

# 三菱電機技報

11

2017

Vol.91 No.11

## 受配電システムの最新技術



## 目次

### 特集「受配電システムの最新技術」

三菱電機設立100周年に向けての 受配電システム機器への期待……………	巻頭言 1
日高邦彦	
受配電システム機器の技術展望……………	巻頭論文 2
城ヶ崎 亨・香川和彦・中村真人	
海外配変電向け24/36kV“HS-X形”C-GIS……………	9
井上直明・松永敏宏・大坪孝年・河西克紀	
海外RMU更新用12kV“HS-X形”C-GIS……………	14
松永敏宏・江波戸輝明・藤 謙一	
海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤ“MS-E”……………	19
木村 透	
海外市場向け低圧モータコントロールセンタ“D”……………	24
関 孝一郎・宮内俊彦・金丸 誠	
停電時間を大幅に削減する保護リレー自動点検システム……………	29
平田陽介	
再生可能エネルギー・EMSと組み合わせた三菱スマート 中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”……………	34
越智良輔	
電鉄変電所向け直流高速度遮断器……………	39
遠矢将大・佐々木 央・仲田知裕	
一般論文	
大規模電磁界解析技術とタービン発電機への適用例……………	44
元吉研太・米谷晴之・前田 進・空 信之	

### The Latest Technologies of Power Distribution Systems

Outlook for Power Receiving and Distribution Systems Apparatus towards Mitsubishi Electric's 100th Year in Business

Kunihiko Hidaka

### Technological Aspects of Power Distribution Systems Equipment

Toru Jogasaki, Kazuhiko Kagawa, Masato Nakamura

### 24/36kV C-GIS “HS-X” for Overseas Power Distribution and Transmission Market

Naoaki Inoue, Toshihiro Matsunaga, Takatoshi Otsubo, Katsunori Kawanishi

### 12kV C-GIS “HS-X” for Overseas RMU Renewal Market

Toshihiro Matsunaga, Teruaki Ebato, Kenichi Fujii

### 7.2/12kV Switchgear “MS-E” for Overseas Market

Toru Kimura

### Low Voltage Motor Control Center-“D” for Overseas Market

Koichiro Seki, Toshihiko Miyauchi, Makoto Kanamaru

### Automatic Inspection System for Protection Relays to Drastically Reduce Power Failure Time

Yosuke Hirata

### Mitsubishi Smart MVDC Distribution Network System “D-SMiree” Coordinated with Renewable Energy and EMS

Ryosuke Ochi

### High Speed Circuit Breaker for Railway Substation

Nobumoto Tooya, Hiroshi Sasaki, Tomohiro Nakata

### Large-scale Electromagnetic Field Analysis Technique and Example of Application to Turbine Generator

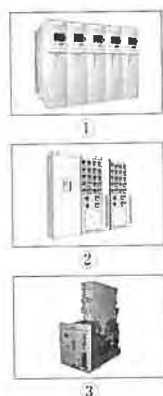
Kenta Motoyoshi, Haruyuki Kometani, Susumu Maeda, Nobuyuki Sora

### 特許と新案

「ガス絶縁開閉装置」「電動機の診断装置」……………	49
「直流高速度遮断器」……………	50

### スポットライト

オートリクローザー用真空バルブ



表紙：受配電システムの最新技術

受配電システム機器では、近年、更なる安全性向上、グローバル化・規格の国際化、省エネルギー・環境負荷削減、IoT(Internet of Things)・高機能化、LCC(Life Cycle Cost)削減、電力安定供給などの社会ニーズに対応した技術の進展によって、国際規格に準拠した内部アーク放圧技術、IoT・高機能化技術、直流配電技術が進展してきている。

- ① 海外配変電向け24/36kV“HS-X形”C-GIS
- ② 低圧モータコントロールセンタ
- ③ 電鉄変電所向け直流高速度遮断器

# 巻/頭/言

## 三菱電機設立100周年に向けての受配電システム機器への期待

Outlook for Power Receiving and Distribution Systems Apparatus  
towards Mitsubishi Electric's 100th Year in Business

日高邦彦  
Kunihiko Hidaka



大正10年(1921年)に設立された三菱電機は、東京2020オリンピック・パラリンピックが開催される2020年度に100周年を迎えようとしている。ここでは100周年を目前に、受配電システム機器を取り巻く周囲状況と更なる技術革新への期待を述べることにする。まず、この分野での社会のニーズを思いつくままに書くと、環境負荷低減、高信頼性・高機能、ライフサイクルコスト低減、グローバル化、電力安定供給、直流給配電、システム化となる。

