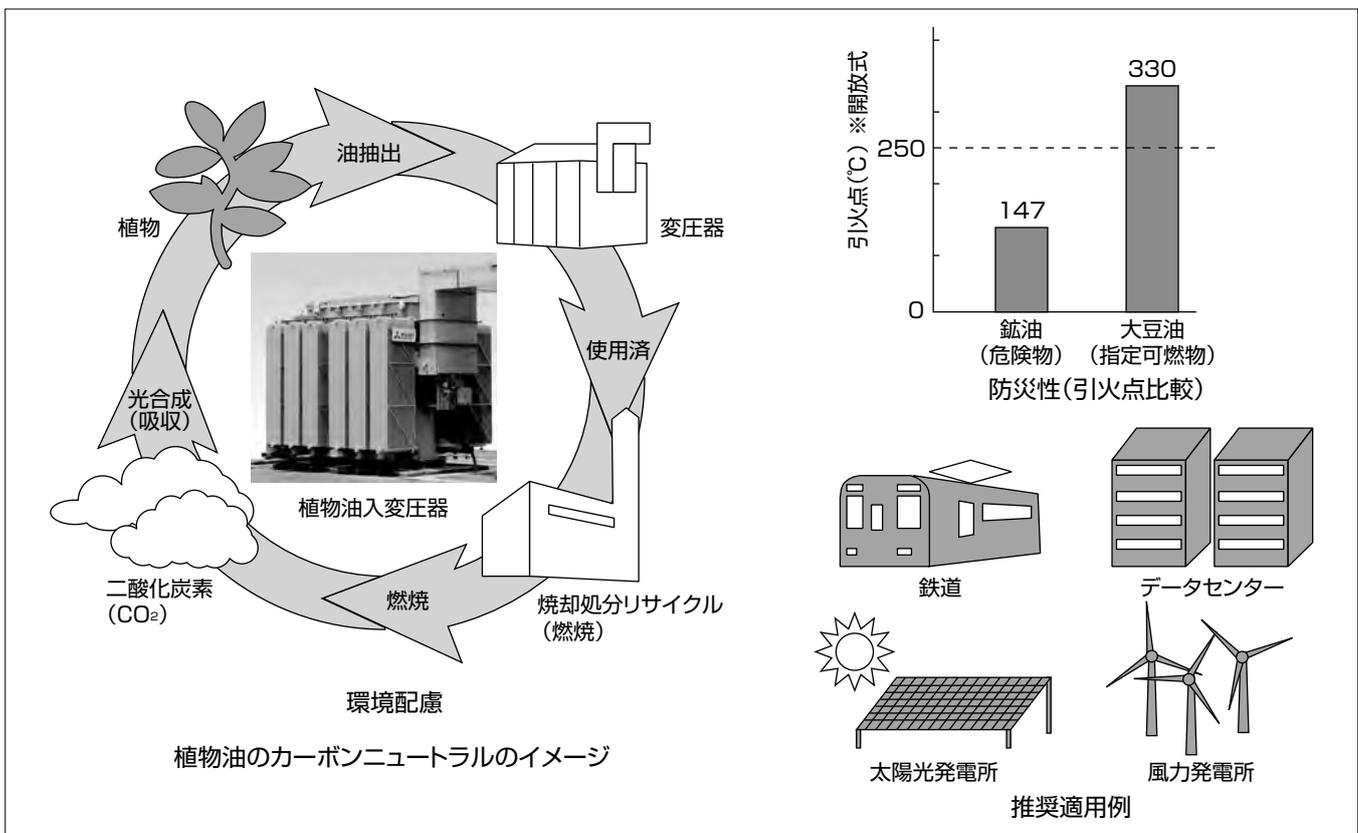
## 要 旨

電力用変圧器は、電力会社の変電所、工場、ビル、鉄道用変電所など様々な場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。従来、変圧器内部の絶縁油としては主に石油由来の鉱油が使用されているが、近年、環境配慮及び防災性の観点から、植物を基材とした絶縁油(以下“植物油”という。)を変圧器に使用する動きが進んでいる。特に海外では、植物油を使用した変圧器(以下“植物油入変圧器”という。)の納入台数が100万台を超えており、今後更なる増加が見込まれる。

三菱電機では、大豆を基材とした絶縁油(以下“大豆油”という。)を使用した変圧器を2017年5月に市場投入して以来、環境配慮及び防災性といった市場ニーズに対応している。

一方、開発当初は、鉱油に比べ粘度の高い大豆油では、冷却性能が低下し、変圧器が大型化することが懸念された。当社では、大豆油の使用に合わせて、絶縁、冷却設計を見直すことで、変圧器据付面積を従来の鉱油入変圧器と同等とすることに成功した。製造面でも、大豆油専用の注油設備を整備するなど、増産に向けた体制を整えている。なお、変圧器の輸送方法は全装輸送だけでなく、変圧器容量が大きい場合や輸送制限がある場合には、変圧器の解体輸送も可能である。

今後も更に幅広いニーズに応えるため、長期信頼性検証など、環境負荷低減と安定した電力供給を両立させる植物油入変圧器の開発に取り組んでいく。



## 三菱植物油入変圧器の特長

2017年に当社は変圧器の絶縁油に植物油を使用した“植物油入変圧器”の市場投入を開始した。当社の植物油入変圧器は、絶縁油がライフサイクル全体としてカーボンニュートラルの特長を持っており、持続可能な社会実現に貢献している。また、絶縁油の高い引火点の特長から、変圧器の火災発生リスク低減が期待でき、環境配慮及び防災性の観点から、様々な用途での導入が進んでいる。

### 1. ま え が き

電力用変圧器は、電圧を変換する機能を持つ機器で、発電所から需要家までの電力系統に設置されており、送電効率の向上や地絡事故電流の抑制など、電力流通で重要な役割を担っている。

従来の電力用変圧器では、変圧器内部の絶縁油として主に石油由来の鉱油を使用しているが、石油は将来的に枯渇することが懸念されている。これに対し、持続可能な材料を使用するという観点、さらには高い防災性の観点から、植物油を変圧器に使用する動きが国内外で進んでいる(図1)<sup>(1)</sup>。

当社でも、植物油を使用した変圧器の開発を2016年に完了し、植物油入変圧器をラインアップ化した。

本稿では、三菱植物油入変圧器の特長を含め、開発の経緯について述べる。

### 2. 三菱植物油入変圧器の特長

#### 2.1 環境配慮

三菱植物油入変圧器では、大豆油を使用している。大豆油はライフサイクル全体でのカーボンニュートラル(図2)の特長を持っており、持続可能な材料として、地球環境保全に貢献する。また、大豆油の生分解度は鉱油に比べ約4倍であり、万が一土壌に漏えいした場合でも、微生物によって速やかに分解される(図3(a))。

