

# MITSUBISHI

## 三菱電機技報 Vol.80 No.7

2006 **7**

特集「開閉装置技術」



## 目次

### 特集「開閉装置技術」

開閉装置技術特集号に寄せて	1
日高邦彦	
開閉装置技術の最新動向	2
小山健一	
ガス遮断器におけるアークシミュレーション技術	7
堀之内克彦	
GIS用厚膜複合絶縁技術	11
井波 潔・吉村 学・清水芳則・大塚卓弥・永尾栄一・羽馬洋之	
電磁波モードを利用したGIS中部分放電源の同定技術	15
吉村 学・武藤浩隆・亀井光仁・岡部成光・金子周平	
真空遮断技術と真空絶縁技術の変遷	19
佐藤伸治・吉田友和・三木真一・小山健一・竹内敏恵	
遮断器における電磁駆動設計技術	23
月間 満・竹内敏恵	
電磁操作方式真空遮断器のCBM技術	27
丸山昭彦・松永敏宏	
72kV 脱SF <sub>6</sub> ガス絶縁スイッチギヤ“HG-VA”	31
有岡正博・佐藤伸治・丸山昭彦・金 太炫・吉村 学	
低圧開閉機器の遮断技術の動向	35
三橋孝夫・幸本茂樹・関口 剛	
低圧遮断器における最近の規格動向と 新形ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器	39
細貝節夫・上元利和	
新形“W&WSシリーズ”遮断器の小型化技術	43
渡辺和昌	
三次元過渡電磁界解析を用いた開閉装置の高度設計技術	47
牧田 陽・竹内敏恵	
熱流体解析と渦電流解析を用いた開閉装置の設計高度化	51
稲口 隆・小倉健太郎・牧田 陽	
遮断器制御基板における耐ノイズ評価技術	55
白木康博	

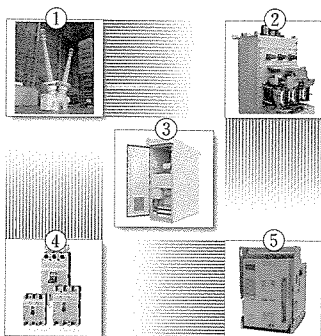
Advanced Technologies of Switching Device	
Foreword to Special Issue on Switchgear Technology	
Kunihiko Hidaka	
Advanced Technology of Switching Device	
Kenichi Koyama	
Arc Simulation Technology for Gas Circuit Breaker	
Katsuhiko Horinouchi	
Hybrid Insulation Techniques Applying Thick Dielectric-Layered Electrode for Gas Insulated Switchgear	
Kiyoshi Inami, Manabu Yoshimura, Yoshinori Shimizu, Takuya Otsuka, Eiichi Nagao, Hiroyuki Hama	
Technique of Location Identification of Partial Discharge by Electromagnetic Wave in GIS	
Manabu Yoshimura, Hiroataka Muto, Mitsuhiro Kamei, Shigemitsu Okabe, Syuhei Kaneko	
Vacuum Interrupter and Vacuum Insulation Technology	
Shinji Sato, Tomokazu Yoshida, Shinichi Miki, Kenichi Koyama, Toshie Takeuchi	
Design Technique of Electromagnetic Driving for Circuit Breakers	
Mitsuru Tsukima, Toshie Takeuchi	
Condition-Based Maintenance Technology for Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker	
Akihiko Maruyama, Toshihiro Matsunaga	
72kV Dry Air Insulated Switchgear “HG-VA”	
Masahiro Arioka, Shinji Sato, Akihiko Maruyama, Tae Hyun Kim, Manabu Yoshimura	
Current Interrupting Techniques for Low-Voltage Switching Devices	
Takao Mitsuhashi, Shigeki Koumoto, Tsuyoshi Sekiguchi	
Standard Trend in Low-Voltage Switchgear and New MCCBs and ELCBs	
Setsuo Hosogai, Toshikazu Uemoto	
Downsizing Technology for New Molded-Case Circuit Breaker “W&WS Series”	
Kazumasa Watanabe	
Advanced Design Technology of Switching Devices Using 3-D Transient Electromagnetic Analysis	
Yo Makita, Toshie Takeuchi	
Advanced Design of Switching Devices by Using 3-D Thermo-Fluid Analysis and Eddy Current Analysis	
Takashi Inaguchi, Kentaro Kokura, Yo Makita	
Noise Evaluation Technique for Breakers' PCB	
Yasuhiro Shiraki	

### 特許と新案

「開閉器」「遮断器の制御装置および制御方法」	59
「開閉器」	60

### スポットライト

グローバル規格対応 White&World Super Series  
ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器30AF~1600AF



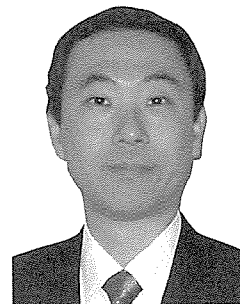
表紙：開閉装置技術

表紙の写真は、この特集号で紹介している最新の超高圧から低圧までの遮断技術、絶縁技術、電磁操作機構技術、通電技術及びノイズ設計技術に代表されるような開閉装置周辺技術を搭載した当社製品群である。

①550kVガス遮断器、②24kV電磁操作方式真空遮断器、③72kV脱SF<sub>6</sub>ガス絶縁スイッチギヤ、④新形ノーヒューズ遮断器、⑤新形気中遮断器AE-SWシリーズである。

## 開閉装置技術特集号に寄せて

Foreword to Special Issue on Switchgear Technology



日高邦彦  
Kunihiko Hidaka

開閉装置は、電気エネルギーの発生、輸送、変換、利用のすべての回路において、電気の流れを制御する重要な役割を担っている。開閉動作は単なるスイッチのオンオフと思われるかもしれないが、そこで扱う電圧は100V~100万V、電流はmA~10万Aと、これまた電力システムで現れるすべての電圧・電流が対象となっており、電力分野のキー技術の一つと言えよう。

開閉装置技術におけるここ30年の小型化・高度化のスピードは余りにも速く、そのために、屋外の変電所で人目についていた開閉装置は、ビルの地下室に収まったり機器の操作盤の中に入ったりして、あっという間に目立たなくなってしまった。そのような電力システムを根本から支える開閉装置技術にスポットライトを当てようとするこの特集の企画に敬意を表したい。

電力システムにおける開閉装置と言うと遮断器、断路器、接地開閉器、負荷開閉器など回路の開閉を行う機器のみを想像しがちであるが、ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear: GIS)に代表されるように、開閉機器のほか、母線、計器用変成器、避雷器なども含むシステム機器である。個別機器の性能向上とともに、機器間の機能分担、協調を図りながらシステム全体として最高のパフォーマンスが得られるようにする必要がある。

こういった技術の開発は我が国の最も得意とするところであり、電気機器メーカーと電力会社の連携もあり、大幅なコンパクト化と高信頼度化を世界に先駆けて実現している。大いに胸を張って社会に発信してよいし、また、次世代の若手技術者、研究者にうまく継承していくべきであると考えている。

電力技術の標準化を議論するCIGRE(国際大電力システム会議)が行ったGISの信頼性調査によると、我が国における7万V以上のGISの重故障率は、年間100回線当たり0.08で、全世界の数値の1/10という極めて低い故障率となっている。我が国に設置されているGISのほとんどが国内メーカー製であることを考えると、国内メーカーの技術力がいかに高いかがよく分かる。

開閉装置にとって欠かせない絶縁ガスの一つがSF<sub>6</sub>ガスである。その高い絶縁耐力と優れた消弧性能を生かしたガス遮断器の研究が1950年代からアメリカのウェスティングハウス社(WH社)で進められた。当時は、WH社が保有する基本特許のため我が国のメーカーの中ではWH社と技術提携関係を結んでいた三菱電機のみ、ガス遮断器の製作・販売が可能であった。日本最初の製品は、1963年に三菱電機が製作した240kVタンク形ガス遮断器であることを記しておきたい。国内の他メーカーは、WH社の特許の切れる1969年に照準を合わせて開発研究がなされた。

一方、世界初のGISの登場は1966年のことで、フランスEDF社の計画による245kV GISのフィールド試験である。日本初のGISの登場はそのわずか2年後の1968年で、三菱電機製84kV GISのフィールド試験が関西電力(俵姫路変電所)で行われた。

その後の開閉装置の発展は前述のとおりであるが、こうした高性能な装置は既に国内では行き渡り、新たな需要は見込めないのではないかという懸念がある。どんなに優秀な機器でも寿命はあり、GISの出現から40年が経過している現在、確実に更新時期がくる。その際、ユーザーは、何十年も前と同じ開閉装置を購入するはずはなく、更に高機能で環境にも優しい装置を求めらるであろう。それにこたえ得る技術力がメーカーに求められている。

世界に目を向けると、BRICsと呼ばれるブラジル、ロシア、インド、中国を中心に高度成長が進み、人々は都市に集まり、旺盛(おうせい)な経済活動が展開されている。まさにこれまでの我が国と同じ道を辿(たど)っている。都市化における電力の十分かつ安定な供給、この課題に対する開閉装置技術の有効活用は、我が国の得意芸であり、我が国の経験を踏まえた最新技術はそうした国々の発展に大いに貢献できる。また、製品の大きな市場となると考える。

紙面の関係であまり触れられなかった今後の技術課題を含め、三菱電機における開閉装置技術の最先端を知ることができるという意味でも、この特集号に期待するところは極めて大きい。



小山健一\*

# 開閉装置技術の最新動向

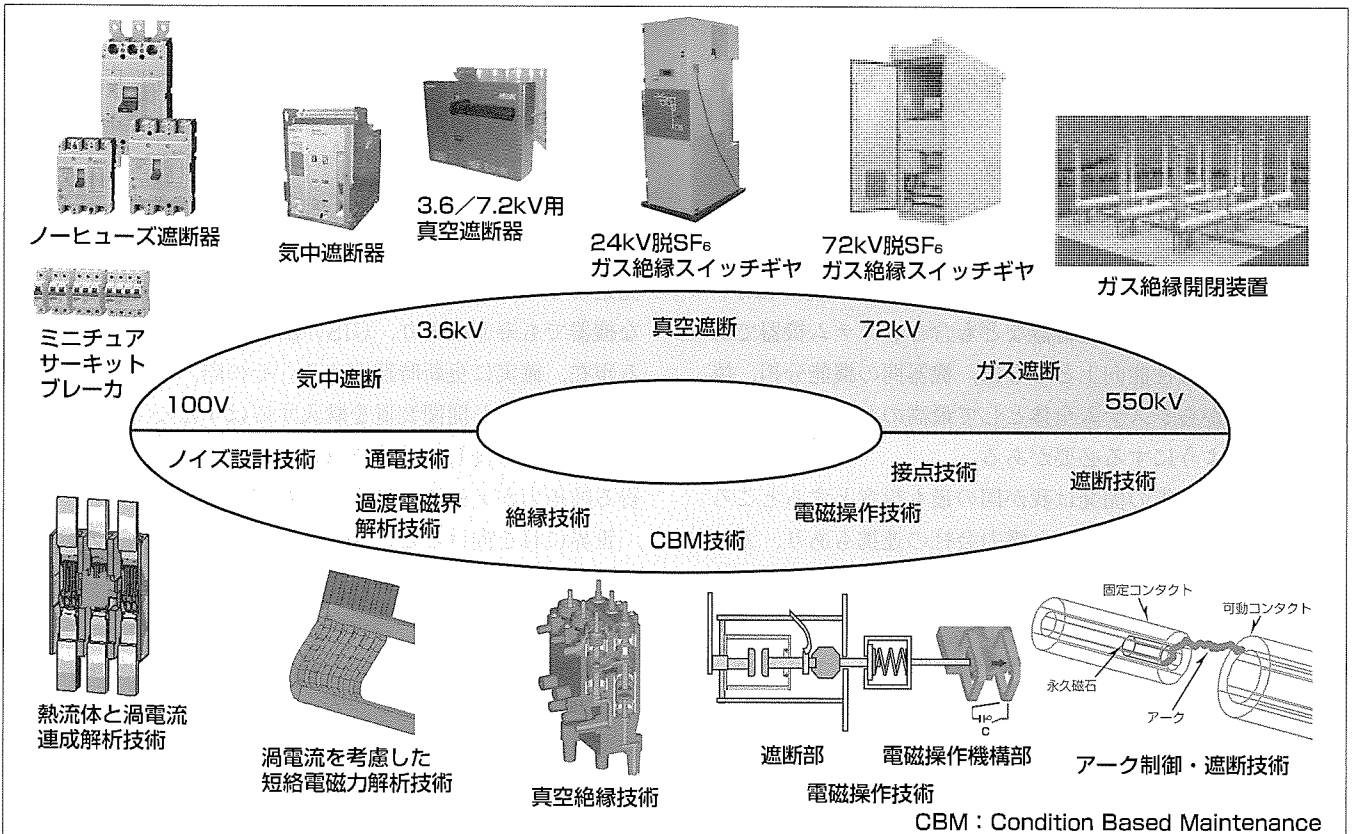
Advanced Technology of Switching Device

Kenichi Koyama

## 要旨

電力の発生から消費に至る電力回路には、数多くの開閉装置が配置されている。その適用電圧は数百ボルトから千キロボルトまで実に4けたの幅があり、また、その必要遮断電流も短絡電流遮断から断路、接地用途などで多岐にわたる。そのいずれにおいても、電力の安定供給を目的に設置されていることから、開閉装置自体においても通電、絶縁、開閉等の各性能において高い信頼性を維持しつつコンパクト化や低価格化、高機能化などの時代のニーズに対応する必要がある。そのため、これら主要性能に対応したアーク現象や絶縁破壊現象などの放電に関する解明研究や磁気現象に関する解明研究、電磁界現象の応用や新材料開発などの要素技術確立研究、革新的な製品化開発などが継続

的に行われてきた。例えば、真空遮断器の遮断部分である真空バルブでは、同一定格比において約30年で容積が1/10以下にまでコンパクト化され、また、ガス遮断器の接点当たりの遮断容量も飛躍的に増加してきた。さらに、最近では、電磁操作技術などの開発による新機能開発も活発化している。また、開閉装置の周辺技術でも、電子化、ネットワーク化、システム化などが精力的に進展している。今後も、これら周辺技術の進展や世の中のニーズの変化に対応した技術開発、さらには、これらニーズや周辺技術開発を牽引(けんいん)する技術革新を継続して推進し、更に利用しやすく環境に優しい電気利用社会の実現に貢献していく。



## 開閉装置を支える最新技術

開閉装置の高度化・高機能化を達成するための技術を示す。

## 1. ま え が き

発電所で作られた電気が送電用変電所、送電線、配電用変電所、配電線を経由して電力需要家の配電回路から負荷機器へ到達するまでには、実に多くの電力用開閉装置が挿入されている。これらは、電力系統に短絡などの故障が発生した際に速やかにその故障点を切り離し各種機器の損傷を防ぐとともに安定した電力供給を継続するため、電力の供給経路を変更するため、機器の保守や工事などの際に安全確実に対象機器を電力系統から切り離すため、等の役割を担っており、電気に依存した現代社会になくてはならない重要な機器と言える。

この開閉装置に必要とされる主要基本性能とそれを実現するための主要必要技術を表1に示す。開閉装置と一言で言っても、その適用電圧は数百Vクラスから1,100kVクラスまで広範囲にわたっており、それぞれの電圧クラスに応じて必要性能を満足するために絶縁技術、遮断技術、機構技術、通電技術などが発展し高度化されてきた。

本稿では、これらの開閉装置の高度化や革新を支える最新技術について、その概略を述べる。

## 2. 絶 縁 技 術

絶縁技術は、開閉装置がつながる電力系統の信頼性、開閉装置の周辺機器の信頼性や安全性の観点から、特に重要な要素技術である。一般に低圧のMCCB(Molded Case Circuit Breaker)等の機器では大気絶縁が利用されているが、高压機器では大気絶縁のほかに、固体絶縁、真空絶縁、ドライエア絶縁、SF<sub>6</sub>ガス絶縁等がその信頼性確保、装置のコンパクト化などの観点で利用されている。近年では、地球環境保護の観点からSF<sub>6</sub>ガスの使用量削減も重要視されており、特に配電機器の分野で固体絶縁や真空絶縁やドライエア絶縁技術が進展している。ここでは、それら技術について簡単に述べる。

### 2.1 固体絶縁

図1に、開閉装置の小型化・軽量化・低電力損失化を目的として開発製品化した固体絶縁技術適用の複合絶縁開閉装置“MS-S”を示す。充電部への固体絶縁技術の適用は、充電部の露出を防止し、耐電圧性能の信頼性向上及び定期点検周期延長につながる。MS-Sでは、真空遮断器の真空

表1. 開閉装置に要求される主要基本性能

必要性能	機 能	必要技術
通電性能	安定・安全に電気を流し続ける必要性	絶縁技術、 通電技術
開放性能	確実に・安全に電路を切り離し維持する必要性	絶縁技術
遮断性能	通電状態から決められた時間内で流れる電流を確実に切り、開放状態に移行する必要性	遮断技術、 機構技術
投入性能	開放状態から決められた時間内に流れる可能性のある電流を想定して通電状態に移行する必要性	接点技術、 機構技術

バルブ(Vacuum Switching Tube : VST)を含む主回路部のVSTユニット、主母線部の母線導体ユニット、分岐部の分岐導体ユニットの3ユニットに固体絶縁技術を適用し、複数の機能を持たせることで、部品点数の削減や発熱損失の低減を図っている。また、VSTユニットを母線ユニットに直接接続する垂直接続構造とし、母線からケーブル接続までの電路を最短にすることで低損失化を図っている。

### 2.2 真空絶縁

真空中では、その絶縁破壊過程の特長から、短ギャップ空間においてSF<sub>6</sub>ガスや空気中よりも高い絶縁性能を持っている。この特長を生かして24kV定格クラスの真空絶縁スイッチギヤ(複合絶縁多機能真空開閉装置)を開発した。図2に示すように、複合絶縁多機能真空開閉装置では、1つの真空容器中に遮断接点、断路接点、接地接点部を保有しており、その真空容器は固体絶縁物でモールドされている。さらには、高電圧部と開閉機構部間も真空中で絶縁をしていることからケーブル接続によって全く高電圧部分が

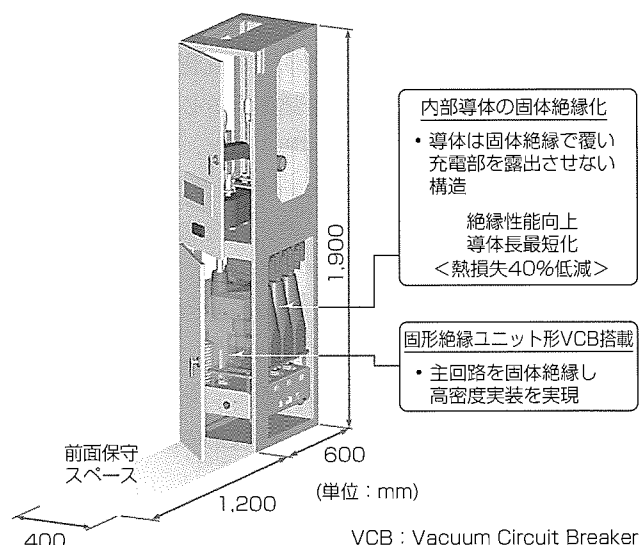


図1. 固体絶縁開閉装置MS-S

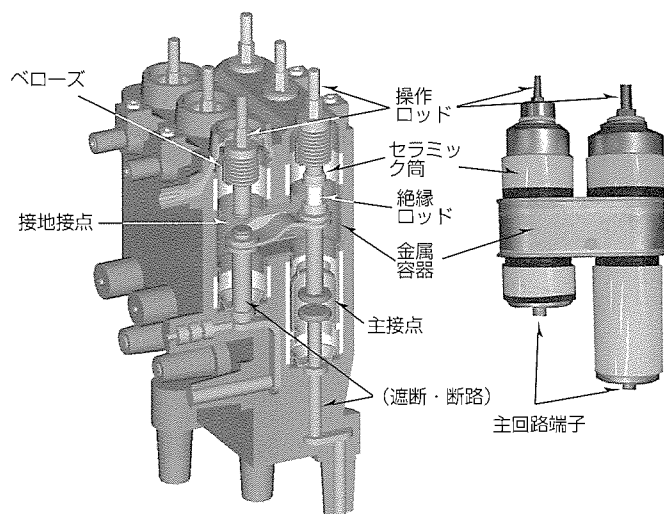


図2. 複合絶縁多機能真空開閉装置構造図

外部に出ない。この真空絶縁技術によって、SF<sub>6</sub>ガス絶縁スイッチギヤと比較してもコンパクトでかつ脱SF<sub>6</sub>化を実現できた。

### 2.3 ドライエア絶縁

環境負荷低減という社会ニーズが形成・発達する中で、キュービクル形ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)の主回路絶縁にドライエアを適用し、脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現した。ドライエア圧力はC-GISを軽量化・コンパクト化しやすい0.3MPa.abs.以下の低ガス圧方式とし、ユーザーメリットを追求した。SF<sub>6</sub>ガスの約1/3のドライエア絶縁性能を最大限に引き出すため、ドライエア単体及び絶縁バリアとの複合絶縁下での絶縁破壊特性を重点的に検討した。図3は、24kV“HS-X”形スイッチギヤ開発における、絶縁バリアを設置した主回路とガスタンク間の絶縁距離の最適化検討例である。24kV HS-X形スイッチギヤでは据付面積をSF<sub>6</sub>機種の75%に、質量は73%に縮小し、軽量化とコンパクト化を損なうことなく脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現した。

## 3. 遮断技術

開閉装置、特に短絡電流を遮断する責務を持つ遮断器では、確実に決められた大電流を遮断する必要がある。遮断器では、通電状態から接点を開極すると、接点間にアークが発生する。電流を遮断するという事は、このアークのエネルギーを速やかに消費し、例えば交流電流においては電流がゼロをよぎるタイミングで接点間で高い絶縁性を回復することを意味する。今までの遮断器の進歩はこの遮断技術の進歩であり、コンパクト化のためにいかに狭い空間で、さらに、高信頼性のためにいかにシンプルな構成でアークエネルギーを消費するかという技術の高度化に依存してきた。

例えば、真空遮断器の消弧部である真空バルブでは、アークの挙動解析や磁界解析技術、さらには真空中の絶縁破壊現象の研究によって、真空バルブそのものの小型化が進んだ。真空バルブの小型化は、耐アーク性や高耐圧性が優れた接点材料の開発と、風車接点や縦磁界電極構造で代表される電極構造のアーク駆動又は拡散性能の高効率化により実現されてきた。図4に7.2kV-600A-12.5kA遮断器用

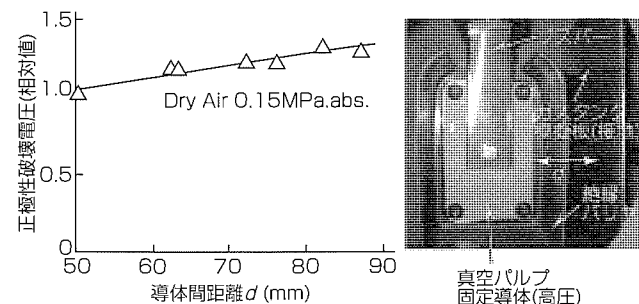


図3. 24kV HS-X形スイッチギヤにおける絶縁バリアの適用検討例

真空バルブの小型化の変遷を示す。この図からも36年の間で容積比にして6%にまで小型化が進んでいることが分かる。

一方、ガス遮断器の消弧室では、アークにSF<sub>6</sub>など絶縁消弧ガスを吹き付けることにより冷却して消弧し、さらに極間から高温ガスを排出して絶縁を回復するというものを行うが、そのために、パuffaという吹き付け機構を備えており、このパuffaによるガス流の最適化設計が遮断性能の向上及びパuffaの小型化に重要となる。また、パuffaの操作力を低減する技術に、オートパuffaというアークのエネルギーを蓄積してそれを消弧に用いる技術がある。これらパuffa機構の最適化設計やアークエネルギー蓄積効率を高度化する技術として図5の例のような熱ガス流解析技術があり、最新の流体解析技術や電磁界解析技術によって達成されている。

さらに、消弧性能を向上させる技術に、図6に示すアークを磁力によって駆動して冷却を行うアーク磁気駆動という技術がある。この技術には、高い駆動力を得る磁場分布を得るための磁界解析技術や挙動解析技術が適用され、永

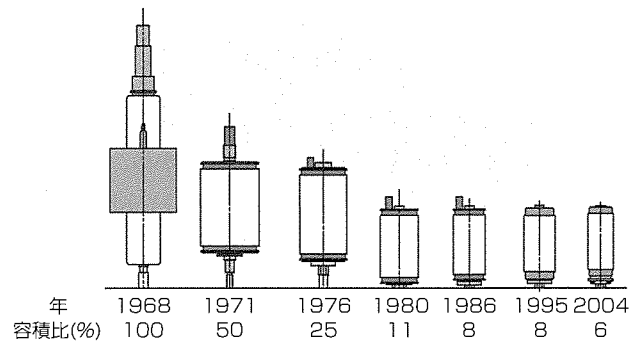


図4. 7.2kV-600A-12.5kA汎用遮断器用真空バルブの変遷

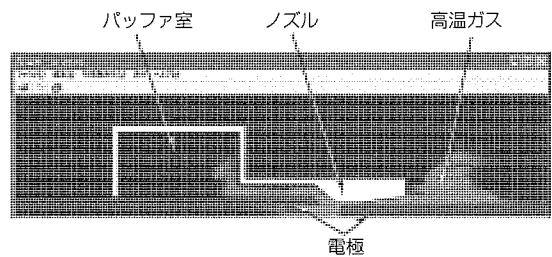


図5. ガス遮断器消弧室のガス流解析技術

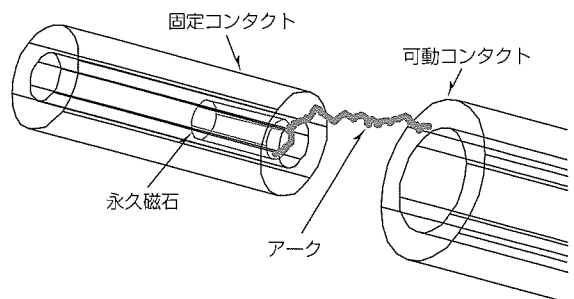


図6. 磁気駆動アークの三次元挙動解析技術

久磁石や電磁石の配置などの設計に反映されている。

#### 4. 電磁操作機構技術

これまでの遮断器は、ばねの蓄勢エネルギーを利用して接点の開閉を行っているため応答が遅く、遮断指令から50ms程度の時間を要する。この動作時間では、多くの負荷機器の特徴から無瞬断での電力切換えに対応できない。そこで開発されたのが図7に示す高速電磁反発駆動技術を用いた高速開閉器<sup>(1)</sup>である。高速電磁反発駆動技術は、駆動コイル及び反発板、皿ばねから構成され、駆動コイルにパルス電流を通電することにより誘起される渦電流に伴う電磁反発力を利用するものであり、遮断時間が通常の遮断器と比べて大幅に短縮(3サイクル→1サイクル)された。この高速遮断器の実現によって2つの電力系統の瞬時切換えや自家発電機の瞬時切離し等が可能となり、現在、多くの実システムで利用されている。

高速開閉器が瞬時に大きな力によって開閉駆動するのに対して、小さな力で接点を直接駆動し開閉寿命や機構部構成が従来の約半分のレベルで達成可能な新しい技術として注目されているのが図8のスイッチギヤ用真空遮断器に採用した電磁操作機構である。電磁操作機構は、ヨーク、永久磁石、開閉極用コイルを一体化させたシンプルな構造であり、永久磁石により無電力での開閉保持を実現すると

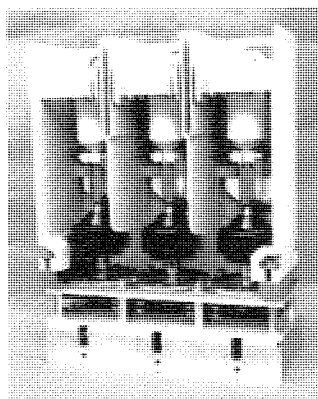


図7. 15kV高速開閉器

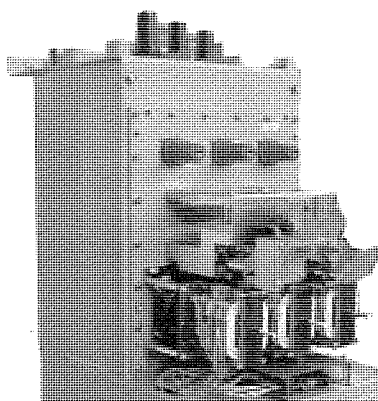


図8. 24kV複合絶縁スイッチギヤ用真空遮断器

もに、開閉極用コイルに操作電流を通電することにより開閉駆動させる。この電磁操作技術の発展は、真空遮断器の操作機構部の部品点数削減だけでなく、電磁現象を利用した新しい機構診断システムの実現などの革新をもたらすとともに、その優れた制御性から位相制御遮断器への拡張を可能にする<sup>(2)</sup>。

#### 5. 通電技術

上述した機構技術向上に加え、通電性能向上のための新たな設計技術の確立とその適用化を推進している。ここでは、通電部設計高度化技術として①三次元過渡電磁力解析による短時間通電(短通)設計技術<sup>(3)</sup>、②電磁界・熱連成解析による熱設計技術<sup>(4)</sup>について述べる。

##### 5.1 三次元過渡電磁力解析による短通設計技術

新形気中遮断器“AE-SWシリーズ”では、定格電流2,000~4,000A機種において重要仕様の一つである短通容量格上げを達成している。短通性能の向上では大電流通電時の電磁反発力による接点浮き上がり・発弧を抑えることが最大の課題であった。そこで、図9に示すように、複雑な通電部の偏流が考慮可能なA-φ法三次元過渡電磁界解析手法を新たに導入し、各フィンガ導体で発生する電磁反発力を高精度に考慮した通電部短通設計手法を確立した。この技術を適用することで、AE2000SWAからAE4000SWAの機種で、目標の大電流通電時でも発弧なく良好な通電性能を確保できる最適な主回路構造を実現した。

##### 5.2 電磁界・熱連成解析による熱設計技術

通電性能に要求されるもう一つの重要課題として本体の温度上昇抑制がある。これまでの通電部発熱設計では熱回路網法による設計手法が主に用いられてきたが<sup>(5)</sup>、近年の低圧遮断器開発における通電性能の大容量化、筐体(きょうたい)の小型・軽量化の一層な加速に伴い、高精度な熱設計の最適化が不可欠となっている。そこで、導体や機構部の渦電流損失を厳密に考慮した電磁界・熱連成解析技術を確立した。

以下、大型MCCBへの適用例につき述べる。図10に機構部の渦電流による発熱量の計算結果を、図11にこの渦電流による発熱を考慮して温度分布を計算した結果を示す。

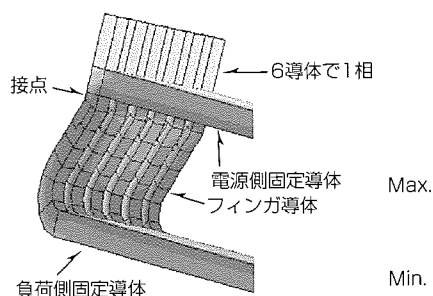


図9. 新形AE4000-SWA通電部電流分布

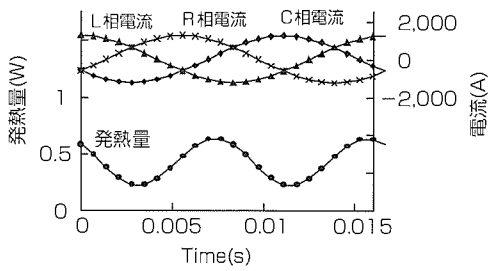


図10. 通電電流と機構部の渦電流による発熱量

この手法は、上述の渦電流損失による発熱以外にも、従来の熱回路網解析では十分解析できない流体の流れや輻射(ふくしゃ)の影響も考慮可能であり、今後重要性が高まるものと思われる。

### 6. む す び

以上のように、電力インフラで重要な役割を担う開閉装置では、電磁界現象や放電現象などの基礎現象に立ち返った研究成果を基にした新技術さらには新製品開発が活発に行われている。今後も、電力インフラや開閉装置に要求される世の中のニーズに対し、的確な現象研究と新技術開発を継続して進め、より良い電気利用社会の実現に貢献していく。

### 参 考 文 献

(1) 竹内敏恵, ほか: 等価回路モデルによる渦電流反発式高速遮断器の駆動解析, Trans. of IEEJ, PE, **124**,

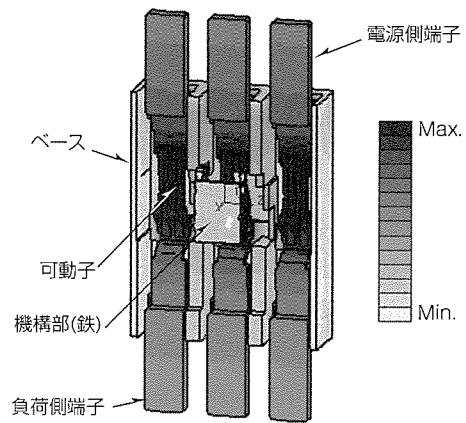


図11. 大型MCCBの温度分布の計算結果

No.6, 859~865 (2004)

(2) Takeuchi, T., et al.: An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion, IEEJ Trans. PE, **124**, No.2, 321~326 (2004)

(3) 牧田 陽, ほか: 三次元過渡電磁界解析を用いた開閉装置の高度設計技術, 三菱電機技報, **80**, No.7, 471~474 (2006)

(4) 稲口 隆, ほか: 熱流体解析と渦電流解析を用いた開閉装置の設計高度化, 三菱電機技報, **80**, No.7, 475~478 (2006)

(5) 岡下広史, ほか: 新形低圧気中遮断器“AE-SWシリーズ”, 三菱電機技報, **79**, No.6, 377~380 (2005)



# ガス遮断器におけるアークシミュレーション技術

堀之内克彦\*

Arc Simulation Technology for Gas Circuit Breaker

Katsuhiko Horinouchi

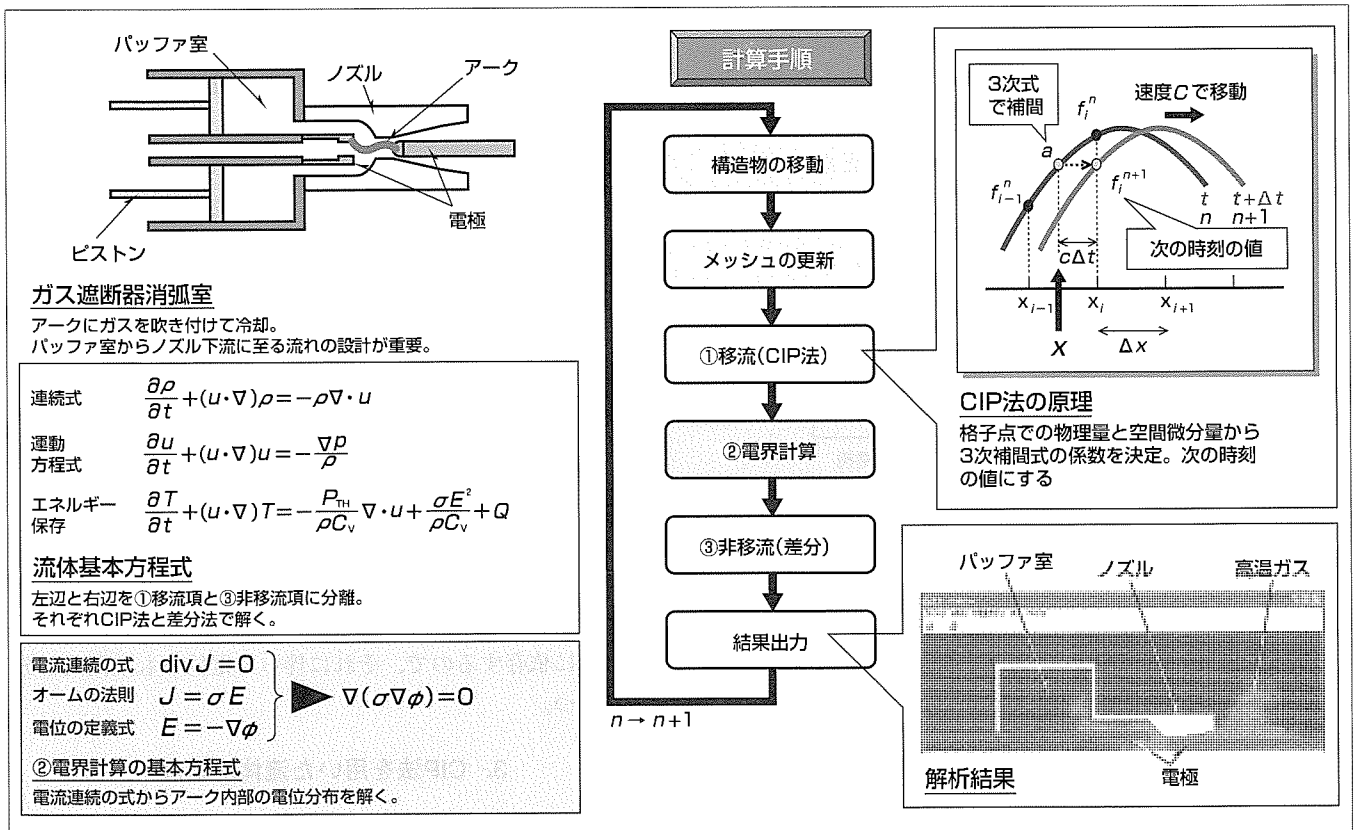
## 要旨

ガス遮断器は、SF<sub>6</sub>などの消弧ガスを高温のアークに吹き付けることにより冷却して消弧し電流を遮断する。そのため、パuffa室と呼ばれるガスを圧縮し高圧力にする部屋を持ち、そこからアークに対して吹き付けを行う。高い遮断性能を得るためには、パuffa室から電極間への吹き付け構造及び電極間から熱を排出するノズルからその下流に至る構造のいわゆる消弧室の設計が重要となる。消弧室の設計を短期間で効率良く行うために熱ガス流計算機シミュレータが用いられるが、本稿では、その基礎となるガス流とアークのシミュレーション技術について述べる。ガス流解析手法としては、近年注目されている東工大の矢部孝教授が考案したCIP(Constrained Interpolation Profile)法を用いている。そして、これに電界解析を連成している。

アークは熱源として取り扱われるが、電気的にはジュール熱であり、それは、電界の強度に依存する。アークの温度分布が変化することによって電界分布も変化するため、流体解析と連成して解く必要がある。

CIP法は流体方程式の移流項を解くために用いるが、これは、格子間を補間するために三次式を用い、その未知係数を補間点を挟む格子点の物理量と空間微分量によって求めるのが特徴である。本稿では、更にこれを発展させた有理関数CIP法を用いて精度良く補間している。

さて、ガス遮断器の開発では大規模な試験設備による遮断試験が必要であることやアークが高温であるため実験計測が非常に困難であることから、今後、ガス遮断器のアークシミュレーション技術はより重要性を増すと考えられる。