さて、市場規模を知っておくことは技術開発のインセンティブにもなろう。電力インフラに対する世界の需要は極めて高く、2040年まで毎年85兆円の投資が予想されており、そのなかで配電関係は23兆円と試算される。この金額の中には建設・施工費も含まれるので、機器だけではないものの、一般製造業での受電機器が加わることから、世界市場が長期間にわたって定常的に存在していることになる。

環境負荷低減に関連して、米国トランプ大統領がパリ協定からの脱退を表明したことから、温室効果ガス削減が頓挫するのではないかと悲観的な見解も出ている。ただ、よく調べてみると、パリ協定は、協定発効(2019年11月4日)から3年経過後以降に、脱退の意思を书面通告することによって脱退可能で、また、脱退が効力を持つのは通告から1年後とのことである。つまり、米国の通告が効力を持つのは最速で2020年11月4日となる。この日は次回大統領選の翌日であることから、実際に脱退するかについてはまだまだ不明と考えておいた方がよく、温室効果ガス排出量の削減を着実に進めておく必要がある。

もう一つの事実として、日本の温室効果ガス排出量は世界全体のわずか2.8%である。国内の努力には限界があり、日本全体の排出量を超えるような地球全体の排出削減に貢献する必要がある。高度な技術に裏打ちされた高信頼性でライフサイクルコストも低減できる製品はもちろんのこと、世界トップクラスのエネルギー効率を実現している生産技術についても可能であれば海外に普及させることで、地球

規模での貢献が可能となる。

次に、直流給配電について考えてみる。風力・太陽光発電の拡大が進み、2040年には世界の年間発電電力量に占める割合が21%、8,000TWhに達し、これは日本の年間発電電力量の9倍に当たる膨大な数値である。風力・太陽光発電による電気を、現在、主流となっている交流システムにつなごうとすると、どうしてもどこかで直流から交流に変換する必要がある、もし、ユーザー側で電子デバイスのように直流で動作しているものを多く使用しているのであれば、直流をそのまま活用の方が効率的である。データセンターや蓄電池システムなどは典型的な例で、こうしたところで信頼性の高い直流給配電システムは誰もが望むところであり、その市場は世界に広がっている。

直流電力を扱う場合の最大の課題の一つは、電流を切る開閉器の高性能化である。電流を切る際に必ず発生するアーク放電、特に直流では自然に電流がゼロにならず、このアークを消滅させるのに苦勞している。現在の技術の延長線で考えるのもよいが、需要の高まりを追い風に、直流アークの物理を再検討するところから始め、開閉器のイノベーションにつながる研究開発にチャレンジする必要があると考えている。

最後に、システム化についても言及しておきたい。日本だけでなく世界の電力ビジネスにおいては、既存の電気事業者以外に新規の電気事業者が参入しており、また、新興国では電気事業を正に立ち上げようとしている。こうした新規の電気事業者は、資金は持っているものの、システムの設計、施工、保守、更に運用までも人任せにしたいと思っていると聞いたことがある。受配電システムにおいても、あらゆるニーズに的確に応えられるような柔軟かつ多様性のある機器システムの開発、システム設計の標準化、保守管理サービスの標準化など、技術者が手腕を振るうことができることを期待している。

# 巻頭論文

## 受配電システム機器の 技術展望



城ヶ崎 亨\*



香川和彦\*\*



中村真人\*\*\*

### Technological Aspects of Power Distribution Systems Equipment

Toru Jogasaki, Kazuhiko Kagawa, Masato Nakamura

#### 要 旨

受配電システム機器では、近年、更なる安全性向上、グローバル化・規格の国際化、省エネルギー・環境負荷削減、IoT(Internet of Things)・高機能化、LCC(Life Cycle Cost)削減、電力安定供給などの社会ニーズに対応した次に示すような受配電システム技術の進展によって、新製品が投入されている。

#### (1) 国際規格に準拠した内部アーク放圧技術の進展

- ①IAC(Internal Arc Classified) AFLRへの対応技術
- ②狭隘(きょうあい)な空間設置への対応技術
- ③2段積構造への対応技術
- ④モータコントロールセンタへの対応技術