#### 2.2 防災性

三菱植物油入変圧器は、使用する大豆油が高い引火点を持っており、鉱油に比べ、変圧器の火災リスク低減を期待できる。鉱油と大豆油の引火点の比較を図3(b)に示す。消防法でも、鉱油が危険物に分類されるのに対し、大豆油は指定可燃物に分類されるため、油保管条件の緩和、設備工事の申請を簡略化できる場合がある。また、一部海外の保険会社では、大豆油を使用した変圧器を導入した施設では、火災リスクが低いことから、施設の保険料率が下がるといった事例もある。

### 3. 三菱植物油入変圧器の技術開発

#### 3.1 絶縁・冷却設計手法構築

変圧器に用いる絶縁油は、内部の電氣的な絶縁に加えて、コイルや電磁鋼板といった発熱体を冷却する役割を担っている。鉱油と大豆油は、絶縁・冷却の特性が大きく異なっていることから、植物油入変圧器を開発する中で、各特性を明確化して設計手法を確立する必要があった。

絶縁設計基準を決定する上で、当社では変圧器内部を模擬した様々なモデル試験を実施し、電界解析との突き合わせを行うことで各部位の設計電界を一つ一つ精査した(図4)。これによって、各部位に応じた大豆油用の絶縁設計基準を

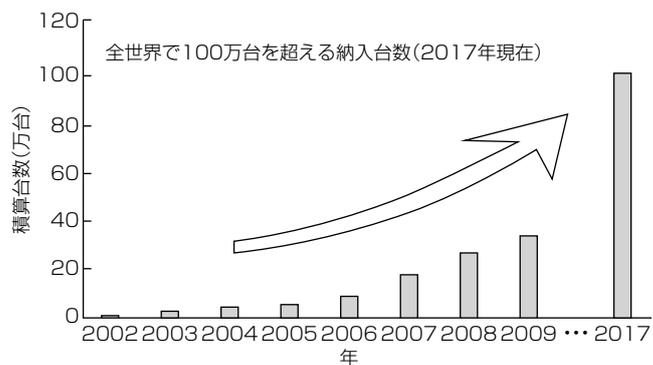


図1. 植物油入変圧器の納入積算台数<sup>(1)</sup>

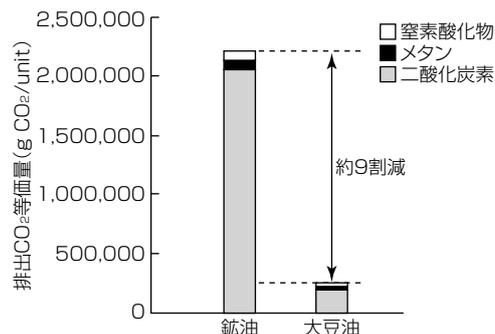
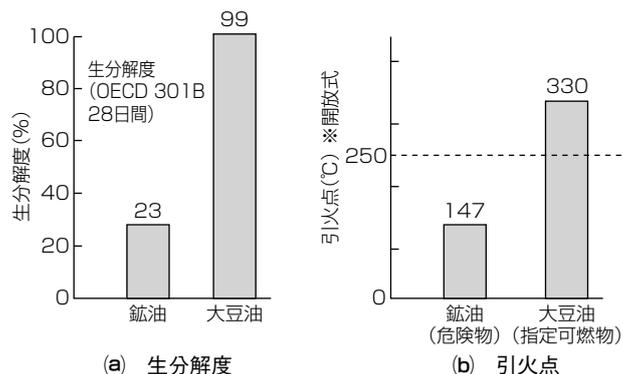


図2. ライフサイクルでの排出CO<sub>2</sub>等価量



OECD 301B：試験ガイドライン

図3. 鉱油と大豆油の特性比較

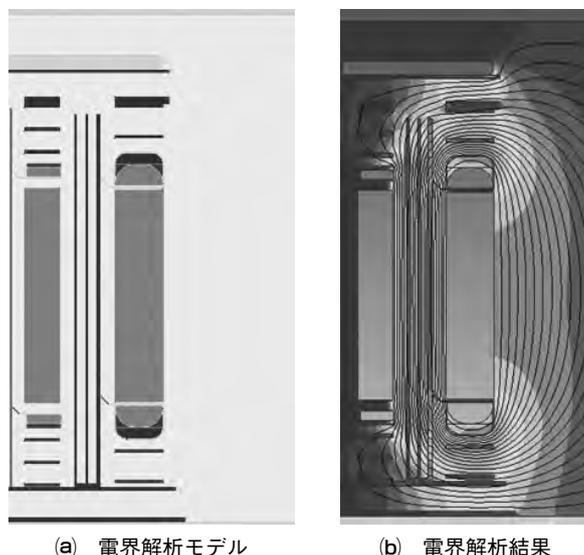


図4. 電界解析例

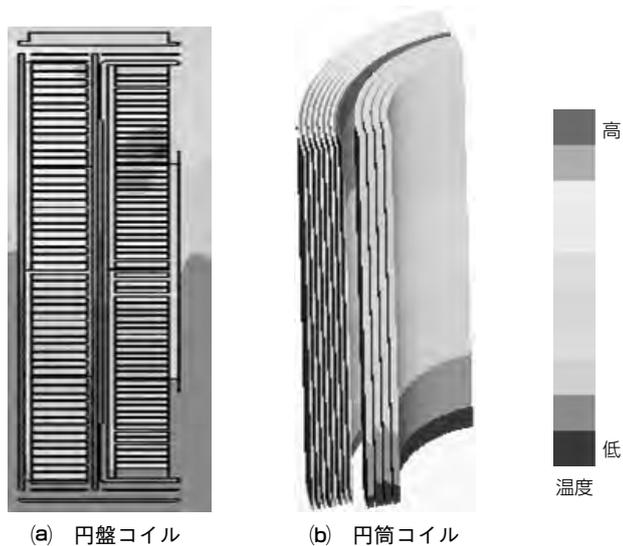


図5. 熱流体解析例

決定した。また、一般に、絶縁油中の水分量と絶縁強度の間には相関があり、水分量が多くなると絶縁強度は低下する。特に大豆油では鉱油に比べ、油中に水分を吸収しやすい特性を持つ。当社では、植物油入変圧器製造時に、適切な乾燥工程を実施することで、油中水分量をコントロールし、絶縁信頼性を確保している。

また、大豆油を用いた際の冷却設計手法を検討する必要があった。当社では、熱流体解析(図5)を活用することによって、変圧器内部での油の流れを詳細にモデル化し、油の流れを適正化することで、従来の鉱油入変圧器に比べて冷却特性の10%改善を達成した。