## ガス遮断器消弧室のアークシミュレーション技術

ガス遮断器消弧室と解析計算フロー及びCIP法の原理と解析例を示す。

1. ま え が き

大電流が流れているときに電極を開くことによって、極間に存在するガスが電離し、高温のプラズマ状態であるアークが発生する。ガス遮断器は、SF<sub>6</sub>などのガスをアークに吹き付けることにより冷却して消弧し電流を遮断する方式の遮断器である。一般的なガス遮断器の消弧室は、図1に示すような構成をしている。図において、パuffa室と示されているところで機械的にガスを圧縮し高圧力にして、そこからアークに対して吹き付けを行う。また、図2に示すような熱パuffa室と呼ばれる蓄熱室を持っているものもあるが、これは、アークの熱をこの部屋に取り込むことによってガスを加熱して高圧力にし、消弧するタイミングにおいて、この圧力を利用して吹き付けを行うオートパuffaと呼ばれるタイプのガス遮断器消弧室である。このように、ガス遮断器では、アークを効率良く冷却するための上記のパuffa室から電極間への吹き付け構造、及び電極間から素早く熱を排出するためのノズルからその下流に至るガスの流れというものの設計が重要となる。また、オートパuffaタイプの場合であれば、アークから熱パuffa室への熱流入についても考慮しなければならない設計がポイントとなる。

このような消弧室設計を短期間で効率良く行うために熱ガス流計算機シミュレータが用いられるが、本稿では、その基礎となるガス流とアークのシミュレーション技術について述べる。三菱電機においても、これまで、ガス遮断器のシミュレータは開発されており、その基本となるガス流

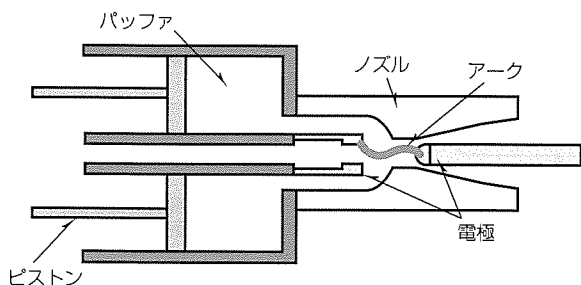


図1. 一般的なガス遮断器消弧室

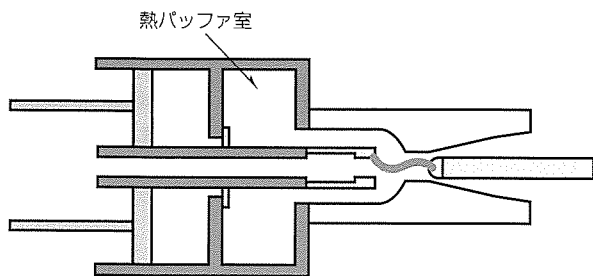


図2. オートパuffaタイプ消弧室

解析手法としてはTVD (Total Variation Diminishing) 法などが用いられているが、本稿では、更に新しい手法として近年注目されている東工大の矢部孝教授が考案したCIP法<sup>(1)</sup>を用いた解析手法について述べ、これに電界解析を連成したアークシミュレーション技術について述べる。

2. ガス遮断器シミュレータの構成

ガス遮断器のシミュレータは次のような①～③の構成をとり、これを微小な時間ステップで順次繰り返して時間変化を求めていく。

- ①流体解析部
- ②メッシュ更新部
- ③電界解析部

①の流体解析部は、各格子に配置されたガスの圧力、温度、密度、流速などの物性量に対し、流体の微分方程式を解いてこれらの時間変化を求める部分である。流体解析手法には幾つかの手法があるが、本稿では、次章で詳しく述べるようなCIP法を用いている。②では、電極やピストンなどの構造物の移動に伴い形状が変化するのにつれて細かいメッシュにする必要のある部分が生じるため、それに合わせてメッシュを切り直す部分である。③の電界解析部は、電極間の電界分布を求める部分である。流体解析部でアークは熱源として取り扱われるが、電気的にはジュール熱として表され、電界の強度に依存した値となる。アークの温度分布変化によって電界分布も変化するため、流体と連成して解析する必要がある。

電界解析は、アーク内部と外部でそれぞれ電位φが満たすべき以下の方程式を解くことで求める。電流密度をJ、電界をEとしたとき、アーク内部では電流連続の式

$$\text{div} J = 0 \dots\dots\dots(1)$$

と、オームの法則

$$J = \sigma E \dots\dots\dots(2)$$

及び

$$E = -\text{grad } \phi \dots\dots\dots(3)$$

から

$$\nabla(\sigma \nabla \phi) = 0 \dots\dots\dots(4)$$

という方程式が得られる。この式を、本稿の方法では、差分法で求める。σは導電率で温度の関数でありアークの温度分布に依存するので、それに伴って電位φも空間的に分布を持つ。

3. CIP法を用いた流体解析部

流体解析の基本となる方程式は、次の連続の式、運動方程式、エネルギー保存の式の3つの流体方程式と状態方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \rho = -\rho \nabla \cdot u \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla p}{\rho} \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T = -\frac{P_{TH}}{\rho C_v} \nabla \cdot u + \frac{\sigma E^2}{\rho C_v} + Q \dots\dots\dots(7)$$

$$p = ZpRT \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $u$ は流速、 $T$ は温度、 $p$ は圧力、 $R$ は気体定数を表す。また、 $C_v$ は定積比熱、 $Z$ は圧縮因子であり、共に温度に依存する。 $P_{TH}$ は、以下の式で表され、理想気体では圧力 $p$ に等しくなる。

$$P_{TH} = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \dots\dots\dots(9)$$

さらに、 $Q$ は熱伝導や光放射による損失項。 $\sigma$ は導電率で、 $E$ は電界解析で求めた電界強度である。

本稿で用いる流体解析手法であるCIP法では、式(5)~式(7)の左辺と右辺をそれぞれ次のように移流項と非移流項に分離し、移流項を狭義のCIP法で非移流項を差分法によって解く。

移流項

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (u \cdot \nabla)\rho = 0 \dots\dots\dots(5a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = 0 \dots\dots\dots(6a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T = 0 \dots\dots\dots(7a)$$

非移流項

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot u \dots\dots\dots(5b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} \dots\dots\dots(6b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P_{TH}}{\rho C_v} \nabla \cdot u + \frac{\sigma E^2}{\rho C_v} + Q \dots\dots\dots(7b)$$

さて以下では、移流項を解く狭義のCIP法について述べる。移流項の方程式(5a)~(7a)の形は一次元の形式で書けば、代表的に

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(8)$$

というように書けるが、これは、図3に示すように、波形が変形せずに $c$ という速度で移動する(移流)ということを示している。したがって、例えば格子点 $x_i$ における次の時刻 $n+1$ での値は現在時刻 $n$ における波形の $x = x_i - c \Delta t$ の位置、すなわち上流での値ということになる。この値は格子点から何らかの補間によって求める必要があるが、基本のCIP法ではこれを三次式(9)によって補間する。

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \dots\dots\dots(9)$$

式(9)の4つの係数 $a, b, c, d$ は補間点 $x$ を挟む格子点 $i$ と格子点 $i-1$ の値から求める必要があるが、CIP法では、格子点上の物理量 $f_i$ と $f_{i-1}$ 及びその空間微分量 $f'_i, f'_{i-1}$ か

ら求める。ところが、空間微分量を用いるとすると次の時刻での各格子点上における空間微分量 $f'$ も求めておく必要があるが、それは式(9)を微分した

$$f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c \dots\dots\dots(10)$$

を空間微分量の補間式として用い、時刻 $n$ における $x = x_i - c \Delta t$ の位置での値を時刻 $n+1$ での $f'$ とする。

さて、上で述べたのはCIP法の中でも簡単なスキームであるが、本稿では、これより更に発展した有理関数CIP法を用いている。これは、上記の3次補間式の代わりに分子が3次式になるような分数式(11)を用いる<sup>(2)</sup>。

$$f(x) = \frac{ax^3 + bx^2 + cx + d}{1 + \delta Bx} \dots\dots\dots(11)$$

式(11)のパラメータの $\delta$ や $B$ は通常条件では0となり式(9)となるように調整され、急峻(きゅうしゅん)な変化をするところでは0ではない適切な値に調整される。式(11)を用いた有理関数CIP法は、図4の矩形(くけい)波の伝搬の比較から分かるように、オーバーシュートやアンダーシュートが起きにくくなっている。アンダーシュートの起きにくさは、アーク内部のような極めて密度が小さい値のときでも計算誤差によって密度が負の値になることを避けることができ都合がよい。

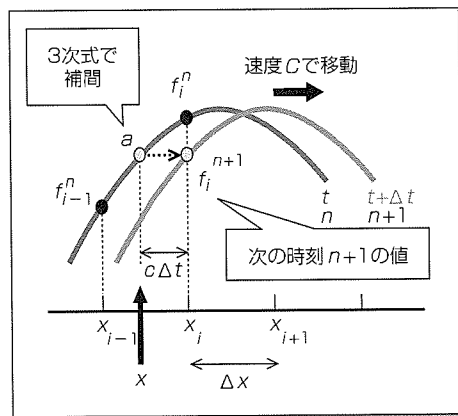


図3. CIP法の原理

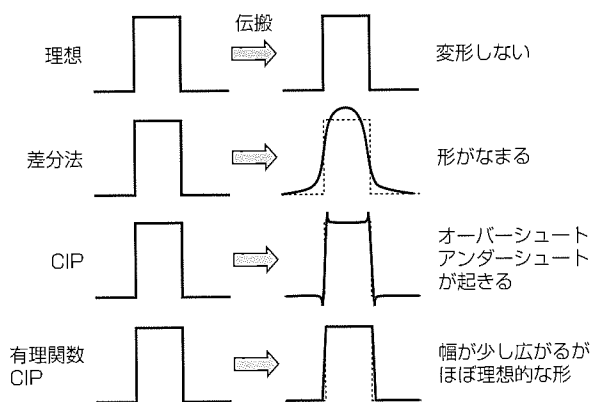


図4. 矩形波伝搬による解析手法の比較

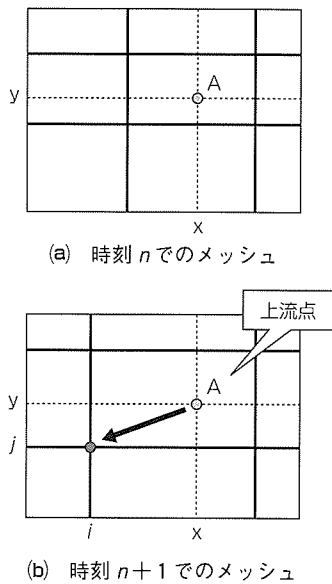


図5. 移流時のメッシュ更新

ところで、前章で述べたようにメッシュ更新部で構造物の移動に伴ってメッシュを切り直すか、メッシュが更新されると格子点の位置が変わるため、更新前の格子点上の値から更新後の格子点の位置での値を求める必要がある。ところが、CIP法を使えば、これは移流項を解くことによって自動的に行われることが分かる。まず、構造物の移動に伴い、新たに二次元のメッシュが切れ、時刻  $n$  から  $n+1$  になって図5の(a)から(b)になったとする。上で説明したように、移流は  $c\Delta t$  上流の位置における値を使うということであるので、時刻  $n+1$  の図の(b)の格子点  $i, j$  での値は、時刻  $n$  すなわち図の(a)における点Aにおける値を周囲の格子点からの補間によって求めればよい。

#### 4. テスタークシミュレーション

前章までに述べた方法によって計算を行っていくが、その計算手順について図6に示す。まず、電極やピストンなどの位置の移動から始め、メッシュの更新、CIP法による移流項の計算、電界分布の計算、非移流項の計算、結果出力を行って、1回の時間ステップが終了し先頭に戻る。

この計算手順に従ってガス遮断器消弧室のテスタークシミュレーションを行った例を図7に示す。この図は温度分布を示したものであるが、この図から、電極間に発生したアークから高温のガス流が下流へ流れていることや、パuffaにアークからの熱流入があることをとらえていることが分かる。

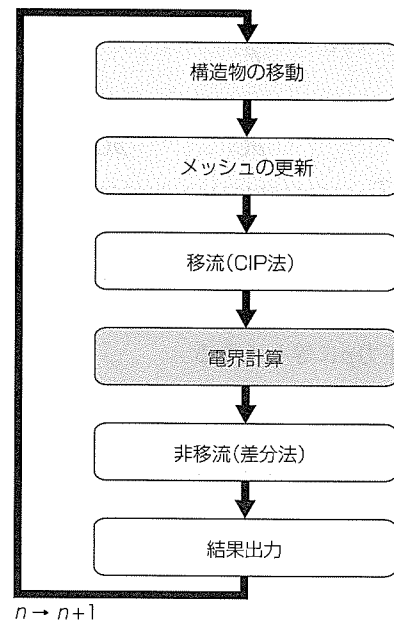


図6. 計算手順

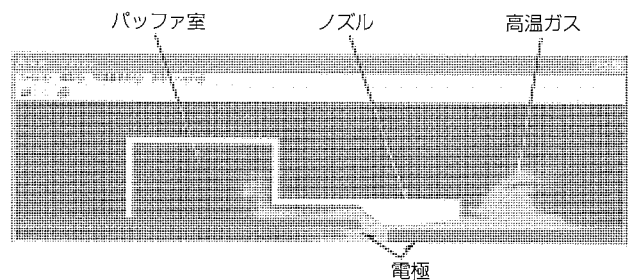


図7. テスタークシミュレーション例

### 5. む す び

以上、ガス遮断器のアークシミュレーション技術について述べた。ガス遮断器の試験には大規模な試験設備が必要であることやアークが高温であるため実験計測が非常に困難であることから、今後、ガス遮断器のシミュレーション技術はより重要性を増すと考えられる。

#### 参 考 文 献

- (1) Yabe, T., et al.: A Universal Solver for Hyperbolic Equations by Cubic-Polynomial Interpolation, Comput. Phys. Comm., **66**, 219~242 (1991)
- (2) Xiao, F., et al.: Constructing Oscillation Preventing Scheme for the Advection Equation by a Rational Function, Comput. Phys. Comm., **93**, 1~12 (1996)

# GIS用厚膜複合絶縁技術

井波 潔\* 大塚卓弥\*  
 吉村 学† 永尾栄一\*\*  
 清水芳則\* 羽馬洋之\*\*\*

Hybrid Insulation Techniques Applying Thick Dielectric-Layered Electrode for Gas Insulated Switchgear  
 Kiyoshi Inami, Manabu Yoshimura, Yoshinori Shimizu, Takuya Otsuka, Eiichi Nagao, Hiroyuki Hama

## 要 旨

SF<sub>6</sub>ガスは、GIS(Gas Insulated Switchgear)などの高電圧ガス絶縁開閉装置に適用され、機器の高信頼度化とコンパクト化を実現してきた。しかし、今後更なるコンパクト化とこれによるコスト低減を進めるには、絶縁方式の改良が必要である。また、SF<sub>6</sub>は温暖化係数の高いガスであることから、環境対策として脱SF<sub>6</sub>化を進めるためにCO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>などの環境低負荷ガスを適用する場合、絶縁性能がSF<sub>6</sub>より低いことから、代替ガスのみでは電界基準を下げざるをえず、機器サイズが大きくなる。

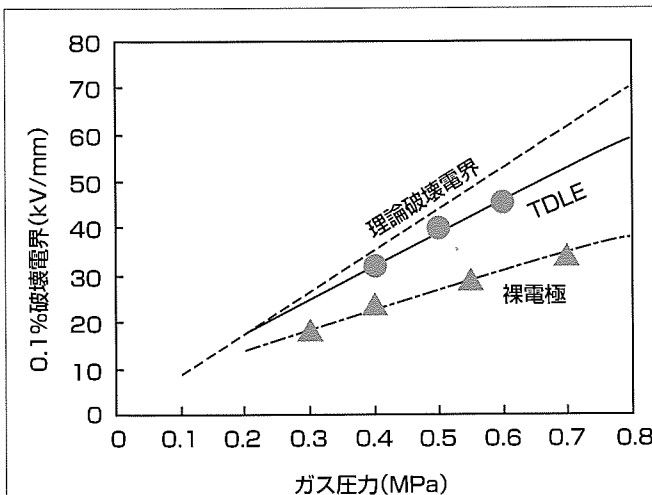
このように、今後GISの大幅なコンパクト化や脱SF<sub>6</sub>化を進めるためには、固体との複合絶縁など新たな絶縁方式が必要となる。その一環として、三菱電機では、SF<sub>6</sub>ガスと厚膜誘電体被覆電極(Thick Dielectric-Layered Electrode: TDLE)との複合絶縁システムを対象に、高ガス圧力領域までの絶縁特性を調査してきている。厚膜誘電体を被覆することにより、①金属電極の面積効果による破壊電界低下の抑制、②電極系ガス空間最大電界の低減が期待でき、機器のコンパクト化を図ることが可能となる。

絶縁設計の基準となるTDLEでのSF<sub>6</sub>ガスの雷インパル

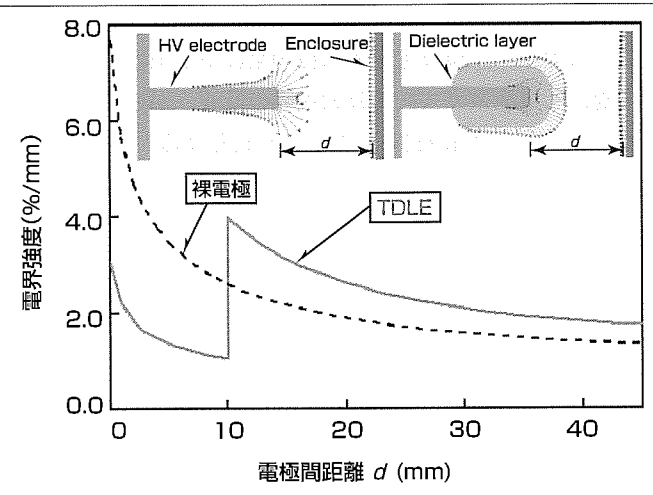
ス電圧破壊特性を実用規模の電極面積で求めた結果、破壊電界は理論値の90%にまで達し、ガス圧0.6MPa(絶対圧)では金属地肌電極(裸電極)の1.5倍程度に上昇することが明らかとなった(左下図)。TDLEは、高ガス圧領域ほど効果が大きく、高ガス圧のGISにより適していると言える。また、厚膜誘電体層を設けることにより高圧電極表面の電界が低下し、さらに、ガス側誘電体層表面の電界も裸電極に比べ大きく低減させる効果が得られる(右下図)。このように、TDLEは、ガス中電極表面電界の設計基準を大きく上昇させることが可能である。

一方、開閉機器の繰り返し放電が生じる部位への適用には、放電による誘電体層の絶縁劣化特性の把握が重要となる。今回、誘電体表面については、適切な充填(じゅうてん)材の選定により劣化を防ぐことが可能であり、誘電体層の貫通破壊については、放電回数と貫通破壊電界特性を得ることにより設計基準を設定できることが分かった。

以上のように、TDLEは、GISの様々な部位への適用が可能であり、大幅な機器のコンパクト化を達成できることが期待される。



SF<sub>6</sub>ガスの雷インパルス破壊電界  
 厚膜誘電体被覆電極(TDLE)と裸電極との比較



厚膜誘電体被覆による電極表面電界の低減と  
 電極間の電界分布

## 厚膜複合絶縁方式による絶縁破壊電界向上と最大電界低減効果

電極に厚膜誘電体を被覆することにより雷インパルス破壊電界は理論値の90%にまで達し、ガス圧依存性が裸電極に比べて大きいため、高ガス圧ほど裸電極に対する破壊電界の向上が大きくなる(左図)。また、被覆誘電体を厚くすることで段絶縁効果による電極表面の電界を低減することができる(右図)。このような絶縁方式をGISに適用することにより、大幅なコンパクト化が可能となる。

1. ま え が き

SF<sub>6</sub>ガスは、1960年代から電力機器の絶縁媒体として適用されて以来、GISなどの高電圧ガス絶縁開閉装置の高信頼度化とコンパクト化を達成してきた。しかし、今後更なるコンパクト化とこれによるコスト低減を進めるためには、従来の延長線上の技術では困難であり、絶縁方式の改良が必要である。また、SF<sub>6</sub>は温暖化係数の高いガスであることから、環境対策として脱SF<sub>6</sub>化を進めるためにCO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>などの環境低負荷ガスを適用する場合、絶縁性能はSF<sub>6</sub>より低いことから、代替ガスのみでは電界基準を下げざるをえず、機器サイズが大きくなる。

このように、今後GISの大幅なコンパクト化や脱SF<sub>6</sub>化を進めるためには、新たな絶縁方式が必要であり、固体との複合絶縁などが考えられる。その一手法として電極への誘電体コーティングが知られているが、現状の電極面積が実器規模の領域では、面積効果による破壊電界の低下を十分改善するには至っていない。

一方、配電クラスでは、既に固体バリア絶縁と低ガス圧力乾燥空気との複合絶縁による脱SF<sub>6</sub>ガス開閉装置が実用化されており<sup>(1)</sup>、また、0.2MPa(絶対圧、以下同様)以下の低ガス圧力SF<sub>6</sub>のエポキシモールド電極での破壊特性などが報告されている<sup>(2)</sup>。しかしながら、特別高圧以上のGISに適用するためには、より高ガス圧力領域の絶縁破壊特性が必要となるが、その報告例はほとんどない。

このような背景から、当社では、GISの更なるコンパクト化を進めるため、SF<sub>6</sub>ガスと厚膜誘電体被覆電極(TDLE)との複合絶縁システムを用い、高ガス圧力領域までの絶縁特性を調査してきている<sup>(3)</sup>。厚膜誘電体を被覆することにより、①金属電極の面積効果による破壊電界低下の抑制、②電極系ガス空間最大電界の低減、が期待でき、機器のコンパクト化を図ることが可能となる。さらに、GISを小型化することは、環境対策としてSF<sub>6</sub>使用量削減による漏洩(ろうえい)低減の効果がある。

本稿では、絶縁設計の基準となるTDLEの雷インパルス電圧破壊特性と、適用時に配慮が必要となる繰返し放電による絶縁劣化特性及び適用例について述べる。

2. TDLEによるSF<sub>6</sub>ガスの絶縁破壊特性

2.1 試験方法

図1に今回用いた試験電極とその構成を示す。同図(a)は長さ5,200mm、直径340mmの実母線内に円板状のTDLEを同軸状に複数個設置しており(タイプ1)、同図(b)は棒対平板電極(タイプ2)で、各電極は比誘電率4.0のエポキシ樹脂でモールドされている。タイプ1のTDLEは幅30mm、直径270mm、最小樹脂厚さが10mm、タイプ2は直径4mmの半球棒先端の樹脂厚さが2mm、3.5mm、5mmで

あり、平板電極とのギャップ長は3.6mmから7.7mm可変である。また、同図(c)はTDLEとの比較のための裸電極の構成であり、直径240mm、幅100mmのアルミニウム合金製の電極を同図(a)と同じ母線内に複数個設置している。タイプ1の電極と裸電極の場合、その個数を1個から12個まで変化させることにより破壊電界の実効面積効果を求めることができる。なお、両電極の電界利用率は実器とほぼ同じ0.6であり、タイプ2の電極は0.61から0.81まで可変である。

試験は、TDLEの場合のガス圧力は0.4MPaから0.6MPa、裸電極の場合のガス圧力は0.3MPaから0.7MPaの間で、負極性雷インパルス電圧による破壊電圧を求めた。

2.2 TDLEと裸電極との破壊特性の比較

図2に、最低破壊電界(0.1%破壊電界)の電極実効面積依存性を示す。最低破壊電界は、両電極とも実効面積増大に伴い徐々に減少し次第に一定値に漸近するが、理論破壊

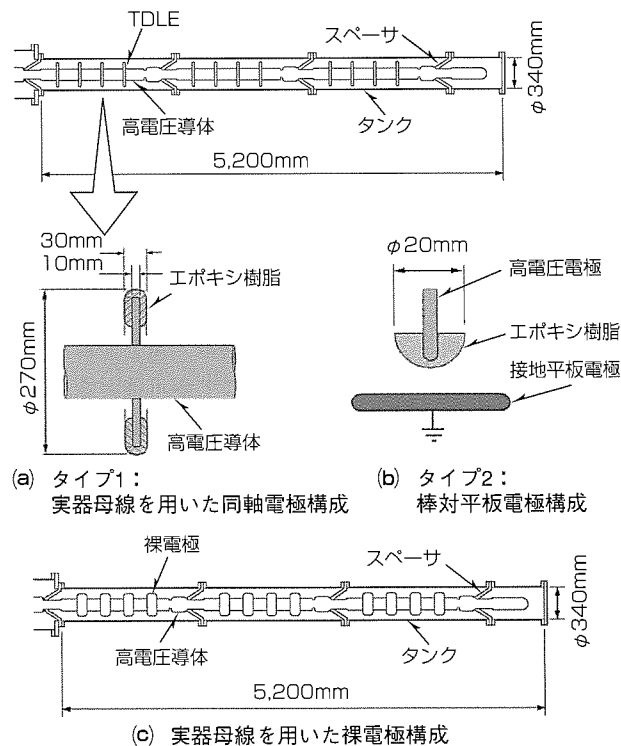


図1. 試験に用いた各電極形状と構成

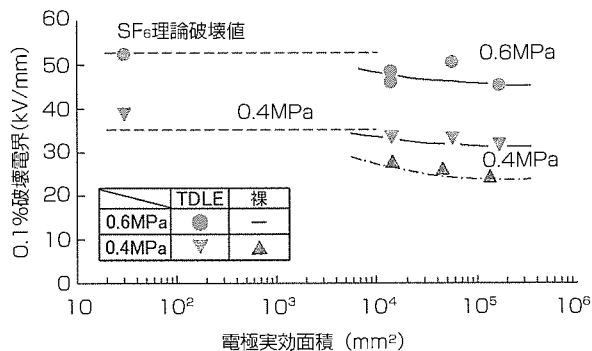


図2. 最低破壊電界の電極実効面積依存性

電界に対するTDLEの減少率は裸電極に比べかなり小さい。

最低破壊電界のガス圧力依存性を図3に示す。図のように、TDLEの方が0.6MPaまでより高いガス圧力依存性を示しており、SF<sub>6</sub>ガスの理論破壊電界の90%程度にまで達し、0.6MPaでは裸電極の1.5倍となっている。このように、TDLEは高ガス圧領域でより有効である。

破壊電界の面積効果は電極表面の微小突起によると考えられているが、現状の数μmレベルの誘電体コーティングでは、通常の微小突起は完全に覆われているにもかかわらず、面積効果の抑制効果はそれほど大きくはない。しかしながら、今回のTDLEのように数mmオーダーの誘電体層にすることにより、面積効果は十分抑制されることが分かる。これらの現象が生じる理由については、より詳細に調査する必要がある。

### 3. TDLEの繰返し放電による破壊特性と貫通破壊特性

高電圧開閉装置において、繰返し放電が発生する部位に適用する場合には、誘電体層表面が劣化しないことが必要である。図4はタイプ2のTDLEのガスギャップで放電したときの様子を示している。誘電体層表面の放電路が高圧電極に達するまでのサブμsの間、高圧電極と誘電体層間に100%の電圧が加わることとなり、その状態を模擬した

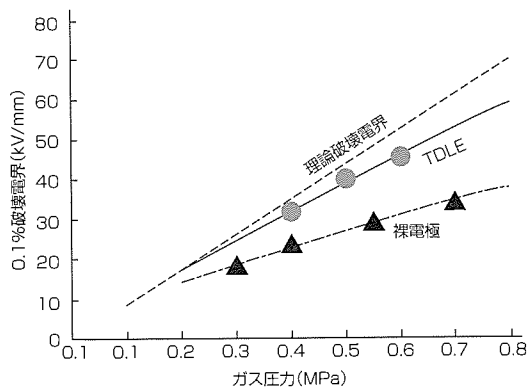


図3. 最低破壊電界のガス圧力依存性

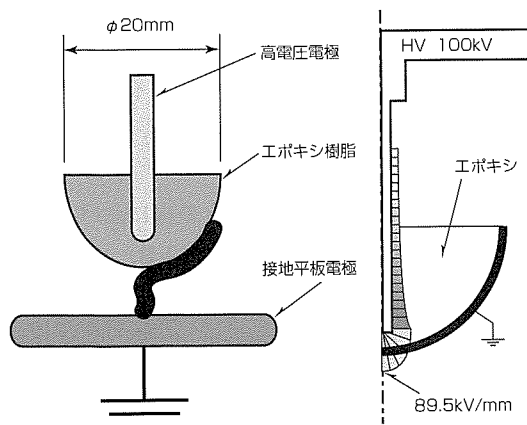


図4. タイプ2の電極でのガスギャップ放電経路と電界

電界計算の結果を同図に示す。図のように埋め込み電極先端の電界は非常に高くなるため、繰返し放電に対しては貫通破壊特性の把握も重要となる。

### 3.1 TDLE表面の破壊特性

図5にタイプ2のTDLEによるガスギャップ破壊電界の回数依存性を示す。充填材が入っていない樹脂の場合100回程度以降回数の増加に伴い破壊電界が低下するが、適切な充填材を入れると破壊電界の低下は見られなくなる。このように、充填材は沿面放電の繰返しによるエポキシ樹脂表面の劣化を防ぐのにも有効であり、高電圧開閉機器への適用には充填材の選定が重要となる。

### 3.2 絶縁層の貫通破壊特性

図6はタイプ2の電極におけるガスギャップ繰返し放電による絶縁層の貫通破壊電界の回数依存性であり、充填材の有無について比較したものである。貫通破壊電界は高圧埋め込み電極の電界である。図のように、貫通破壊電とガスギャップの放電回数*N*との関係は、次式の逆*n*乗則で表され、貫通破壊に関しては、充填材の影響がほとんど見られない。

$$E \propto N^{-1/n} \dots \dots \dots (1)$$

図7は各種電極形状について貫通破壊電界の回数依存性

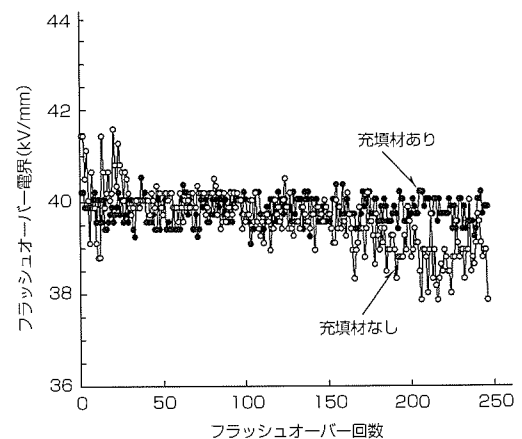


図5. ガスギャップ破壊電界の回数依存性

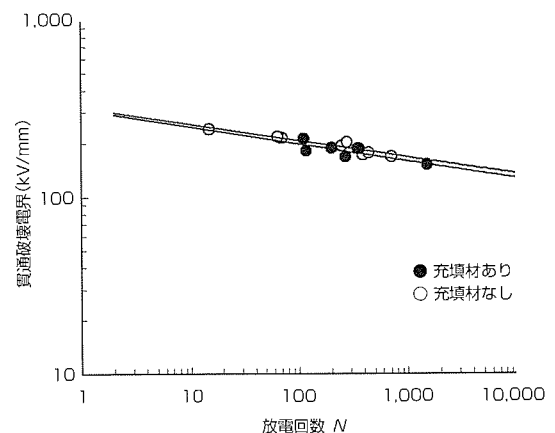


図6. 絶縁層貫通破壊のガスギャップ放電回数依存性

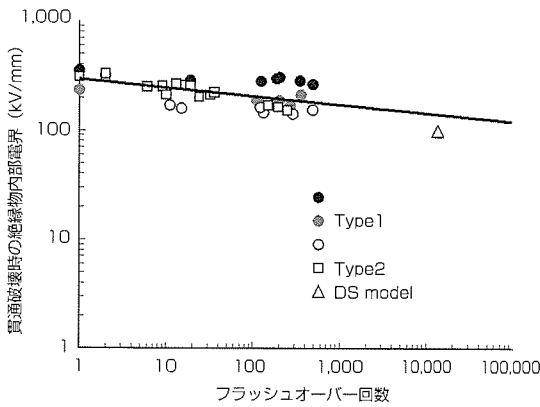


図7. 種々の電極形状における貫通破壊電界のガスギャップ放電回数依存性

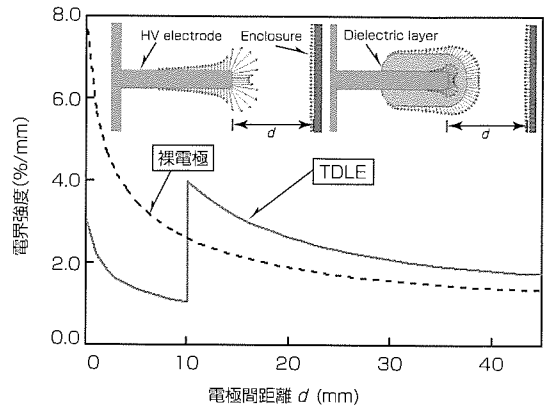


図8. タイプ1における電界分布と最大電界の低減

を求め、整理したものである。タイプ2の電極では、高圧埋め込み電極の直径を2, 4, 6 mmに変化させている。いずれの電極においても、回数の増加に伴う貫通破壊電界の低下の傾向は同様で、式(1)における $n$ 値は約13となる。

このように、TDLEの繰返し放電による絶縁層の貫通破壊電界は電極形状や構成によらず高圧埋め込み電極の電界で整理することができ、設計電界を決めることができる。

#### 4. TDLEの効果と開閉機器への適用

以上のように、エポキシ樹脂を高圧電極に厚膜被覆することで電極面積効果が抑制され、破壊電界はSF<sub>6</sub>ガスの理論破壊電界の90%にまで達する。そして、その効果は高ガス圧領域まで得られ、高ガス圧ほど効果が大きいことが分かる。

一方、厚膜の誘電体を被覆することにより、電極表面の最大電界を低下させる効果も得られる。図8にタイプ1の電極における電界分布を示す。図のように、厚さ10mmの誘電体を被覆することにより、高圧埋め込み電極先端の電界は低下し、誘電体被覆表面の電界も被覆しない場合の最大電界の約1/2にまで低下することが分かる。このように、ある程度不平等な電界構成に対する最大電界低減の効果が期待できる。

以下に、TDLEのこれらの利点を生かすGISへの適用例について述べる。図9に300kV GISの断路器(Disconnecting Switch: DS)に適用した場合の効果を示す。現行のDSは極間シールド電極の電界を低減するため大きな曲率を持っており直径が大きい。裸電極のまま極間シールド直径を小さくするには、極間距離を大きくする必要がある。一方、TDLEを可動側シールドのみに適用した場合、極間距離を変えずにシールド直径を74%に縮小でき、さらに、固定側シールドに適用すれば、両シールド直径を65%、極間距離を50%に縮小することができる。

このように、TDLEを適用することにより、GISの大幅なコンパクト化が可能になる。

DS (金属電極で構成)		DS (TDLEで構成)	
金属-金属(大口径)	金属-金属(小口径)	金属-TDLE	TDLE-TDLE
100%	74%	74%	65%
100%	11.5%	100%	65%
74%	74%	65%	65%

図9. 300kV GIS用DSにTDLEを適用した場合の例

#### 5. むすび

厚膜誘電体被覆電極とガスの複合絶縁方式によりガスの絶縁破壊電界を大幅に上昇させることができ、その効果は高ガス圧領域でより大きくなる。さらに、電極表面電界の低減も可能である。また、厚膜誘電体被覆電極の繰返し放電による破壊特性や誘電体層の貫通破壊現象についても基礎特性を得て、絶縁設計基準の構築が可能となった。

今後、この複合絶縁方式をGISに適用することにより、大幅なコンパクト化を図ることが可能である。さらに、環境対策としてSF<sub>6</sub>使用量削減による漏洩低減やGISの脱SF<sub>6</sub>ガス化を進めるためにも、有効な技術と考えられる。

#### 参考文献

- (1) 有岡正博, ほか: 24kV低ガス圧ドライエア絶縁スイッチギヤ“HS-X”, 三菱電機技報, 79, No.12, 795~798 (2005)
- (2) 吉田哲雄, ほか: SF<sub>6</sub>ガス中複合絶縁における耐電圧向上の検討, 電気学会論文誌B 110-B, No.4, 348~356 (1990)
- (3) Hama, H., et al.: Improvement of SF<sub>6</sub> Gas Insulation System by Applying Thick Dielectric-layered Electrode and its Application to High Voltage Equipment, Gaseous Dielectrics X, 319 (2004)



# 電磁波モードを利用した GIS中部分放電源の同定技術

吉村 学\* 岡部成光†  
 武藤浩隆\*\* 金子周平††  
 亀井光仁\*\*\*

Technique of Location Identification of Partial Discharge by Electromagnetic Wave in GIS

Manabu Yoshimura, Hirotaka Muto, Mitsuhito Kamei, Shigemitsu Okabe, Syuhei Kaneko

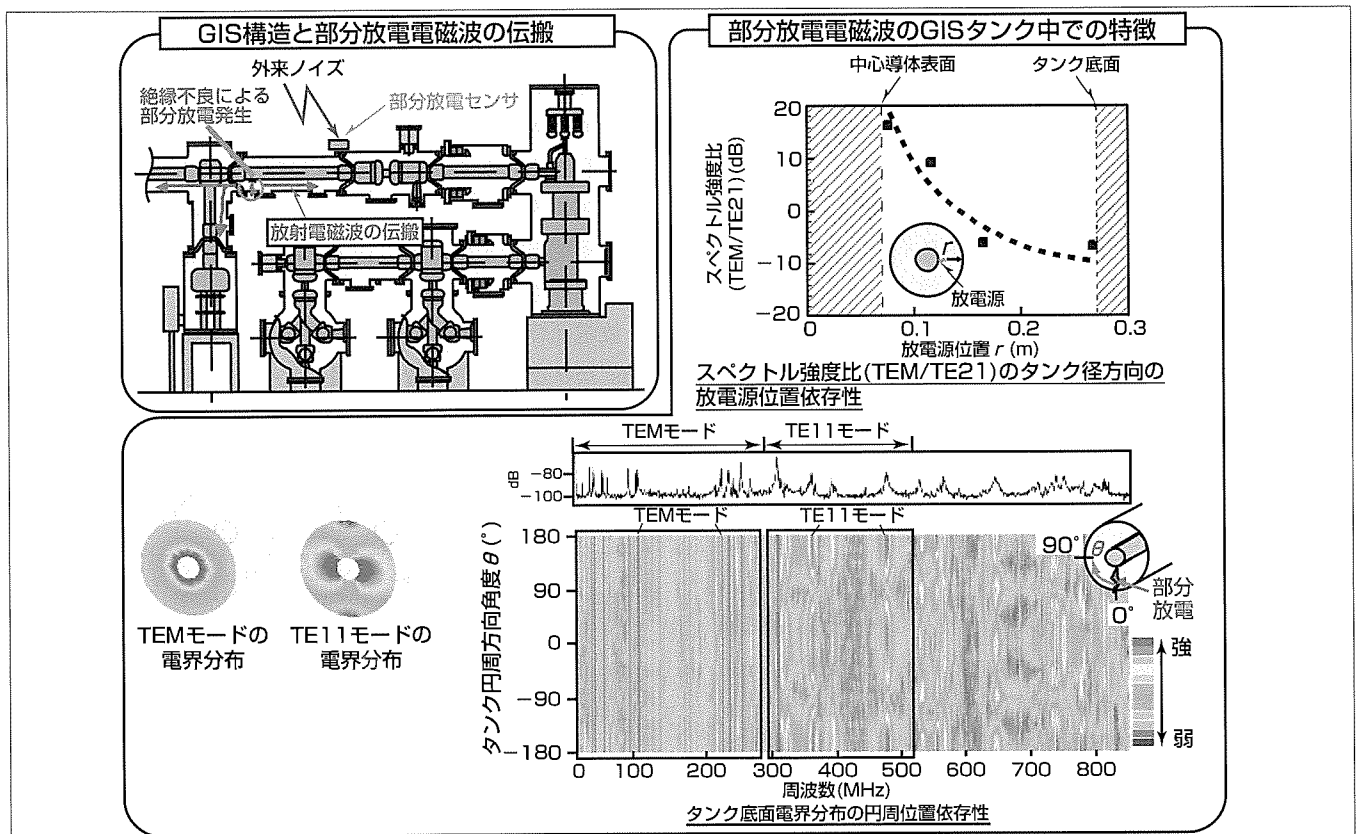
## 要 旨

国内外の送変電所に設置されているガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear : GIS) は、高電圧印加下での長期間の連続運転を要求される。設置後30年以上経過した高経年機器の増加に伴い、絶縁破壊事故を未然に防ぐために、早期に絶縁異常を発見することが重要となっている。絶縁異常を検出する方法として、絶縁破壊の前駆現象である部分放電によって発生する電磁波、音、熱、分解ガス等の物理・化学現象を利用する様々な方法があるが、電磁波検出方法は、検出感度、実時間性の点から有用な方法と考えられている。しかし、GISタンクのような同軸円筒構造の中では、電磁波はモードと呼ばれる固有の電磁界分布を持つ状態で伝搬する。電磁波を利用した部分放電検出の高