#### (2) IoT・高機能化の進展

- ①受配電システム機器の高度化技術

#### ②IoTプラットフォームへの親和性向上技術

#### ③無停電による自動点検システム技術

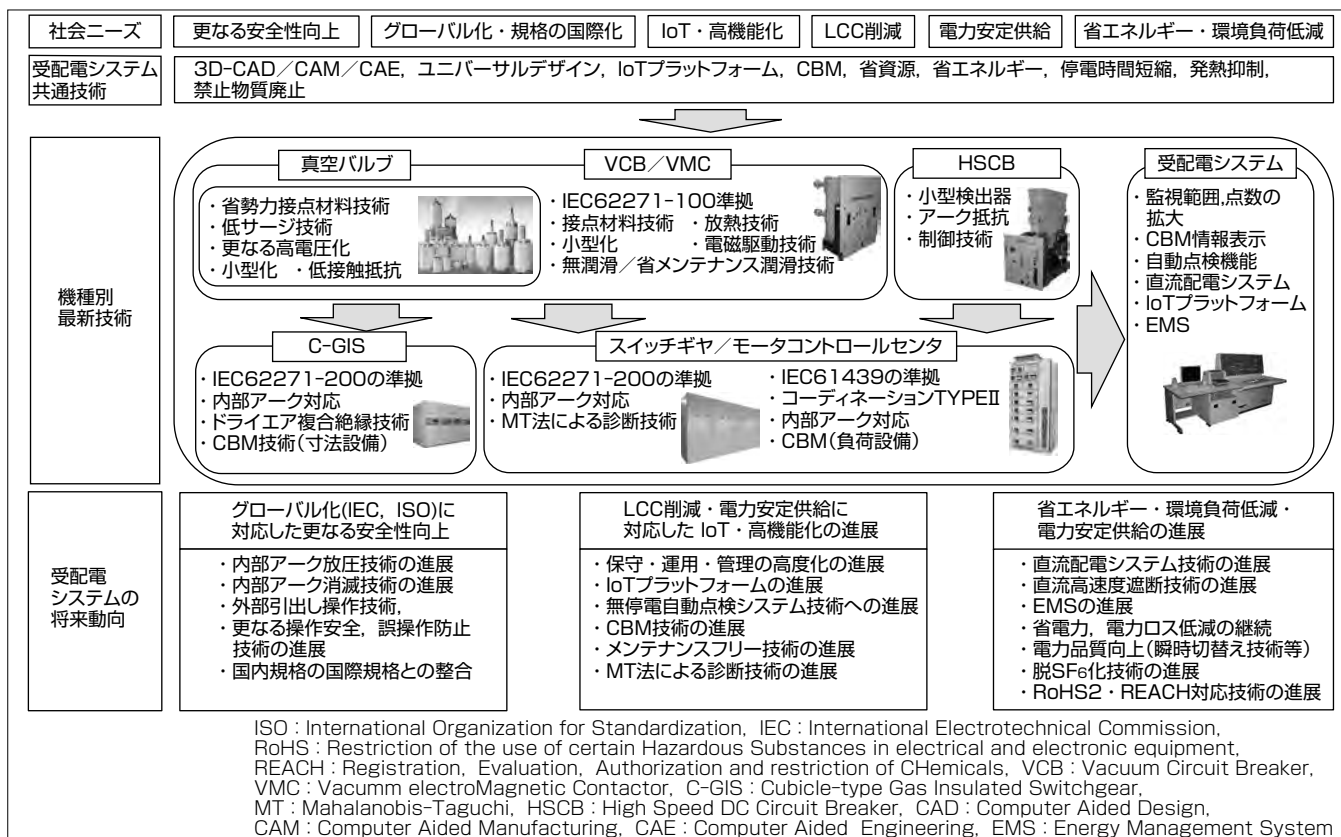
#### ④モータ負荷設備のCBM(Condition Based Maintenance)技術

#### (3) 直流配電技術の進展

#### ①直流配電システムとEMS技術

#### ②直流高速度遮断技術

今後も国内外を問わず顧客ニーズは多様化され、高度化するものと考えられる。三菱電機は、これらの受配電システム技術を更に発展させて製品開発を行い、受配電システム機器として付加価値の高い製品を提供することで社会に貢献していく。



#### 受配電システムの技術マップと将来動向

受配電システム機器の社会ニーズに基づく技術マップと将来動向を示す。

## 1. ま え が き

受配電システムは、電力会社の配電線から電力を受ける鉄道・工場・ビル・店舗等の受電点から動力・照明など配電端負荷にいたるまでの電力供給用設備、保護・計測・監視・制御装置を構成要素としている。また、これらは、公共・民間を問わず、社会インフラでの重要な基幹システムに位置付けられる。