これらを踏まえて、絶縁・冷却設計手法を構築し、植物油入変圧器の設計基準を確立し、据付面積を従来の鉱油入変圧器と同等にすることに成功した。

### 3.2 長期信頼性検証

電力用変圧器は数十年にわたって運用され続ける。この間に外部機器の定期点検や、変圧器内部の絶縁油を採取し、油中ガス分析による変圧器の異常診断が実施されている。一方で、変圧器内部の詳細な点検を実施することはほとんどなく、事前に長期信頼性の検証が重要である。

当社では植物油入変圧器の構成材料である、大豆油、絶縁紙、パッキン、銅、電磁鋼板等の共存状態で、変圧器運用を模擬した加速試験を実施することで、長期劣化特性を調査し、長期運用に対する健全性を確認している。

また、先に述べた油中ガス分析技術に関しても、鉱油入変圧器に関しては世界的に実績が豊富であるが、植物油入変圧器については知見が少ない。当社ではこの点に対し、植物油入変圧器の異常時での発生ガスパターンを調査して植



図6. 植物油入変圧器の初号器  
(3相 60Hz 20MVA 77kV/6.6kV)

物油入変圧器の異常診断技術確立に取り組んでおり、電力の安定供給に対し、より一層の信頼性向上を図っている<sup>(2)</sup>(今特集号の論文“油入変圧器の異常診断技術の高度化”参照)。

## 4. 三菱植物油入変圧器の展開

### 4.1 納入実績と今後の取組み

上記の検証試験を2016年までに完了し、植物油入変圧器の初号器を2017年5月に納入した(図6)。また、環境配慮の点で評価を受け、鉄道会社を始め、公共施設などへの継続的な納入を計画している。

当社では、植物油入変圧器の製造に特化した生産設備の導入も完了しており、今後見込まれる需要拡大に対応している。

## 5. む す び

環境に対する配慮が各所で求められている昨今、電力用変圧器でも持続可能な植物油を使用した植物油入変圧器の特長について述べた。ユーザーからの需要も増えてきており、今後もより広い領域で、環境負荷低減と安定した電力供給を両立させる植物油入変圧器開発に取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) CIGRE A2-35 : Experiences in Service with New Insulating Liquids, Final Report, Brochure 436 (2010)
- (2) Kuriyama, R., et al. : Investigation of Indicator Gas for Internal Fault on Ester Oil-immersed Transformer, International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance 2017, #123 (2017)

# 鉄道車両用走行風利用自冷式主変圧器

速水賜基\* 新庄孝基\*  
小林伸匡\*  
野田敏広\*

## Natural Air Cooling for Traction Transformer

Shiki Hayamizu, Nobumasa Kobayashi, Toshihiro Noda, Koki Shinjo

### 要 旨<sup>(1)</sup>

交流電車に搭載される主変圧器を冷却する手段としては、従来電動送風機を用いた強制風冷式が主流であったが、近年では走行時の自然風を利用して電動送風機を不要とした走行風利用自冷式が主流となっている。三菱電機も、従来の強制風冷式とは異なる特質を持った走行風利用自冷式の鉄道車両用主変圧器及び冷却器を開発・提供している。

自冷式主変圧器の特長は次のとおりである。

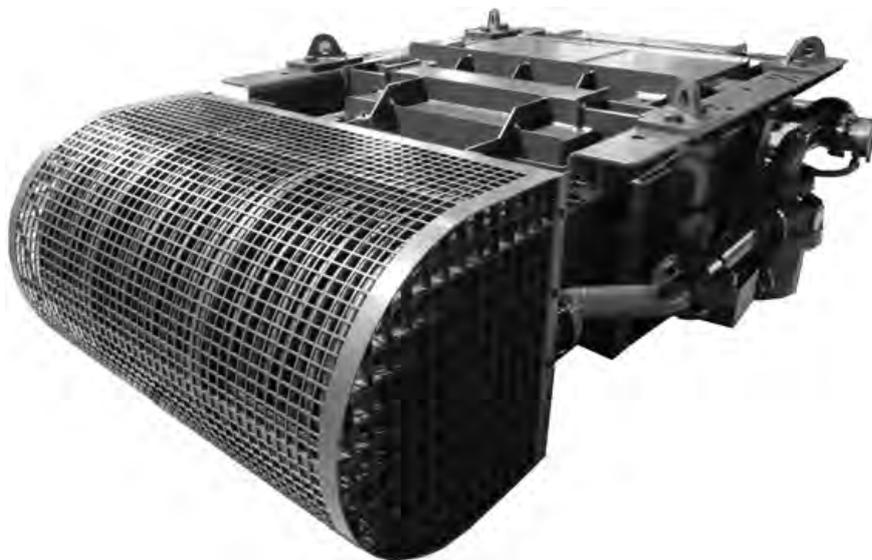
- (1) 省エネルギー(電動送風機の運転電力不要)
- (2) 省メンテナンス(電動送風機のメンテナンス、及び冷却器の清掃作業不要)
- (3) 低騒音化(電動送風機の運転騒音なし)

冷却設計としては次の留意点がある。

- (1) 車両走行速度と冷却風速との関係
- (2) 冷却性能と主変圧器容量の算定
- (3) 主変圧器の配置
- (4) 冷却器の保護

国内では在来線向けとして広く用いられているが、海外でも、環境に対する関心の高まりから、自冷式主変圧器の特長が顧客のニーズとマッチし、高く評価されている。アジアではインド向けで、欧州ではフランス向けで適用するなど、規模の拡大を図っている。

走行風利用自冷式の冷却器の海外展開では国内とは異なる環境に配慮する必要があり、現地の環境条件を分析・検討をすることで、最適な機種として進化している。



インドデリー地下鉄RS13向け自冷式主変圧器

### 鉄道車両用走行風利用自冷式主変圧器

鉄道車両用走行風利用自冷式主変圧器は省エネルギー、省メンテナンス、低騒音化を実現するだけでなく、欧州のEN45545(Railway applications-Fire protection on railway vehicles)、EN15085(Welding of Railway Vehicle and Components)といった規格に準拠した機種となっている。また、鉄道車両用主変圧器としてIRIS(International Railway Industry Standard)の認証を取得している。

## 1. ま え が き

近年の在来線車両で、交流電車で搭載される主変圧器は、走行時の自然風を利用して電動送風機を不要とした走行風利用自冷式が主流となっているが、従来の強制風冷式とは異なる特質があり、設計時によく検討する必要がある。

本稿では、“省エネルギー、省メンテナンス、低騒音化”に貢献している自冷式主変圧器及び国内・海外への展開・適用について述べる。

## 2. 走行風利用自冷式

### 2.1 鉄道車両用主変圧器の冷却

主変圧器は、架線から受電した電力を全ての車両搭載機器に給電する重要機器であり、車両を駆動するための主回路と空調装置などを運転するための補助回路に電力を供給する。

通常、主変圧器では、電動送風機を用いて強制的に冷却器に風を取り込み、冷却する。一方、自冷式主変圧器では、車両走行によって生じる走行風を冷却器に取り込むことによって、主変圧器を冷却している。そのため、電動送風機が不要となっている。