度化のためには、GISタンク内でのモードごとの電磁波伝搬特性を明らかにすることが必要である。

本稿では、相分離タイプのGIS母線内での電磁波伝搬特性を示すとともに、電磁波モードの特性を利用した部分放電源の位置同定技術について述べる。また、理論解析が不可能なL字屈折部やT分岐部に関しては、シミュレーションにより得られた電磁波伝搬特性を示す。

開発した技術では、これまで不可能であったGIS母線円周方向位置とタンク径方向位置を知ることができる。GISの絶縁破壊の予兆として検出される部分放電発生位置情報は絶縁破壊リスクの判断に重要な情報であるため、この技術の適用により絶縁診断の高度化が図れると考えられる。



## GIS構造と部分放電の伝搬と部分放電電磁波のGIS中での特徴

GIS中で発生した部分放電による電磁波が伝搬する様子とGISタンク内で励起される放電電磁波の電界分布の特徴を示す。

1. ま え が き

ガス絶縁開閉装置(GIS)は、高電圧印加下での長期間の連続運転を要求される。設置後30年を経過したいわゆる高経年機器の増加に伴い、事故を未然に防ぐために、絶縁異常を早期に発見する必要性が高まっている。絶縁異常の兆候を発見する方法として、絶縁破壊の前駆現象である部分放電を検出する方法が有効である。放電により放射されるVHF-UHF(Very High Frequency-Ultra High Frequency)帯の周波数帯域の電磁波を利用するUHF法<sup>(1)</sup>が、高感度の検出法として期待されている。

三菱電機では、UHF法による部分放電監視技術の高度化を目的として、GIS内における電磁波の伝搬特性をマイクロ波導波管理論と電磁波シミュレーションにより明らかにしてきた。これらの結果をGISにおける部分放電センサの適切な配置や検出周波数の選定に活用するとともに、検出信号から放電源位置に関する情報を得るための技術開発を進めてきた<sup>(2)</sup>。

本稿では、GISタンク内での電磁波伝搬特性を示すとともに、同軸円筒構造に特有の電磁波伝搬特性を利用した高度な部分放電源の位置検出技術について述べる。また、実器GISタンクを想定し、理論解析が困難なく曲がり部位の伝搬特性については電磁界シミュレーションにより明らかにする。

2. GIS中電磁波モードの特徴と放電源位置同定技術

2.1 GIS中電磁波モードの特徴<sup>(2)</sup>

GIS中の部分放電源から放射される電磁波は、金属であるGISタンク内部を伝搬する。相分離タイプのGIS母線は、高圧導体とタンクが同軸円筒形状をしているので、電磁波伝搬特性の検討には導波管理論が適用できる<sup>(3)</sup>。導波管では、電磁波の進行方向に垂直な二次元断面形状で規定されるモードと呼ばれる特定の電磁界分布を持つ電磁波のみが伝搬できる。それらは、あらゆる周波数で伝搬するTEM(Transverse ElectroMagnetic)モード、モードごとに規定される遮断周波数以上で伝搬するTE<sub>m</sub>nモード( $m, n=1, 2, 3, \dots$ )とTM<sub>m</sub>nモード( $m=0, 1, 2, \dots, n=1, 2, 3, \dots$ )の3種類に分類できる。TEMモードの電界分布は静電界と同じ分布であり、円周方向角度( $\theta$ )依存性を持たない。一方、TE<sub>m</sub>nモードの電界分布は $\cos m\theta$ 、TM<sub>m</sub>nモードは $\sin m\theta$ なる角度依存性を持つ。したがって、遮断周波数と円周方向( $\theta$ 方向)の電界分布が分かれば、観測された周波数スペクトルの個々のピークがどのモードであるかを知ることができる。部分放電によって検出された周波数スペクトルピークのモードを知るために、タンク円周方向の電界強度分布の周波数依存性を測定したのが図1である。図中(a)は放電源を中心導体側に、(b)はタンク底面側に設置

した場合の特性である。放電源を設置した位置をタンク円周方向の基準位置としている( $\theta=0^\circ$ )。図の(a)では、0MHzからTE<sub>11</sub>モードの遮断周波数(288MHz)の領域に複数本のピークが見られ、 $\theta$ 依存性がないことから、TEMモードであることが分かる。288MHz以上ではスペクトルピークに $\theta$ 依存性が見られ、TEモードの電磁波が発生していることが分かる。例えば、288MHzとTE<sub>21</sub>モード遮断周波数(524MHz)の間には、タンク円周方向に強度の山(色の濃い部分)が二つ確認でき、TE<sub>11</sub>モードであることを示している。さらに、TE<sub>11</sub>モードは放電源の位置である $\theta=0^\circ$ と $\theta=180^\circ$ の位置に電磁波強度が強くなるのが分かる。また、524MHz以上では強度の山が4つ現れておりTE<sub>21</sub>モードであることが分かる。

次に、放電源のタンク径方向位置に依存してモードの強度がどのように変化するかを調べるために、放電源を中心導体側に設置した(a)とタンク底面側に設置した(b)を比較する。図の(b)に示したタンク底面側放電では、0~288MHzのTEMモードのスペクトルピークが(a)に比較するとかなり弱い。また、288MHzと524MHzに観測されるTE<sub>11</sub>モードもかなり弱い。さらに、タンク底面側放電では、中心導体側では観測されていないTE<sub>41</sub>モードが950MHz付近に強く現れている。このように、径方向の放電源位置によって、モードごとの相対的な強度が異なることが分かる。

2.2 放電源位置同定の基本的考え方

前節で述べたように同軸導波管内の電磁波は円周方向と径方向に固有の電界分布を持ち、その強度は放電源の位置に依存する。したがって、電磁波モードごとの電界強度分布を利用すれば、放電源の位置が推定できる。この節では、放電源位置推定のための基本的考え方を述べる。

(1) 円周方向位置

放電源位置との相対的な角度 $\theta$ に依存して、電界強度は $\cos m\theta$ なる分布を持つ。図1はそれを実験的に示している。TE<sub>11</sub>モード以上の高次モードに着目すれば、タンク底面に放電源があれば、タンク底面側の電界が強くなり、

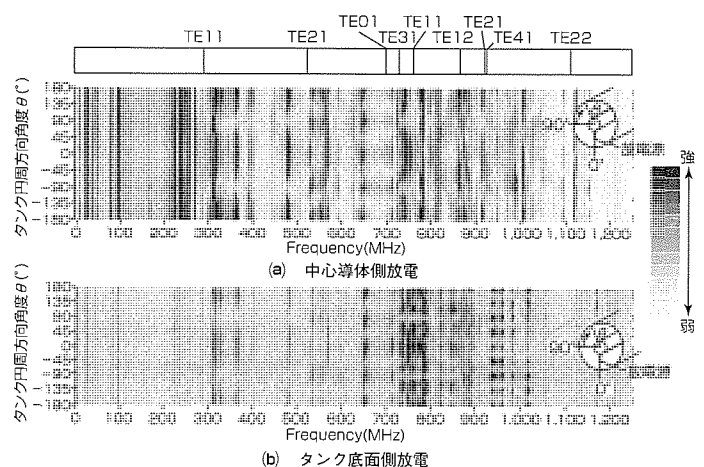


図1. タンク底面電界分布の円周位置依存性

放電源の円周方向位置を知ることができる。ただし、TE11モードを利用した場合その強度分布は180度対称となるので、2か所が可能性のある位置として導き出される。

(2) タンク径方向位置

図1で示したように中心導体上の放電とタンク底面上の放電は各モードの相対的な強度が異なる。その径方向依存性は導波管理論に基づく各モードの電界分布から導出できる。しかし、スペクトル強度の絶対値は放電源の種類や課電電界により変化するので、その絶対値から径方向の位置を推定することはできない。これを解決するため、我々は、モード間の強度の比をとることで放電源位置を推定する方法を提案している。

図2に、一例として、実測によるTEMモードとTE21モードのスペクトル強度比のタンク径方向位置依存性を示した。放電源位置がタンクに近いほど強度比が小さくなっており、タンク径方向の放電源位置が推定できることが分かる。

3. L字屈折, T分岐タンクでの電磁波伝搬特性<sup>(4)(5)</sup>

前章では、同軸円筒形状のGISタンクを伝搬する電磁波には多くのモードが存在し、その特徴が理論的に推定できることを述べた。しかし、実際のGIS母線は90°屈折や、分岐する形状があり、このような形状では理論的な電磁波分布の導出が困難であるため、電磁波シミュレーション技術を利用し、各モードの電磁波伝搬特性を明らかにした。

図3と図4はL字屈折, T分岐形状の伝搬によりどのように電界分布が変化するかをシミュレーションした結果である。TE11モードをPort1から入力し、Port2, Port3での電界分布を示した。TE11モードには円周方向に直角の2つのモードが存在することから、水平と垂直の2つのモードを入力した場合の伝搬特性をそれぞれ示している。

L字タンクでは水平方向のTE11モードを入力した場合(図3(a)), 屈折部での反射が強く、入力側タンク内で共振が強く現れている。L字屈折部透過後の電界分布であるPort2では円周方向の変動が小さく、TEMモードに変換されていることが分かる。一方、垂直方向のTE11モードを入力した場合(図3(b))は、水平方向の場合と異なり、透

過後はモード変換することなく、同じ垂直方向のTE11モードが伝搬していることが分かる。

T分岐タンクで水平方向のTE11モードを入力した場合、図4(a)に示したように、分岐部での反射が強く入力側で共振が強く現れており、L字部の場合と同様となっている。また、直進方向のPort2では水平方向のモードがそのまま透過し、屈折方向のPort3ではTE11モードが少し弱まりTEMモードへの変化が見える。一方、垂直方向にTE11モードを入力した場合(図4(b))は、水平方向入力の場合と異なり、直進方向、屈折方向どちらへも、透過後はモード変換することなく、同じ垂直方向のTE11モードが伝搬していることが分かる。

以上の電界分布に見られるモード変換の様子を定量化するために、Sパラメータ強度(S12, S13)を表1に示した。解析周波数は400MHzの場合である。水平方向入力の場合、L字屈折方向には92%がTEMモードに、T分岐の場合には57%がTEMモードに変換することが分かる。また、垂直方向入力では、L字屈折方向には94%がTE11モードのまま反射することなく透過し、T分岐の場合には60%がTE11モードのまま伝搬することが分かる。

前節で述べたモードごとの電界分布は、直管状の場合に成立する議論である。L字部やT分岐部を透過後の信号から放電源位置を判断する場合は、これらの電磁波シミュレーションに基づくモード変換の特徴を考慮する必要がある。

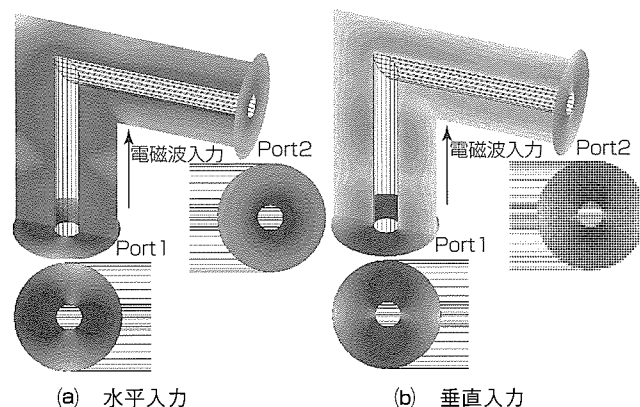


図3. L字タンクの電界分布

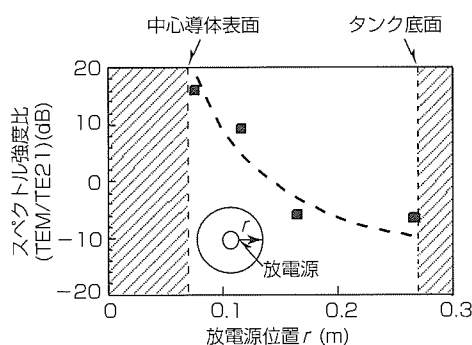


図2. スペクトル強度比(TEM/TE21)の放電源位置依存性

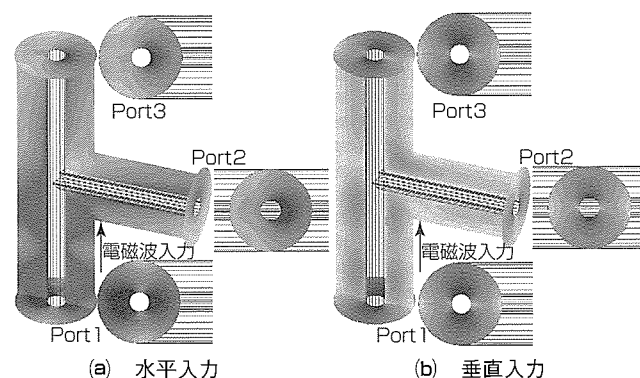


図4. T分岐タンクの電界分布

表1. 出力側Sパラメータ強度(S12, S13)

Port1入力		Port2		
		TEM	TE11(0°)	TE11(90°)
L字	TE11(水平)	0.92	0.09	0.08
	TE11(垂直)	0.07	0	0.94
T分岐	TE11(水平)	0.57	0.47	0
	TE11(垂直)	0	0	0.60
	Port3			
	TE11(水平)	0.4	0.36	0
	TE11(垂直)	0	0	0.75

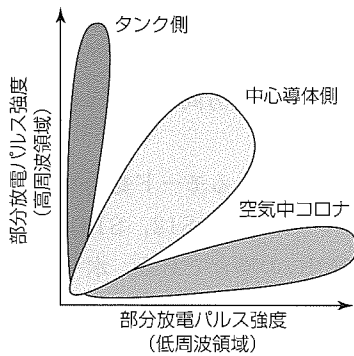


図5. 2周波帯域相関法概念

#### 4. 放電源位置同定のための信号処理<sup>(6)</sup>

放電源の円周方向位置を知るには、TE11モードの周波数帯域に絞ってGISタンク円周方向の電界分布を調べればよい。一方、径方向の位置を知るには、周波数スペクトル強度に関する情報が必要である。保守監視現場で周波数スペクトルを観測することは、装置構成や判定手順が煩雑となり、現実には困難である。この問題を解決するために、比較的簡単な装置構成で周波数スペクトルの特徴を抽出し、取得したデータの判定が容易な手法として2周波数帯域相関法を開発した。この方法は、当社発電機の部分放電診断装置においてノイズ分離方法として実用化した方法である<sup>(7)</sup>。

図5に、この方法の概念図を示した。部分放電源の位置や種類により周波数スペクトルが異なる点に着目し、周波数スペクトルの特徴を2つの周波数に代表させ、低周波軸と高周波軸及び頻度軸における三次元パターンから放電源を識別する方法である。部分放電1事象ごとに低周波成分と高周波成分を抽出し、統計的な分布として比較する方法である。

図6は、GIS中部分放電を2周波相関法により実測したデータの例である。抽出する周波数帯域として2章での電磁波モードの分析に基づき、①TEMモードのみが伝搬できる帯域：250±40MHz、②高次モードが伝搬できる帯域：950±40MHzの2つの周波数帯域を選定した。図(a)は中心導体表面上の部分放電特性で、250MHz帯域成分と950MHz帯域成分は同程度の強度であり、ほぼ45°の傾きで分布している。一方、(b)に示したタンク底面上の部分放電では、250MHzの成分はほとんど0で、分布の傾きがほぼ90°となっている。この例のように、2周波帯域相関法

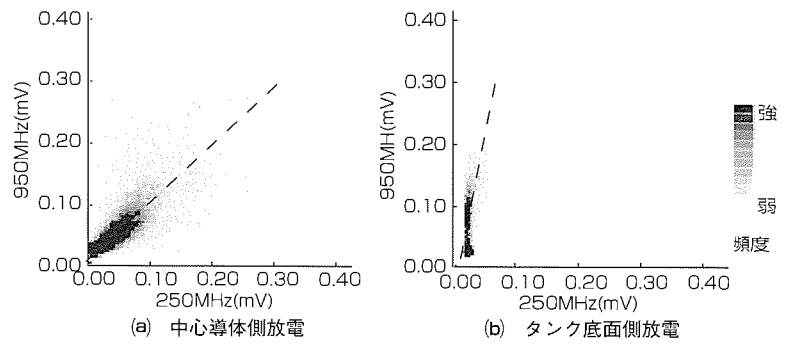


図6. 2周波相関法による放電源位置の分離同定

によれば、周波数領域での特徴が2周波相関分布の傾きとして簡単に抽出できる。図2で示したように、中心導体とタンク底面の中間位置に放電源があれば、この中間の傾きとなることは自明である。

#### 5. むすび

GIS中の部分放電源位置同定のための基礎技術を確立した。同軸導波管内での電磁波モードごとの電磁波分布の特徴を利用する新しい方法であり、これまでの技術では不可能であったGIS母線タンク円周方向位置とタンク径方向位置を知ることができる。GISでの絶縁破壊の予兆として検出される部分放電の位置情報は絶縁破壊リスクの判断に重要な情報であるため、開発した技術の適用により絶縁診断の高度化を図ることができると考えている。今後は、実用化に向けた研究開発を行っていく予定である。

#### 参考文献

- (1) CIGRE TF15 / 33.03.05, PD Detection System for GIS : Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method, ELECTRA, No.183, 75~87 (1999)
- (2) 武藤浩隆, ほか: GIS部分放電による電磁波のモード分離と共振特性, 電気学会論文誌B, 118, No.12, 1406~1414 (1998)
- (3) 岡田文明: マイクロ波工学~基礎と応用, 学献社 (1993)
- (4) 吉村 学, ほか: GIS中電磁波モード変換へのタンク形状の影響, 平成17年度電気学会電力エネルギー大会, No.329 (2005)
- (5) Okabe, S., et al.: Simulation of Propagation Characteristics of Higher Order Mode Electromagnetic Waves in GIS, IEEE Trans. DEI to be published
- (6) 釣本崇夫, ほか: GIS中部分放電信号の二周波数帯域間相関特性, 平成10年電気学会全国大会, 6-349 (1998)
- (7) Itoh, K., et al.: New Noise Rejection Techniques on-line Partial Discharge Measurement of Turbine Generators, IEEE Trans. EC, 11, No.3, 584~594 (1996)

# 真空遮断技術と真空絶縁技術の変遷

佐藤伸治\* 小山健一\*  
 吉田友和\* 竹内敏恵\*\*\*  
 三木真一\*\*

Vacuum Interrupter and Vacuum Insulation Technology

Shinji Sato, Tomokazu Yoshida, Shinichi Miki, Kenichi Koyama, Toshie Takeuchi

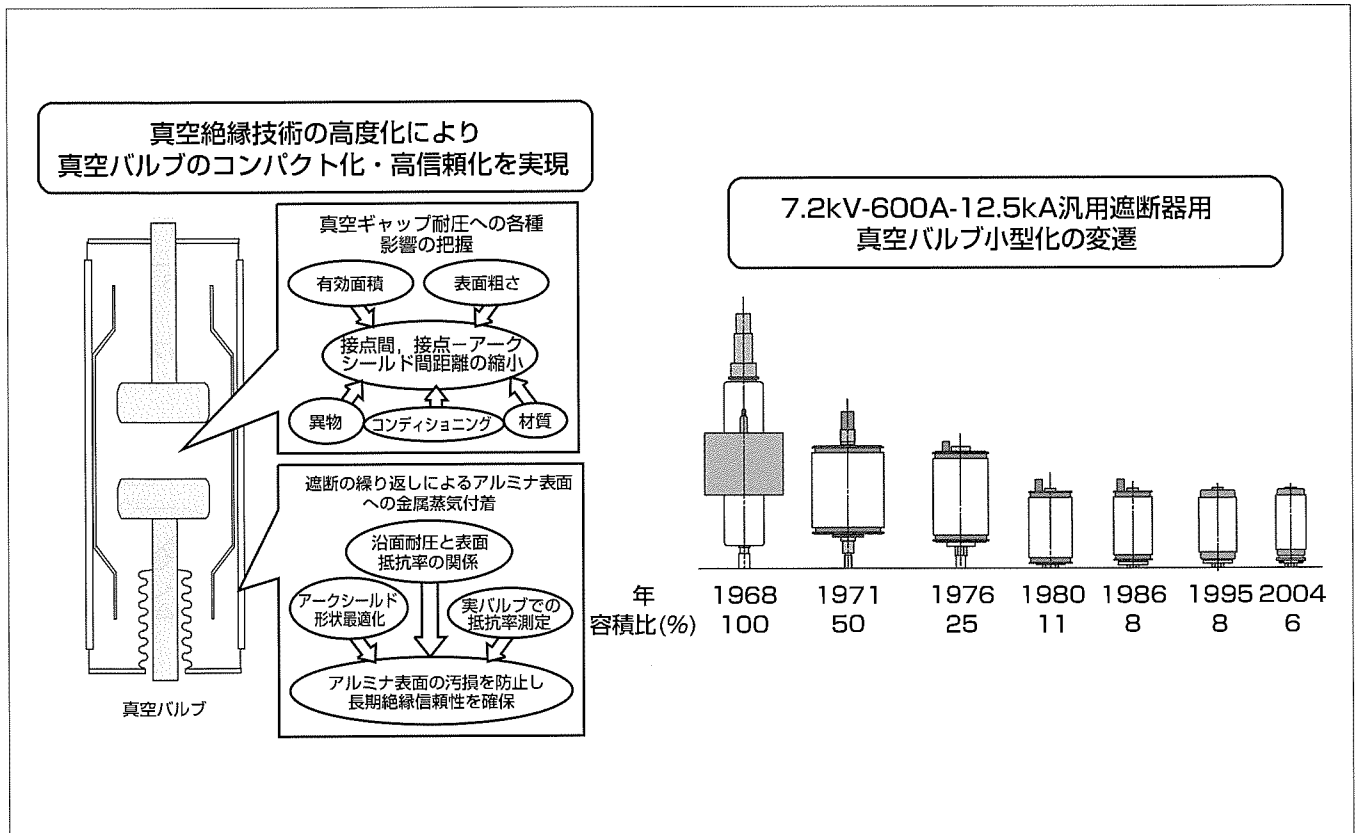
## 要旨

国内外の送配電設備及び受配電設備で用いられているキュービクル型ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)の主回路絶縁には、優れた絶縁性能と安全性を持つSF<sub>6</sub>ガスが用いられてきた。しかし、1997年の地球温暖化防止京都会議以降、SF<sub>6</sub>ガスの排出削減規制とともにSF<sub>6</sub>ガスを用いない脱SF<sub>6</sub>ガス化が望まれてきた。真空は、72kVクラス以下の領域ではSF<sub>6</sub>やオイルなど他の絶縁媒体に比べて優れた耐電圧性能と絶縁回復特性を持っているので、装置の小型化、環境負荷低減及び長寿命化の観点から、近年では、中・高電圧領域で一般的に用いられるようになってきた。このような背景により、1997年以前から三菱電機のC-GISは遮断部に真空遮断方式を適用している。

真空遮断器の消弧室である真空バルブでは、大電流通電状態から接点を開極すると接点間にアークが発生する。アークは、溶融した接点からの金属蒸気により維持され、電

流がゼロになるにつれアーク電流が減少し維持が難しくなる。最終的にアークが消滅し元の真空状態に回復することで電流の遮断が完了する。当社では、真空バルブにおける接点構造の最適化、耐アーク性や高耐圧性に優れた接点材料の開発とともに、アーク挙動や電磁界の解析技術、真空中の絶縁破壊現象の研究によって小型化を実現してきた。また、真空絶縁の基本技術開発として、真空ギャップ破壊電圧に対する接点表面粗さの影響及び破壊電界における面積効果を具体化し、さらに、遮断の繰り返しにより真空バルブセラミックの内面が汚損した場合の表面抵抗率と沿面破壊電圧の低下度を検討し、実用的な真空ギャップの信頼性技術を構築してきた。

本稿では、これら真空遮断技術及び真空絶縁技術の高度化について述べる。



## 真空絶縁技術と真空バルブの小型化

真空絶縁技術と真空バルブの小型化の変遷を示す。

## 1. ま え が き

国内外の送配電設備及び受配電設備で用いられているキュービクル型ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)の主回路絶縁には、優れた絶縁性能と安全性を持つSF<sub>6</sub>ガスが用いられてきた。しかし、1997年の地球温暖化防止京都会議以降、SF<sub>6</sub>ガスの排出削減規制とともにSF<sub>6</sub>ガスを用いない脱SF<sub>6</sub>ガス化が望まれてきた。真空は、72kVクラス以下の領域ではSF<sub>6</sub>ガスやオイルなど他の絶縁媒体に比べて優れた耐電圧性能と絶縁回復特性を持っているので、装置の小型化、環境負荷低減及び長寿命化の観点から、近年では、中・高電圧領域で一般的に用いられるようになってきた。このような背景により1997年以前から当社C-GISは遮断部に真空遮断方式を適用している。

本稿では、これら真空遮断技術と真空絶縁技術の変遷について述べる。

## 2. 真空バルブの変遷

真空は、SF<sub>6</sub>ガスやオイルなど他の絶縁媒体に比べて優れた耐電圧性能と絶縁回復特性を持っている。真空遮断の特徴は、その優れた絶縁性能から短時間で大電流を遮断することができ、他の絶縁媒体による遮断に比べてアークエネルギーが低くアーク時間も短いため高寿命を望める。これに加えて、密封容器の中で遮断や大電流通電などの動作責務が行われるため安全性に優れ、性能維持は真空監視により確認するため省メンテナンスである。これらの利点により、50年近くもの間、遮断器の消弧媒体として利用、開発が行われてきた。

真空遮断器の消弧室である真空バルブでは、大電流通電状態から接点を開極すると接点間にアークが発生する。アークは、溶融した接点からの金属蒸気により維持され、電流がゼロになるにつれアーク電流が減少し維持が難しくなる。最終的にアークが消滅し元の真空状態に回復することで電流の遮断が完了する。真空遮断器の技術開発は、この真空バルブの遮断性能の大容量化と高性能化に依存してきた。

遮断性能の向上は、図1に示す風車接点や縦磁界接点に代表される接点構造の採用、耐アーク性や高耐圧性に優れた接点材料の開発とともに、アーク挙動や電磁界の解析技術、真空中の絶縁破壊現象の研究によって実現されてきた。図2に、当社製7.2kV-600A-12.5kA汎用遮断器用真空バルブの小型化の変遷を示す。前述の技術開発の結果、36年の間で容積比にして6%にまで小型化されていることが分かる。

## 3. 真空絶縁技術

### 3.1 真空ギャップ絶縁

真空バルブには製品全体のコンパクト化などを目的に接

点間距離や真空バルブ径の縮小などが求められる。これらの縮小化は、真空ギャップの絶縁信頼性を確保しつつ実現することが重要である。ここでは、真空ギャップの絶縁性能に影響を与えている要因について述べる。

真空ギャップの破壊電圧は接点表面粗さに依存する。図3は、Cu及び接点材料であるCuCr合金の真空ギャップにおける破壊電圧と表面粗さの関係である<sup>(1)</sup>。どちらの材料でも表面粗さにより破壊電圧は大きく変化し、表面粗さが真空バルブの絶縁設計において重要な管理項目の一つであ

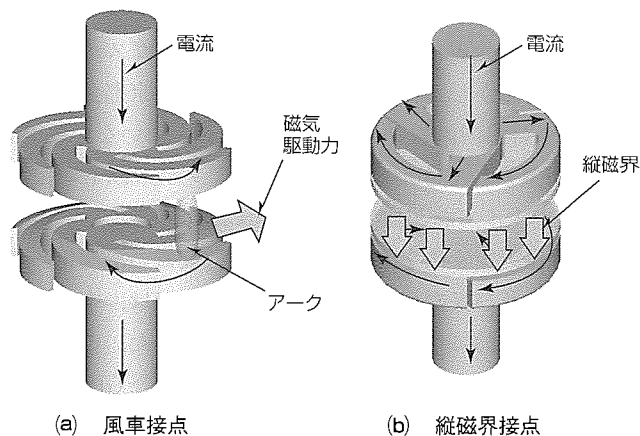


図1. 真空バルブの接点構造

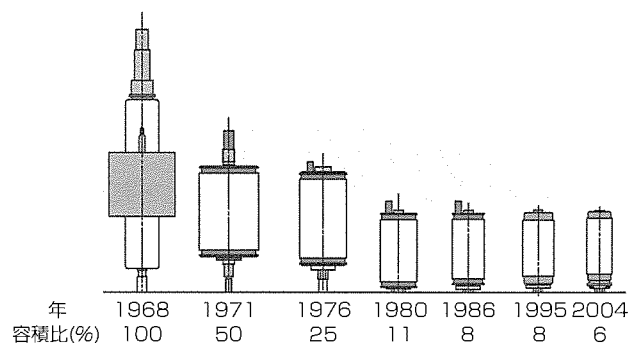


図2. 7.2kV-600A-12.5kA汎用遮断器用真空バルブ小型化の変遷

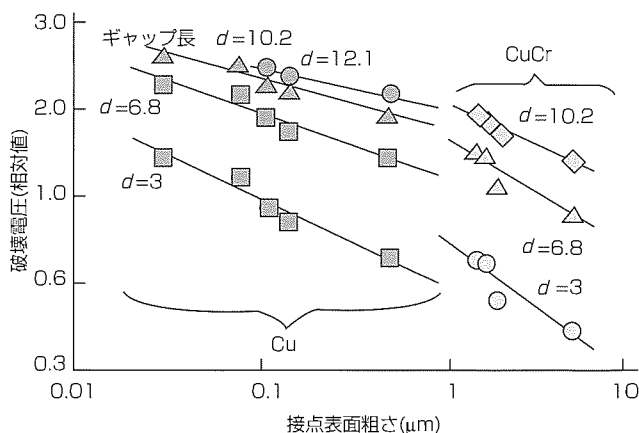


図3. 真空ギャップ(平板-平板)破壊電圧に対する接点表面粗さの影響

ることが分かる。

図4は、無酸素銅接点の真空ギャップで測定した破壊電界の有効面積依存性であり、面積効果が認められる<sup>(2)</sup>。真空バルブ内部の各種導体の形状と有効面積はそれぞれ異なるため破壊電界もそれぞれ異なるが、有効面積で整理すると定量的に各部位の破壊電界を把握することができる。

### 3.2 アルミナによる真空沿面絶縁

遮断時に接点から発生した金属蒸気のほとんどは接点の周囲に配置したアークシールドによって捕捉(ほそく)されるが、多数回遮断を行うと、その一部が真空バルブの容器内面であるアルミナに付着することがある。そのため、アークシールドの構造改良による金属蒸気の捕捉効率向上と、汚損条件下でのアルミナの沿面絶縁性能の把握が必要である。このような背景から、金属蒸気の付着量と沿面破壊電圧の関係を調べた。

実用接点を試験用真空チャンバにセットし、その近傍に試験用アルミナを配置して真空中で遮断を繰り返し、表面に金属蒸気が付着した任意の汚損度のサンプルを作成した。そのサンプルの真空中での沿面破壊電圧を図5(a)の接点を用いて測定した。その後、汚損度を定量化するためサンプルの表面抵抗率を図の(b)のように表面に接点を張って測定した。これらの測定結果を沿面破壊電圧と表面抵抗率の関係として図の(c)に示す。

図の(c)から新品2種類の表面抵抗率は $10^{15} \sim 10^{16} \Omega$ であり、その破壊電圧は両者で異なるが低い方で約35kVである。この破壊電圧は $10^{12} \Omega$ 台でも得られていることからこの抵抗値以上なら汚損度は軽微であり実用上問題ないと判断できる。この検討と並行して、実用真空バルブにおける多数回遮断後のセラミック内面の表面抵抗率を真空バルブを解体して測定した。アークシールドに近い側から遠い側まで等間隔で測定した結果、どの部位でも $10^{12} \Omega$ 以上の表面抵抗率が維持されており、多数回遮断後も沿面耐電圧性能の低下がないことが確認できた<sup>(3)</sup>。

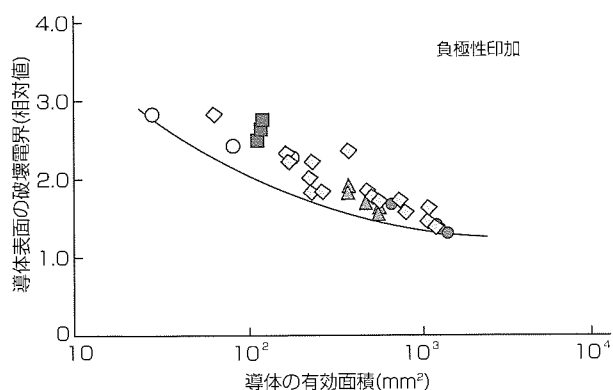


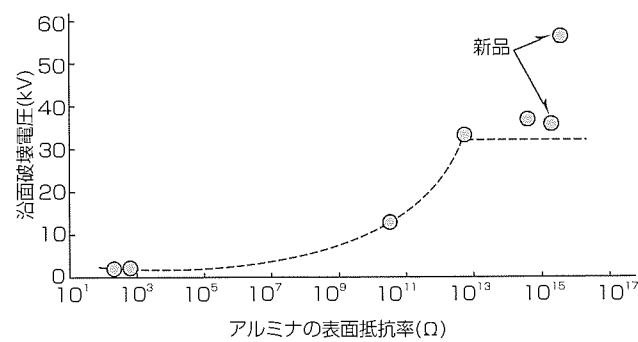
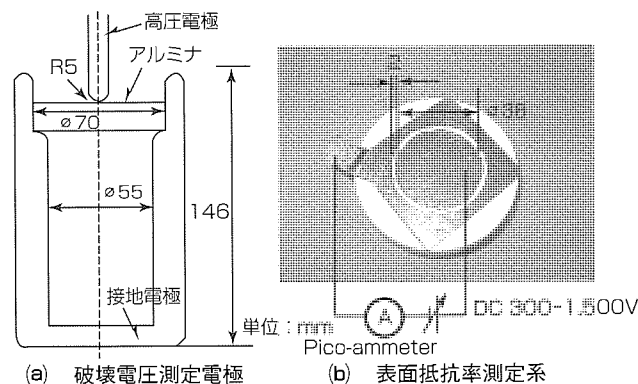
図4. 銅接点真空ギャップの破壊電界における面積効果

## 4. 複合絶縁多機能真空開閉装置

近年の中電圧クラスのスイッチギヤに対する社会的ニーズとしては、設置面積縮小化や輸送軽減のためのコンパクト化と、地球温暖化係数の小さい絶縁媒体を用いることによる環境負荷軽減が挙げられる。スイッチギヤのコンパクト化のためには絶縁距離の縮小技術が不可欠となるが、同時に環境負荷軽減を実現するためには高い絶縁性能を持つSF<sub>6</sub>ガスを使用しない絶縁構造が必要となる。これら相反すると思われる二つのニーズを実現するために、真空絶縁に注目したスイッチギヤを開発した。

一般にガス中においてその絶縁性能はギャップ長(接点間距離)と比例関係にあるが、真空中の絶縁性能はギャップ長の0.5~0.8乗に比例すると言われており<sup>(4)</sup>、真空中では長ギャップと比較して短ギャップほど単位ギャップ長当たりの耐電圧性能が高い。実際に数十mm程度のギャップ長では空気や数気圧程度のSF<sub>6</sub>ガスより真空中の方が耐電圧値が高い。この特長を利用することによって数十kV程度のスイッチギヤではコンパクト化とSF<sub>6</sub>ガスフリー化の両立が可能となる。

図6は、この真空絶縁の特長を利用して開発した24kV定格の複合絶縁多機能真空開閉装置の主要部分である真空バルブの構造である。セラミック等で構成された封じきりの真空容器の内部に、遮断・断路接点と接地接点部が収納されている。この遮断・断路接点の開閉操作を行う操作機



(c) 表面抵抗率と沿面破壊電圧の関係

図5. アルミナ表面への金属蒸気付着時の沿面破壊電圧

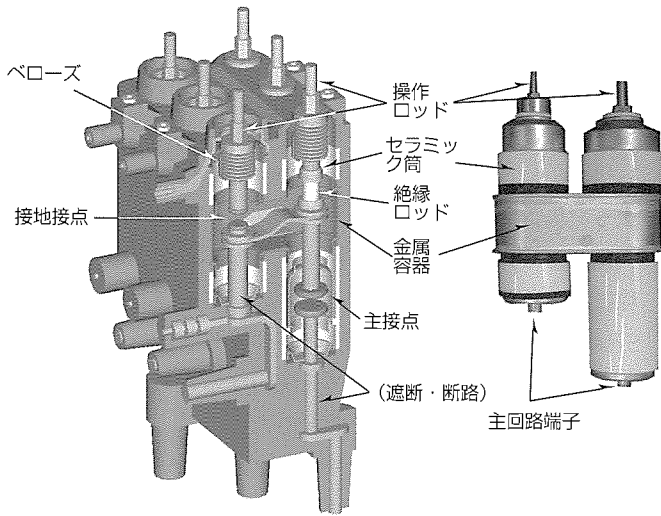


図6. 複合絶縁多機能真空開閉装置の構造

構部と電路はこの真空容器中で絶縁され、さらに、真空容器は固体絶縁物で覆われていることから、ケーブル接続を行うことで全く充電部が外部に存在しない。

このように真空絶縁技術及び真空バルブ製造技術を駆使し、コンパクト性と環境負荷軽減を両立した24kV定格の複合絶縁多機能真空開閉装置を製品化した。

## 5. むすび

本稿では、当社製真空バルブの変遷及び真空絶縁技術について述べた。今後も、中圧スイッチギヤの絶縁技術には、脱SF<sub>6</sub>ガス化という地球環境保護への配慮と、製品の軽量化・コンパクト化・高信頼化といったユーザーメリットが同時に求められると考えられる。これらのニーズに対し基本技術から体系的に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) Sato, S., et al : Relationship between electrode surface roughness and impulse breakdown voltage in vacuum gap of Cu and CuCr electrodes, IEEE Trans. DEI, **10**, No.4, 576~582 (2003)
- (2) 佐藤伸治, ほか : 不平等電界真空ギャップの破壊電界における電極面積効果, 電気学会論文誌A, **124**, No.8, 747~753 (2004)
- (3) Sato, S., et al : Flashover voltage of alumina ceramic contaminated by metal vapor in vacuum interrupters, IEEE Trans. DEI, **13**, No.1, 34~40 (2006)
- (4) 電気学会 : 放電ハンドブック, 上巻 (1998)