受配電システム機器では、近年、更なる安全性向上、グローバル化・規格の国際化、省エネルギー・環境負荷削減、IoT・高機能化、LCC削減、電力安定供給などの社会ニーズに対応して、国際規格に準拠した内部アーク放圧技術、IoT・高機能化、直流配電技術が進展してきている。

本稿では、社会ニーズに対応することで発展している受配電システム機器の技術開発や製品化動向と展望について述べる。

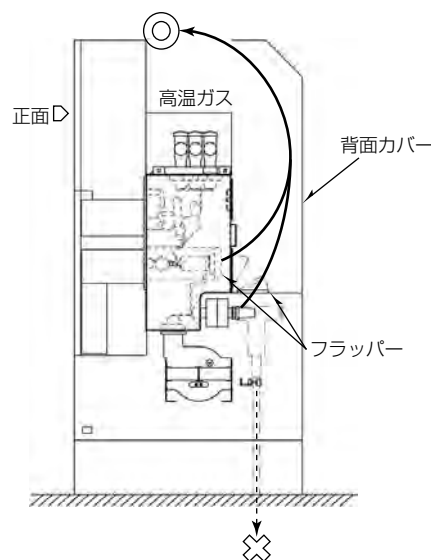
## 2. 国際規格に準拠した内部アーク放圧技術の進展

国際規格で、スイッチギヤの万一の内部アーク故障時の安全性に対し、クラス分けがされており、設置環境等も含め、顧客の要求クラスに応じた対策を要している。比較的容易な内部アークの放圧場所としてケーブルピットがあるが、図1に示すように健全なケーブルも損傷してしまうことから、昨今、最新の解析技術の進展に伴って、より難しい天井部への放圧がなされている。

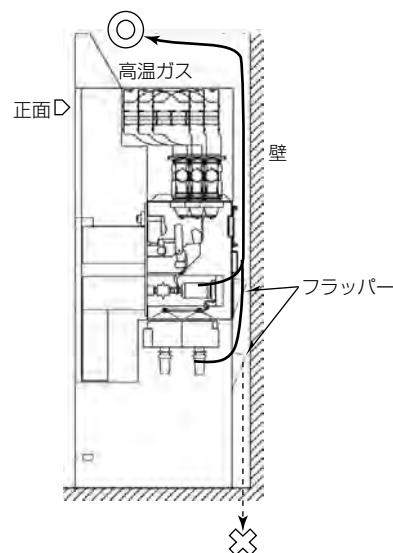
また、国内規格でも、国際規格との整合化が更に進み、国内も内部アーク性能の要求が高まると推測する。

### 2.1 IAC AFLRへの対応技術

世界的に配変電に採用される電圧は24kV、36kVが一般的で、その需要は非常に多く、海外市場では2,500Aの定格電流、31.5kA及び40kAの定格遮断電流が要求されるとともに、図1(a)に示すように最新の国際規格(IEC62271-200)に準拠した耐内部アーク性能の要求が高い。IEC規格では耐内部アーク性能のクラス分けが規定されており、クラスAFLRのアクセスビリティ(A)についてはC-GISを使用する許可を受けた人がC-GISに接近した場合の安全性が要求されており、FLRについてはC-GISの正面(F)、側面(L)、背面(R)の全ての方向に対して2mの高さまでの安全性が要求されている。形式試験ではC-GISの周囲に高温で着火するインジケータを配置した状態でC-GIS内部で内部アーク故障を発生させて周囲のインジケータが着火せず、またアークによってバーンスルーが生じないことなどが要求される。この性能を試験で確認する場合、供試器製作・試験に時間を要するだけでなく、試験後の供試器の再利用が難しく膨大な費用が必要となる。このことから、図2に示すように、内部アークに関する解析技術の高度化による試験回数の極小化が必要である。そ