図1に自冷式主変圧器のイメージを、図2に外観を示す。

### 2.2 自冷式主変圧器の特長

自冷式主変圧器には、電動送風機を不要としていることで、次の特長がある。

- (1) 省エネルギー(電動送風機の運転電力不要)
- (2) 省メンテナンス(電動送風機のメンテナンス、及び冷却器の清掃作業不要)
- (3) 低騒音化(電動送風機の運転騒音なし)

### 2.3 冷却設計の留意点

自冷式主変圧器は冷却設計上、次のことを考慮している。

#### 2.3.1 車両走行速度と冷却風速との関係

走行風利用自冷式冷却での特質は、走行速度によって走行風の風速が変わり、冷却性能が常時変化することである。過去の試験から得られた走行速度と冷却風速との関係を基に冷却設計を行っている。

#### 2.3.2 冷却性能と主変圧器容量の算定

走行速度の関数で冷却性能が変化することを考慮して、所定の走行線区及び走行パターンについて温度シミュレーションを実施し、定格容量を設定する。

#### 2.3.3 主変圧器の配置

自冷式主変圧器は、図1のように冷却器を極力車体の側面に配置し、冷却器へ走行風を取り入れやすいように、前後の機器との間に適当な間隔を確保する必要がある。

車両の床下が完全にカバーで覆われる車両では、走行風取り入れのために、冷却器を側面カバーの外に出す構成が必要となる。このとき、冷却器前後のカバーをスロープ形状

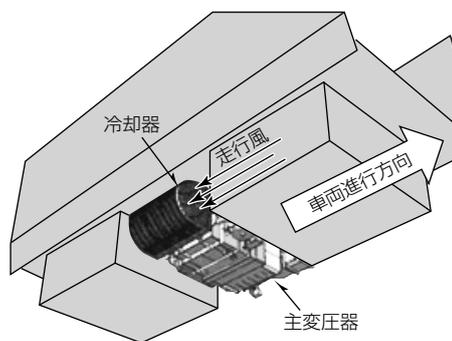


図1. 自冷式主変圧器のイメージ



図2. 東日本旅客鉄道(株)E657の系特急形交直流電車用自冷式主変圧器

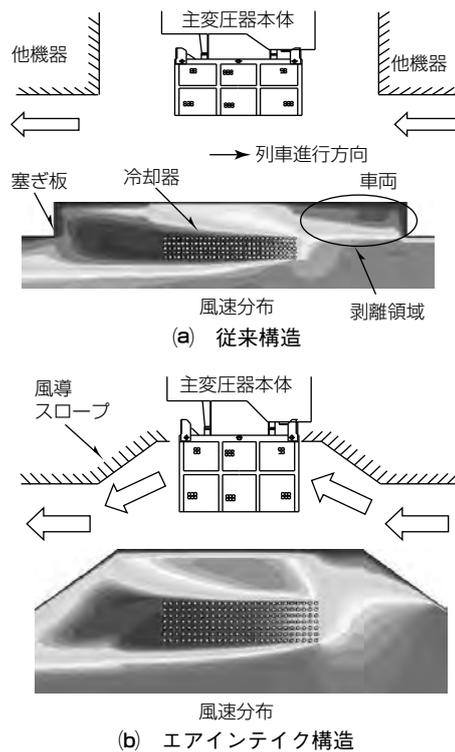


図3. 冷却風の解析例

とすることによって、より多くの走行風を冷却器へ取り入れる工夫が施されたエアインテイク構造(特許第3373446号)を採用している。図3に冷却風の解析例を示す。

#### 2.3.4 冷却器の保護

2.3.3項のように走行風利用自冷式冷却は、走行風を取り入れるために車両側面に寄せる必要がある一方で、飛石などの飛来物に配慮する必要がある。

### 3. 国内での実績

2. 2節の特長を持つ自冷式主変圧器は、その特長が評価され、国内在来線向けに広く適用されている。1980年の初適用から、2018年2月現在までで945台の自冷式主変圧器を納入している(図2、図4)。

35年以上の実績を持つが、これまで走行風利用自冷式冷却に起因した不具合は起きておらず、信頼性の高い機器と評価されている。また、保守面に関しても清掃作業不要であることを実証できている。

### 4. アジアへの展開・適用

アジアへの展開として、鉄道需要の高いインド市場への提案を試みた。インドでは、大気汚染問題が深刻であり、排気ガス削減などの省エネルギー意識や環境への意識が高まっている。特に近年では、単なる鉄道の整備だけでなく、鉄道車両としての省エネルギーも求められるようになってきている。

また、運用環境は塵埃(じんあい)や羽、油分を含んだゴミなどが多く、通常の強制風冷式では清掃保守に多くの費用がかかっている。このような背景の中、走行風利用自冷式はそれらの問題を解決するために適した技術であるにもかかわらず、インド市場では、走行風利用自冷式の技術は認知度が低かった。そのため、顧客に走行風利用自冷式の技術、実績、既存機種に対する消費電力量の差、騒音低減率などを提案して2016年からデリー地下鉄を走行する車両に適用された(図5)。

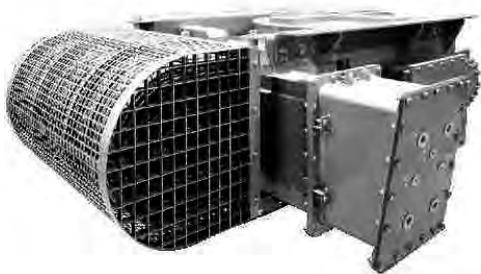


図4. 西日本旅客鉄道(株)の683系特急電車(サンダーバード)用自冷式主変圧器

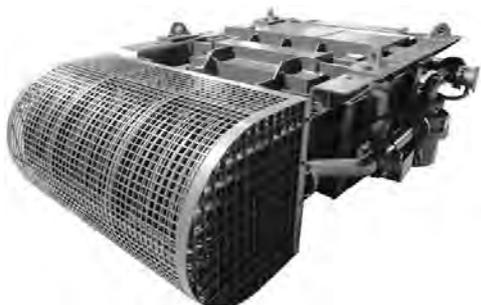


図5. インドデリー地下鉄RS13向け自冷式主変圧器

1年運用後に現車で温度上昇試験、及び状態確認を実施した。現車で油温度測定結果及びシミュレーション結果の比較を図6に示す。油温度は許容値(100℃)内であり、シミュレーション結果と同等であることから、設計の妥当性も評価できた(図7)。

また、走行風利用自冷式冷却器の状態確認を実施した結果を図8に示す。走行風利用自冷式冷却器の状態は国内と同様に塵埃や羽、油分を含んだゴミの付着などなく良好な状態が保たれていることを確認でき、インドのような過酷な状況下でも、走行風自冷式冷却器が問題なく適用できることを実証できた。