# 遮断器における電磁駆動設計技術

月間 満\*  
竹内敏恵\*\*

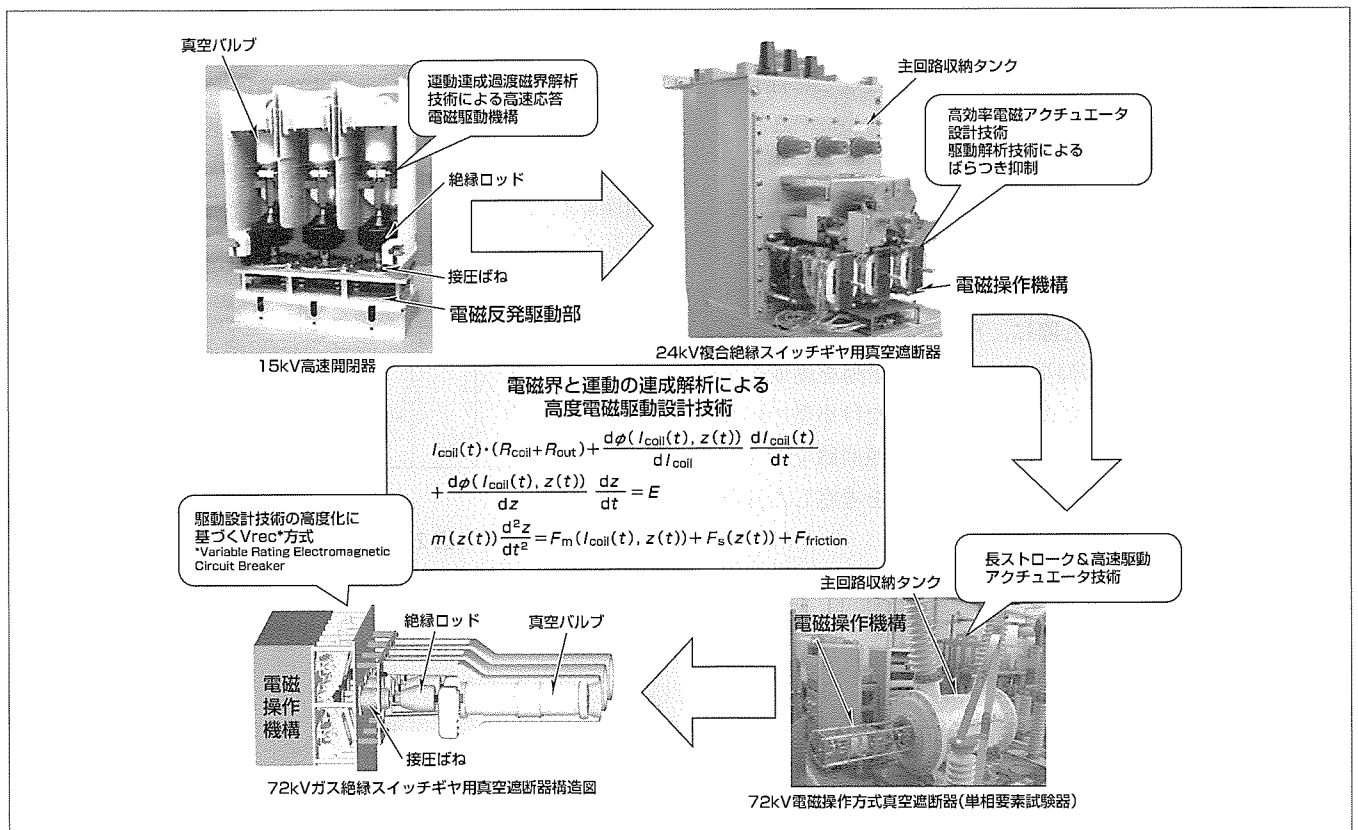
Design Technique of Electromagnetic Driving for Circuit Breakers

Mitsuru Tsukima, Toshie Takeuchi

## 要 旨

三菱電機製品の15kV高速開閉器(1998年製品化)や24kV複合絶縁スイッチギヤでは、従来のばね操作機構に代わり、新型の電磁操作機構を採用している。この電磁操作機構の採用により、ばね操作機構で必要であったラッチなどの消耗部品を撤廃でき、グリスレス化も可能であることから、メンテナンスの省力化や信頼性向上が期待できる。電磁操作機構の開発には、電磁界と運動の連成解析による電磁駆動設計技術の構築が不可欠である。そこで、高速開閉器をターゲットに等価回路法を用いた電磁界運動連成解析技術を開発し、さらに、有限要素法電磁界解析と運動の連成解析技術を開発し適用した。当社開発の連成解析技術を用いた電磁駆動設計手法では、動作途中で質量や接圧ばね力が不連続に変化する遮断器の駆動状態を忠実に再現でき、時

間分解能を0.5ms以下まで達成している。また、有限要素法では物体の運動を考慮するのにメッシュ更新を必要とするため計算時間が長くなるのに対し、今回の手法では、渦電流効果を磁束及び電磁力を一次遅れで模擬することで、計算時間を従来の1/10以下にまで短縮した。この手法の適用により、遮断器の個体差による動作時間のばらつきの机上での仮想数値実験が可能となり、開発期間を大幅に短縮できる。この設計技術の構築により、当社唯一の開閉極の両方向に高速駆動が可能な15kV高速開閉器の製品化、極めてエネルギー効率の高い24kV複合絶縁スイッチギヤ用電磁操作方式真空遮断器の製品化、さらに、今回、世界で初めて72kVクラスの高圧絶縁スイッチギヤ用真空遮断器への電磁操作機構搭載を実現した。



## 真空遮断器における電磁操作機構の適用

真空遮断器に適用された電磁操作技術の変遷を示す。

1. ま え が き

開閉器などに用いられている電磁アクチュエータの設計には、位置状態を固定した電磁界解析手法が用いられるのが一般的であった。しかし、電磁アクチュエータは磁気ギャップが変化しながら移動するため、短ギャップでのインダクタンスの変化が大きく、特に高速で動く場合には、駆動時の速度起電力を考慮することが必要となってくる。この速度起電力の考慮には、電磁界と運動の連成解析技術が必要である。

当社製品の15kV高速開閉器や24kV複合絶縁スイッチギヤでは、従来のばね操作方式に代わり、直動の電磁操作方式真空遮断器を用いており、これらの開発には電磁界と運動の連成解析による電磁駆動設計技術を構築し適用してきた。

本稿では、当社製電磁駆動遮断器の展開と開発した電磁駆動設計技術について述べる。

2. 15kV高速開閉器

当社における電磁駆動を用いた高機能真空遮断器は、図1に示す15kV高速開閉器から始まる<sup>(1)</sup>。高速開閉器とは、開極時間約1ms、遮断時間1サイクル以下の性能を満たす遮断器であり、一般の遮断器の開極時間が約25msであることと比べ、大幅な高速応答性能を持った遮断器である。近年では、受電系統自身や自家発電系統との高速切替装置に適用され、瞬低時の重要負荷の保護などに注目されている。

当社製高速開閉器は、電路を開閉する接点部を持つ真空バルブ、非線形な荷重特性を持つさらばね、及び、上下の開極用と閉極用固定コイルの間に低抵抗の反発板を配置した電磁反発駆動部より構成されている。例えば、開極コイルにパルス電流を通電した際に、反発板に誘導される電磁反発力を利用して、開極時間1ms以内の駆動を達成している。電磁反発駆動部の高速応答をできるだけ小型のパルス電源で効率良く設計するには、パルス電源回路を含んだ過渡応答電磁界解析と非線形負荷荷重特性を考慮した運動との連成解析が不可欠であった。

そこで、誘導電流を表皮厚さの1ターンコイルのイメージコイルで模擬し、図2の誘導結合等価回路を用いて電磁

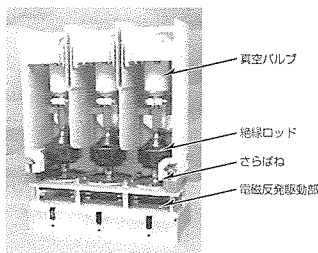


図1. 15kV高速開閉器

界方程式を立て、非線形ばねを考慮した運動方程式と連成する手法を開発した<sup>(1)</sup>。ここで、反発板に誘導される電磁力 $F_m$ は、磁気エネルギー $E_m$ の変分則の考え方から、図中の励磁コイルとイメージコイルとの相互インダクタンス $M$ を用いた式<sup>(2)</sup>で求めた。なお、 $x$ は駆動方向、 $I_{coil}$ は励磁コイル電流、 $I_{eddy}$ は1ターンのイメージコイル電流である。

$$E_m = M \cdot I_{coil} \cdot I_{eddy} \dots\dots\dots(1)$$

$$F_m = \frac{dE_m}{dx} = - \frac{dM}{dx} I_{coil} \cdot I_{eddy} \dots\dots\dots(2)$$

この等価回路手法を用いて連成解析した結果と実測との比較を図3に示す。解析と実測が良好に一致しており、この解析手法が電磁反発駆動部の設計技術として有用であることが分かる。

3. 電磁操作方式真空遮断器の電磁駆動設計技術

次に、2004年に製品化した24kV複合絶縁スイッチギヤに適用している一般用電磁操作方式真空遮断器の電磁駆動設計技術について述べる<sup>(2)</sup>。

24kV複合絶縁スイッチギヤの電磁操作方式真空遮断器の概略構造を図4に示す。従来のばね操作方式に代わり当社独自の高效率電磁操作方式を採用することで機構部の部品点数を従来比35%に削減したことによる信頼性向上と、ラッチレバーなどの損耗部品レス化とグリスレス化による省メンテナンス化を達成している。さらに、駆動時の機械的ロスを削減するために、図1の高速開閉器と同様、三相リンク機構を廃止し、直動型三相個別駆動を採用している。また、永久磁石の採用により無電力での開閉保持を実現し、開閉駆動はコンデンサ回路を用いて開極コイル及び投入コ

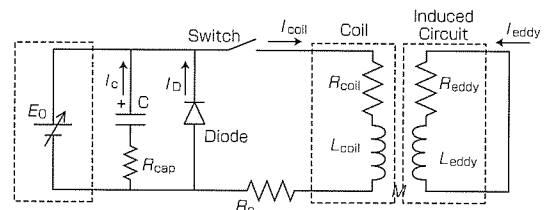


図2. 誘導結合等価回路

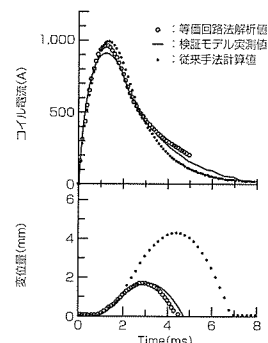


図3. コイル電流と可動部変位量の解析結果と実測の比較

イルにそれぞれ電流を放電することにより行っている。

三相個別駆動方式を採用する遮断器では、三相間の開閉動作ばらつきを数ms以下に抑える必要があるため、遮断器の製造上の公差、組立管理公差による動作時間ばらつきを仮想数値実験できる設計手法が不可欠であった。汎用の有限要素法を用いた電磁界運動連成解析ではメッシュの更新が必要であり、計算に長時間を要する。そこで、遮断器の動作を忠実に計算でき、かつ短時間で容易にパラメータサーベイが可能な電磁駆動設計技術を開発した。

開発した手法では、磁束  $\phi(I, z)$  及び電磁力  $F_m(I, z)$  の電流並びに可動子位置依存性を汎用の三次元静電磁界解析により求め、式(3)、式(4)を連成して解析している。渦電流による磁束及び電磁力の遅れは、駆動試験結果から求めた時定数  $\tau$  を用いて、式(5)、式(6)のように表現した。さらに、接圧ばね力及び可動部質量変化の不連続性を運動量保存則の適用により解決することで、図5のとおり高精度な駆動解析を実現した。この手法を用いることで、計算時間を従来の1/10以下にまで短縮でき、三相間の動作ばらつきを数ms以下に抑えるための設計条件を簡便に抽出できるようにした。

$$\frac{q(t)}{C} + I_{coil}(t) \cdot (R_{coil} + R_{out}) + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dt} = E, \quad \dots(3)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = I_{coil}$$

$$m(z(t)) \frac{d^2z}{dt^2} = F_m(I_{coil}(t), z(t)) + F_s(z(t)) + F_{friction} \quad \dots(4)$$

$$\phi_{transient} = \phi_{static}(I_{coil}(t)(1 - \exp(-\tau t)), z(t)) \quad \dots(5)$$

$$F_{m\,transient} = F_{m\,static}(I_{coil}(t)(1 - \exp(-\tau t)), z(t)) \quad \dots(6)$$

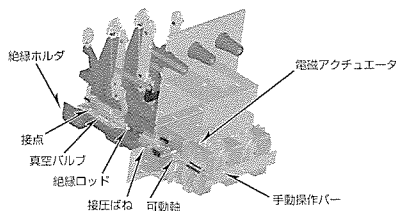


図4. 24kV複合絶縁スイッチギヤ用真空遮断器構造

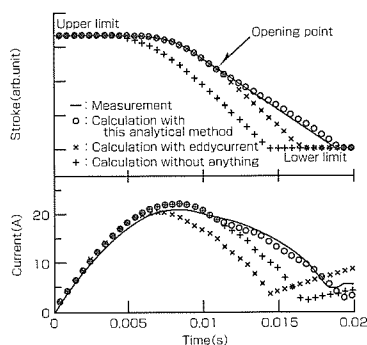


図5. 連成解析結果と実測結果の比較

#### 4. 高電圧用電磁操作方式真空遮断器の高速化

図6は、72kV級電磁操作方式真空遮断器(単相要素試験器)の外観である。電磁アクチュエータの駆動軸(タンク内に配置された)を真空バルブ可動接点まで一直線状に配置しており、24kV複合絶縁スイッチギヤ(図4)と同様、回転駆動変換を介さないシンプルな構成としている。

図7に、試作した遮断器の動作特性の実測結果(実線)及び駆動解析結果(+印)を示す。上から順に、コイル電流、真空バルブ接点の変位を示す。実測と計算とは比較的良く一致していることが分かる。式(3)に示すようにコイル電流  $I_{coil}$  はアクチュエータの動作  $z(t)$  と密接に関連し、その結果、電磁力  $F_m$  にも影響を与えるため(式(4))、電磁界と運動を連成させたこの解析手法が、電磁操作方式遮断器の開発に有力である。

遮断器の駆動特性に要求される性能は、遮断器の種類や定格電圧、遮断電流等によって多岐にわたる。ここでは、比較的高電圧の遮断器に要求される開放速度の高速化を検討例として取り上げる。

ばねなど荷重関係を強化すれば開放速度も必然的に増加するが、これは、操作機構の大型化となり好ましくない。一方、図8の●印は電源容量と速度の関係を示すものであるが、コンデンサ電源の容量を4倍にすると約2倍の速度上昇を見込めることが分かる。しかし、これは上述した操作機構の代わりに電源を大型化したに過ぎない。

この電磁アクチュエータは、高効率駆動を特徴としている。高効率駆動とは低消費電力での駆動を意味するが、ここでは、あえて駆動効率を低下させる“逆励磁”について検討した。

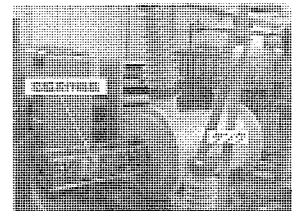


図6. 72kV級電磁操作方式真空遮断器(単相要素試験器)

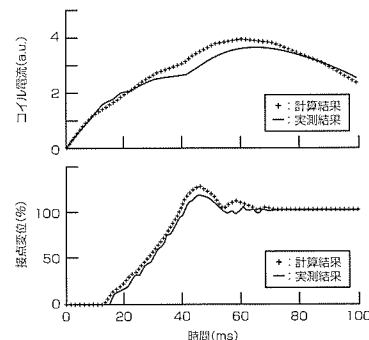


図7. 開極動作時の計算結果と実測の波形比較

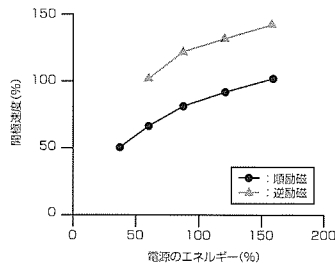


図8. 開極速度の電源容量依存性(測定結果)

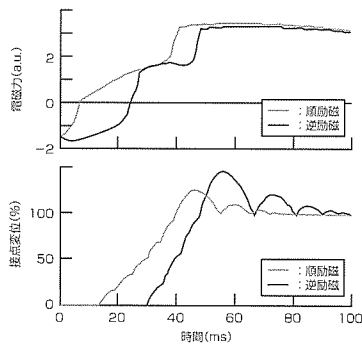


図9. 逆励磁による高速化

図9は、同じ電源条件で、駆動コイルを順方向に励磁した場合と逆方向に励磁した場合の、開極駆動特性(計算結果)を比較したものである。逆励磁の場合、動作開始時刻は遅延するが、速度(=変位の傾き)は増加していることが分かる。電磁力波形から、順励磁の場合よりも遅れてから増加することが分かる。

次に、この理由について考察する。図10は、駆動コイルを順励磁した場合のアクチュエータ内の磁束密度分布であり、白色が磁束密度の高い領域に相当する。図からアクチュエータ内部の磁気現象を以下のようにとらえることができる。

- (1) 永久磁石磁束の打ち消し：コイルが励磁されると、永久磁石の作る磁束が打ち消され、可動鉄心とコアの接触部(上側)の磁束密度が低下することで吸着保持力が低下する。
- (2) 吸引磁束の増大：同時にアクチュエータ下部の磁束密度が上昇し、可動鉄心を開極方向(下方向)に駆動する力が増大する。

つまり、順励磁の場合、永久磁石磁束による吸着保持力を打ち消しつつ可動鉄心を駆動することになる。

これに対して、図11は、コイルを逆に励磁した場合の磁束密度分布を示したものである。

- (3) 吸着保持磁束の増大：コイルが逆励磁されることにより、可動鉄心とコアの接触部での磁束密度は増大する。しかし、鉄心の磁気飽和により磁束密度は上昇しない。荷重についても同様に、吸着保持力は増大するが、飽和傾向となる。

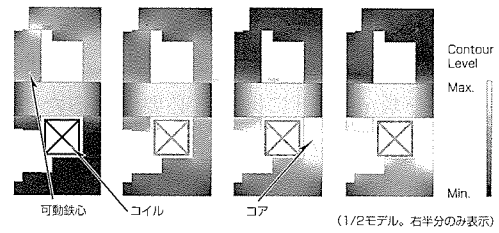


図10. 順励磁のときの磁束密度変化

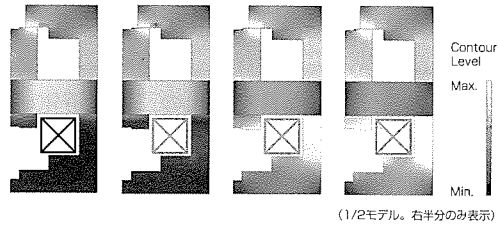


図11. 逆励磁のときの磁束密度変化

- (4) 吸引磁束の増大：順励磁と同様に、アクチュエータ下部の磁束密度が上昇し、可動鉄心を開極方向に駆動する力が増大する。

つまり、逆励磁の場合、吸着保持力を低下させずに可動鉄心を駆動するため、図9の駆動解析結果のようにアクチュエータの動作開始時刻が遅れ、吸引電磁力を急増できるため開極速度を向上できることが分かる。

この逆励磁方法を利用したときの平均開極速度(実測結果)が図8の▲印の特性であり、アクチュエータや電源の大型化なしに、開極速度を約1.5倍まで高速化できることが分かる。

## 5. む す び

当社電磁駆動遮断器の展開とその電磁駆動設計技術について述べた。現在、国内外で遮断器用操作機構部の電磁操作化が進められており、今後、電磁駆動設計技術の重要度はより大きくなると考える。なお、今回の設計技術は72kV脱SF<sub>6</sub>ガス絶縁スイッチギヤ用電磁操作真空遮断器にも適用され、72kVクラスでの世界初の製品化を達成した<sup>(3)</sup>。

## 参 考 文 献

- (1) 竹内敏恵, ほか：等価回路モデルによる渦電流反発式高速遮断器の駆動解析, Trans. of IEEJ, PE, **124**, No.6, 859~865 (2004)
- (2) Takeuchi, T., et al. : An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion, IEEJ Trans. PE, **124**, No.2, 321~326 (2004)
- (3) 有岡正博, ほか：72kV脱SF<sub>6</sub>ガス絶縁スイッチギヤ“HG-VA”, 三菱電機技報, **80**, No.7, 455~458 (2006)

# 電磁操作方式真空遮断器のCBM技術

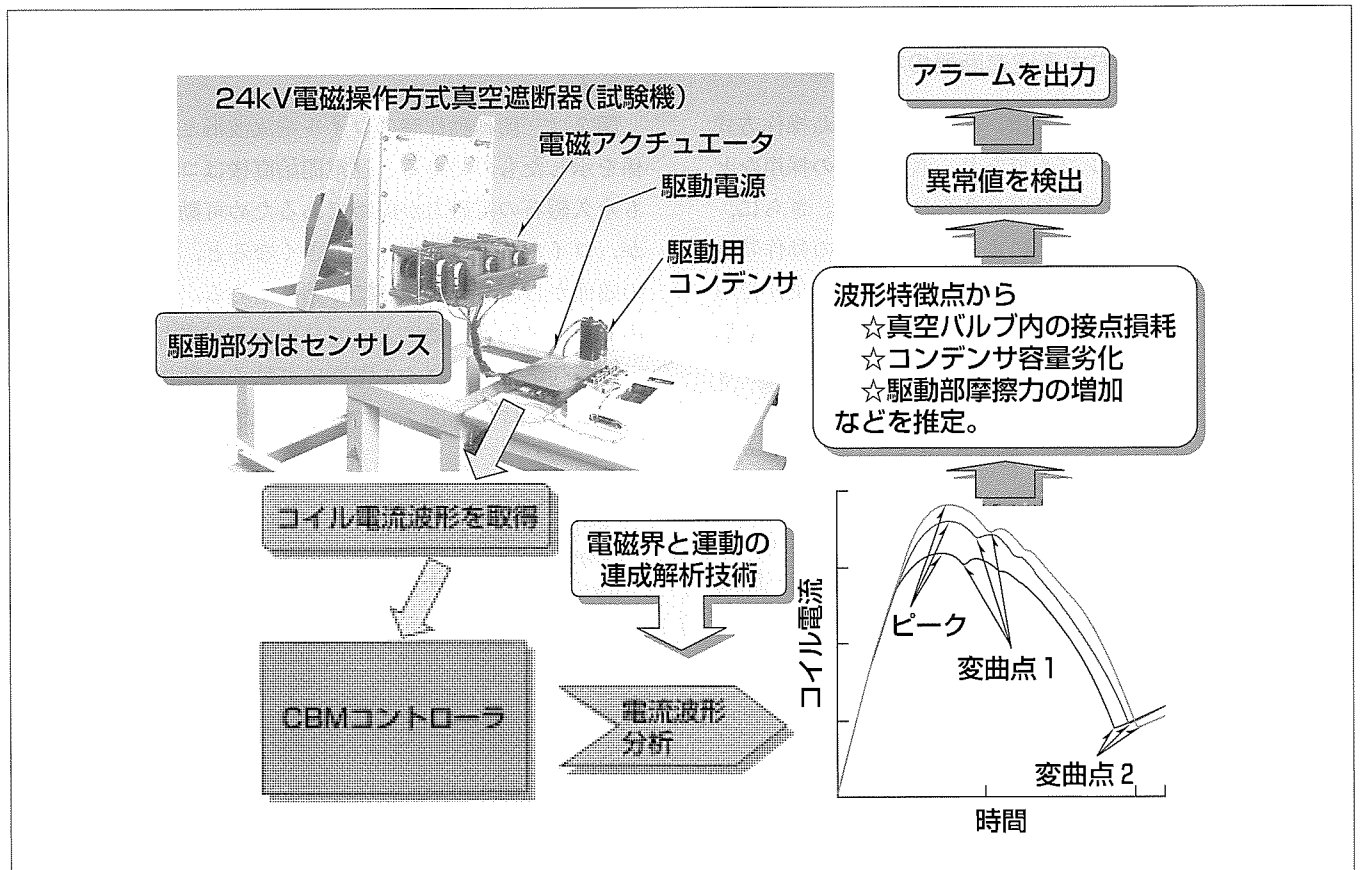
丸山昭彦\*  
松永敏宏\*\*

Condition-Based Maintenance Technology for Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker  
Akihiko Maruyama, Toshihiro Matsunaga

## 要旨

受配電システムにおける安定な電力の供給のためには、システムの故障を未然に防ぐためのメンテナンス作業が欠かせない。従来、一般に行われている保全方式は、消耗部品の交換、故障発生リスクの高い部位の点検を定期的に行うもので、時間基準保全 (Time-Based Maintenance : TBM) と呼ばれる。一方、状態基準保全 (Condition-Based Maintenance : CBM) と呼ばれる手法は、機器の状態を監視して、必要な時点において必要なメンテナンスを実行する方法である。CBMを実現するためには、機器の状態を監視するためのモニタシステムが不可欠となる。そこで、近年市場に登場し始めた電磁操作方式真空遮断器の特徴に着目し、遮断器の駆動部分へのポジションセ

ンサなどの監視装置の設置を必要としないCBM装置の開発を行った。このCBM装置は、電磁アクチュエータのコイルに流れる電流と電圧を取得することによって遮断器の駆動機構部の経年劣化を表す状態量 (接点損耗量、摩擦力、コンデンサ容量など) を監視することが特長である。電流・電圧波形と機器劣化状態の関係の評価には電磁界と運動の連成解析技術を用いた解析手法を用い、試験結果と良い一致が得られることを確認した。さらに、この手法を用いて、コイル電流波形から駆動機構の状態量を高い精度で推定する手法を確立し、低コスト、高精度のCBM装置を開発した。



## 電磁操作方式真空遮断器に適用したCBM装置の概要

電磁操作方式真空遮断器の電磁気現象と機械的な運動を連成して解析する技術を応用し、電磁アクチュエータのコイルに流れる電流波形の特徴から遮断器駆動部の摩擦力変化や真空バルブ内の接点の損耗量を推定する。

1. ま え が き

受配電システムにおける安定な電力の供給のためには、システムの故障を未然に防ぐためのメンテナンス作業が欠かせない。従来、一般に行われている保全方式は、消耗部品の交換、故障発生リスクの高い部位の点検を定期的に実施するもので、時間基準保全(TBM)と呼ばれる。一方、状態基準保全(CBM)と呼ばれる手法は、機器の状態を監視して必要な時点において、必要なメンテナンスを実施する方法である。CBMを導入することにより期待される効果は、第一に設備の点検周期の延長によってもたらされるLCC(Life Cycle Cost)の削減効果である。第二には、故障の兆候を事前に感知して故障が発生する前に警告を出すことによる予防保全効果があり、トータルコストの低減を目指すユーザーにCBM導入に対する関心が高まりつつある。

CBMを実現するためには、機器の状態を監視するためのモニタシステムが不可欠となる。そこで、近年市場に登場し始めた電磁操作方式真空遮断器<sup>(1)</sup>の特徴に着目し、電磁アクチュエータのコイルに流れる電流値、及び、コイル両端の電圧を取得することによって遮断器の駆動機構部の状態を精度良く監視するCBM技術、及びこの技術を用いたCBM装置の開発を行った。

2. 電磁操作方式真空遮断器の状態監視

電磁操作方式真空遮断器では、従来の電動ばね操作方式に比較して、構造がシンプルであり、直動方式の採用などによって遮断器動作の信頼性が高められている。さらに、電磁操作方式を採用したことによって、遮断器の動作特性の変動が操作側の電気的特性に反映するという効果が得られるようになった。従来の電動ばね操作方式では、遮断器の動作特性を監視するためには、可動部分を直接ポジションセンサなどを用いて見る方法が一般的であった。

一方、電磁操作方式では、図1(a)のように電磁アクチュエータを用いて直接に遮断器の駆動部分を動作させている。電磁アクチュエータの動作特性は操作電流(コイル電流)と駆動部の機械的条件によって決まるが、逆に、駆動部の機械的条件の変動が操作電流の変化となって現れる。この原理を利用して、電磁操作方式真空遮断器の駆動特性を変動させる主な要因である以下の4項目、

- (1) 駆動部での摩擦力の増大
- (2) 駆動用コンデンサの経年劣化
- (3) 真空バルブ内の接点の損耗
- (4) 電磁アクチュエータ保持力の低下

について、その状態を監視する手法の開発を行った。この手法を用いれば、従来の駆動部分にセンサを配置し調整する必要がなくなるため、低コストで高精度のCBM装置を構築することが可能となる。

3. 電流波形分析による機器状態推定技術

図1は、電磁操作方式真空遮断器の1相分の駆動機構部の構造を示したものである。駆動部は、真空バルブ、絶縁ロッド、接圧ばね、電磁アクチュエータなどから構成され、さらに、電磁アクチュエータを駆動するための駆動電源、駆動用コンデンサがある。図の(a)は閉極状態を示しており、電磁アクチュエータ内の可動子は永久磁石の電磁力によって固定子の閉極側に吸着されている。この吸着力によって接圧ばねが圧縮され、真空バルブ内の固定接点と可動接点の接触面に適切な圧力を与えている。

駆動電源回路は、駆動用コンデンサに充電を行うとともに、外部からの開極指令によって、このコンデンサから開極側コイルへ放電を行う。開極側コイルが発生する電磁力は、永久磁石の電磁力と逆向きであり、コイル電流値が十分に大きくなると、可動子は開極側に引き付けられて開極動作が開始される。開極動作の初期段階では、可動子は開極側に移動しても、接圧ばねが伸張するために、真空バルブ内の接点は閉極状態を保ったままである。図の(b)は接圧ばねが最大長まで伸張した状態であり、これ以降は、絶縁ロッド、可動側接点が可動子と一体となって開極側へ移動する。図の(c)は動作完了状態(開極状態)を示したもので、可動子は再び永久磁石の電磁力によって開極側に吸着される。

図2は、開極動作時のコイル電流波形と可動子変位の関係を示したものである。通電開始直後はコイル電磁力よりも永久磁石の電磁力が優勢であるため可動子は動作しないが、コイル電流値が十分に大きくなると、可動子が閉極側の端面から離れて開極側に移動し始める。可動子が動き始めると、可動子移動によって発生する起電力によりコイル電流が制限され、コイル電流は可動子の動作開始直後に電流ピークを持つ。図2中でBと示した時点は、図1(b)に相

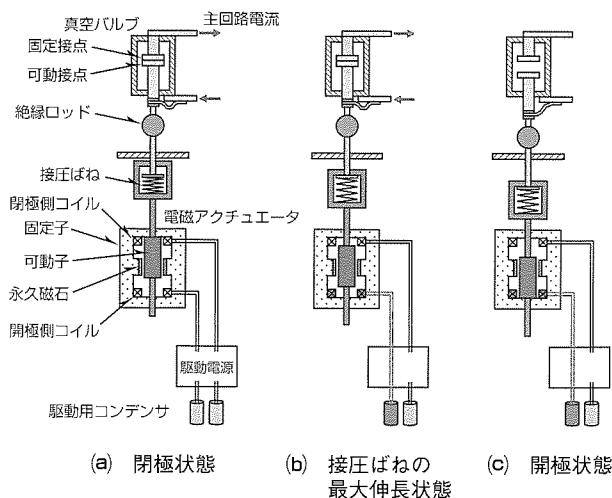


図1. 電磁操作機構の概略構成と動作

当する時点である。上述したように、B点以降は絶縁ロッド、可動側接点が可動子と一体となって移動するために、可動部質量がB点において変化する。図2では、可動子の速度がB点において変化している様子が分かる。可動子速度はコイル両端に発生する起電力に対応しており、図2のB点においてコイル電流波形にも対応する変化が現れていることが分かる。同様に、図2においてCと示した点は、図1(c)のごとく可動子が動作完了する時点に相当しており、可動子が停止したことによって、電流波形に変動が現れている。

このように、駆動用コイルに流れる電流の波形と可動子の運動は密接に関係している。これらの関係は、電気回路方程式と駆動部の運動方程式によって表すことができる。電気回路方程式は以下の式(1)で表される。

$$V = I \cdot R + L(I) \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{d\phi(I, z)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad \dots(1)$$

ここで、 $V$ は駆動電圧、 $I$ はコイルに流れる電流、 $R$ はコイル(配線部を含む)抵抗、 $L$ はコイルの自己インダクタンス、 $\phi$ はコイルを鎖交する磁束量、 $z$ は可動子の位置である。一方、運動方程式は、駆動部質量 $m$ 、電磁力 $F_m$ 、ばね力 $F_s$ 、摩擦力を $F_r$ として、

$$m(z) \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = F_m(I, z) + F_s(z) + F_r \quad \dots(2)$$

で表される。なお、摩擦力 $F_r$ には、真空バルブの自閉力なども含まれる。

上記2つの方程式に基づき、アクチュエータの電磁界解析と駆動機構の運動解析を連成することにより、電磁操作方式真空遮断器の駆動特性と電磁アクチュエータの電気特性の関連性を解析することができるようになった<sup>(2)</sup>。

図3において白丸で示したデータは、前記の解析によって遮断器開極動作のコイル電流波形を計算し、この電流波形から図2のC点に相当する時刻( $T_{end}$ )を抽出して、接点損耗量の変化と $T_{end}$ の変化量( $\Delta T_{end}$ )の関係を示したものである。さらに、図中には、試験機を用いて接点損耗量と

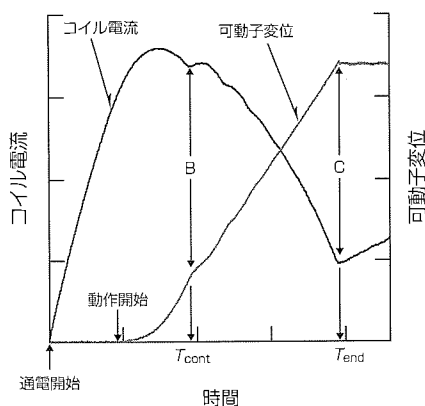


図2. コイル電流波形と動作特性

$\Delta T_{end}$ を実測した結果を黒丸で示している。この図から、 $\Delta T_{end}$ と接点損耗量の関係について、解析結果と実測が良く一致していることが分かる。さらに、コイル電流波形から得られる情報を用いて、真空バルブ内の接点損耗量を一定の精度で推定することが可能であることが分かる。

図4は、駆動用コンデンサの容量(C容量)が定格値の70%に劣化した場合について、図3と同様のデータを示したものである。このように、接点の損耗やコンデンサ容量劣化などの駆動条件が複合して変動した場合でも、解析結果と実測値は良く一致しており、解析を基にして遮断器の状態推定手法の検討を進めることが可能となった。

今回開発した状態推定方法では、前記の動作完了時点のようなコイル電流波形上の特徴点の時刻、電流値、電圧値の変化をとらえる。そして、これらの特徴点のデータから、機構部の状態量、すなわち、接点損耗量、摩擦力変動、コンデンサ容量劣化、アクチュエータの保持力などを推定するものである。この状態量を推定するために、解析によって特徴点データと状態量の相関を求め、実際の測定誤差を考慮して、特徴点データから状態量を算出する最適な関数を作成した。図5は、試験機を用いてコンデンサ容量、摩擦、接点損耗を複合して変動させた場合において、駆動時

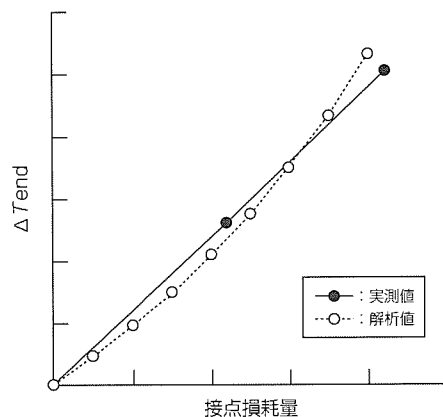


図3. 接点損耗量と $\Delta T_{end}$ の関係(C容量定格条件)

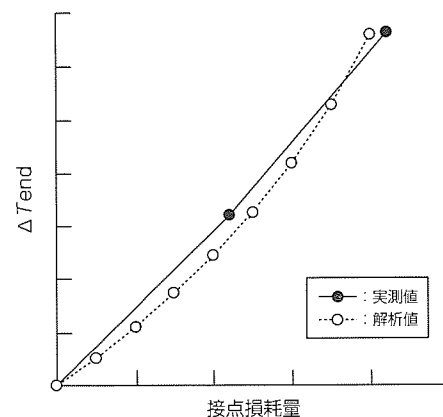


図4. 接点損耗量と $\Delta T_{end}$ の関係(C容量劣化条件)

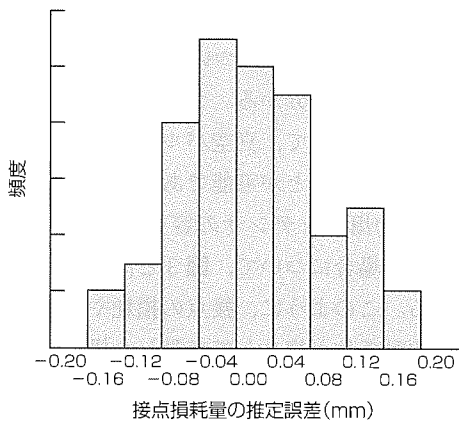


図5. 接点損耗量の推定誤差

のコイル電流と電圧波形から前記算出関数を用いて接点損耗量を推定した結果である。図は接点損耗量の推定誤差の分布を示しており、横軸は実際の接点損耗量と推定値の差で、縦軸は頻度である。この分布の分散( $\sigma$ )は約0.1mmであり、良い精度で推定が行えていることが確認された。

さらに、この技術を応用すれば、開極動作時に取得した電流波形特徴点データを用いて、次の閉極動作における投入時間を推定することが可能となる。投入時間の推定は、位相制御投入を行う際に重要となる。安定な位相制御投入を行うためには、遮断器の経年変化による投入時間の変動を吸収する必要があるため、この技術を用いれば、長期にわたって安定な位相制御を提供することが可能となる。

#### 4. CBM装置の構成

このCBM技術では、アクチュエータに通電する電流、及び電圧をモニタすることによって、遮断器駆動部分の状態を診断する。このため、CBM機能を実現するための機器は、駆動電源の内部、又は出力部に配置するコイル電流/電圧モニタ部と、このモニタ信号を取り込んで電流波形を解析するCBMコントローラのみで構成される。図6は、CBMコントローラの機能の概略を示したものである。CBMコントローラは、駆動電源内部、又は外部に設置された電流、電圧モニタからの信号を一定周期でサンプリングし、波形データとして取得する。この波形データから、電流波形の特徴点抽出、状態量の推定を行った上で、あらかじめ設定された状態量の下限值、又は上限値との比較により、異常値であると判定された場合は、外部に警報出力