(a) IAC AFLRタイプ



(b) IAC AFLタイプ

図1. C-GIS断面図

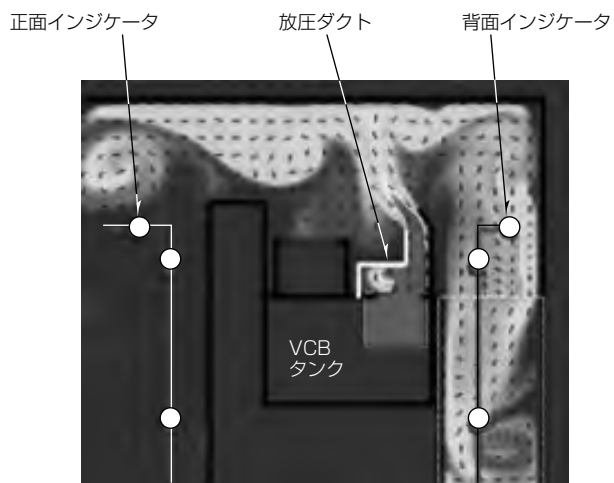


図2. VCBタンク内部アーク発生時の熱風流体解析結果

のため、内部アーク発生時のタンク内圧力上昇、及びタンクから放出される高温ガスの挙動を解析によって予測し、タンクの必要強度の確保、放圧ダクトから排出された高温ガスでインジケータが焼損しない構造とするためのガス流制御を行うようになってきている。

実際の試験でも高温ガスは解析結果と同様の傾向を示すまでに至っており、今後ますます解析精度が向上していくと推測する。

## 2.2 狭隘な空間設置への対応技術

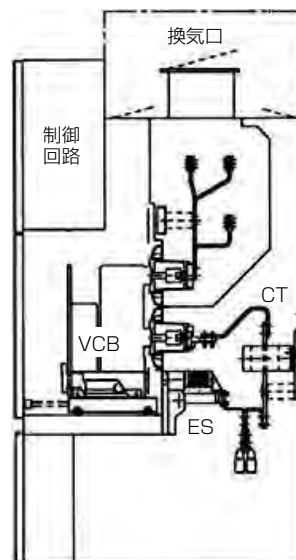
海外市場の12kVループ受電系統では、既設の分配用開閉器(RMU)が更新時期を迎えている。既設RMUは市街地地下などの狭隘な電気室に据え付けられている場合が多く、設置スペースの制約や既設ケーブルとの取り扱いなど顧客ごとに要望が異なる一方で、先に述べた24kV、36kVクラスのC-GISと同じく、12kV RMU用C-GISに対しても耐内部アーク性能など最新の国際規格(IEC62271-200)にも準拠する必要がある。

12kV RMU用C-GISは既設更新のために、特に奥行き寸法の制約が大きい。この場合、作業者がC-GISの背面に回り込まないことを前提に、図1(b)に示すように内部アーク事故時の高温ガス放出に対する安全性の確保を正面(F)、側面(L)に限定すると、内部アーククラスをクラスAFLで対応できる。C-GISタンクから放出される高温ガスをC-GIS背面と電気室壁との隙間100mmのスペースを伝って上方へと排出させ、C-GIS天井、側面、正面に高温ガスの排出方向を制限する障壁を設けることで、電気室の高さも3,400mmから2,600mmに縮小できる。実際の試験でも性能が確認されており、狭隘な空間設置への内部アーク対応技術も向上していくと推測する。

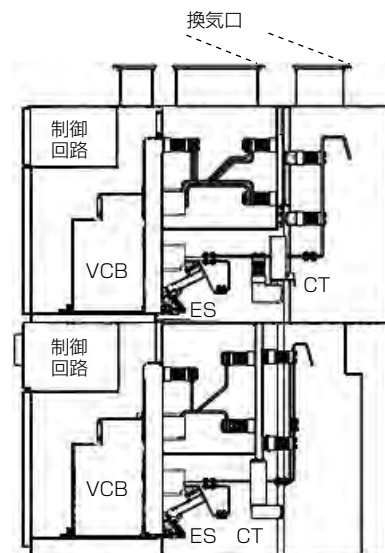
## 2.3 2段積構造への対応技術

海外市場では大規模な設備投資がある一方で、スイッチギヤを含む電気室設備全体の建設コストを抑制する目的で、配列サイズ縮小化の要求がある。この市場要求への対応として、図3に示すようにVCBの2段積化によって配列サイズ縮小を実現した気中絶縁スイッチギヤも出てきており、7.2/12kV定格の屋内スイッチギヤで最高クラスのAFLR40kA-1sに対応している製品もある。