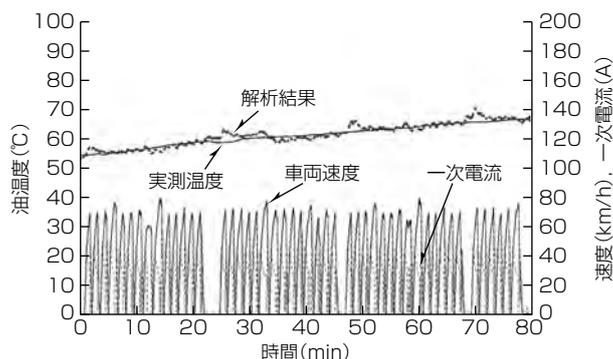


図6. 油温度測定結果とシミュレーション結果

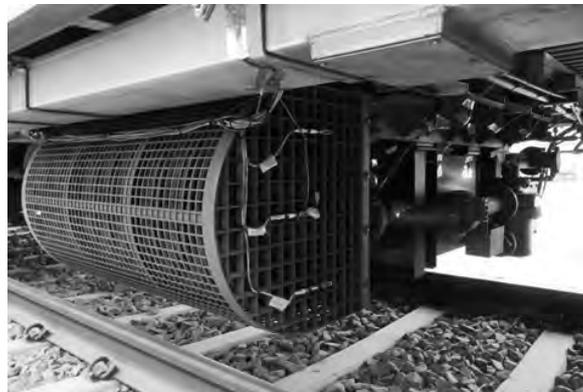


図7. 現車走行試験での油温度測定



図8. インドデリー地下鉄RS13向け1年走行後の冷却器の状況

## 5. 欧州への展開・適用

### 5.1 屋根上走行風利用自冷式冷却器

海外へのもう一つの展開として、欧州市場への提案を進めた。欧州の環境は国内と同等と予想されるが、主変圧器の設置場所が異なる。国内では主変圧器は車両の床下に設置されるのが一般的であるが、欧州では駅のプラットフォームが低く、バリアフリーの観点から低床車両が適用され、主変圧器などの電機品は屋根上に設置される。したがって、走行風利用自冷式冷却器の冷却器も屋根上に設置されることになる。

走行風利用自冷式冷却器の冷却器の設置場所が閉塞された車両の床下から、開放された車両の屋根上に変更されることによって、走行風をより多く取り込むことが可能であると考えられるが、屋根上設置の実績がなく、車両速度と走行風の関係が不明な状況であった。そこで、車両状態を模擬した流体解析を実施し、屋根上の走行風の状態を確認した。

解析結果の例を図9に示す。解析結果から床下よりも多くの走行風が得られるが、風の流れ方も異なることが分かった。屋根上に適した自冷式冷却器を設計し、屋根上設置に適した軽量の屋根上走行風利用自冷式主変圧器を開発した。

### 5.2 フランス国鉄への参入

フランス国鉄は、TGV(高速車両)や通勤用車両として新造車を調達する一方で、環境に配慮して資源を有効活用するため、老朽化した車両の車体はそのまま流用して電機品だけをリニューアルする更新工事にも積極的に取り組んでいる。その中で、T4型路面電車(図10)では省エネルギー化、低騒音化、ライフサイクルコストの低減が求められていた。

当社が開発した屋根上設置型の自冷式主変圧器は、フランス国鉄の訴求ポイントにマッチし、これまで培ってきた当社車両用主変圧器の技術が高く評価されて採用に至った。フランス国鉄に対しては日本メーカーとして初めての参入となる。表1にT4型路面電車の既設器と当社の自冷式主変圧器の比較を示す。

更新工事となるため、既設器からの優位性を保ちながら、車両とのインタフェースを完全に合わせる必要がある。また、屋根上自冷式主変圧器であるが、車両側の条件、他機器との位置関係なども変更できないため、周囲の走行風の条件について、慎重に検討を重ね、設計・製造を進めている。

今後、実際の車両で約1年間の走行試験が行われた後、量産での仕様が決定される予定となっており、屋根上自冷

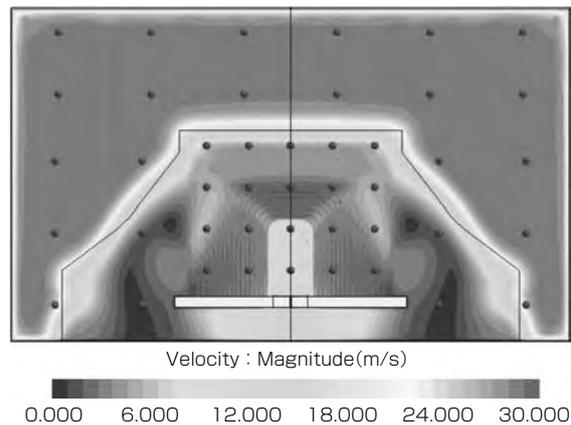


図9. 屋根上走行風利用自冷式冷却器の解析例



図10. T4型路面電車

表1. T4型路面電車の既設器と当社自冷式主変圧器の比較 (同一容量, インピーダンス, 質量での比較)

項目	既設器	当社器
サイズ(車長方向寸法)	2,493mm	2,125mm
信頼性	1回/5年の頻度で故障	30年ほぼ故障なし
騒音レベル	80dB(A)	67dB(A)
メンテナンス	<ul style="list-style-type: none"> <li>部品メンテナンス</li> <li>ブロワーモータのベアリング交換</li> <li>冷却器の清掃など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ベアリング交換不要</li> <li>冷却器清掃不要</li> </ul>
損失(効率)@定格	27.3kW(96.2%)	14kW(98.0%)

式主変圧器として初適用である本車両で、屋根上走行風の状況を把握し、量産時の設計にフィードバックしていく。

## 6. むすび

近年の環境意識の高まりによって、鉄道は環境負荷の少ない移動・輸送手段として重要度がますます高くなってきており、自冷式主変圧器は顧客から高い評価を得ている。今後も、環境負荷の少ない自冷式主変圧器の適用拡大に向けて取り組み、社会貢献していく。

## 参考文献

- (1) 三菱電機株：走行風利用自冷式車両用主変圧器，電気評論，101，No.3，74 (2016)

# IEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステム

鍋野恭宏\* 西澤 研\*\*  
久村大作\* 上楽康智\*\*  
島田洋輔\*

Transmission Line Protection Relay System Based on IEEE C37.94 Communication Standard