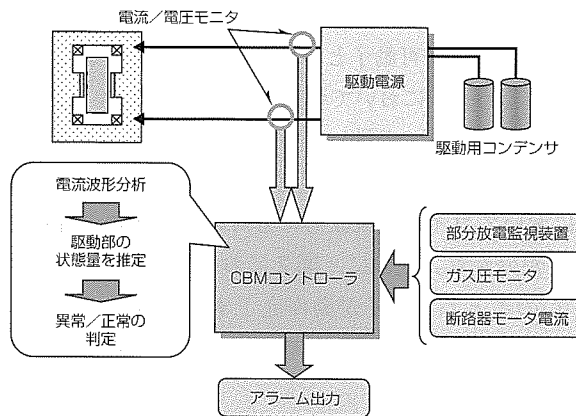


図6. CBMコントローラの概略構成

を行ってメンテナンスの実施を要求する。さらに、CBMコントローラには部分放電監視装置、タンク内ガス圧、断路器モータ電流などのモニタ情報も集約され、遮断器全体としての状態を監視するとともに、コントローラ自身の自己診断機能を持っている。

#### 5. む す び

電磁操作方式真空遮断器の駆動部の経年劣化状態を推定するために、駆動部摩擦力、接点損耗量、コンデンサ容量等を、駆動用コイルに通電する電流波形を監視することによって正確に推定する技術を確立した。さらに、この技術を応用し、遮断器の状態を常時監視し、異常が発生した場合に警報を出力する機能を備えたCBM装置の開発を行った。このCBM装置は、遮断器駆動部を監視するポジションセンサ等を用いないため、低コストで、かつ、高精度なCBM機能を提供することが可能である。

このCBM装置は、2006年2月に製品発表した“HG-VA型72kVドライエア絶縁スイッチギヤ”に世界で初めて標準搭載される。

#### 参考文献

- (1) 有岡正博, ほか: 24kV低ガス圧ドライエア絶縁スイッチギヤ“HS-X”, 三菱電機技報, 79, No.12, 795~798 (2005)
- (2) 竹内敏恵: 電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術, 三菱電機技報, 79, No.11, 699~702 (2005)



# 72kV 脱SF<sub>6</sub>ガス絶縁スイッチギヤ “HG-VA”

有岡正博\* 金 太炫\*\*  
佐藤伸治\*\* 吉村 学\*\*  
丸山昭彦\*\*

72kV Dry Air Insulated Switchgear “HG-VA”

Masahiro Arioka, Shinji Sato, Akihiko Maruyama, Tae Hyun Kim, Manabu Yoshimura

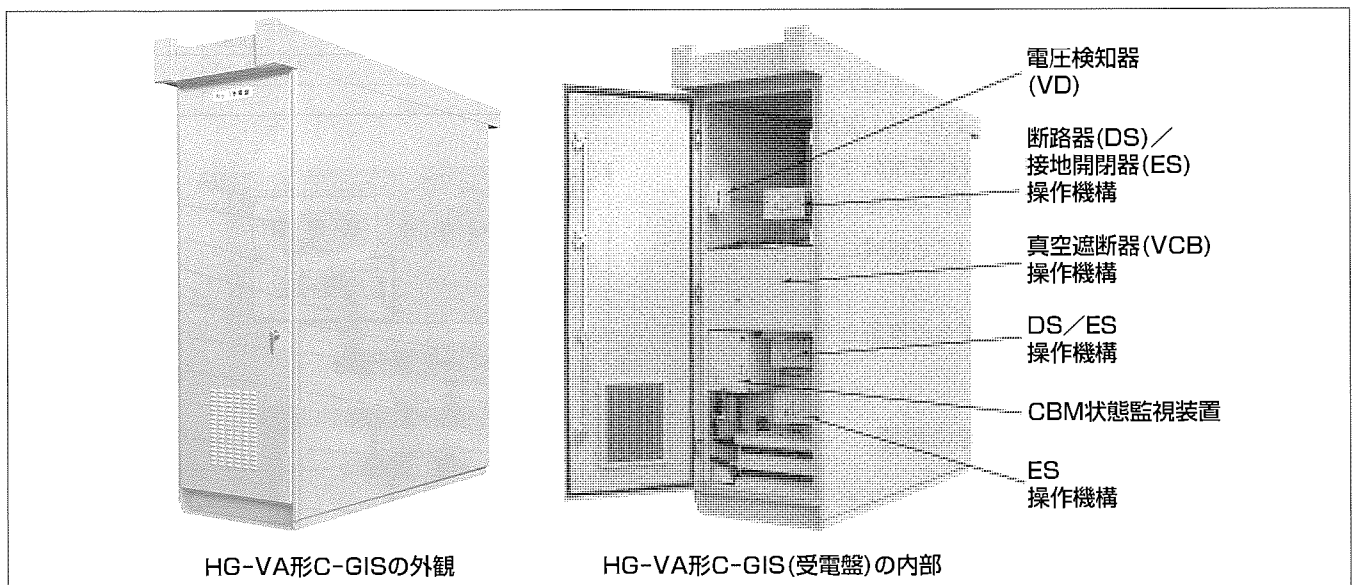
## 要 旨

国内外の送配電設備及び需要家の受配電設備に用いられているガス絶縁スイッチギヤ(GIS)は、無毒・無臭に加え絶縁性能・消弧性能に優れる六ふっ化硫黄ガス(SF<sub>6</sub>ガス)を絶縁媒体として1970年ごろから採用されている。国内受配電設備向けのGISは、三相分離形→三相一括形→キュービクル形ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)へと移行し、小型・軽量化、信頼性向上、ライフサイクルコスト(LCC)低減及び環境負荷低減が図られてきた。また、1997年の地球温暖化防止京都会議以降、SF<sub>6</sub>ガスの排出量削減とともにSF<sub>6</sub>ガスを用いない脱SF<sub>6</sub>ガススイッチギヤが望まれ、2000年以降24~36kV級密閉形スイッチギヤにおいて脱SF<sub>6</sub>ガス化を図った製品が開発され適用されている。一方、72kVクラス以上のGIS及びC-GISは、SF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒体としたものが主流であるが、近年、24~36kVクラスと同様に脱SF<sub>6</sub>ガス化が望まれている。

三菱電機は、C-GISの脱SF<sub>6</sub>ガス化による地球温暖化抑制を目的として、24~36kV脱SF<sub>6</sub>ガス絶縁(密閉型複合絶縁)スイッチギヤで実用化したドライエア(乾燥空気(相対湿度1,000ppm以下):O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>混合ガス)と固体絶縁による

複合絶縁を更に高度化することで、72kVクラスのスイッチギヤにおいて、世界で初めて低圧力(最高使用ガス圧力0.2MPa-G以下)のドライエアにより、従来のSF<sub>6</sub>ガス絶縁C-GISと同等の外形寸法で脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現した密閉形複合絶縁スイッチギヤ“HG-VA”を製品化した。この製品は、従来の当社C-GIS(低圧力SF<sub>6</sub>ガス絶縁)で高い評価を得ている“小型”“軽量”“高信頼性”及び、あらゆる受電形態と電気室に対応できる“配置計画の柔軟性”などの特長に加え、一層の“環境負荷低減”と“LCCの低減”を目的としている。

遮断器は、72kVクラスの真空遮断器(VCB)に電磁コイルの磁力による開閉動作と永久磁石の磁力による開閉状態保持を行う電磁操作方式を採用し、大幅に信頼性を向上した。さらに、操作機構を電磁操作化することにより、VCB操作機構の状態監視ができる技術を開発し、既に実用化されているタンク内常時監視技術と合わせて、スイッチギヤのトータルCBM(Condition Based Maintenance)化を可能とした。これらは、LCC削減に大きく貢献できるものである。



## HG-VA形C-GISの外観及び受電盤の内部構造

屋外設置用72kV HG-VA形C-GISの外観及び内部構造を示す。通常操作を行う操作部、電圧検知器(表示部)及びCBM状態監視装置は前面側に配置している。

1. ま え が き

国内外の送配電設備及び需要家の受配電設備に用いられているGISは、無毒・無臭に加え絶縁性能・消弧性能に優れたSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒体として1970年ごろから採用されている。国内受配電設備向けのGISは、三相分離形→三相一括形→C-GISへと移行し、小型・軽量化、信頼性向上、LCC低減及び環境負荷低減が図られてきた。また、1997年の地球温暖化防止京都議定書以降、SF<sub>6</sub>ガスの排出量削減とともにSF<sub>6</sub>ガスを用いない脱SF<sub>6</sub>ガススイッチギヤが望まれ、2000年以降24~36kV級密閉形スイッチギヤにおいて脱SF<sub>6</sub>ガス化を図った製品が開発され適用されている。一方、72kVクラス以上のGIS及びC-GISは、優れた絶縁性能・消弧性能と安全性を持つSF<sub>6</sub>ガスを絶縁媒体としたものが主流であるが、近年、24~36kVクラスと同様に脱SF<sub>6</sub>ガス化が望まれている。

当社は、C-GISの脱SF<sub>6</sub>ガス化による地球温暖化抑制を目的として、24~36kV密閉形複合絶縁スイッチギヤで実用化したドライエアーと固体絶縁による複合絶縁を更に高度化することで、72kVクラスのスイッチギヤにおいて、世界で初めて低圧力(最高使用ガス圧力0.2MPa-G以下)のドライエアーにより、従来のSF<sub>6</sub>ガス絶縁C-GISと同等の外形寸法で脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現した“HG-VA形スイッチギヤ”を製品化した。この製品は、従来の当社C-GIS(低圧力SF<sub>6</sub>ガス絶縁)で高い評価を得ている“小型”“軽量”“高信頼性”及び、あらゆる受電形態と電氣室に対応できる“配置計画の柔軟性”などの特長に加え、一層の“環境負荷低減”と“LCCの低減”を目的としている。

遮断器は、72kVクラスのVCBに電磁コイルの磁力による開閉動作と永久磁石の磁力による開閉状態保持を行う電磁操作方式を採用し、大幅に信頼性を向上した。さらに、操作機構を電磁操作化することにより、VCB操作機構の状態監視ができる技術を開発し、既に実用化されているタンク内常時監視技術と合わせて、スイッチギヤのトータルCBM化を可能とした。これらは、LCC削減に大きく貢献できるものである。

本稿では、HG-VA形スイッチギヤの概要とその特長について述べる。

2. HG-VA形C-GISの概要

表1にHG-VA形スイッチギヤの製品コンセプトを示す。環境負荷低減のための脱SF<sub>6</sub>ガス化のほかに、省エネルギー/省スペースに配慮し、メンテナンスなどのLCC低減、安全性/信頼性の向上を図った。また、HG-VA形スイッチギヤの定格及び仕様を表2に、構造を図1に示す。

密閉容器内に主回路を収納し、大気圧近傍の低圧力ドライエアーと固体絶縁物の複合絶縁により脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現

した。さらに、密閉容器全体を金属閉鎖箱に収納した構造とすることで、設置環境に影響を受けない構造、レイアウトの柔軟性が高い列盤モジュール形、機器操作の前面配置による良好な操作性確保など、当社の従来形C-GISの特長を踏襲している。VCBは低圧力ドライエアーを密封した容器内に収納することにより真空スイッチ管(VST)のベローズ部への負担を軽減し、電磁操作機構により主接点を

表1. 製品コンセプト

コンセプト		新技術/対策
環境に優しく	地球温暖化抑制	ドライエアー絶縁の採用 (脱SF <sub>6</sub> ガス)
	省エネルギー	電磁操作方式VCBの採用
		機器配置の最適化
	省スペース	主回路導体の最長化による発熱量低減
人に優しく	安全性	機器構成の機能モジュール化
	省力性	低ガス圧化
		電磁操作機構部のメンテナンスフリー化
	高信頼性	CBM機能ユニット搭載
		母線接続時のガス処理レス化
構造の単純化		
		部品点数の削減
		電磁操作機構による主接点直動化
		操作機構部の損耗部品レス化

表2. HG-VA形スイッチギヤの定格及び仕様

項目		仕様	
G I S	定格電圧 (kV)	72	
	定格耐電圧	雷インパルス (kV peak)	350(断路極間400)
		商用周波 (kV rms)	140(断路極間160)
	定格周波数 (Hz)	50/60	
	定格電流 (A)	800/1,200	
	定格短時間耐電流 (kA)	25/31.5(2秒)	
	定格ガス圧力 (MPa・G at 20℃)	0.15	
	準用規格	JEC-2350	
	V C B	定格電圧 (kV)	72
		定格電流 (A)	800/1,200
定格遮断電流 (kA)		25/31.5	
準用規格		JEC-2300	

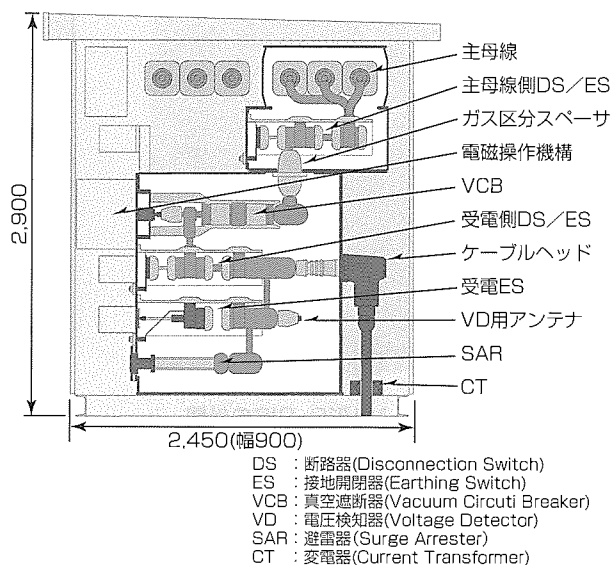


図1. HG-VA形C-GISの構造(受電ユニット)

直動することによってVCB駆動機構部の構造を大幅にシンプル化し、消耗部品であるラッチレバーをなくして部品点数を大幅に削減した。これにより、VCBの操作機構部を含めた信頼性を大幅に向上した。

また、列盤母線をプラグイン構造とすることで、現地据付場所でのガス処理作業を不要とし、現地据付作業の簡素化を可能とした。

### 3. ドライエア絶縁

ドライエアの絶縁耐力はSF<sub>6</sub>ガスの約1/3（圧力が同じ場合の比較）である。しかし、ドライエアは大気中に存在しかつ地球温暖化係数がゼロであることに着目し、この絶縁特性を当社の特長である低圧力（労働安全衛生法における第二種圧力容器の検定が不要な0.2MPa-G以下）領域において重点的に研究した結果、2000年に業界トップレベルの小型・軽量化を図り、かつ、世界で初めて完全脱SF<sub>6</sub>ガス化を実現した24/36kV複合絶縁スイッチギヤを製品化している<sup>(1)</sup>。

72kV HG-VA形スイッチギヤは、24/36kVスイッチギヤに適用したドライエアと固体絶縁物を組み合わせた複合絶縁技術を更に発展させ、低圧力ドライエア絶縁で72kVクラスに必要な絶縁性能を実現し、従来のSF<sub>6</sub>ガスを適用したC-GISと同程度の外形寸法としている。複合絶縁技術による耐電圧性能向上化の概念を図2に示す。

### 4. CBM機能

CBMは、従来から一般的に実施されている定期的メンテナンスを行うTBM（Time Based Maintenance）に対し、機器の状態変化に応じてメンテナンスを行う方法で、より効率的なメンテナンスが可能で、LCC低減の大きな効果が期待できるものである。ここでは、HG-VA形スイッチギヤに搭載したCBM機能の概要について述べる。

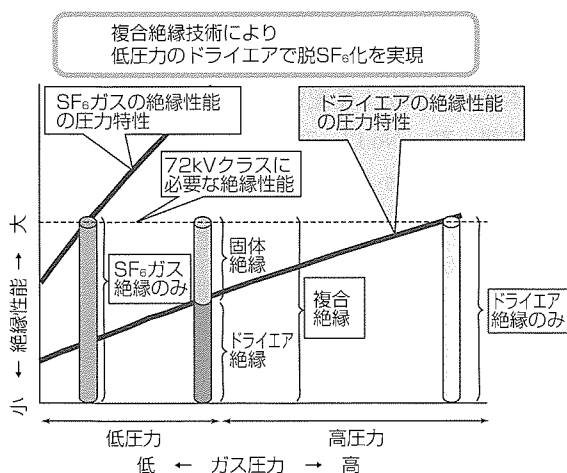


図2. 複合絶縁技術による絶縁効果の概念図

### 4.1 VCB用操作機構部の状態監視機能

VCB動作特性の経年的変化の主な要因は、電流開閉によるVSTの接点消耗、摩擦による機構部の磨耗などである。当社は、電磁操作方式VCBの電磁コイルを流れる電流（コイル電流）波形と、操作機構可動部の変位波形において、変曲点の発生する時間が同じであるという現象に着目し、コイル電流の波形分析技術を用いて機器の状態を推定する技術を確立した。

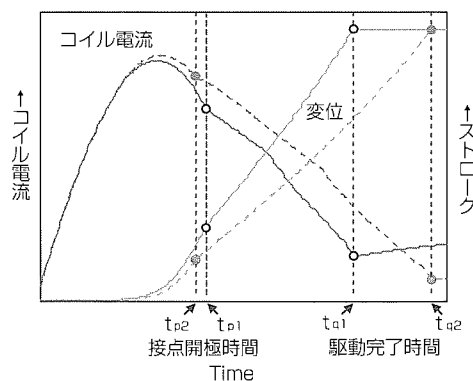
一例として、VCB接点が消耗する前の状態（初期状態）と接点消耗を模擬した場合のコイル電流と操作機構可動部の変位の波形を図3に示す。

接点初期状態に対し、接点消耗時のコイル電流及び変位のカーブで電流波形の変曲点と操作機構可動部変位の変曲点は一致しているため、コイル電流の波形（電流値、時間）を常時監視し、電流波形が変化する時間や電流値を抽出して分析することで、電流波形の変曲点から接点消耗量や操作機構部の磨耗など機械的な開閉特性に影響する異常の兆候を特定することができる。

HG-VA形スイッチギヤには、この電磁操作機構の電流波形分析による経年変化監視技術を含むCBM状態監視装置を搭載している。これにより、VCBの経年的変化による障害発生の予兆を検出する<sup>(1)</sup>ことで、従来は定期的又は遮断器の動作回数に応じて設備を停電して行っていた遮断器の開閉特性試験、操作機構各部の点検や接点消耗量測定などのTBM式保守形態から、機器の状態をCBM状態監視装置で検出し、必要に応じてメンテナンスを実施するCBM式保守形態にできるため、設備寿命までの保守点検作業やそれに伴う停電による操業ロスなどLCC低減に大きく寄与できるものと考えられる。

### 4.2 絶縁劣化監視機能

スイッチギヤの絶縁劣化監視の一つとして部分放電監視がある。部分放電発生時に放射される電磁波を検出する方



実線：接点初期状態，破線：接点消耗時  
t<sub>01</sub>, t<sub>02</sub>：接点開極時間，t<sub>01</sub>, t<sub>02</sub>：駆動完了時間  
(t<sub>01</sub>, t<sub>01</sub>：接点初期状態)，(t<sub>02</sub>, t<sub>02</sub>：接点消耗時)

図3. 遮断器駆動時のコイル電流と変位の波形変化

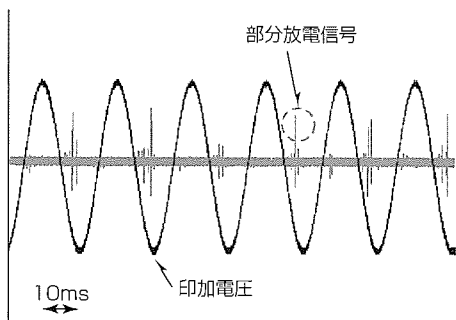


図4. 印加電圧と部分放電信号の関係

法はGISのオンラインの絶縁診断方法として認知されており、CBM機能として使用することに適している。特にMHz帯の周波数を利用するUHF(Ultra High Frequency)法と呼ばれる検出方法は、主にkHz帯を使用する方法に比べノイズ成分が少ない周波数帯を利用するため、S/N(Signal to Noise)比が高く検出能力に優れている<sup>2)</sup>。

図4にスイッチギヤ内で発生させた部分放電をスイッチギヤ内部に設置したアンテナで電磁波を検出したときの部分放電と印加電圧の関係を示す。

図から、印加電圧の交流サイクルと部分放電の発生は同期していること、及び部分放電が印加電圧の半サイクルの間に多頻度で発生する特徴を持つことが分かる。また、部分放電は数nsから数十nsの極短時間のパルス波形であり、図5の部分放電の放電信号の周波数特性を見ると、低い周波数から数百MHzの高い周波数まで、幅広い周波数帯を持つことが分かる。

部分放電を電磁波で検出する方法において、部分放電による電磁波とノイズとを区別する方法は最も重要な技術である。UHF帯の電磁波ノイズには放送波(地上波TV、衛星TV)、通信波(携帯電話、PHS(Personal Handyphone System))に代表される連続的な外来ノイズやモータやインバータ等の動作による単発ノイズがあり、UHF帯のノイズ源は少なくない。したがって、ノイズと放電とを分離する精度を高めることがシステムの誤動作を抑えるために重要となる。

一般的にノイズを分離・区別する方法には幾つかの方法があり、

- ① システムに進入するノイズを物理的に遮断
  - ② 部分放電による電磁波の物理的特性を利用
  - ③ 部分放電の特性を利用(放電判定方法による分離)
- が代表的である。①の方法は、電磁波の受信部であるアン

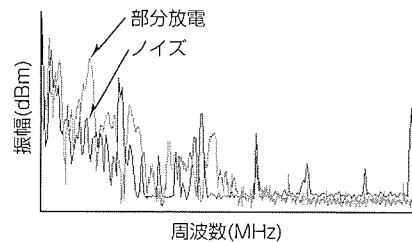


図5. 放電信号の周波数特性

テナの配置、選定によってノイズを遮断する方法が挙げられる。例えば、スイッチギヤのように全体が金属で覆われている内部は、外部からの電磁波の侵入が少ないため、アンテナをスイッチギヤ内部に配置することで容易にノイズの影響を低減できる。②の方法は、部分放電による電磁波がノイズよりも強い狭帯域の周波数をフィルタ回路で絞る方法が代表的で、図5のような部分放電による電磁波の周波数特性を利用する。③の方法は、例えば、図4で見られた印加電圧の交流サイクルに同期した放電信号が発生する特性を利用し、このサイクルごとの連続的な信号波形特性による放電判定アルゴリズムの適用によりノイズとの区別が可能になる。

上記の方法に代表されるような部分放電とノイズの判別により、高感度なスイッチギヤ用の部分放電検出システムを構築することができる。

## 5. む す び

以上、低圧力ドライエア絶縁方式を採用した72kV密閉形複合絶縁スイッチギヤHG-VAの概要と採用した機能について述べた。設備のライフサイクルにおける地球環境保全のための取り組み、ライフサイクルコストの低減など、今後とも更に追求していくテーマであり、地球温暖化係数(GWP)がゼロであるドライエアを利用した小型・高信頼性の密閉形複合絶縁スイッチギヤは、CBM状態監視装置とともに、今後の受配電設備に最適なスイッチギヤとして普及していくと思われる。

## 参考文献

- (1) 藤本隆一, ほか: 受配電システムの技術展望, 三菱電機技報, 78, No.12, 768~772 (2004)
- (2) 有岡正博, ほか: 24kV低ガス圧ドライエア絶縁スイッチギヤ“HS-X”, 三菱電機技報, 79, No.12, 795~798 (2005)

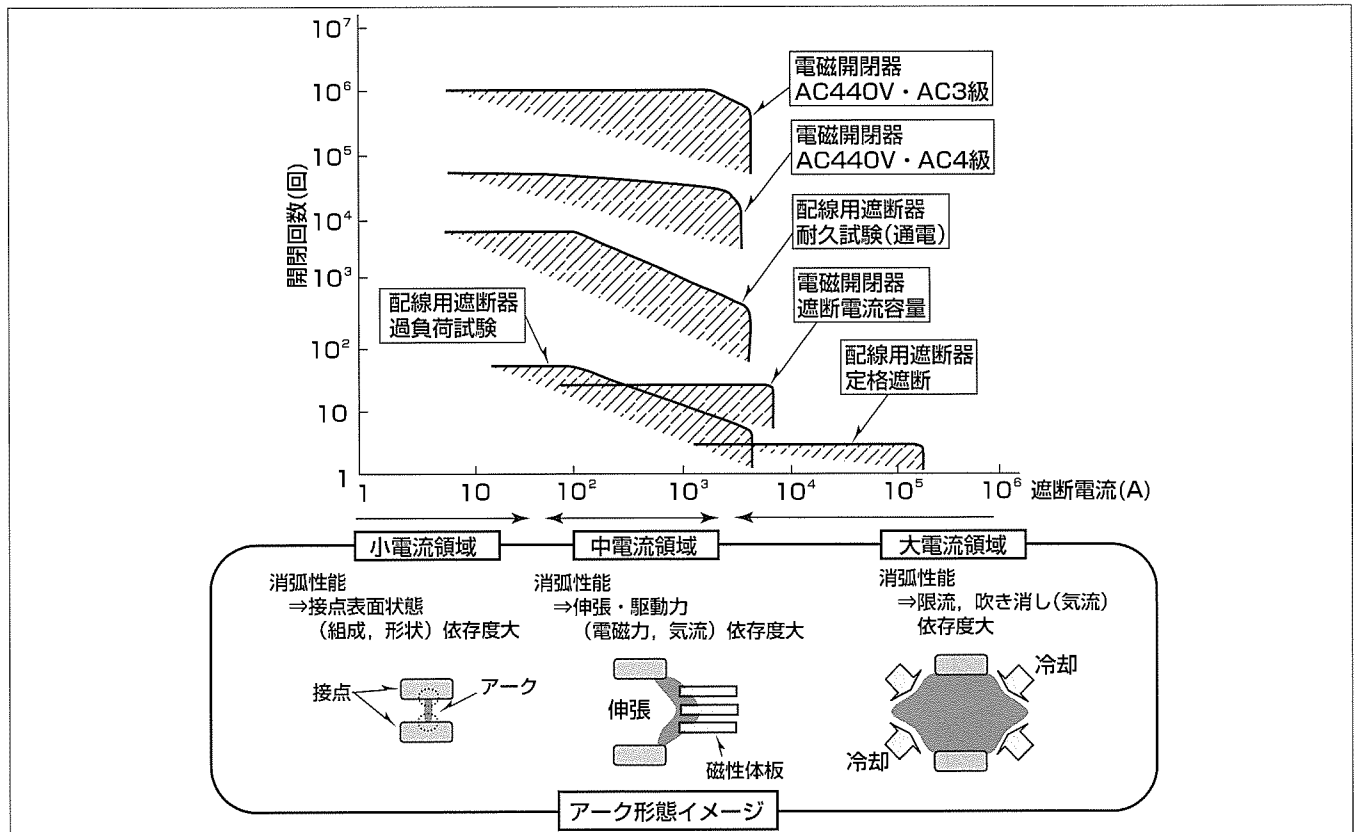
# 低圧開閉機器の遮断技術の動向

Current Interrupting Techniques for Low-Voltage Switching Devices  
Takao Mitsuhashi, Shigeki Koumoto, Tsuyoshi Sekiguchi

## 要 旨

低圧開閉器・遮断器の分野では、現在においても特殊な用途を除いて、寸法、コストの点で機械接点式が半導体方式より優位にあり、電流遮断動作時に接点間に発生する気中アーク(以下“アーク”という)を消弧し、接点間の絶縁を回復させる遮断技術の向上が求められている。これら低圧開閉機器が遮断すべき電流値は、数A以下～数百kAと広範囲にわたり、アーク挙動は電流領域により大きく異なる。そこで、本稿では、遮断電流領域を小電流領域、中電流領域、大電流領域の3つに大別し、各領域でのアーク制御に有効な手法、及び近年の遮断技術の研究開発状況について述べる。数十A以下の小電流領域では、自己電流による電磁力が弱くアークが駆動・伸張されにくいので、特に開極

距離が短い開閉器では消弧性能が電極状態に大きく依存する。一方、数十A～の中電流領域以上では、アークを駆動・伸張するための力(電磁力、気流等)の影響が大きくなり、これを強化する手法、例えば磁性体、駆動磁場を発生する回路構成等が有効となる。さらに、大電流領域では、膨大なアークエネルギーを処理する必要があるため、事故電流を絞り込む限流(処理すべきエネルギーを低減できる)に重点が置かれ、様々な限流遮断技術が開発・適用されている。また、グローバル化に伴う高電圧回路(AC600, 690V)での遮断容量格上げ要求に対応するため、PA (Polymer Ablation type) オートパッファ技術の高度化及び各機種への展開に取り組んでいる。



## 低圧開閉機器の遮断責務とアーク形態イメージ

低圧開閉機器の遮断責務は、機種により遮断電流は数A以下～数百kA、電流遮断回数は数回～百万回と広範囲にわたるが、電流領域によりアーク形態及びその挙動が大きく異なる。そのため、各機種で消弧性能を決定する主要パラメータが異なり、それぞれに最適化された消弧装置の開発が必要である。

### 1. ま え が き

低圧開閉装置(Low-voltage Switchgear)とは、主として交流600V以下、直流750V以下において、電気エネルギーの発電、変電、配電及び変換を目的とした開閉機器並びにこれに付随した制御装置、計測、保護及び調整装置の組合せであり、その主回路の電流制御及び保護には、低圧開閉器、低圧遮断器、ヒューズなどが用いられる。低圧開閉器には、広く用いられている機械接点式の電磁開閉器(Electromagnet Switch)のほか半導体を用いたソリッドステートコンタクタなどがあり、後者は特に多頻度多回数開閉、無騒音、アーク・ノイズレス等を必要とする用途で用いられている。一方、低圧遮断器には配線用遮断器(Miniature Circuit Breaker, Molded Case Circuit Breakers)、気中遮断器(Air Circuit Breakers)などがあり、これらには、機器自体に主回路の電流を検出して遮断器を動作させる機能が組み込まれ、過負荷保護、短絡保護、断路、漏電保護などの機能を持っている。また、同じ保護機器であるヒューズと比べ、多機能、かつ複数回の遮断が可能であることから、特に高速・高限流遮断が必要な場合を除いて低圧遮断器が用いられる傾向にある。

これら低圧開閉器・遮断器の分野では、現時点においても、特殊な用途を除いて、寸法、コストの点で機械接点式が半導体方式より優位にあり、電流遮断動作時に接点間に発生するアークを消弧し、接点間の絶縁を回復させる遮断技術の向上が求められている。

### 2. 要求される遮断責務

図1に、機械接点式の低圧開閉器・遮断器に求められる遮断電流と開閉回数の関係を模式的に示す。低圧開閉機器全体では、遮断すべき電流値が数アンペア以下～数百kアンペアと広範囲にわたり、開閉回数(遮断回数)も数回～百

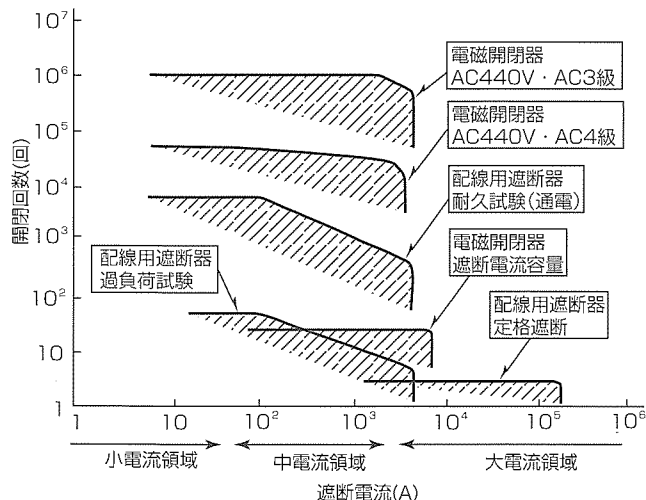


図1. 低圧開閉機器の遮断責務(AC400V系)

万回と広い。一般的に、電磁開閉器は遮断器と比較して遮断すべき電流範囲は中電流領域までと小さいが、～百万回の多頻度多数回の開閉が要求される。一方、遮断器では、電磁開閉器ほどの開閉回数に対する要求はないが、数アンペア以下の定格通電電流～数百kアンペアの短絡遮断電流まで広範囲の電流を遮断する性能が要求される。これらの遮断責務は、接点間で発生したアークを消弧する点では同じであるが、遮断すべき電流値及び回数の違いから、消弧装置等の基本的な設計思想が異なる。遮断すべき電流が比較的小さい電磁開閉器では、消弧装置は小型・簡易なものが用いられるか、又は省略され、多頻度多数回開閉のため消弧室寸法に対して相対的に接点寸法は大きく、開極距離は小さく設計される。このような構成において遮断性能を向上させるには、接点上でのアーク制御が最重要となる。一方、遮断器では、短絡遮断時の膨大なアークエネルギーを処理するため消弧装置は電磁開閉器と比較して大型・複雑なものが用いられ、開極距離も大きく設計される。このような構成において遮断性能を向上させるには、アーク伸張・駆動と消弧装置での消弧能力の改善が重要となる。

以下に、電磁開閉器の消弧装置を想定して実施した小電流～中電流領域での接点上アークの挙動観測について、及び配線用遮断器の大電流領域での遮断技術の適用例と近年の遮断技術の研究開発について述べる。

### 3. 小電流～中電流領域の遮断現象

図2に、電磁開閉器の消弧部にアクリル製観測窓を設けて観測したアーク外観例を示す。試験条件は、接点材質：銀酸化カドミウム、回路条件：単相交流460V、遮断電流40又は100A、撮影レート：20,000コマ/sである。同図(a)の40A遮断時では、アークは常に接点中央部の発弧位置で安定し、湾曲、移動することなく電流零点で消弧された。一方、同じ40Aの遮断であっても遮断を繰り返すことで接点を劣化させた(b)では、接点中央部で発弧したアークが接点のエッジ部へと高速移動し、両接点で外向き(図では右側)のアークジェットを形成し、アークが湾曲・伸張さ

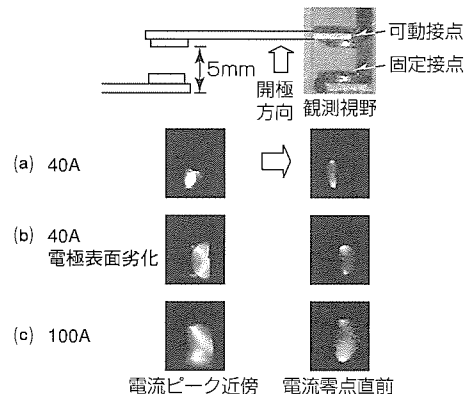


図2. 小電流～中電流領域のアーク形態

れた形態で消弧された。この劣化した接点表面を分析すると、局所的にカドミウム含有量が大幅に増加している部分が観測され、電極表面の組成変化がアーク挙動に影響を与えていることが推測される。また、(c)の100A遮断時では、アークは接点上を左右に激しく動き、最終的に接点エッジ部で外向きのアークジェットを形成し、湾曲・伸張された形態で消弧された。これらのアークの挙動及び形態の違いは、接点状態や遮断すべき電流値によって消弧性能を高める有効手段が異なることを示している。一般的に、数十A以下のアークでは、自己電流による電磁力が弱く、駆動・伸張しにくいので、消弧性能は接点の状態に大きく依存する。一方、数十A以上のアークでは、アークを駆動・伸張するための力(電磁力、気流等)の影響が大きくなるので、これを強化する手法、例えば磁性体、駆動磁場を発生する電路構成等が有効となると考えられる。

#### 4. 大電流領域の遮断技術

##### 4.1 配線用遮断器の大電流遮断技術の変遷

配線用遮断器では、短絡電流等の大電流遮断を行う場合、アーク電圧を利用して電流を制限する(限流する)ことにより処理すべきエネルギーを小さくし、小型で高い遮断容量を実現してきた。そのため、これまで、遮断性能の向上を目的としてより高いアーク電圧を発生させる手法の開発が進められてきた。遮断性能を向上させる手法を大別すると、①消弧板による分断(電極降下電圧の利用)、②電磁力によるアーク駆動・伸張、③有機絶縁物を利用したアーク及び空間の冷却、④接点多点化などがある。

図3は、三菱電機配線用遮断器の遮断技術と単位体積当たりの遮断容量の変遷を示したものであり、図中に示されたVJC(Vapor Jet Control)技術は上記③に、ISTAC(Impulsive Slot Type Accelerator)技術は上記②と③を融合した技術に、超限流技術は上記②、③、④を融合した技術にそれぞれ該当する。これらの技術は、現在でも各製品

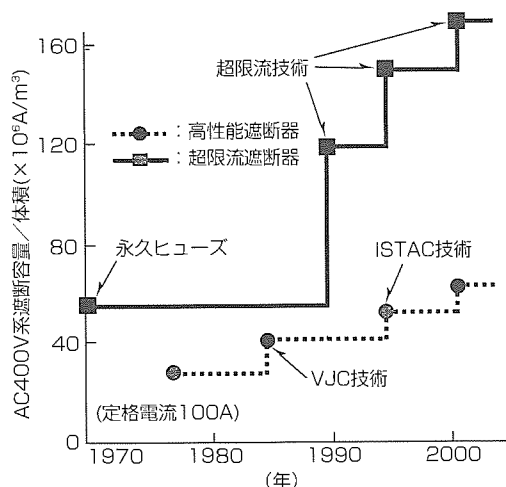


図3. 配線用遮断器の単位体積当たり遮断容量の変遷

に最適化した構成で適用されており、例えば、超限流技術を適用した製品では世界最大クラスの遮断容量と限流性能を維持している。

以上の技術は主に限流性能を向上させることを目的としたものであるが、近年の市場グローバル化に伴い高電圧回路(AC600, 690V)での遮断容量拡大の要求が高まっており、これに対応するために当社独自のPAオートパuffa技術が開発された。次節ではPAオートパuffa技術とその進展について述べる。

##### 4.2 PAオートパuffa技術の進展

PAオートパuffa技術とは、遮断動作時に接点間に発生するアークの熱を利用して高分子材(プラスチック)から分解ガスを発生させ、この分解ガスを筐体(きょうたい)内に貯留してアークの吹き消しに利用するもので、電流零点近傍での電極間での絶縁回復力を高めることができる。この技術は、2001年に発売された三菱ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器“WSシリーズ”の250定格高性能品から適用を開始し、2004年にUL489規格対応小型ノーヒューズ遮断機“SRU/HRUシリーズ”へ、2006年に“新形W & WSシリーズ”400, 630A定格品へと適用を拡大してきた。図4に、新形W & WSシリーズ630A定格品の消弧室の基本構成を示す。この機種では上中下3つのモールド部材で1つの消弧空間隔壁を形成しており、この消弧空間に蓄積された有機絶縁物分解ガスを電流零点近傍で接触子間アークに吹き付けて消弧する。

PAオートパuffa技術では、アークによる分解ガスを積極利用するため、遮断時の筐体内圧が上昇する傾向があり、これを受ける筐体強度への要求が高くなる。一方、筐体強度の点からはできるだけ内圧上昇が低い方がよく、製品への適用には必要な遮断性能をできるだけ低い内圧上昇で達成する必要がある。そのため的重要設計パラメータとして、排気口位置及び形状、電極材料、消弧板との併用並びに排気流路形状などが挙げられるが、以下においては、排気流路形状に関して実施した基礎検討について述べる。