従来構造に比べ、VCBを2段積化することによってスイッチギヤに1台当たりの収納機器が増大、区画数は上/下段のVCB室・母線室・ケーブル室の計6区画となり、それぞれの区画で内部アーク発生時の圧力上昇、高温ガスの流れを検討し、筐体(きょうたい)の強度検討を実施する必要がある。強度検討には品質工学のパラメータ設計を導入し、あらかじめ製造条件・使用条件・使用環境のばらつき要素を解析に取り入れ、スイッチギヤから排出される高温ガスの流れを、図4に示すように熱風流体解析を実施し、これらの検討結果が2段積構造の製品開発に活用される。



(a) 従来構造



(b) 2段積構造

VCB : Vacuum Circuit Breaker  
ES : Earthing Switch  
CT : Current Transformer

図3. スwitchギヤの従来構造と2段積構造

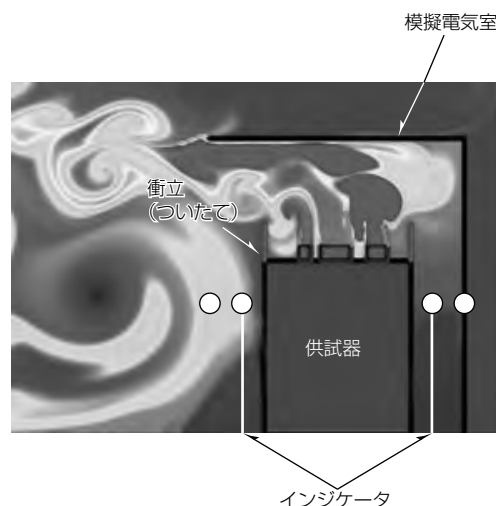


図4. 内部アーク時の熱風流体解析



## 2.4 モータコントロールセンタへの対応技術

高圧盤では、内部アークはIEC62271-200に定められており、内部アーク対応のための技術が進歩してきた。低圧盤に対しては、内部アーク規格が制定されていないものの、海外市場では内部アーク対応モータコントロールセンタ(MCC)が求められてきている。内部アーク対応MCCを製品化するには、高圧盤と比べ、盤内部空間が狭いことや、ユニット間の仕切りが多く盤外への放圧が難しいという問題がある。従来の高圧盤の内部アーク設計の延長上でシミュレーションを行うと、圧力変化が過渡的に起こるため、圧力ピークが捉えられなくなる。また、過渡現象の強度解析は解析工数が大幅に増加する。このため次のことを考慮して設計を進める必要がある。

- (1) ユニットに合わせた小さな分割単位での圧力解析
- (2) 急峻(きゅうしゅん)な圧力上昇を考慮した短い時間ステップでの圧力解析
- (3) 圧力ピーク、作用時間、力を受ける部品の質量から、過渡現象を静的なモデルに置き換え、シミュレーションの工数を低減

今後ますます、MCC内部アーク対応の解析技術が向上すると推測する。

## 3. IoT・高機能化の進展

### 3.1 受配電システム機器の高度化技術

構成機器(遮断器、開閉器、変成器等)や、制御・保護・計装・表示を行うマルチリレーの進化によって、受配電システム機器は高度化してきた。次に、求められている高度化ニーズと代表的な実現技術を述べる。

- (1) 使い勝手の向上(ユニバーサルデザインの導入(図5))
- (2) 環境性能向上  
(脱SF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)ガス、腐食性ガス等の耐環境性能技術)
- (3) 高機能化(IoTによる設備劣化診断技術)
- (4) 収納効率・省スペース(小型化技術、熱設計技術)
- (5) 省メンテナンス(CBM、自動点検システム技術)
- (6) 省エネルギー、環境への配慮(マルチリレーの集約技術)

国内でも現在、電力システムシステム改革が国主導で推進され、2016年4月1日に第2段階(電気の小売全面自由化)が制定された。今後、国内外でLCC低減の要求が、ますます高くなると想定できる中、保護・制御・監視に加え、クラウド上のアプリケーション(データ分析機能、学習機能等)を駆使したソリューション提供へと結びつけるために、IoTやクラウド環境にフレキシブルに対応可能な受配電システム機器が求められると推測する。