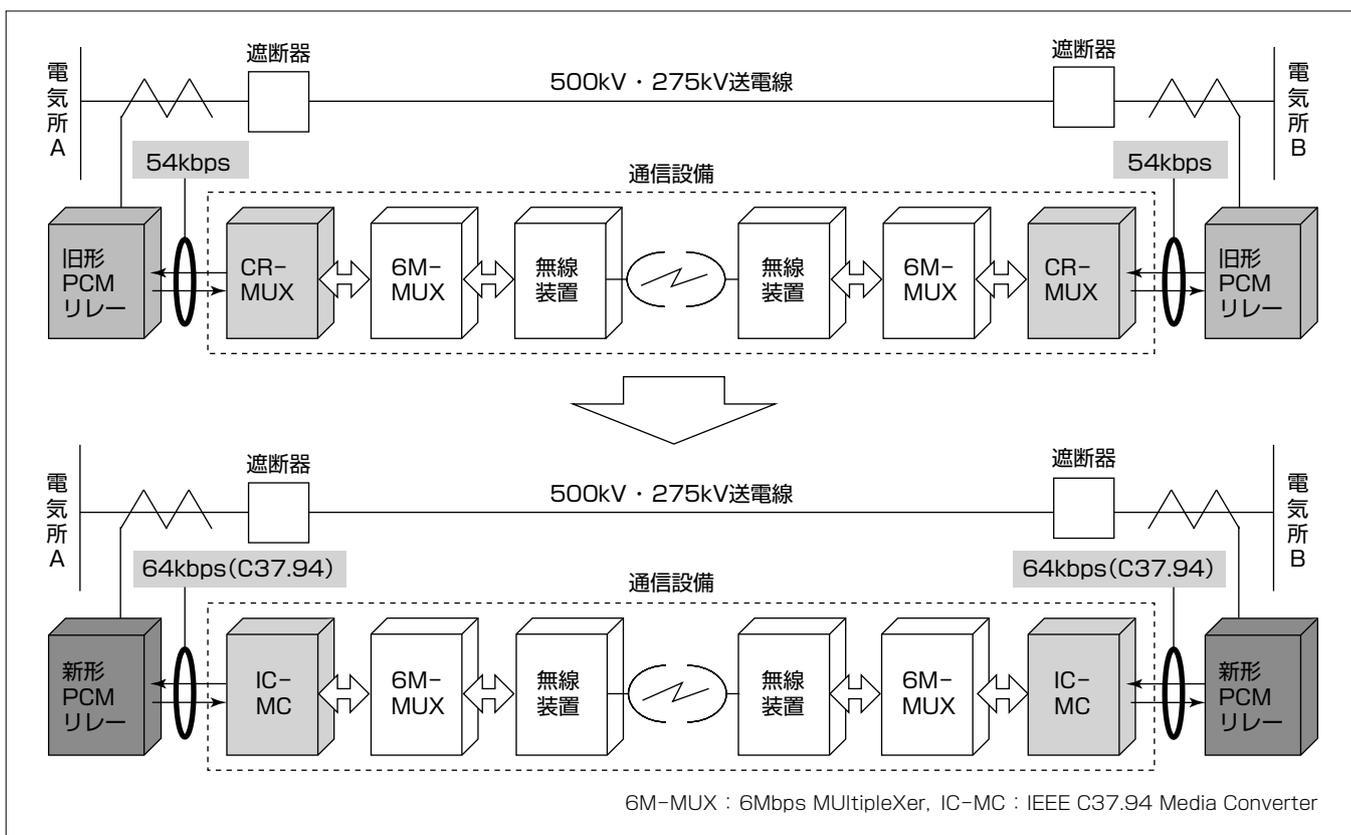
Yasuhiro Nabeno, Daisaku Kumura, Yosuke Shimada, Ken Nishizawa, Yasutomo Johraku

## 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おり、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至る。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にある。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、電力設備コストの削減が一層求められている。電気所間通信を利用した送電線保護リレーシステムでは、国内保護リレー専用規格の通信装置(CR-MUX: Carrier Reley MUltipleXer equipment)が適用されているため、電力設備コストの低減には、この通信装置の低コスト化が課題である。

現在、国内電力会社の基幹系PCMリレーでは国内専用の通信方式(伝送速度54kbps)が広く用いられているが、東京電力パワーグリッド(株)では、2015年度から500kV、275kV PCMリレーに、国際標準の保護リレー通信方式として普及している国際通信規格IEEE C37.94を適用している。この規格を採用することによって、通信装置の低コスト化が可能となる。

なお、今回開発したIEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステムは、三菱電機の国内電力会社向け保護リレー装置MELPRO-CHARGE2シリーズ<sup>(1)</sup>を適用して製作しており、東京電力パワーグリッド(株)に2017年4月に納入し、稼働中である。



## IEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステムの構成

国内保護リレー専用規格の通信装置(CR-MUX)から国際規格IEEE C37.94の通信装置(IC-MC)に置き替え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、各電気所に設置されたPCMリレーは通信装置(IC-MC、6M-MUX、無線装置)に接続され通信を行う。

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にある。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、電力設備コストの一層の削減が求められている。電気所間通信を利用した送電線保護リレーシステムでは、保護リレー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。

現在、国内電力会社の基幹系PCMリレーシステムでは国内専用の通信方式(伝送速度54kbps)が広く用いられているが、国際標準の保護リレー通信方式として普及している国際通信規格IEEE C37.94を適用することによって、通信装置の低コスト化が可能になる。そこで、国際規格であるIEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステムを開発して実用化した。

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

図1に、従来のPCMリレーのシステムの構成を示す。従来システムでは、PCMリレーと通信装置間の通信に、国内専用の通信規格(伝送速度54kbps)を適用している。PCMリレーは、リレー室に設置され、通信装置(CR-MUX, 6M-MUX, 無線装置)は通信機械室に設置される。PCMリレーとCR-MUX間の通信には、ノイズの影響を受けないように光通信を行う。CR-MUXはリレーからのデータ(伝送速度54kbps)を1.5Mbpsに変換する機能を持つ。なお、CR-MUXと6M-MUX間及び、6M-MUXと無線装置間は、同通信機械室内に設置されるため電気信号で接続される。従来システムでは、伝送速度に54kbpsを採用することによって、サンプリング同期誤差が生じにくいシステム構成が可能である。

IEEE C37.94を適用したPCMリレーのシステムの構成を図2に示す。今回システムでは、PCMリレーと通信装置(IC-MC)間の通信に、IEEE C37.94を適用する。従来システムと同様に、PCMリレーは、リレー室に設置され、通信装置(IC-MC, 6M-MUX, 無線装置)は通信機械室に設置される。PCMリレーとIC-MC間の通信には、ノイズの影響を受けないように光通信を行う。IC-MCはリレーからのデータ(伝送速度2M(64k) bps)を1.5Mbpsに変換する機能を持つ。なお、IC-MCと6M-MUX間及び、6M-MUXと無線装置間は、同通信機械室内に設置されるため電気信号で接続される。