図5に、400A定格品以上の大型配線用遮断器の消弧室寸法を想定し、内壁面形状を単純化した実験モデルの例を示す。同図(a)の単純矩形(くけい)モデルを基準モデルとし、

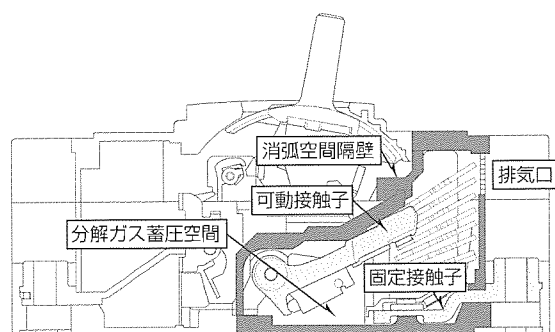


図4. 新形630A定格品の消弧室基本構成

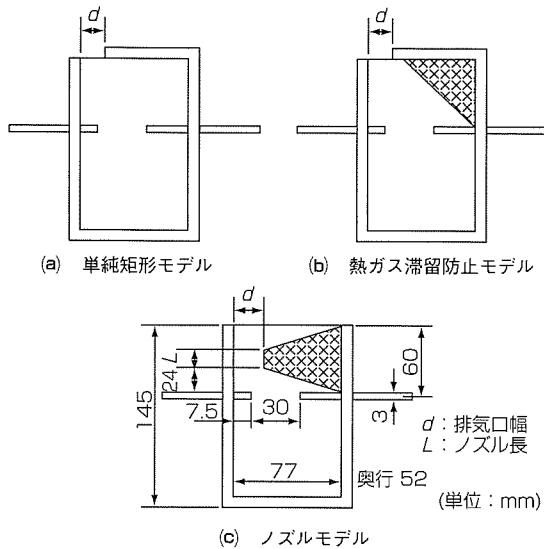


図5. 実験モデルの構成例

(b)の熱ガス滞留防止モデルでは電極上部空間に排気口に連なるテーパ状の部品(同図中、網掛け部)を追加し、上記空間における導電性の高い金属蒸気を含んだ熱ガスの滞留防止をねらっている。また、同図(c)のノズルモデルでは、排気口に連なるノズル状流路(同図中、網掛け部)を追加し、ノズル効果による効率的な熱ガスの排気をねらっている。これら供試器に設けた銅製の固定対向電極間でヒューズを溶断させることによりアークを発生させ、1サイクル通電の外部回路設定で最初の電流ゼロ点で遮断が成功するかどうかで遮断の成否を判定した。さらに、筐体底面に設置した圧力センサで筐体の内圧変化を同時に測定した。なお、実験回路条件は、交流600Vrms、推定短絡電流10kArms、力率0.24、投入位相90°である。

表1に、各モデルにおいて排気口の大きさを変化させて試験を行い、遮断が成功した場合の遮断時ピーク圧力のうち、最小の値を示す。同表から、単純矩形モデルに比べ、熱ガス滞留防止モデルでは約60%のピーク圧力で、ノズルモデルでは約40%のピーク圧力でそれぞれ遮断が成功していることが分かる。最もピーク圧力が低かったノズルモデルでは、熱ガス滞留モデルと同様に、テーパ状部品による熱ガス滞留防止効果が同時に作用していると考えられ、ノズル形状による効果が不明瞭である。そこで、ノズル長を変化させて更に詳細な検討を実施した。図6は、ノズルモデルにおいて、ノズル長を変化させた場合の平均ピーク圧力(同一セットアップで4回程度実施した平均)と遮断成功確率の関係を示したもので、ノズル長はノズルを外部方向

表1. 遮断成功時の最低ピーク圧力

モデル形状	遮断成功時の最小ピーク圧力
単純矩形モデル	0.31MPa
熱ガス滞留防止モデル	0.22MPa
ノズルモデル	0.13MPa

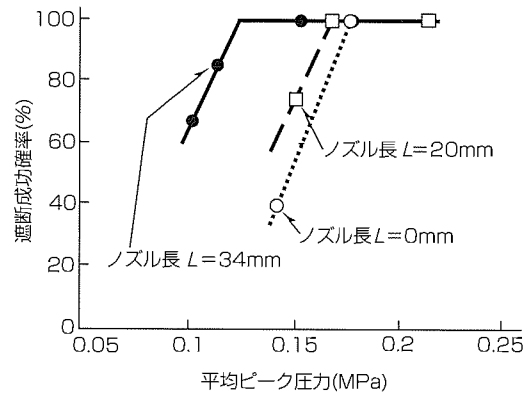


図6. ノズルモデルでの遮断成功確率

(図5(c)中、上部)に延長させることにより変化させ、筐体内側の電極と対向するテーパ状壁面の形状は同じとした。同図から、ノズル長が長くなるほど、より低いピーク圧力で安定的に遮断に成功していることが分かる。これは、ノズルを設けることにより効率的な熱ガスの排気が促進されることを示している。

以上から、自己吹き消し遮断を適用した配線用遮断器において、排気路をノズル状にすることにより、消弧に有利な気流を安定的に形成でき、遮断性能を低下させることなく遮断時の内圧を低減できることが判明した。

## 5. む す び

低圧開閉装置に用いられる機械接点式の開閉器及び遮断器の遮断技術について近年の研究開発動向を述べた。これらで得られた知見及び基本技術を基に、各機種に最適化した新たな消弧装置を開発し、小型化、遮断容量及び遮断回数向上を進めている。

## 参 考 文 献

- (1) 三橋孝夫, ほか: 最近の遮断器における新遮断技術, 三菱電機技報, 76, No.5, 348~351 (2002)
- (2) 三橋孝夫, ほか: 配線用遮断器の自己吹き消し遮断でのノズル効果, 電気学会全国大会, 6-223 (2006)



# 低圧遮断器における最近の規格動向と 新形ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器

細貝節夫\*  
上元利和\*

Standard Trend in Low-Voltage Switchgear and New MCCBs and ELCBs

Setsuo Hosogai, Toshikazu Uemoto

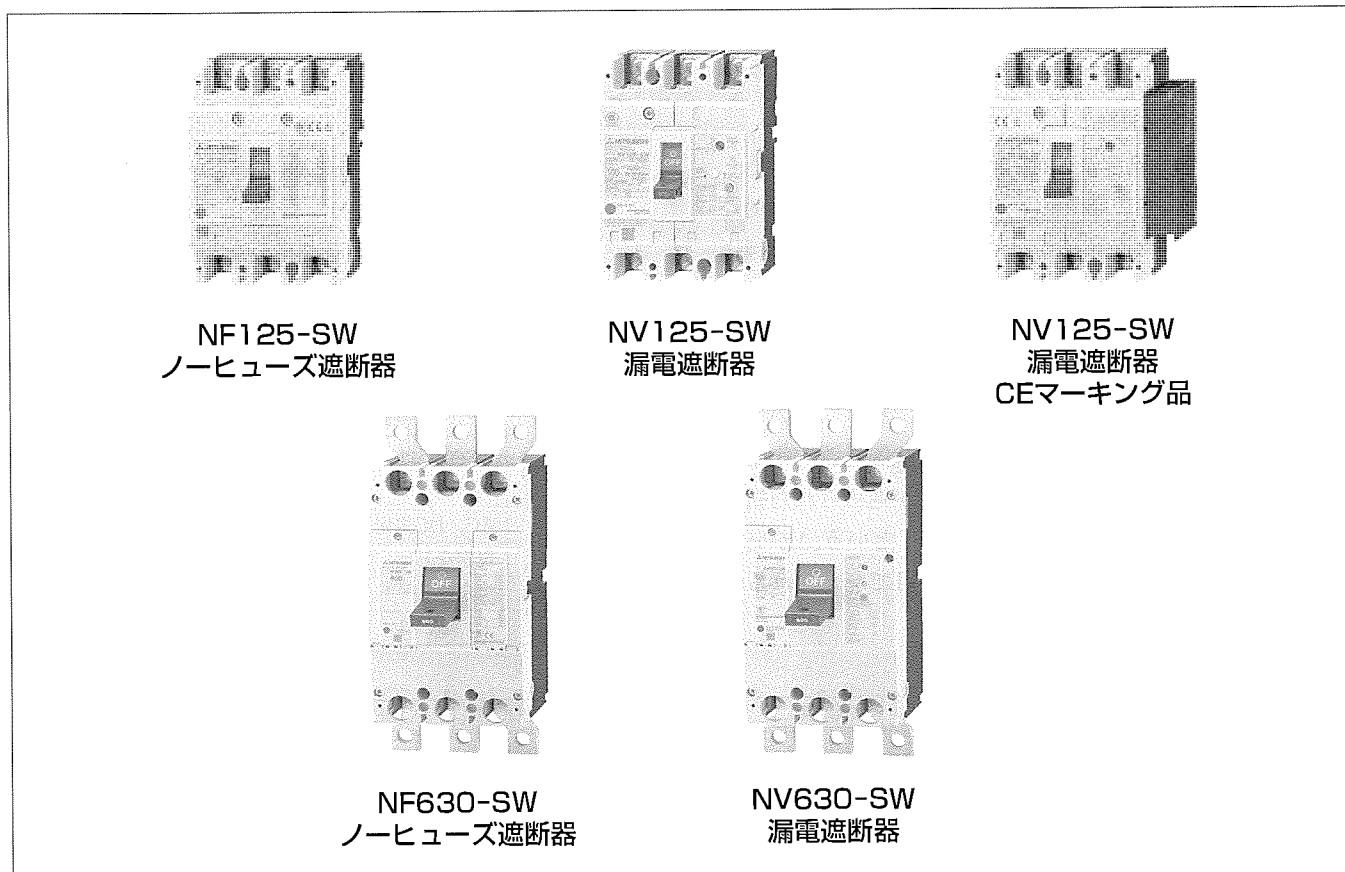
## 要 旨

低圧遮断器を取り巻く規制・規格の環境が、安全指向や規制緩和のために、グローバルな標準化に向かって大きく変わりつつある。2004年12月に我が国の低圧遮断器(配線用遮断器・漏電遮断器)のJIS(Japanese Industrial Standards)規格が大幅に改正された。それは、国際規格であるIEC(International Electrotechnical Commission)規格の体系を取り込み、従来からのJIS規格と統合を図った規格である。規格の国際整合化が進み、世界的な貿易の自由化の拡大が一層進むものと考えられる。

こうした環境変化の中、三菱電機の低圧遮断器は、国際化するグローバル市場の要求にこたえるために、2006年1月

(250Aフレーム以下)と4月(400Aフレーム～1,600Aフレーム)に新製品を市場に投入した。

新製品の特長は、国内・海外の形名を統一して新JIS規格への適合と海外規格に同時適合し、世界に通用する白カバーデザインを採用し、また、環境負荷の軽減を目指したRoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substance in electrical and electronic equipment)指令に適合したことである。機種標準化と仕様統一を図り世界市場に対応できる製品を目指したもので、グローバル化する国内市場の要求に対応した。



NF125-SW  
ノーヒューズ遮断器

NV125-SW  
漏電遮断器

NV125-SW  
漏電遮断器  
CEマーキング品

NF630-SW  
ノーヒューズ遮断器

NV630-SW  
漏電遮断器

## 新形三菱ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器

グローバルな市場への対応を目指し、新JIS規格と海外規格に同時対応し、国内仕様と海外仕様の統一化のため形名の統一と白カバー化を採用し、また、環境に配慮し欧州RoHS指令に適合した製品である。

## 1. ま え が き

低圧遮断器を取り巻く規制・規格の環境は、安全指向・グローバルな標準化指向へと大きく変わりつつある。2004年12月に、我が国の低圧遮断器(配線用遮断器・漏電遮断器)のJIS規格が大幅に改正された。規格の国際整合化を目指したIEC規格とJIS規格との統合化であり、世界的な貿易自由化の拡大がより一層進むものと考えられる。

国際規格であるIEC規格は2003年4月にIEC60947-2 Third edition(第3版)が発行され、これを受けて、EN(European Standards)規格は、2006年6月以降EN60947-2:2003(IEC規格第3版の内容)への適合が義務付けられた。

また、地球環境負荷の低減に対応して、欧州RoHS指令は、有害6物質の使用制限を取り決め、2006年7月以降上市される電気・電子機器の規制に取り組む。

こうした環境変化の中、当社の低圧遮断器は、海外規格に対応したグローバル化を目指し、製品の標準化を図りながら市場の要求にこたえるため、2006年1月(250Aフレーム以下)と4月(400A~1,600Aフレーム)に新製品を発売した。

本稿では、低圧遮断器を取り巻く規格の動向と、それに対応した新製品開発の取り組みについて概要を述べる。

## 2. 規格の動向

### 2.1 JIS規格改正の経緯

2004年12月低圧遮断器のJIS規格が大幅に改正された。これは、貿易上の障害を低減し規制緩和の推進と世界的な貿易の自由化の拡大を求めてJIS規格の国際整合化を図ったものである。

我が国の低圧遮断器のJIS規格は、従来から運用されているJIS規格(以下“従来JIS”という。)と、1999年にIEC規格と整合を図ったJIS規格(以下“整合化JIS”という。)の2つの規格が存在していた。この並存という状況を改善するために双方の規格を整理・統合化する作業が進められた結果、統合化された新しいJIS規格(以下“新JIS”という。)が発行された。なお、従来JIS規格は2008年9月で廃止される予定である(図1、図2)。

### 2.2 新JIS規格の概要

統合化された新JIS規格は、IEC規格の体系を採用したことにより、従来JIS規格にない“産業用”“住宅用”に分けられた。また、統合化を進める中で、IEC規格と従来JIS規格の性能規定で共通的部分を“規格本体”とし、電気設備工事規定に対し大幅に異なる部分では附属書として規定している。

#### 2.2.1 産業用と住宅用の区分

産業用と住宅用との区分は電気設備の使用に関して設備知識がある人とそうでない人とのスキルによって用途が区分されるとし、住宅用とは一般人も操作することを前提とし、産業用とは熟練者と技能者が取り扱おうとし、一般人は取り扱わないとした考えである。また、住宅用は、産業用と比べて適用範囲が制限されていることに注意が必要である。表1に違いを示す。

#### 2.2.2 電気設備工事規定による区分

電気設備が施工される設備工事規定の要求性能により、

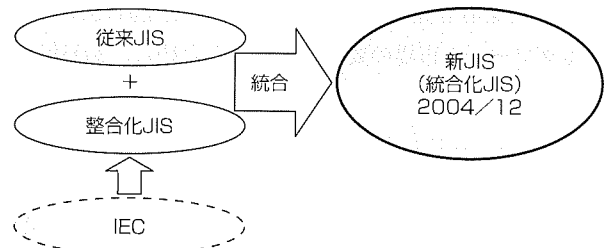


図2. 従来JIS, 整合化JISと新JISとの関係

表1. 産業用と住宅用の適用範囲

	産業用	住宅用
使用区分	熟練者・技能者	一般人
定格電圧	AC1,000V以下 DC1,500V以下 (電技省令では低圧 AC600V以下, DC750V 以下)	AC440V以下(線間) AC300V以下(対地間)
AC/DC	AC, DC規定あり	AC規定のみ
定格電流	規定なし	150A以下
定格遮断電流	規定なし	25kA以下
汚損度	1, 2, 3	2

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
JIS	従来JIS: JIS C 8370, JIS C 8371 等							(2008/9 廃止予定)
	整合化JIS: JIS C 8201			新JIS: JIS C 8201-2-1 付属書1, 付属書2 等				
IEC	IEC60947-2 第2版							
	03/4 IEC 60947-2 第3版 (漏電遮断器 三相電源取り化を規定)							
EN	EN-60947-2:2001					2006/5 廃止		
	EN-60947-2:2003 (06/6から漏電遮断器 三相電源取り化を規定)							
RoHS	規制6物質(Pb, Hg, Cd, 6Cr, PBB, PBDE)					06/7 EU RoHS適合		
内線規程	従来JISを指定				新JIS 付属書2 を追加			

図1. 規格の動向

それぞれの規格が“附属書1”“附属書2”に分けて規定された。さらに、附属書1の遮断器と附属書2の遮断器の混用はできないとしている。

附属書1は、JIS C 0364建設電気設備規定に対応する回路遮断器の性能を規定(IEC規格特有の要求項目)し、附属書2は、在来電気設備規定に対応する回路遮断器の性能を規定(従来JIS規格特有の要求事項)している。

### 2.3 電気設備技術基準と内線規程

電気設備の技術基準は、解釈第3条から271条までを在来工事規定とし、新しく解釈第272条として1999年にIEC工事(JIS C 0364建設電気設備工事)を認めている。

また、内線規程は、JIS規格の統合化に合わせ、2005年9月に新JISの附属書2を取り入れた。

### 2.4 EN規格

EN規格では、2006年6月以降、EN60947-2:2003への適合が義務付けられる。これはIEC規格の第3版に相当する規定で、電源電圧依存型の漏電遮断器では、欠相状態を想定し、制御電源を三相から供給することが必要となる。従来の漏電遮断器(単相電源取り)と三相電源取りの構成の違いを図3に示す。

### 2.5 RoHS指令

欧州では、電気・電子機器への特定有害物質の使用を制限するRoHS指令が2006年7月から施行される(表2)。規制の対象製品は、10種類のカテゴリーに区分されている。低圧遮断器は“監視及び制御機器”(カテゴリー9)に含まれ、RoHS指令の規制対象には含まれていない。また、特定有害6物質の適用除外規定も定められており、電気機器の接点に含まれるカドミウムは適用除外となっている。

## 3. 新形遮断器の開発

当社の低圧遮断器は規制・規格の環境変化に対応し、国内市場・海外市場を視野に入れたグローバルな市場展開を進めるため、国内仕様、海外仕様、海外規格対応仕様を統一し標準化を図った新製品の開発を行った。新製品の特長として①国内・海外製品の形名統一、②白カバー化、③名板廃止による表示のレーザ印字化、④JIS・IEC・GB(Guojia Biaozhun: 中国国家標準)規格への同時適合、⑤630Aフレームの小型化などである。

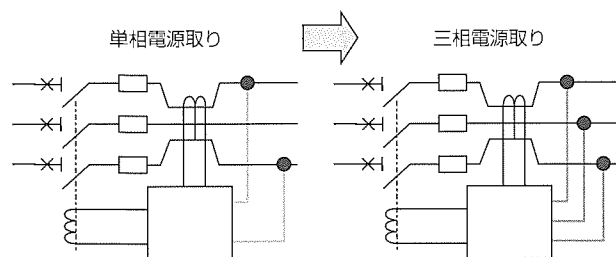


図3. 単相電源取りと三相電源取りの比較

また、オーダーの情報管理と製品個体識別管理を行うためQR(Quick Response)コードを採用した。

### 3.1 国内・海外製品の形名統一

当社の形名は、従来JIS規格に規定されたアンペアフレーム(フレームの大きさ)を形名の一部として使用してきたが、新JIS規格では、アンペアフレームの規定がなくなったことにより、標準数“R10”を使用した海外形名に統一し標準化を図った。

(例)NF30-SW→NF32-SW

NF50-SW・NF60-SW→NF63-SW

### 3.2 白カバー化

国内向けとして黒色カバー、海外向け及び国内向けの規格対応(UL・CE・GB)製品を白色カバーとして対応してきた。グローバルな市場展開と製品の標準化を図り、新製品では白色カバー統一を図った(図4)。

### 3.3 JIS・IEC・GB規格への同時適合

国際市場の拡大や国内需要家の海外進出・生産拠点の海外移行などが進み、海外規格取得の要求や国内・海外での製品共用化の要求が高まってきている。新JIS規格が制定されたことにより、製品のJIS・IEC・GB規格の同時適合を図った。

### 3.4 EN規格への対応

漏電遮断器については、EN60947-2:2003に対応した三相電源取り構造を採用し、CEマーキング対応品としてシリーズ化を図った。しかし、国内市場や中国、アジア市場など、EU市場以外ではEN規格への対応が必ずしも必要ではなく、従来からの単相電源取り構造の漏電遮断器も併売することとしている(図5)。

### 3.5 名板廃止とレーザ印字

各規格に同時適合したことにより、それぞれに定められている表示義務事項や規格認証マークの表示について、規

表2. 特定有害6物質とその含有しきい値

特定有害6物質	しきい値
鉛, 水銀, 六価クロム ポリ塩化ビフェニール(PBB) ポリ臭化ジフェニールエーテル(PBDE)	均質材料の質量 1,000ppm以下
カドミウム	均質材料の質量 100ppm以下

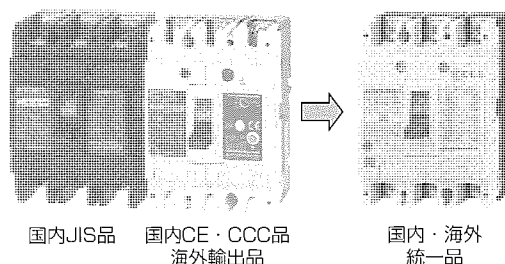


図4. カバー統一

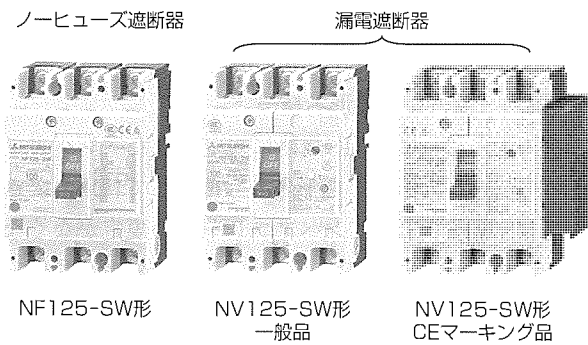


図5. 新製品のノーヒューズ遮断器・漏電遮断器

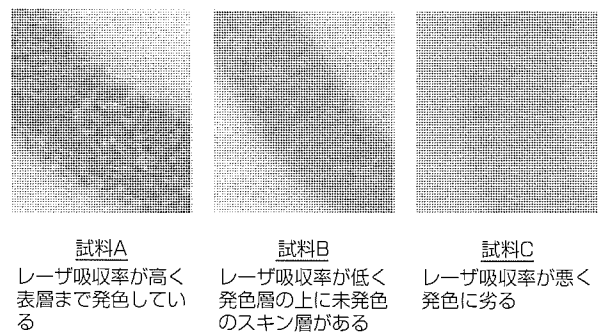


図7. レーザ印字の表面状態

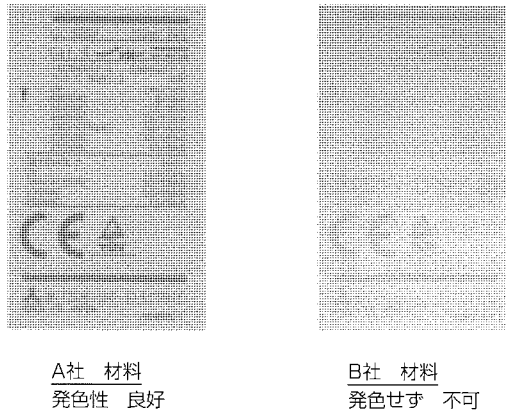


図6. 材料によるレーザー発色性比較

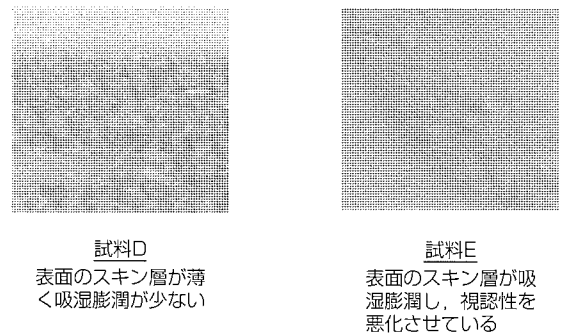


図8. 耐湿度試験結果

格に定められたシンボルマークなどを使って表示の標準化を進めるとともに、多種多様な情報をオンラインデータ化し、製造ライン内にレーザー印字装置を設置し、インラインで直接製品カバーに表示することで、品質の向上と短納期化を図った。

### 3.5.1 材料選定

レーザー印字するために材料の選定が重要である。レーザー印字は、カバー表面に直接レーザー光を照射し、局部的に表面層を発色させ印字するものである。レーザーを照射させ樹脂表面を発色させる原理は、材料の種類や添加剤の成分・処方により異なり、①発泡作用による発色、②発色剤の凝縮作用による発色、③炭化反応による発色、④化学変化による発色、などがある。今回採用した材料は、炭化反応による発色を採用した。

低圧遮断器に採用する材料で発色性の優れた材料を選定するために、二種類の材料を基本に数社の材料での印字性比較試験を行った。同じ基材材料でも、添加物・処方の違いによりその発色性は大きく異なっている(図6, 図7)。

### 3.5.2 材料の信頼性評価

発色性の優れた材料を採用するに当たり、材料の強度低下や耐環境性能の劣化がないか、信頼性評価試験を行った。強度評価では、実機評価を含め現状と同等であることを確

認した。また、耐環境性能としては、耐熱性・耐湿性・耐候性、耐ガス環境性などの評価を行った。評価は、視認性とQRコードの読み取り精度の確認、被測定物からの反射光を測定する色差計を用いた数値判定により評価した。

### 3.5.3 材料の改良

対湿度評価において、材料によっては極端に視認性が低下する場合があった。これは、発色メカニズムとの関係があり、樹脂の水分吸収により表示部分のスキン層が膨潤することで、視認性を低下させることが分かり、材料処方の改良で対策した(図8)。

### 3.6 630Aフレームの小型化

従来技術のPA(Polymer Ablation type Auto-Puffer)オートパッファ技術を進化させた中間ベース構造や、樹脂と金属部分を分割結合した分割クロスバー技術、薄形コイルばねを利用し安定した摺動(しゅうどう)接触抵抗を可能にした新形シャントレス構造等を採用し、従来機種の体積比で63%に低減した小型遮断器を実現した。

## 4. む す び

以上、低圧遮断器を取り巻く規制・規格の動向と、新形ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器の開発について述べた。

今後とも、低圧遮断器のグローバル化を目指し、新しい技術を取り込んだ製品開発を行う所存である。

# 新形“W & WSシリーズ”遮断器の小型化技術

渡辺和昌\*

Downsizing Technology for New Molded-Case Circuit Breaker “W&WS Series”

Kazumasa Watanabe

## 要旨

近年における低圧配電設備の大容量化・省スペース化に伴い、配線用遮断器・漏電遮断器に関しても外形寸法の小型化・標準化に対する根強いニーズが存在する。

しかし、遮断器では、短絡電流などの大電流遮断で発生するアークを素早く消滅させるため、十分な消弧スペースが必要である。また、定常通電時は電流の2乗に比例する熱が遮断器の内部導体から発生するが、温度上昇を規格値内に抑えるために、導体の電気抵抗を低減し、十分な放熱スペースを確保しなければならない。

遮断器の小型化にはこのような課題が存在するが、新形W & WS (White & World Super) シリーズ遮断器630アンペアフレームでは、外形寸法を従来の63%に低減した。

今回の製品開発では、次のような技術を新規に採用した。

### (1) 中間ベース構造

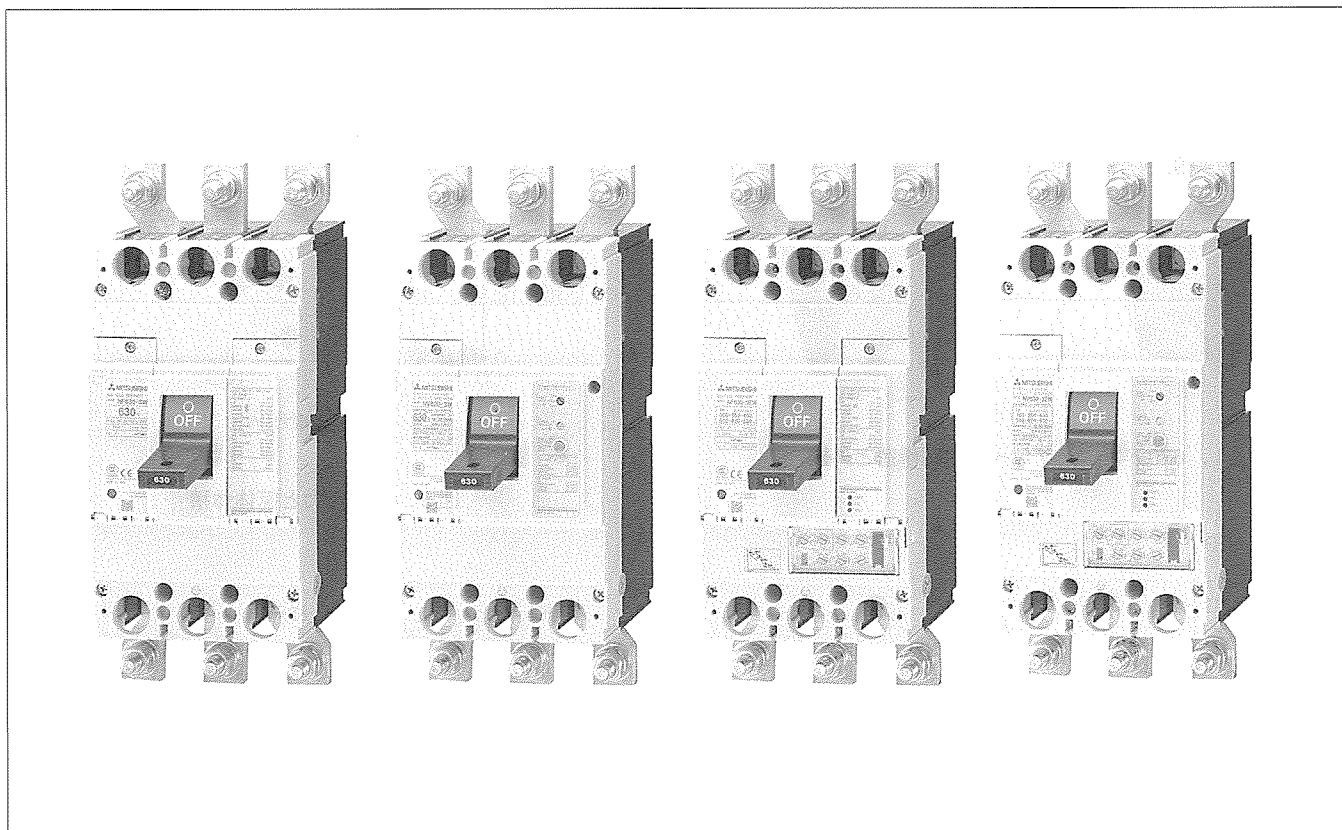
筐体(きょうたい)を構成するベースとカバーの間に簡易形状の中間ベースを設置し、PA (Polymer Ablation) - オートパuffa効果により単位体積当たりの遮断性能を向上させた。

### (2) 新シャントレス通電技術

シャントレス通電構造部分に薄形コイルばねを使用した。このばねを通電摺動(しゅうどう)部の押圧確保に利用することで、大電流の接触抵抗を省スペースで安定させた。

### (3) 分割式クロスバー

可動接点保持部材のクロスバーを局部的に樹脂材料から金属に代えることで、強度を確保しつつ横幅寸法を小型化した。



## 新形W & WSシリーズ遮断器630アンペアフレーム

左からノーヒューズ遮断器“NF630-SW”，漏電遮断器“NV630-SW”，電子式遮断器“NF630-SEW”，電子式漏電遮断器“NV630-SEW”である。

## 1. ま え が き

電気エネルギーの需要増大、設備の大容量化で、低圧配電設備や各種機械装置に広く使用される配線用遮断器・漏電遮断器は高遮断容量化が進んだ。そして、近年における経済意識の高まりや設備設計作業の効率化により、同等性能での外形寸法の小型化、標準化などが求められている。

このようなニーズに対応するため、新形W&WSシリーズ遮断器630アンペアフレームでは、体積比で従来の63%に低減する外形寸法の小型化を実現した。その内部構造と外観を図1に示す。

この開発における小型化に関する課題と、それを解決した新技術について述べる。

## 2. 小型化に関する技術課題

### 2.1 遮断性能

配線用遮断器・漏電遮断器の基本的役割は過電流や短絡発生時に電気接点を開くことで、電流を遮断して回路を保護することである。電流が大きくなると開極時に接点間にアークが発生する。このアークを速やかに伸張・冷却して消滅させるために、アークエネルギーに応じた消弧スペースが必要である。図2に三菱電機遮断器におけるAC415V、

50kAでの最大通過エネルギー $I^2t$ と筐体体積の関係を示す。アークエネルギーが大きくなるにつれて遮断が困難になり、必要な筐体体積が増加しているのが分かる。

遮断容量を維持しつつ小型化するためには、消弧スペースの減少に対して何らかの対応が必要である。

### 2.2 通電容量

遮断器に定格電流以下の電流が流れている場合でも、電源負荷端子間の内部抵抗で電力を消費し、電流値の2乗に比例した熱が発生する。遮断器では各種規格によって温度上昇の上限が決まっているが、外形寸法の小型化を行うと内部導体の断面積や放熱スペースが減少し、規格値を満足することが困難となる。

図3は当社遮断器の定格電流50~4,000A品における消費電力と筐体体積の関係を示したものである。この図から、消費電力が増加するに従い、従来遮断器では筐体体積を指数的に確保することで温度上昇を抑えてきたということが分かる。つまり、小型化するためには限られたスペース内で内部抵抗を低減する必要がある。

## 3. 新形遮断器の小型化技術

図4は新形W&WSシリーズ630アンペアフレーム品と従来機種“PSシリーズ”の600アンペアフレーム品の外形を

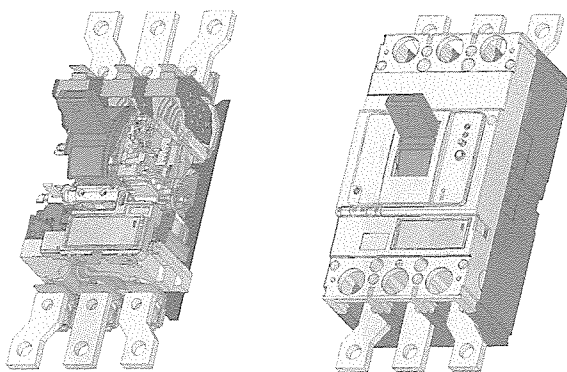


図1. 630アンペアフレーム内部構造と外観

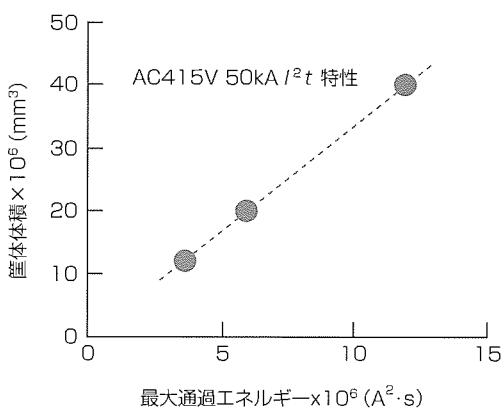


図2. 最大通過エネルギーと筐体体積

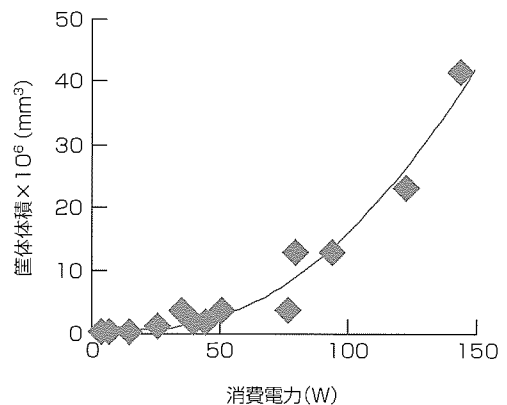


図3. 消費電力と筐体体積

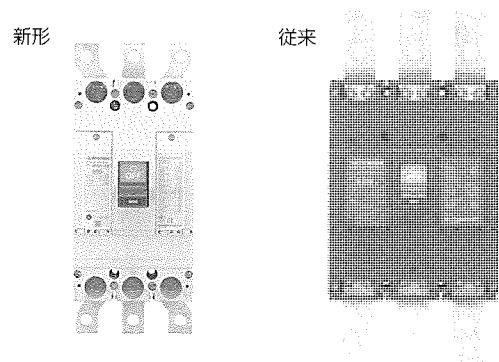


図4. 外形新旧比較

比較したものである。左側の新形では、幅寸法を67%に、高さを93%に小型化し、従来400アンペアフレーム品と同じ外形寸法に標準化した。開閉耐久回数、通電容量、遮断性能などの製品仕様は従来機種と同等又はそれ以上であり、同一外形寸法で配線用遮断器、漏電遮断器、漏電アラーム遮断器、電子式遮断器など、様々な製品をラインアップした。

以下に、小型化に用いた技術について述べる。

### 3.1 中間ベース構造

まず、省スペースで遮断性能を維持又は向上させるため、図5のように、筐体ベースとカバーの間に中間ベースと呼ばれるモールド部材を設置した。その断面図を図6に示す。新形の断面図中央部分が中間ベースで構成された隔壁である。この隔壁は、大電流遮断時に発生するアークによる爆風や溶融物から機構部や引き外しリレー部を保護する。また、内圧上昇時に最もひずみを生じやすいベース側

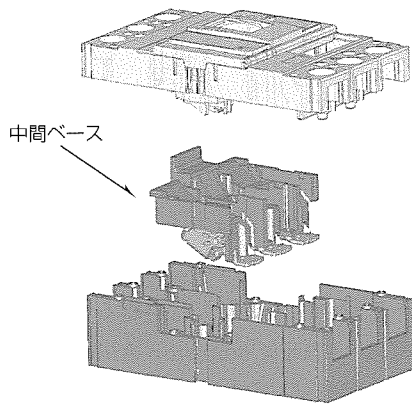


図5. 中間ベース構造

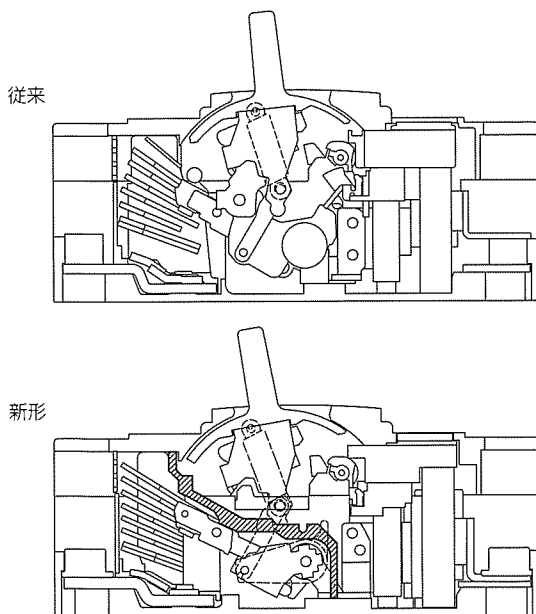


図6. 中間ベース断面図

壁を保持する構造を持ち、筐体の剛性も上げている。

かつ、可動接点奥部の空間を密閉する形状になっており、遮断時に発生する高分子分解ガスを貯留し、いわゆるPAオートパッファ効果でアークの吹き消しや遮断後の絶縁回復も行われる。従来も可動接点周辺を専用ケースで密閉する構造は存在したが、中間ベース構造は組立性と部品点数低減で優れている。この構造を採用することで、小型化だけではなく、AC690Vの遮断容量向上(Icu: 15kA→35kA)も実現した。