今回システムでは、伝送速度に64kbpsを採用するために、従来システムと比較し、サンプリング同期誤差の拡大

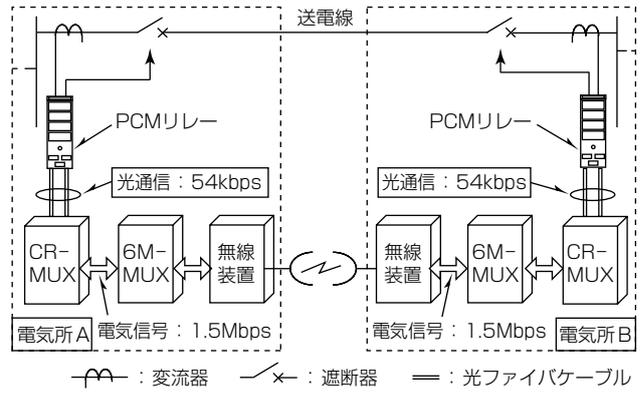


図1. 従来の送電線保護リレーシステムの構成

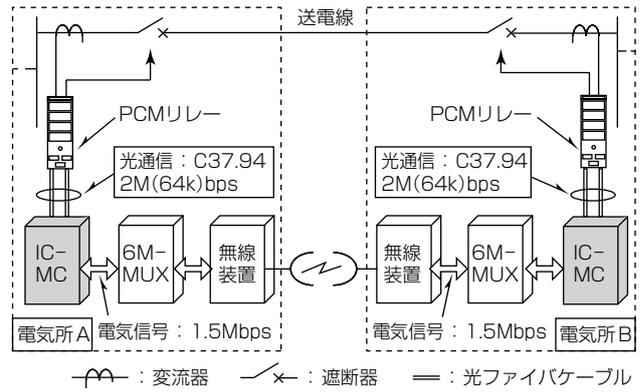


図2. IEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステムの構成

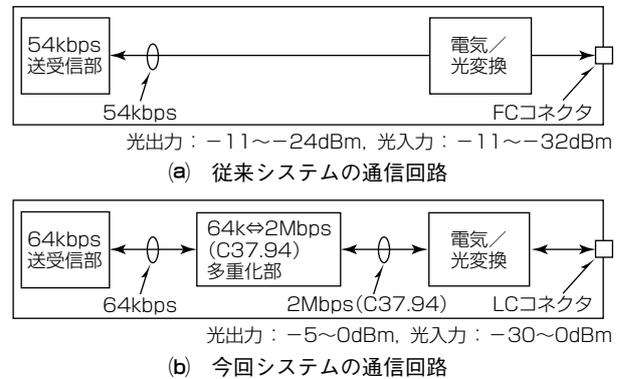


図3. PCMリレー通信回路の比較

が懸念される。

図3に、従来システムの通信回路及び今回システムのPCMリレーの通信回路の比較を示す。従来システムの送受信部は、54kbpsを採用している<sup>(2)</sup>。一方、今回システムでは、送受信部は、一般的な64kbpsを採用しており、さらに、IEEE C37.94に準拠した2Mbpsへの多重化部を備えている。

2.2 国際通信規格IEEE C37.94

2.2.1 伝送フォーマット

従来システムの54kbpsの伝送フォーマットを図4に、IEEE C37.94の2Mbps, 64kbpsの伝送フォーマットを図5, 図6に示す。

IEEE C37.94の2 Mbpsのフォーマットは、“フレームヘッダ”“オーバヘッドデータ”“チャンネルデータ”で構成される。チャンネルデータは、D1~D96及びその反転データで構成され、PCMリレーの64kbpsデータを、D1~D8 (TS1の8 bit)で時分割多重化して授受する。従来システム

で用いる54kbpsフォーマットでは、1フレーム当たりのビット数が固定(90bit)であるのに対して、64kbpsフォーマットでは、1フレーム当たりのビット数が可変(106bit又は107bit)になる。このため、64kbpsフォーマットでは、1フレームのビット数は、先頭のフレーム同期部分によって変更し、フレームの

長さによって変更し、フレームの長さが106bitの場合には、フレーム同期ビット数を17bitとし、フレームの長さが107bitの場合には、フレーム同期ビット数を18bitとする。

2.2.2 2 Mbpsの通信方式

IEEE C37.94では、従来の54kbpsと異なり、64kbpsのデータを2Mbpsに時分割多重してデータを授受する。

さらに、IEEE C37.94の2 Mbpsでは、通信システム内のデータをビット単位で同期する規定がある。このため、システム内のいずれかの通信装置を、2M同期マスタとし、他の通信装置及びリレーは、2M同期マスタからの受信信号にビット単位で同期して送信する必要がある(図7)。なお、IEEE C37.94の伝送クロックの規定では、周波数精度(±100ppm)、ジッタ性能(±0.1UIの信号が受信可能でかつ、±0.2UI以内で送信)が規定されている。

2.2.3 その他機能

IEEE C37.94では、“YELLOW ALARM BIT”機能があり、伝送不良区間の判別が可能である。図8に、PCMリレーとIC-MC間で、伝送不良が発生した場合の例を示す。

伝送不良が発生すると、伝送不良を検出したPCMリレーはIC-MCに、“YELLOW ALARM BIT”を送信する。IC-MCでは、

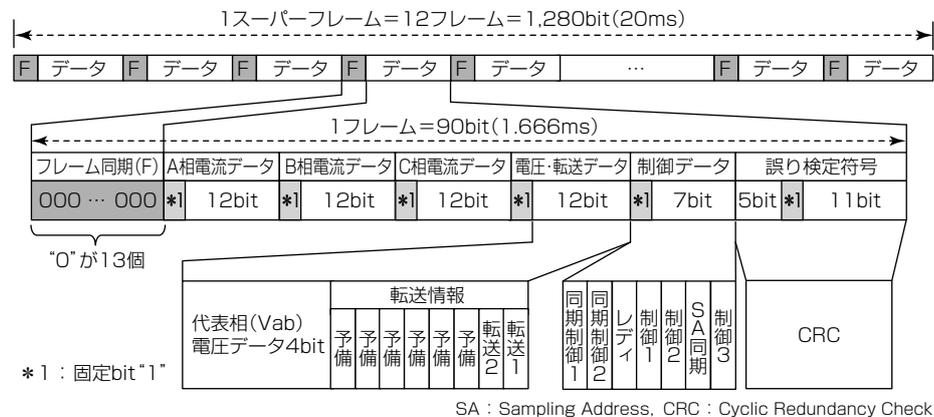


図4. 従来システムの54kbps伝送フォーマット

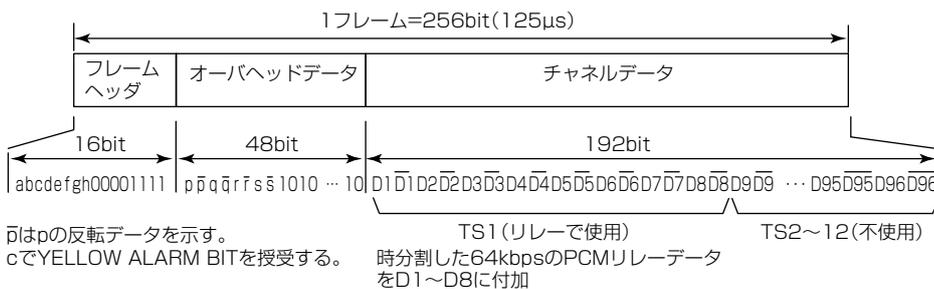


図5. IEEE C37.94の2Mbps伝送フォーマット

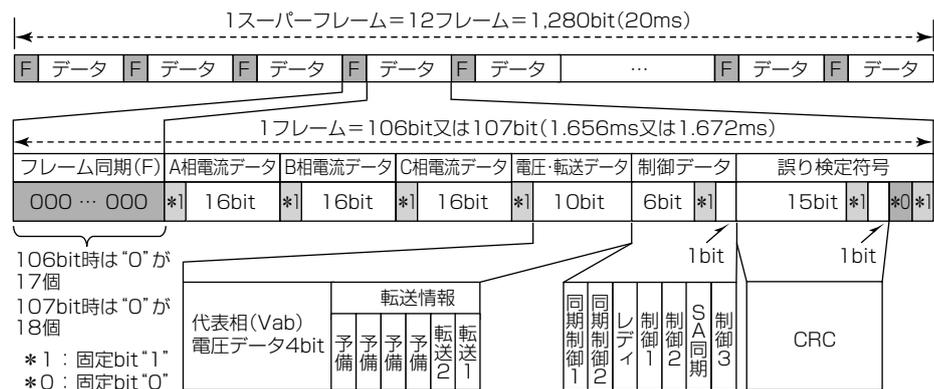


図6. IEEE C37.94の64kbps伝送フォーマット

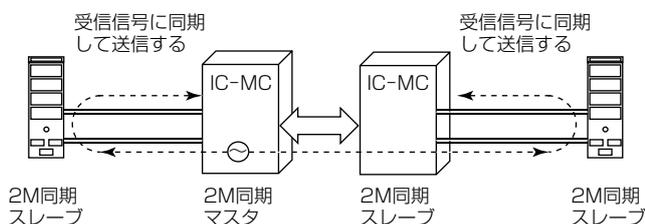


図7. 2Mbps信号の同期

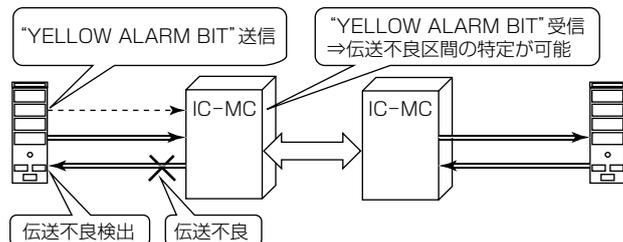
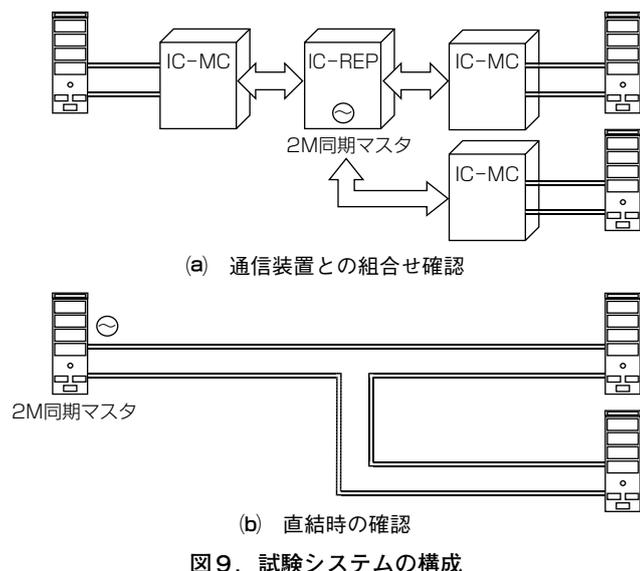


図8. “YELLOW ALARM BIT”機能



“YELLOW ALARM BIT”を受信することによって、当該区間に伝送不良があることが特定可能になる。なお、“YELLOW ALARM BIT”は2Mbpsのフレームヘッダ部でデータ授受される。

先に述べたとおり、今回システムでは、演算処理周期と1フレーム当たりのビット数に端数が生じた状態でサンプリング同期制御を実施する必要がある。また、IEEE C37.94では、2.2.2項のとおり、通信装置に2M同期マスタを設置し、スレーブの装置では、マスタからの信号(2M)に同期して、データ返送する必要がある。このため、従来システムで実施しているビット長を調整するサンプリング同期方法は、ジッタ性能の制約から適用できない。このため、この装置では、2Mbpsのビット長を変更せずに、64kbpsのビット数を106bit又は107bitに変更可変させることによって、サンプリング同期制御を実施している。また、同期誤差対策として、サンプリング同期制御の平準化を実施している。

### 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PCMリレーを用い、サンプリング同期制御の確認試験を実施した。試験システムの構成を図9に示す。PCMリレーは3端子構成とし、通信装置IC-MC及び情報中継多重装置IC-REP(IC-REP: IEEE C37.94 REpeater)との接続時の確認、及びPCMリレー装置直結時の確認を実施した。なお、通信装置との組合せ時には、IC-REPを2M同期マスタに設定して試験を実施した。また、PCMリレー装置直結時には、PCMリレーの1端子を2M同期マスタに設定して試験を実施し、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。



図10. MELPRO-CHARGE2シリーズ

#### 3.2 通信装置との組合せ試験

サンプリング同期制御の確認試験と同じ構成(図9)で、通信装置との組合せ時の応動を確認した。従来システムと同様の伝送不良検出時の応動確認及び“YELLOW ALARM BIT”等の今回システム特有の応動が所望の性能を満足することを確認し、良好な結果を得た。

#### 3.3 総合動作試験

電力システム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。試験システムの構成は図9の構成を適用した。また、伝送不良模擬装置を用い、任意の伝送不良発生時の検証を実施した。検証の結果、所望の性能を満足することを確認し、良好な結果を得た。

### 4. むすび

国際通信規格IEEE C37.94を適用した送電線保護リレーシステム及び検証結果について述べた。このシステムを適用することによって、システム全体のコスト低減が可能となる。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-CHARGE2シリーズ(図10)を適用して製作しており、東京電力パワーグリッド(株)に2017年4月に納入し、稼働中である。

#### 参考文献

- (1) 匹田猛雄, ほか: 新型デジタルリレー“MELPRO-CHARGE2”, 三菱電機技報, 86, No.9, 16~19 (2012)
- (2) 電気学会: 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, No.1276 (2013)