### 3.2 新シャントレス通電技術

シャントレス通電構造部分に薄形コイルばねを使用した。

この薄形コイルばねをスラスト方向に使用した場合のばね特性を図7に示す。上の軌跡が押し込み時の特性、下の軌跡が戻り時の特性である。

この薄形コイルばねの特長は、幅寸法2mm以下という微小スペースで50N以上の荷重が得られることだけでなく、ストロークの変動に対して荷重が安定する範囲が広い点である。このばねを、図8のように、可動接点回転軸の電気的な接触部の押圧ばねとして使用した。

この押圧は過大になると回転部の摩擦が増加し開閉性能が低下し、過小になると接触が不安定になり電気抵抗が急増する。薄形コイルばねを用いることで、部品寸法のばらつきを吸収して、従来より安定した接触抵抗を得ることが

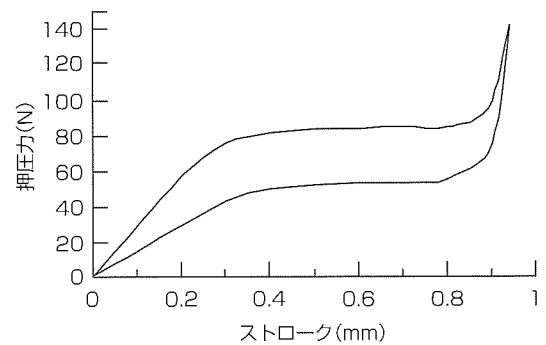


図7. 薄型コイルばね特性

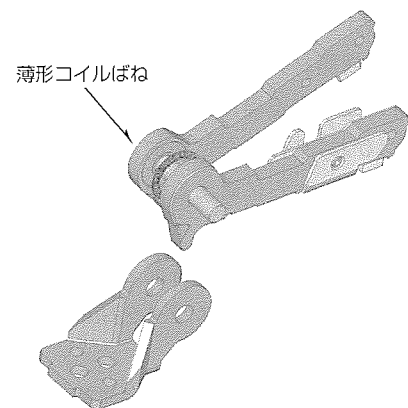


図8. 新シャントレス構造

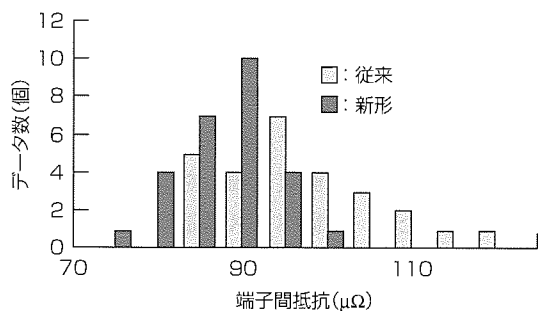


図9. 端子間抵抗値比較

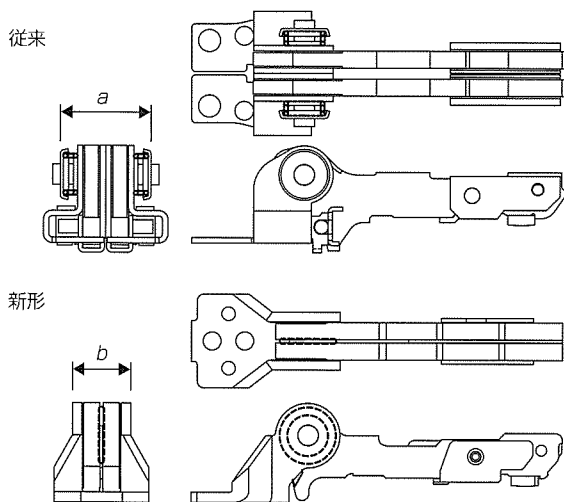


図10. 新シャントレス構造外形比較

できた。遮断器端子間抵抗値のヒストグラムを図9に示す。この図から、新シャントレス方式の新形では、従来品より抵抗値のばらつきが小さくなり平均値も低くなったことが分かる。

また、薄形コイルばねを使用する前後での寸法比較を図10に示す。圧縮コイルばねを2つ用いていた従来品接触部a寸法から、薄形コイルばね1つに変更した新形b寸法は34%の小型化を達成できた。

### 3.3 分割式クロスバー

多極遮断器では複数の可動接点を同時に開閉する。この可動接点を保持するクロスバーには異極間の電気的絶縁が必要であるため樹脂材料が使用される。また、開閉の衝撃荷重、通電時に発生する導体からの熱、接点接触圧を保持するための捻(ひね)り荷重などが加えられるため、クロスバーの小型化ではこれらに耐える強度を確保する必要がある。

新形遮断器では、可動接点保持部を金属化して異極間のみ樹脂材料とする分割式クロスバーを採用した。その構造を図11に示す。

可動接点の軸部を保持する部品が金属製のホルダであり、薄板の曲げ加工で製作した。そして、異極間のホルダ同士を接続するのが樹脂製のクロスバーである。開閉動作はこ

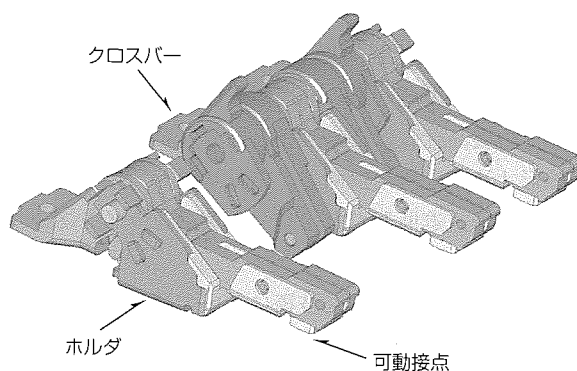


図11. 分割式クロスバー

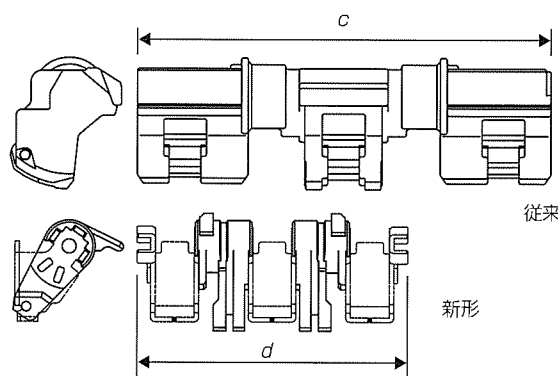


図12. 分割式クロスバー幅寸法比較

のクロスバーを駆動することで行われる。クロスバーとホルダの結合部は、CAE(Computer Aided Engineering)解析を用いて、接触部に発生する応力が最小になる形状とした。

また、図12は幅寸法を従来品と新形で比較したものである。この構造により、従来と同等の強度を確保しつつ、新形の幅寸法dは従来品cの66%まで小型化した。

## 4. む す び

新形W&WSシリーズ遮断器の小型化に関する技術について述べた。今回の開発で、63%の小型化達成と同時に、400アンペアフレーム品への外形寸法標準化も実現できた。つまり、小型化による軽量化・省スペース効果のほかにも、別製品と外形寸法を合わせることで配電盤設計の標準化、取付互換性の拡大、付属装置の共用など、使い勝手が向上した。

これからも新しい技術を探索・創造しつつ、ユーザーフレンドリーな製品開発を目指していく。

## 参 考 文 献

- (1) 三橋孝夫, ほか: 最近の遮断器における新遮断技術, 三菱電機技報, 76, No.5, 348~351 (2002)



# 三次元過渡電磁界解析を用いた開閉装置の高度設計技術

牧田 陽\*  
竹内敏恵\*

Advanced Design Technology of Switching Devices Using 3-D Transient Electromagnetic Analysis  
Yo Makita, Toshie Takeuchi

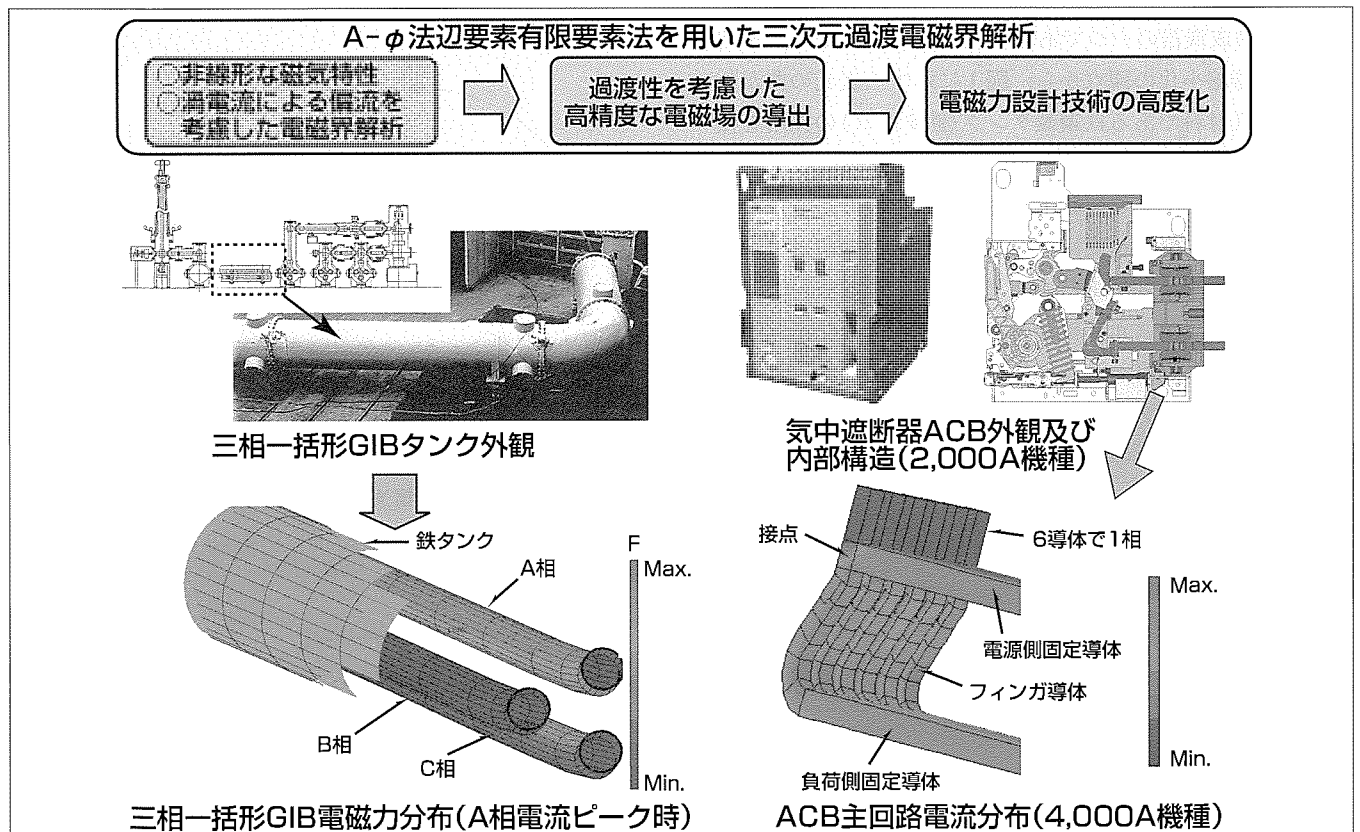
## 要 旨

各種開閉装置の高度化開発の要所で電磁界解析が用いられている。有限要素法を用いた三次元過渡電磁界解析は重要な技術の一つであり、電極部の様々な現象解析に対し主に適用されている。その中でも、磁気ベクトルポテンシャル  $A$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  を用いた  $A-\phi$  法辺要素有限要素法は、①渦電流多連結導体問題の取扱いが容易、②非線形問題での収束性に優れる等の特長があり、現在最も汎用的に使われている手法の一つである。

筆者らは、 $A-\phi$  法辺要素有限要素法による過渡電磁界解析技術を用いた開閉装置の短絡電磁力設計技術の高度化を推進してきた。本稿では、 $A-\phi$  法による三次元過渡電磁界解析技術を用いたガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear : GIS) の短絡電磁力設計の高精度化技術及び

低圧気中遮断器 (Air Circuit Breaker : ACB) の短時間通電設計最適化技術について述べる。この技術の新たな導入により、通電時に渦電流の影響で導体内に発生する電流が不均一に流れる現象 (偏流) を厳密に模擬でき、さらに、導体付近の非線形な磁気特性を持つ磁性体の影響を考慮した電磁界解析が可能になり、導体に発生する短絡電磁力設計の高精度化が実現できる。

その結果、高精度な過渡電磁界解析による GIS 用三相一括形ガス絶縁母線 (Gas Insulated Busbar : GIB) の小型化の可能性を見だし、さらに、新形低圧気中遮断器 “AE-SW シリーズ” における定格短時間通電容量の格上げを達成した。



## 三次元過渡電磁界解析を用いた開閉装置設計技術の高度化

三相一括形 GIB 短絡電磁力設計高精度化及び ACB 主回路の短時間通電設計最適化への適用を示す。

## 1. ま え が き

各種開閉装置の高度化開発の要所で電磁界解析が用いられている。有限要素法を用いた三次元過渡電磁界解析は重要な技術の一つであり、電極部の様々な現象解析に主として適用されている。その中でも、磁気ベクトルポテンシャル $A$ と電気スカラーポテンシャル $\phi$ を用いた $A-\phi$ 法辺要素有限要素法は、①渦電流多連結導体問題の取扱いが容易、②非線形問題での収束性に優れる等の特長があり、現在、最も汎用的に使われている手法の一つである。

筆者らは、 $A-\phi$ 法辺要素有限要素法による過渡電磁界解析技術を用いた開閉装置の短絡電磁力設計技術の高度化を推進してきた。

本稿では、 $A-\phi$ 法による三次元過渡電磁界解析技術を用いたGISの短絡電磁力設計の高精度化技術及び低圧ACBの短時間通電設計最適化技術について述べる。

## 2. 三相一括形GIBの短絡電磁力設計高精度化

近年の系統容量の増大に伴い、超高压クラスのGISにおける短絡事故時の短時間耐電流値の増大が求められている。一方、更なる経済性の追求からは一層の機器縮小化が要求されており、このためには、短絡電磁力の解析精度の向上が要求されてきた。

GISの構成機器の一つである三相一括形GIBでは、経済性及び機器縮小化の観点から、図1に示す三次元の曲がり部や強磁性材料である鉄鋼製タンク(鉄タンク)の採用を検討してきた。鉄タンクの曲がり部の採用は、短絡事故時の三相導体間に発生する短絡電磁力の増大につながるため、この短絡電磁力を高精度に把握し支持構造等の設計に反映することが重要課題であった。そこで、 $A-\phi$ 法辺要素有限要素法による三次元非線形過渡電磁界解析手法を適用し、短絡事故時に渦電流効果により発生する三相導体内の電流の偏流及び鉄タンクの影響を考慮することにより電磁力解析の高精度化を検討した<sup>(1)</sup>。

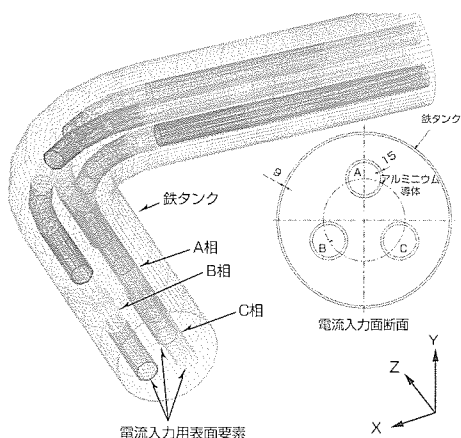


図1. 550kV GIS三相一括形GIBメッシュモデル

## 2.1 解析モデル

図1に示すとおり、三相導体は正三角形に配置され、15mm厚のアルミニウム導体、9mm厚の鉄鋼製タンクで構成される。短絡電磁力解析の高精度化のため、三相一括形GIBの63kA短時間通電試験を対象に三相過渡電流が流れた場合の電流偏流及び短絡電磁力を解析した。解析には、導体及びタンク内の渦電流、非線形磁気特性が考慮可能な汎用電磁界解析ソフトウェアEMSolution<sup>(注1)</sup>を用い、電流流入面に電気スカラーポテンシャルを与えることで導体を伝搬する電流の偏流が解析できる。また、電磁力の計算は、振動解析との連携が容易であり比較的精度が高いと言われる節点法を用いて実施した<sup>(2)</sup>。

図2に、A相電流ピークの11ms時におけるA相断面内の電流密度分布を示す。A相導体内の電流は、渦電流効果により、B、C相側への電流密度の集中(偏流)が発生していることが分かる。

次に、A相電磁力の1周期分の時間依存性を図3に示す。A相導体は、1周期の間に+X方向から+Y方向、-X方向へと回転するように電磁力を受け、A相電流ピーク時の11msでB、C相に対して反発する方向に最大値を持つ。また、渦電流を考慮した電磁力解析値は、渦電流を考慮しない電磁力と比べて約20%小さくなる事が分かる。つまり、(注1) EMSolutionは、サイエンスソリューションズ(株)の登録商標である。

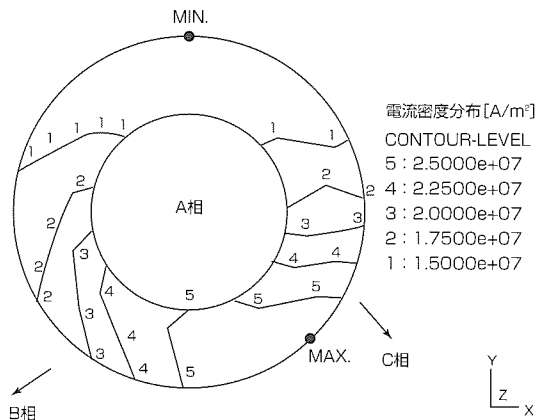


図2. A相導体内電流密度分布(A相電流ピーク時)

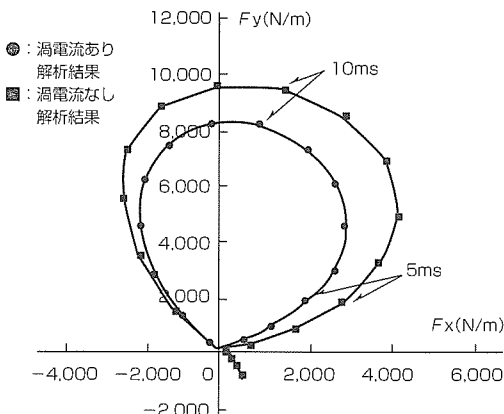


図3. A相電磁力の1周期分の時間特性

三相導体に発生する短絡電磁力は、従来の偏流を考慮できない解析値では過大評価の可能性があり、電流偏流を考慮した電磁力設計を採用することにより、よりコンパクトな機器設計の可能性を示唆している。

### 2.2 高度化設計とその検証

次に、解析精度の検証のため、A相導体近傍の磁界分布とひずみ測定を実施した。

図4及び図5にそれぞれ磁界分布、ひずみ測定の結果を示す。図4から、渦電流を考慮したこの解析手法がより高精度に解析できていることが分かる。また、この解析手法を用いた電磁力解析値を用いて振動解析を実施した結果<sup>(3)</sup>、実測波形と振動解析結果が図5に示すとおり振動周期、ひずみ量ともほぼ一致することを確認した。

以上のことから、A-φ法三次元過渡電磁界解析手法を用いることにより、三相一括形GIBの短絡電磁力解析の高精度化が可能であることを示し、また、この手法を用いることにより機器縮小化の可能性を見いだした。

### 3. 気中遮断器AE-SWシリーズ短通設計最適化

低圧配電系統の保護機器の一つとして気中遮断器(ACB)がある。主幹遮断器として使用されるACBは近年の高度情報化機器の普及に伴い給電信頼性が強く要求されており、新形気中遮断器AE-SWシリーズでは短時間通電(短通)に耐え得る電流値を表す短通容量の格上げを行い、製品競争力の強化を図った。複数本の主回路導体で構成されるACBは、各導体の表皮効果による偏流が発生する。そこで、前章で示した解析手法を応用展開し、導体の偏流を考慮した主回路部の短通設計手法の高度化を図るとも

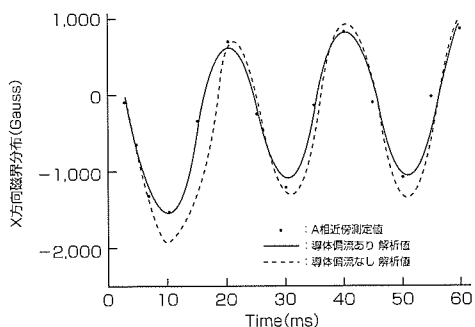


図4. 磁界分布測定結果と解析結果の比較

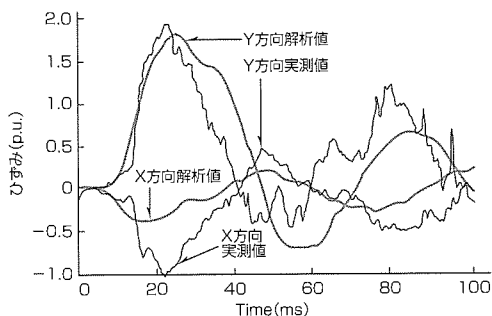


図5. A相導体ひずみ測定結果と解析結果の比較

に、定格短時間通電性能の格上げを実施した<sup>(4)</sup>。

### 3.1 解析モデル及び短通設計手法

図6(a)にACB主回路の断面構造を示す。主回路は固定接点を固着した電源側固定導体、可動接点を固着した可動子、薄銅板を積層した可とう性導体及び負荷側固定導体からなる。可動子及び可とう性導体は複数のフィンガで構成される。

図7にACBの三相主回路解析メッシュモデルを示す。短通時に主回路で発生する渦電流の影響を精度良く解析するため、各導体は表皮厚(=8mm@60Hz)の1/3以下のメッシュで構成し、空気領域も含めて約30万要素のモデルを作成した。また、電流流入面に面要素を設け、総電流量を規定する電気スカラポテンシャルを与えた。

次に、接点部の接圧力発生メカニズムについて、図6(b)を用いて述べる。主回路に電流が流れると、可とう性導体に発生する電磁力 $F_{fin}$ と接圧ばね力 $F_{sp}$ がリンクピンを支点に接点部の接触圧力(接圧力) $F_{pr}$ として働く。図中では $F_{fin}$ の発生箇所を1か所で代表しているが、実際の発生電磁力は電路全体に分布するので、式(1)に示すとおり電磁界解析で得られる各要素での電磁力 $F_{fin}$ の総和となる。

$$F_{pr} = \sum_i F_{fin_i} \frac{L_{fin_i}}{L_{con}} + F_{sp} \frac{L_{sp}}{L_{con}} \dots\dots\dots(1)$$

一方、接点部では電流集中による電磁反発力 $F_{con}$ が同時に発生する。電磁反発力は一般にはHolmの式<sup>(5)</sup>により解析的に求めることができるが、今回は、接点部の表面状態等を厳密に考慮するために、評価モデルによる測定を実施し接点反発力 $F_{con}$ を求めた。

短通設計を行うに当たって、解析で得た接圧力 $F_{pr}$ と電磁反発力 $F_{con}$ の差分による接圧裕度評価手法を新たに導入

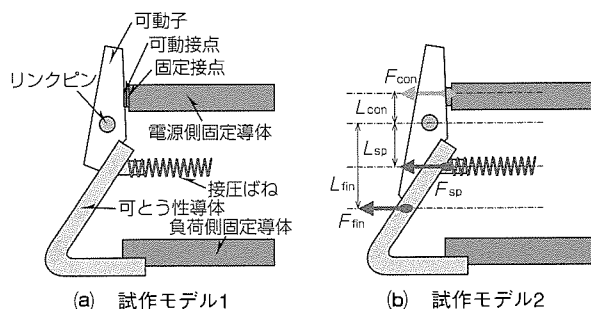


図6. ACB主回路試作モデル断面図

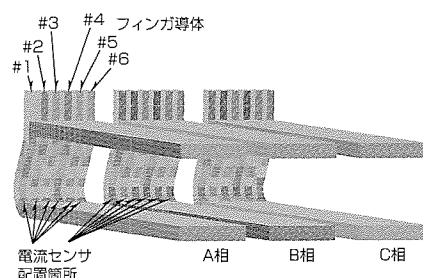


図7. AE4000-SWA主回路部のメッシュモデル

し主回路形状と接圧裕度の依存性を求めた。導体形状は接圧ばね力を増大させることなく安定した短通性能を達成するために、図6に示すように可動子後端の形状を改良し、可とう性導体に発生する電磁力を接圧力として有効に活用可能な主回路構造を検討した。

### 3.2 解析結果

図8に、通電開始後6ms(B相の電流ピーク)の電流密度分布の解析結果を示す。各フィンガの電流密度は不均一に分布し、渦電流の影響で両端フィンガの電流は中間位置フィンガの最大約2倍であることが分かる。

次に、A、B相の各フィンガにログスキークoilを配置し、各フィンガの通電電流の時間変化を測定し解析値との比較検証を行った。その結果、解析値と実測値は10%以内で良好に一致しており、この解析手法が十分な精度を持っていることを確認した。

以上から、この解析手法を用いて導出した各フィンガの電磁力も同様に十分な精度を持っていると結論付ける。

### 3.3 短通設計とその検証

次に、図6の試作モデル1、2について前節の接圧裕度評価法による短通設計を実施した。

図9に、試作モデル1、2におけるA相での接圧力と反発力の関係を示す。試作モデル1の場合、A相フィンガ#1では接圧力が反発力より大きい、A相フィンガ#6ではB相ピークの6ms付近で接圧力と反発力の差が極めて小さく、接圧裕度が確保できず短通性能を達成できない可能性がある。これに対し、試作モデル2では、通電中常に接圧力が反発力より大きく、十分な接圧裕度が確保できており、良好な短通性能を達成できると考えられる。

参考までに、従来用いていた静磁界解析による試作モデル1の短通設計結果を図9の点線で示す。静磁界解析の場合、上記の過渡電磁界解析で確認できた通電開始後6msでの接圧力と反発力の重なりは見えない。これは、渦電流によるフィンガ間の電流の偏流が考慮できないため、フィンガ#6にはA相通電流の1/6の電流が流れていることになり、この解析手法で求めた電流値より小さくなる。したがって、接点に発生する反発力が小さくなるためと考えられる。

上記設計結果を踏まえ、試作モデル1、2を試作し80kAの短通試験を実施した。その結果、試作モデル1では80kAでA相フィンガ#6で発弧したが、可動子形状を改良した試作モデル2では発弧なく良好な短通性能を満足することを確認し、目標の短通性能格上げを達成した。この結果は上記短通設計結果と一致しており、この設計手法の有効性を確認できた。

## 4. む す び

以上A-φ法辺要素有限要素法による三次元過渡電磁界

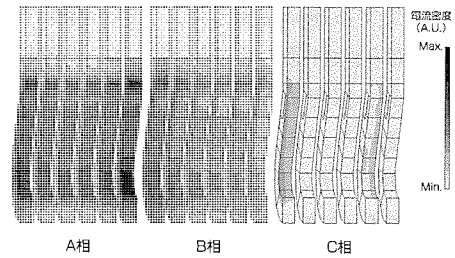


図8. フィンガ導体部の電流密度分布(通電開始後6ms)

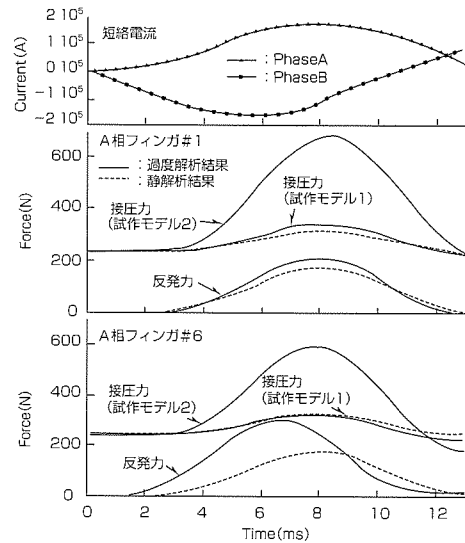


図9. A相フィンガ#1及び#6の接圧力と反発力

解析技術を用いた開閉装置の短絡電磁力設計手法の高度化について述べた。今回述べた三相一括形GIBの短絡電磁力設計の高精度化及び低圧ACBの短時間通電設計最適化技術への適用に続き、電力機器全般の高度化開発へ更なる適応拡大を推進していく。

## 参考文献

- (1) Takeuchi, T., et al.: 3-D Nonlinear Transient Electro-magnetic Analysis of Short Circuit Electro-magnetic Forces in a Three-Phase Enclosure-Type Gas Insulated Bus, IEEE Trans. on Magnetics, **36**, No. 4, 1754~1757 (2000)
- (2) Kameari, A.: Calculation of transient 3-D eddy current using edge-elements, IEEE Trans. on Magnetics, **26**, No.2, 488~492 (1990)
- (3) 築谷憲二, ほか: 短絡電流発生時の三相一括GIBの動的挙動解析, 電気学会・電力エネルギー部門大会, 627~628 (1998)
- (4) 牧田 陽, ほか: 新形低圧気中遮断器“AE-SWシリーズ”の短時間通電性能向上, 三菱電機技報, **79**, No.6, 381~384 (2005)
- (5) Holm, R.: Electric Contacts, 4th Ed., Springer-Verlag (1967)

# 熱流体解析と渦電流解析を用いた 開閉装置の設計高度化

稲口 隆\*  
小倉健太郎\*\*  
牧田 陽\*

Advanced Design of Switching Devices by Using 3-D Thermo-Fluid Analysis and Eddy Current Analysis  
Takashi Inaguchi, Kentaro Kokura, Yo Makita

## 要 旨

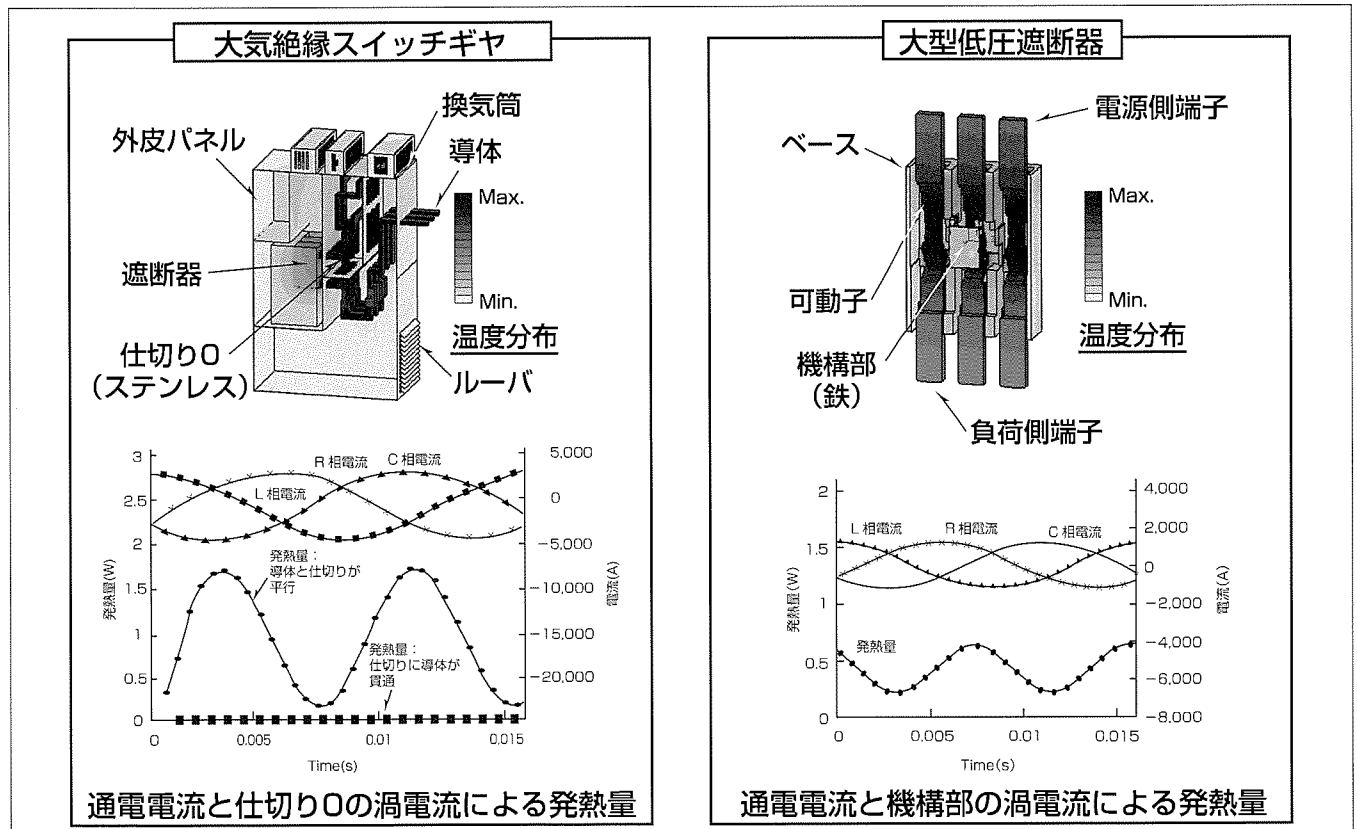
開閉装置は小型化の傾向がある。そのため、筐体(きょうたい)内の発熱を低減し温度上昇を抑制することが必要となり、熱設計の高度化が必要である。筐体内の発熱源には導体のジュール熱のほか筐体壁等に電磁誘導で生じる渦電流による発熱があり、これらを考慮する必要がある。

そこで、渦電流発熱を考慮した熱流体解析を提案する。この解析手法の特徴は、発熱源として上述の渦電流による発熱と導体のジュール熱を考慮していることと、熱輸送の形態として熱伝導のほか、対流と輻射(ふくしゃ)を考慮した三次元熱流体解析であることである。このため、従来の

熱回路網解析では十分解析できない流体の流れや輻射の影響も検討可能である。

この手法は、渦電流による発熱の時間変化に比べて温度変化が十分短いと仮定しており、まず、渦電流による発熱量とジュール熱を求め、これらを構造物のエネルギー方程式のソース項に付加して解くものである。

本稿では、大気絶縁スイッチギヤと大型低圧遮断器に適用した。いずれも試験結果と計算結果を比較し、計算結果が妥当であることを示した。



大気絶縁スイッチギヤと大型低圧遮断器へ適用した例  
渦電流による発熱量と温度分布を示す。

\*先端技術総合研究所(工博) \*\*同研究所

## 1. ま え が き

開閉装置は小型化の傾向がある。そのため、筐体内の発熱を低減し温度上昇を抑制することが必要となり、熱設計の高度化が必要である。筐体内の発熱源には導体のジュール熱のほか筐体壁等に電磁誘導で生じる渦電流による発熱があり、これらを考慮する必要がある。

そこで、渦電流の発熱を考慮した熱流体解析を提案する。この解析手法の特徴は、発熱源として上述の渦電流による発熱と導体のジュール熱を考慮していることと、熱輸送の形態として熱伝導のほか対流と輻射を考慮した三次元熱流体解析であることである。

この手法では、渦電流による発熱の時間変化に比べて温度変化が十分短いと仮定しており、図1に示すようにまず渦電流による発熱量とジュール熱を求め、これらを構造物のエネルギー方程式のソース項に付加して解くものである。熱流体解析ソフトウェアとしてStar-CDを、渦電流解析ソフトウェアとしてEMsolution<sup>(注1)</sup>を利用した。

本稿では、大気絶縁スイッチギヤと大型低圧遮断器を適用例として取り上げて述べる。

## 2. 大気絶縁スイッチギヤ

### 2.1 計算モデル

大気絶縁スイッチギヤの通電時の温度上昇を抑制することを目的に、渦電流発熱を考慮した熱流体解析を実施した。図2は大気絶縁スイッチギヤの計算モデルを示したもので

(注1) EMsolutionは、サイエンスソリューション㈱の登録商標である。

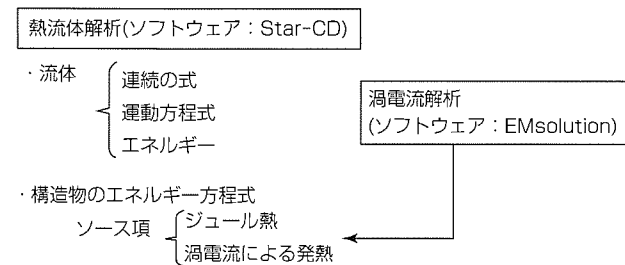


図1. 渦電流による発熱を考慮した熱流体解析

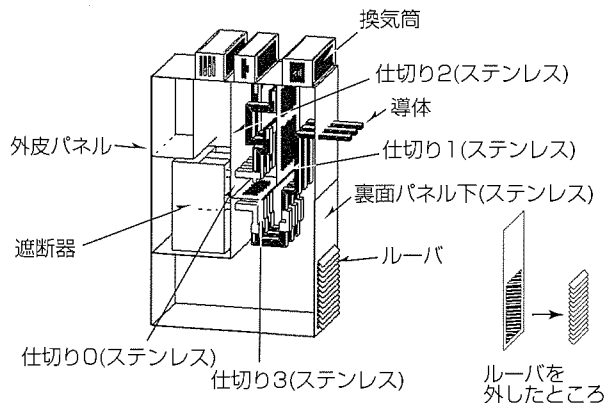


図2. 大気絶縁スイッチギヤの全体計算モデル

ある。発熱源として、通電部のジュール熱と、仕切り板の渦電流発熱を考慮した。通電部の発熱量は、各部の断面積、長さの違いを考慮し抵抗分布を求め、ジュール熱を求めた。導体には絶縁のためエポキシがコーティングされているが、計算では、エポキシの熱抵抗に相当する熱抵抗を導体表面に設定してその影響を考慮した。

仕切り0～3は図に示すようにステンレスできており、渦電流による発熱は比較的小さいと考えられる。しかし、その中で、仕切り0は導体が貫通しており、また、仕切りに平行な導体部分との距離も他の仕切りより近接しているため、渦電流による発熱が最も大きいと考えられる。そこで、仕切り0の発熱量を計算した。計算モデルを図3に示す。導体が仕切り板を貫通する場合と仕切りに平行な場合に分離して検討した。

### 2.2 計算結果と試験結果の比較

図4に渦電流による発熱の計算結果を示す。導体が仕切りを貫通する場合と平行な場合を合わせて時間平均1Wであった。実機では、導体が仕切りから遮断器側に貫く場合と、遮断器側から仕切りを貫く場合があるので、両者を合わせるとこの部分での発熱量は2Wとなる。発熱量は極めて小さい。仕切りの材料がステンレスの場合、透磁率が小さいため、導体が貫通していても発熱量は少なく、導体が

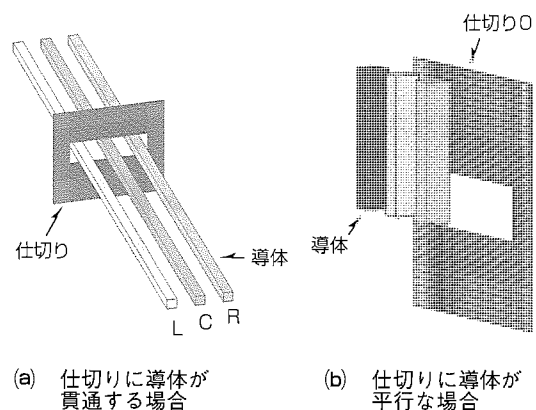


図3. 渦電流発熱の計算モデル

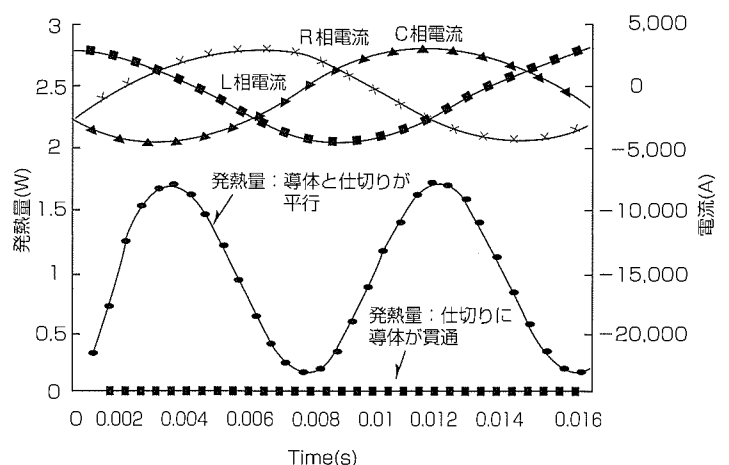


図4. 通電電流と渦電流による発熱量

仕切りに平行な場合の方がむしろ発熱量は大きいことが分かる。

上記渦電流による発熱も含めて温度分布を計算した。図5及び図6に温度分布の計算結果を示す。遮断器接点部及び母線側/負荷側一次ジャンクションの温度が最も高くなる。図7に速度分布を示す。裏面パネル下のルーバから外気が流入し、仕切りに区切られた各空間を通過し、天井の換気筒から流出しているのが分かる。

図8は計算結果と試験結果を比較したものである。空気温度、延長導体において計算結果の方が低めになっているが、全般的に計算結果はよく試験結果と一致しており、この計算手法の精度を確認できたと言える。

### 3. 大型低圧遮断器

#### 3.1 計算モデル

大型低圧遮断器の温度上昇低減策立案のため、熱流体解析を実施した。

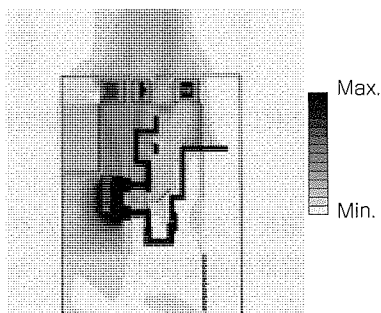


図5. 断面の温度分布

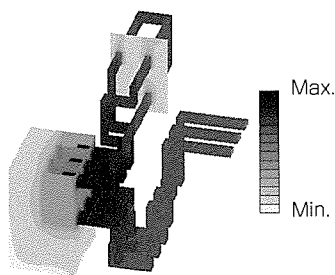


図6. 通電部分の温度分布

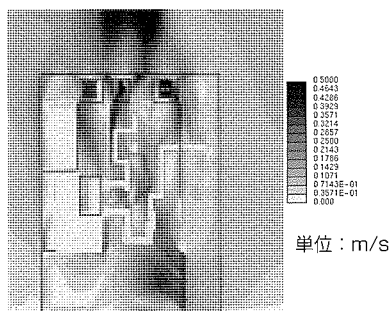


図7. 速度分布

図9に大型低圧遮断器の全体の計算モデルを、図10に遮断器内部の計算モデルを示す。遮断器本体の計算モデルは通電部、カバー、ベースから構成される。周辺部として取付け板、ブスバー、アダプタがある。モデル化に当たり、通電部についてはCAD(Computer Aided Design)データをそのまま読み込み計算メッシュを作成した。カバー、ベースについては形状をモデル化した。遮断器内で渦電流が発生する可能性のある箇所として機構部が考えられる。そこで、上記に機構部を追加し、機構部の渦電流による発熱量を計算した。

#### 3.2 計算結果

機構部の渦電流による発熱の計算結果を図11に示す。

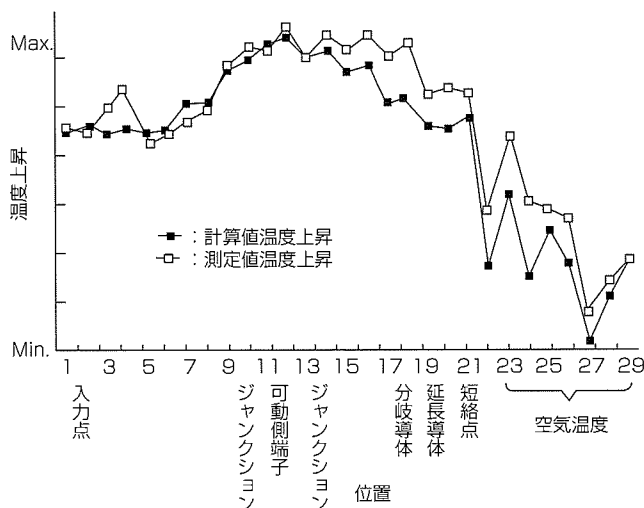


図8. 温度上昇値の計算値と測定値の比較

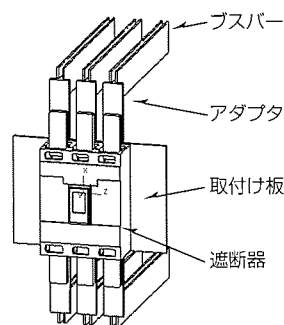


図9. 大型低圧遮断器の全体計算モデル

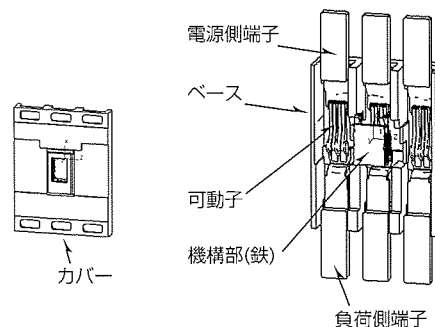


図10. 遮断器内部の計算モデル

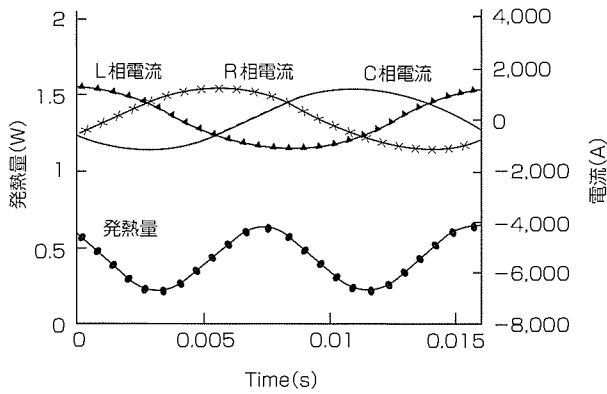


図11. 通電電流と機構部の渦電流による発熱

発熱量は時間平均0.44Wであった。

この渦電流による発熱量を含めて温度分布を計算した。図12に断面の温度分布を示す。可動子接点の位置が電源側にあるので電源側の温度が高くなる。また、遮断器内の高温の空気は浮力により上昇しているのが分かる。

図13に、温度上昇について計算結果と測定結果を比較したものを示す。よく一致していることが分かる。

#### 4. む す び

電磁誘導で生じる渦電流による発熱や導体のジュール熱を発熱源として考慮した熱流体解析を、大気絶縁スイッチギヤと大型低圧遮断器に適用した。試験結果と計算結果を比較し、計算結果が妥当であることを確認した。この手法で上記発熱源について検討可能であるほか、従来の熱回路

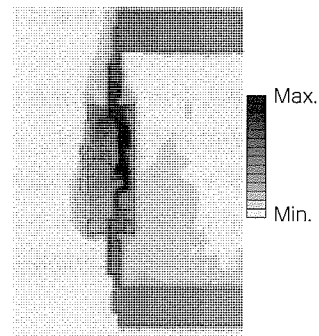


図12. 断面の温度分布

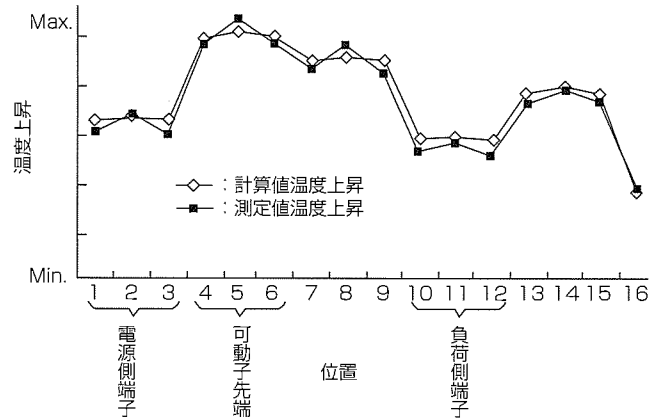


図13. 温度上昇について計算結果と測定結果の比較

網解析では十分解析できない流体の流れや輻射の影響も検討可能で、開閉装置の高度設計のため、今後重要性が高まるものと思われる。



# 遮断器制御基板における耐ノイズ評価技術

白木康博\*

Noise Evaluation Technique for Breakers' PCB

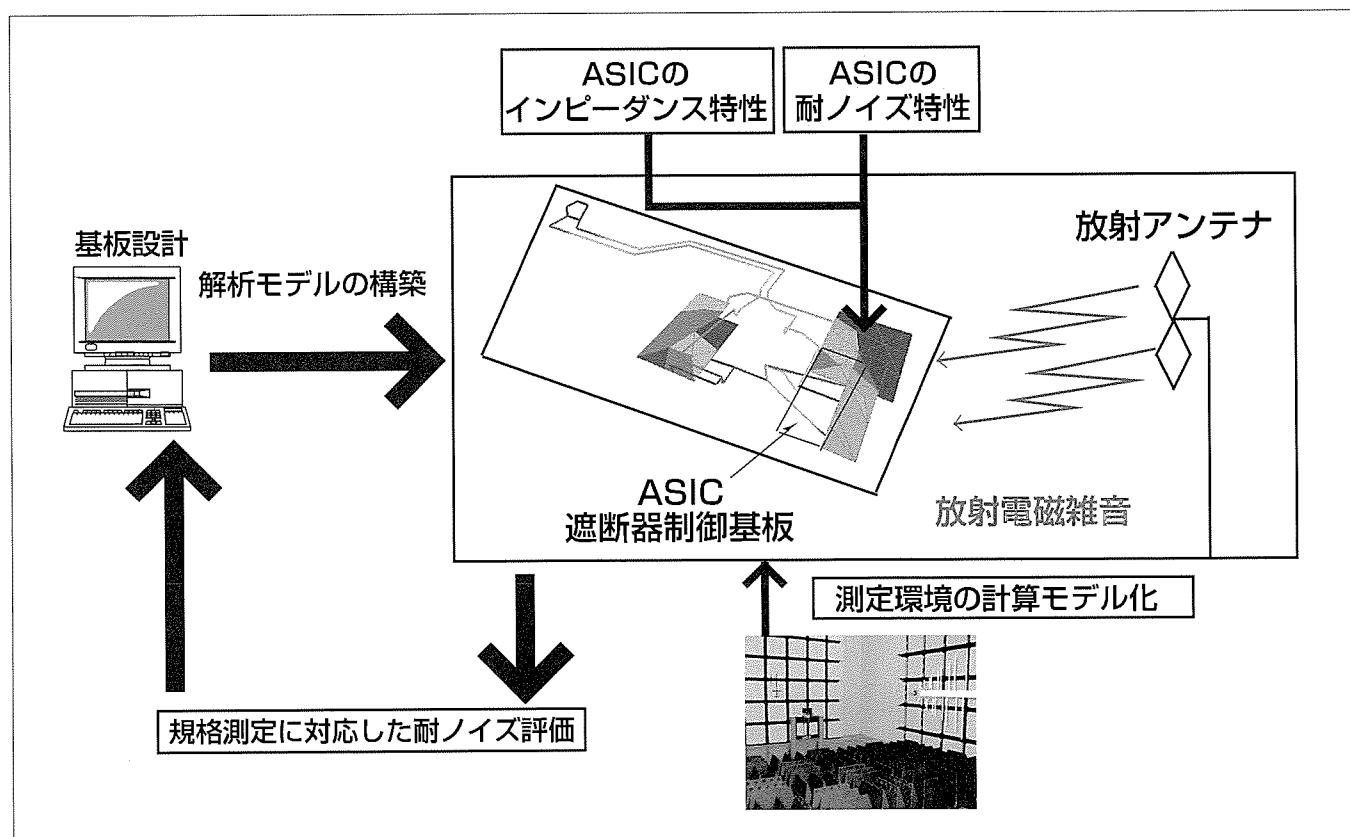
Yasuhiro Shiraki

## 要 旨

遮断器は、工場などの劣悪な電磁環境で使用されることが多く、放射電磁雑音に対して誤動作しないことが求められている。そのために、IEC(国際電気標準会議)で遮断器などの電子機器のノイズ耐性が規格化されており、製品出荷前に確認試験が義務付けられている。遮断器では、制御基板(Printed Circuit Board: PCB)のノイズ対策を行うことにより、遮断器のノイズ耐性を強化している。しかし、これらのノイズ対策は設計・試作後に行われることが多く、対策のために試作回数が増えて製品開発期間を延長させることがある。最小限の試作回数で製品開発を行うためには、設計段階で制御基板のノイズ対策を行う必要がある。

本稿では、電磁界解析技術とASIC(Application Specific

Integrated Circuit)の耐ノイズ評価技術を連携させることにより設計段階における遮断器制御基板の耐ノイズ評価技術を開発したので述べる。ASICの耐ノイズ評価では、専用の評価基板と高周波測定装置を用いてASICに関するインピーダンス及び耐ノイズの周波数特性の測定技術を開発した。さらに、ASICのEMC(Electromagnetic Compatibility)特性を考慮した電磁界解析技術により制御基板を含む遮断器全体の耐ノイズ特性を評価する技術を開発した。最後に、この耐ノイズ評価技術を適用した遮断器について、電波暗室でIECの規格試験を行い、この耐ノイズ評価技術の妥当性を検証した。



## 遮断器の耐ノイズ評価技術

設計・試作後の実測により遮断器のノイズ特性を評価する従来方式に比べて、この耐ノイズ設計技術を使うと、遮断器のノイズ特性を設計段階で把握することが可能になる。この設計技術では、測定環境、遮断器制御基板の構造及び制御基板上に搭載されるASICのインピーダンス特性を考慮した電磁界解析により遮断器制御基板のノイズ分布を解析して、ASICの耐ノイズ特性と比較することにより、遮断器の耐ノイズ特性を算出する。

### 1. ま え が き

近年、工場では、インバータなどのスイッチング電源から発生する放射電磁雑音により工場の電磁環境が悪化している。そのために、IEC61000-4-3<sup>(1)</sup>で、工場などで使われる遮断器などの電子機器では放射電磁雑音に対するノイズ耐性が規格化されており、製品出荷前に確認試験が義務付けられている。遮断器では、制御基板のノイズ対策を行うことにより、遮断器のノイズ耐性を強化している。しかし、これらのノイズ対策は設計・試作後に行われることが多く、対策のために試作回数が増えて製品開発期間を延長させる。最小限の試作回数で製品開発を行うためには、設計段階で制御基板のノイズ対策を行う必要がある。

本稿では、電磁界解析技術及びASICの耐ノイズ評価技術を制御基板のノイズ対策に適用して、設計段階における耐ノイズ評価技術を開発したのでこれについて述べる。

### 2. 遮断器制御基板の耐ノイズ評価方法

遮断器の制御基板の中で放射電磁雑音に対して誤動作するASIC周辺の回路を図1に示す。放射電磁雑音によりASICに接続する配線1に誘導電流が流れて、ASICの信号入力部であるP1-P2間に誘起電圧が発生することにより誤動作し、誤動作を知らせる信号をP3から出力する。

図2に、電磁界解析とASICの評価技術を連携して放射電磁雑音に対する遮断器の制御基板のノイズ耐性を評価する方法を示す。まず、ASICのインピーダンス特性の測定データ、制御基板の配線レイアウト及びIEC規格の試験条件を考慮して電磁界解析の入力データを作成する。次に、放射電磁雑音を印加した遮断器の電磁界解析を実行し、ASICの信号入力部の誘起電圧を算出する。最後に、ASICの信号入力部の誘起電圧とASICの耐ノイズ特性から、放射電磁雑音に対する遮断器の耐ノイズ特性を算出する。

### 3. ASICのインピーダンス及び耐ノイズ特性の検討

図3に、ASICのインピーダンスと耐ノイズ特性を同時に測定できる評価基板を示す。評価基板上にASICの信号入力端子(P1, P2)、電源端子(Vs)、グラウンド端子(GND)に接続できるコネクタを設けて、P1-P2間、P1-GND間及びP1-Vs間のインピーダンスを測定できるようにした。また、外部信号を模擬した交流電圧(60Hz)をP1-P2間に印加できるパッドを設けた。さらに、ASICと測定器間の配線及びコネクタの影響を補正できる校正ラインを設けた。

図4に、ASICのインピーダンスの測定方法を示す。インピーダンスの測定を動作状態で行うために、DC電源でVsに動作電圧を与えた。インピーダンスアナライザを用いて、P1-P2間、P1-GND間及びP1-Vs間のインピーダンスの周波数特性をRC並列回路として測定した。

次に、ASICの伝導ノイズに対する耐ノイズ特性を測定する。測定回路を図5に示す。ASICには動作電圧をVsに印加し、P1-P2間に外部信号を模擬した交流電圧(60Hz)

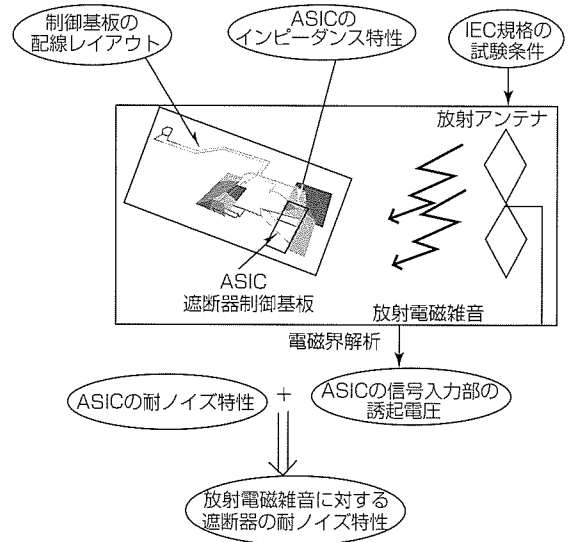


図2. 放射電磁雑音に対する遮断器の耐ノイズ評価方法

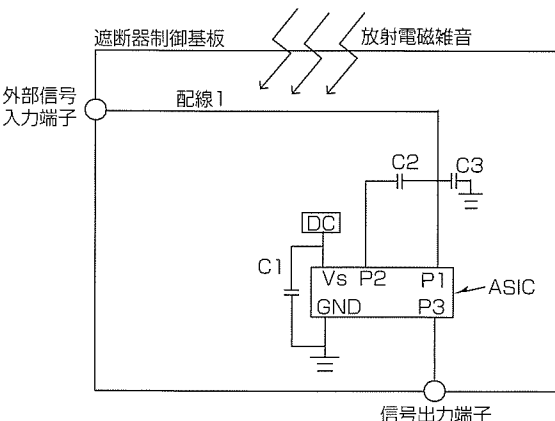


図1. 遮断器の制御基板の回路構成

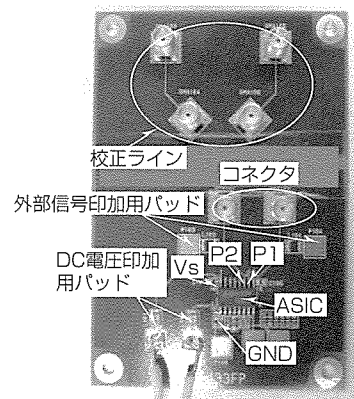


図3. ASICの評価基板

を印加した。放射電磁雑音によりASICのP1-P2間に誘起するノイズ電圧を模擬するために、高周波発信器を用いて高周波電圧をP1-P2間に印加した。高周波電圧がしきい値を超えてASICが誤動作する状況を、P3端子から出力される信号で確認できる。周波数ごとに、誤動作が発生する高周波電圧のしきい値を測定した。図6に測定結果を示す。

#### 4. ASIC信号入力部の誘起電圧の解析

この章では、前章で測定したASICのインピーダンス特性を考慮した遮断器の制御基板を計算モデル化して、放射電磁雑音によりASICの信号入力部へ誘起する電圧を解析する。解析手法として、電磁界解析の一つであるモーメント法<sup>(2)</sup>を用いた。放射電磁雑音を模擬するために、基板厚さ方向に振幅1V/mで規格化したTEM(Transverse Electromagnetic Mode)波を印加した。

図7に、ASICのP1-P2間の誘起電圧の解析結果を示す。制御基板内の共振により、700MHz付近で誘起電圧が高くなる。

図7に示すASICの信号入力部の誘起電圧と図6に示すASICの耐ノイズ特性を比較することにより、放射電磁雑音による遮断器の制御基板の誤動作を評価することが可能である。

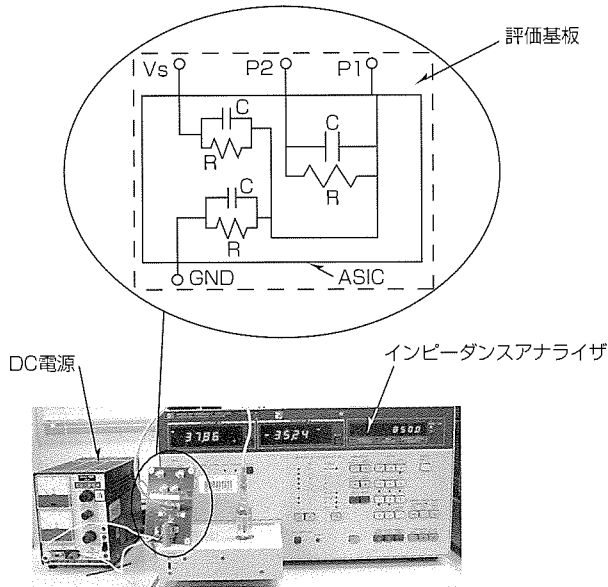


図4. ASICのインピーダンス測定方法

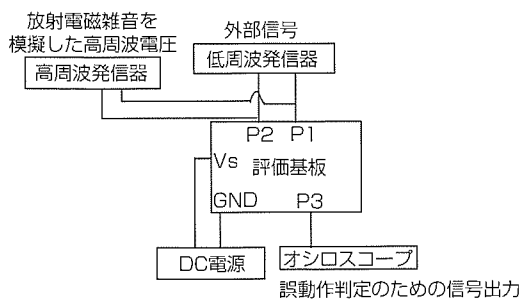


図5. ASICの耐ノイズ特性の測定方法

#### 5. 実測による耐ノイズ評価方法の検証

耐ノイズ評価技術の妥当性を検証するために、図8のように遮断器を電波暗室内に設置し、アンテナで放射電磁雑音を照射し、遮断器が誤動作するアンテナの電界強度を実測した。

解析及び実測結果の比較を図9に示す。測定では、誤動作を比較しやすいように、ノイズ対策部品を外して行った。

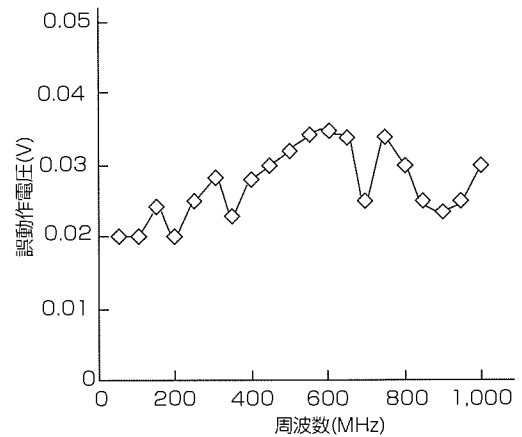


図6. ASICの耐ノイズ特性の測定結果

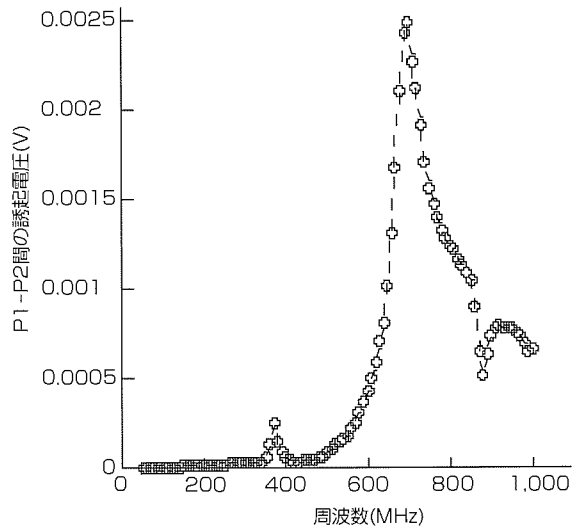


図7. ASIC信号入力部への誘起電圧の解析結果

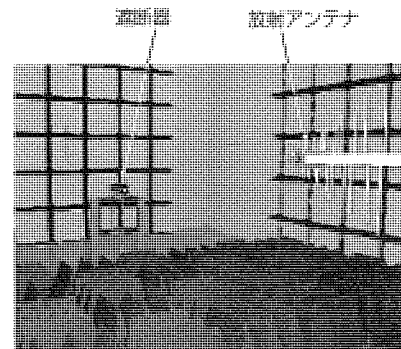


図8. 放射電磁雑音に対する遮断器の耐ノイズ試験方法

図に示すように、耐ノイズ評価技術の解析結果は実測結果とほぼ一致し、誤動作するアンテナの電界強度を予測できることが分かった。

### 6. む す び

電磁界解析技術及びASICの耐ノイズ評価技術を遮断器制御基板のノイズ対策に適用して、設計段階における耐ノイズ評価技術を開発した。耐ノイズ評価技術はASICの信号入力部の誘起電圧とASICの耐ノイズ特性を比較する方法であり、IEC試験で規格化されている電磁波照射試験体系を模擬しているため、設計段階のノイズ対策の評価手法として用いることが可能である

### 参 考 文 献

- (1) IEC 61000-4-3 : 2006. Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 4-3 : Testing and measurement techniques-radiated, radio frequency, electromagnetic field immunity test.
- (2) Harrington, R.F. : Field Computation by Moment Methods, The Macmillian Co. (1968)

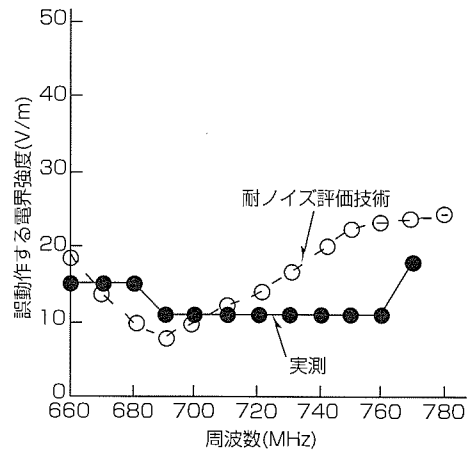


図 9. 実測による耐ノイズ評価技術の検証  
(ノイズ対策部品を外した制御基板で比較)



# 特許と新案 \* \* \*

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## 開閉器 特許第3450050号(特開平7-282710)

発明者 高橋 貢, 三橋孝夫, 藤井 洋, 福谷和則, 岸本康雄

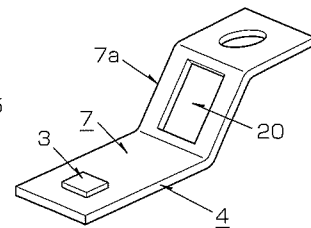
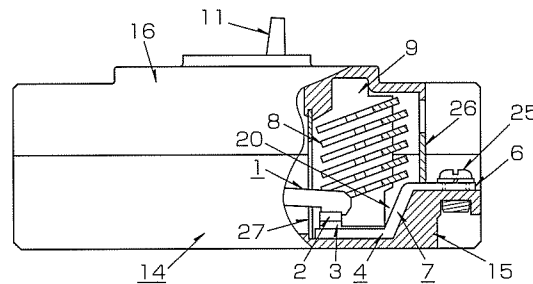
この発明は、例えば、回路遮断器、限流器、電磁接触器などのように、電流遮断時にアークを生じる開閉器に関するものである。

従来の開閉器の固定接触子では、端子部よりも固定接点の筐体(きょうたい)の底面側に位置するので、固定接触子を構成する接続導体の端子部に隣接する部位に、アーク伸長、駆動を阻害する電流要素が存在し、電流遮断時に接点間で発生したアークを十分に引き伸ばすことができない。そのために、消弧板による冷却作用を十分受けることができず、必要とされる限流性能を得ることができなかった。

この発明では、上記部

位に開口部を設けることにより、アーク伸長、駆動を阻害する電流要素の悪影響を低減するとともに、伸長、駆動されたアークを開口部から露出するアーク冷却用部材に触れさせて同部材から発生する蒸気で効率良く冷却することができる。

これにより、単純な構成で、高い限流遮断性能の開閉器を提供することができる。



- 1:可動接触子
- 2:可動接点
- 3:固定接点
- 4:固定接触子
- 6:端子部
- 7:接続導体
- 8:消弧板
- 15:ベース
- 20:開口部

## 遮断器の制御装置および制御方法 特許第3710442号(特開平2004-103385)

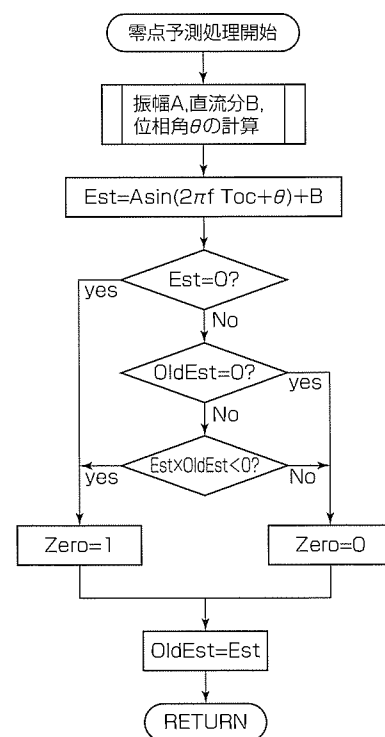
発明者 堀之内克彦

この発明は、例えば、遮断器の制御装置および制御方法、特に、遮断器の開閉極位相制御を行う制御装置および制御方法に関するものである。

従来の制御方法では、開閉極指令の直前の極間電圧および主回路電流の零点の時刻間隔を基に、開閉極の目標とする零点までの時間を予測して制御を行っている。しかしながら、直流分などがある場合には零点が等時間間隔では訪れないことにより、予測を誤ることとなる。

この発明では、現在時刻の最新データから1サイクル前以内の電流や電圧のデータを保持する記憶手段を備え、この記憶手段に保持されたデータから振幅、位相および直流分を求めて電流や電圧の波形を予測し、その予測波形に基づいて開極動作に必要な時間後の電流や電圧の値を求め、零点であったときに開閉動作信号を生成する演算処理手段を設けた。

これにより、直流分が含まれている場合にも、比較的少量のデータによりの確に動作信号を生成し遮断器を制御することができる。





# 特許と新案 \* \* \*

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話 (03) 3218-9192(ダイヤルイン)

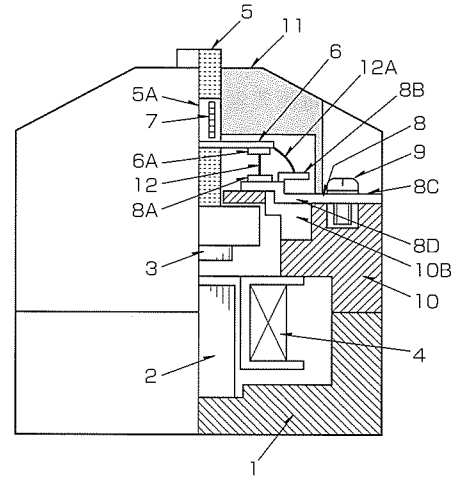
## 開閉器 特許第3672219号(特開平11-312449)

発明者 林 龍也, 森 貞次郎, 伊佐治敏博

この発明は、電流を開閉する開閉器、詳しくは、固定接点を持つ固定接触子、可動接点を持つ可動接触子と、固定接点と可動接点との間に発生したアークの足が移行されるアークランナとが配設された消弧室空間と、可動接触子を駆動させる電磁石が配設された駆動室空間とを備えた開閉器に関するものである。

アークの放出をなくすことができ、また、ベースとアークカバーとの間隙(かんげき)からの放出(漏れ)も抑制されるため、信頼性を大幅に改善することができる。

従来の開閉器では、接点間でアークが発生し遮断されるまでにアークによって発生した電子やイオンを含むホットガスが消弧室空間の圧力を高め、ベースに設けられた固定接触子の切り抜き中空部の下部から外部へ通じる外通路を通して外部へと放出されていた。このホットガスの外部放出は、近接機器の損傷を招くため、極力少ないことが望まれる。



この発明では、固定接触子に穿設(さくせつ)された切り抜き中空部の下方のベース面を開口し、消弧室空間と駆動室空間とを連通する連通路を設け、ホットガスを駆動室空間に導くようにした。

- 1: 取り付け台
- 2: 固定鉄心
- 3: 可動鉄心
- 4: 操作コイル
- 5: クロスバー
- 6: 可動接触子
- 6A: 可動接点
- 8: 固定接触子
- 8A: 固定接点
- 8B: アークランナ
- 8D: 切り抜き中空部
- 10: ベース
- 10B: 連通路
- 11: アークカバー
- 12: アーク
- 12A: 移行したアーク

これにより、アークによって生じるホットガスが連通路を通して消弧室空間から電磁石を収納する駆動室空間に放出されるので、従来例のように外通路からの外部ホットガ

### 〈本号記載の商標について〉

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.80 No.8 特集「最新のディスプレイ技術」

<p>三菱電機技報編集委員</p> <p>委員長 三嶋 吉一</p> <p>委員 小林 智里 増田 正幸 山本 比呂志 佐野 康之 中山 保夫 世木 逸雄 岡本 尚郎 河合 清司 長谷 勝弘 木槻 純一 逸見 和久 光永 一正 黒畑 幸雄 赤川 正英</p> <p>事務局 園田 克己</p> <p>本号取りまとめ委員 竹内 敏恵</p>	<p>三菱電機技報 80巻7号 2006年7月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 2006年7月25日 発行</p> <p>編集人 三嶋 吉一</p> <p>発行人 園田 克己</p> <p>発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&amp;サービス事業部 〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号 日本地所第一ビル 電話 (03) 3288局1847</p> <p>印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス</p> <p>発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03) 3233局0641</p> <p>定 価 1部945円(本体900円)送料別</p>
<p>三菱電機技報 URL</p> <p>三菱電機技報に関するお問い合わせ先</p>	<p>URL <a href="http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/">http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/</a></p> <p>URL <a href="http://www.MitsubishiElectric.co.jp/support/corporate/giho.html">http://www.MitsubishiElectric.co.jp/support/corporate/giho.html</a></p>
<p>英文季刊誌「MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE」がご覧いただけます</p>	<p>URL <a href="http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/">http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/</a></p>

# スポットライト

## グローバル規格対応White & World Super Series ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器30AF~1600AF

急速に広がる市場の国際化に対応して、新JIS規格と海外の規格に同時対応し、国内・海外の形名を統一し、白カバーを採用し意匠統一を図った新形White & World Super Seriesノーヒューズ遮断器・漏電遮断器を発売いたしました。より一層使いやすくなった製品です。

### ■ 特長

#### 1. 30Aフレームから1600Aフレームまでシリーズ拡大

- “一般品” と “海外規格対応品” を統合しJIS・IEC・GB規格に同時適合を図り、EN規格(第三版)へ対応し製品の充実を図りました。

- 国内向け、海外向け製品の形名を統一いたしました。

- デザインを白カバーに一新し、国内向け、海外向け製品の統一を図りました。

#### 2. Aフレームの拡大

- 従来のAフレームに加え新たなAフレームを追加いたしました。用途に合わせたきめ細かな機種選定が可能です。

- 新技術採用による630Aフレームの小型化を図り、400・600・630Aフレームを同一外形といたしました。

#### 3. 機種の充実

- 400Aフレームから1600Aフレームの電子式遮断器にデジタルETRを搭載し、マルチ可調整が可能となり、上位機種との協調が一層とりやすくなりました。

- 漏電表示付き遮断器のラインアップを充実し、100Aフレームから800Aフレームまで品ぞろえを図りました。

#### 4. 環境に配慮した製品

- 規制6物質の使用を制限し、RoHS指令に対応した製品です。

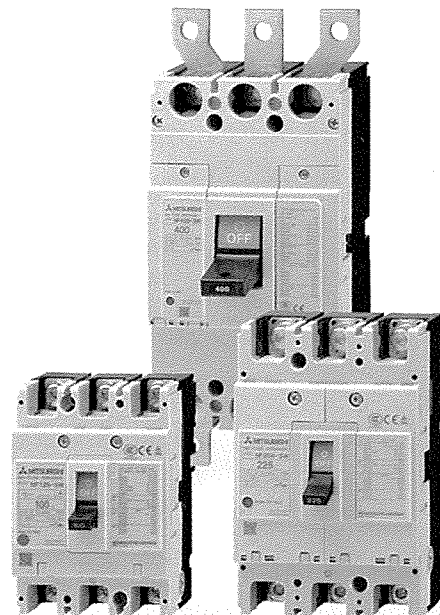


図1. 新形WSシリーズ 三菱ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器

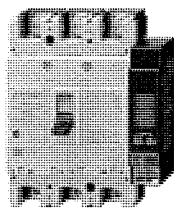


図2. NF250-SWL

表3. 漏電表示付き遮断器のラインアップ  新製品

Aフレーム	ノーヒューズ遮断器	漏電遮断器
100/125	NF125-SWL	NV125-SWL
225/250	NF250-SWL	NV250-SWL
400	NF400-SWL	NV400-SWL
600/630	NF630-SWL	NV630-SWL
800	NF800-SEWL	NV800-SEWL

表2. グローバルに対応するWSシリーズ

規 格	準拠規格					安全認定規格	
	JIS 附属書1	JIS 附属書2	IEC	EN CEマーク	GB CCCマーク	UL	CSA
	日本	日本	国際	欧州	中国	アメリカ	カナダ
一般品	ノーヒューズ遮断器	○	○	○	○	-	-
	漏電遮断器	○	○	-	-	-	-
CEマーキング品	漏電遮断器	○	○	○	○	-	-
UL登録品		○	○	○	○	○	○

表1. 追加拡大したAフレーム  新設Aフレーム

新Aフレーム	30	32	50	60	63	100	125	225	250	400	600	630	800	1000	1200	1250	1600
形 名(例)	NF32-SW		NF63-SW			NF125-SW		NF250-SW		NF400-SW	NF630-SW		NF800-SEW	NF1000-SEW	NF1250-SEW		NF1600-SEW

住 所：〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-7-3 (東京ビル)

会社名：三菱電機株式会社 お問い合わせ先：福山製作所 遮断器製造部 遮断器技術第一グループ TEL 084-926-8291