### 3.2 IoTプラットフォームへの親和性向上技術

計装システムの構成機器であるコントローラとの接続を実現するため、受配電システム機器は、マルチリレー



(a) D形MCCの正面上部



ON状態  
OFF状態  
MCCB : Molded Case Circuit Breaker

(b) MCCB操作ハンドル

(c) EMC-B形マルチ  
モータコントローラ

図5. MCCのユニバーサルデザイン例

にオープンネットワークフィールドバスインタフェース(CC-Link等)を備え、受配電システムの監視・制御を可能としてきた。

今後は、IoT技術がますます一般機器に展開される中、インテリジェント化機能によって得られたデータや、通常の監視・制御データをクラウドなどへ転送してビッグデータ分析へつなげる機能等が必要となる。そのためには、受配電システム機器が、IoTプラットフォームにフレキシブルに対応する機能が必要になってくる。IoTプラットフォームへの親和性向上のための主な機能を示す。

- (1) データ収集容易性実現のためのデータ通信機能の無線化や、既設活用に適したPLC(Programmable Logic Controller)通信サポート
- (2) データのセキュリティデータ圧縮機能
- (3) リアルタイム性とデータ信頼性の保証機能

今後、これらの機能がマルチリレーに搭載されていくと推測する。

### 3.3 無停電による自動点検システム技術

スイッチギヤなど受配電設備の中でも特に故障を検知するための保護リレーや系統を切り離すための遮断器に異常や故障があると重大事故につながる可能性が高くなる。重大事故を未然に防ぐためには定期的に健全性を点検する必要があるが、点検には設備を停電させる必要があるため、設備によっては十分な停電時間の確保が難しい場合がある。

そこで、当社は、図6に示すようにマルチリレー“MP31”と受配電監視・制御システム“MELSAS-S”を組み合わせ、保護リレーの健全性を自動点検できるシステムを実現している。

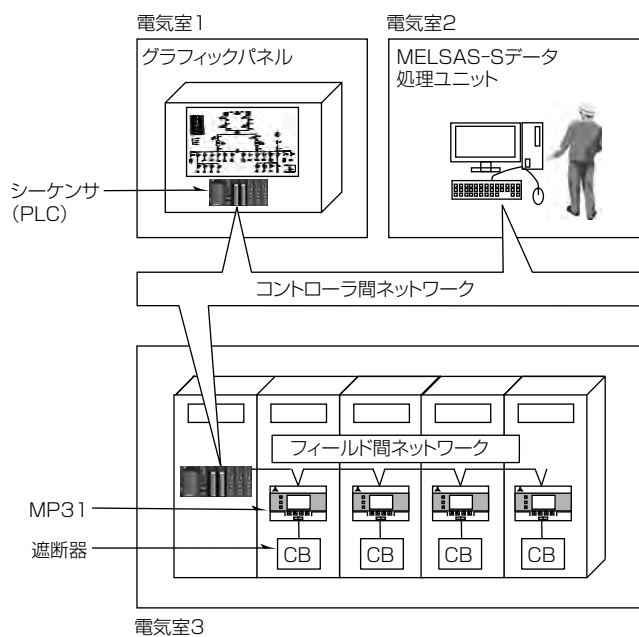


図6. 自動点検システム構成

保護リレーは信頼性を向上させるため計測回路を二重化(A/B系)している。常時はA/B系の二重回路で設備保護を実施するが、保護リレー点検の一つである保護特性試験では片方の回路(A系)で設備保護を実施しながらもう片方の回路(B系)で保護特性試験を実施できるようにした。これによって設備運用中에서도保護リレーの保護特性試験が可能となり、停電時に実施する作業が削減される。また、万が一、この試験によって故障が見つかった場合、保護リレーの計測回路が二重化されているため、健全な片側回路で保護リレー交換までの間、保護を継続できる。

今後、メンテナンスフリーや自動点検化による省力化・無停電化が更に進むと推測する。

### 3.4 モータ負荷設備のCBM技術

工場の保全現場では、設備の老朽化等によるプラント障害の増加、及び保全熟練技能者の引退による素人化が進んでいるが、依然として保全活動の主体は定期点検と日常巡回点検に依存しており、設備の故障時期の予知を可能とするCBM技術のニーズが高まっている。

図7に示すようにMCC搭載のCBM技術では、モータへ供給する電流の波形からFFT(Fast Fourier Transform)演算による特徴成分の検出及び電流、電圧波形の逆相成分から評価式を用いてオンラインでモータの劣化度(寿命)を推定する技術が確立されている。

次に代表的なCBM技術を述べる。

- (1) モータ機械系異常検出技術
- (2) レアショート検出技術
- (3) モータ負荷トルク推定技術
- (4) 微少漏洩(ろうえい)電流検出技術

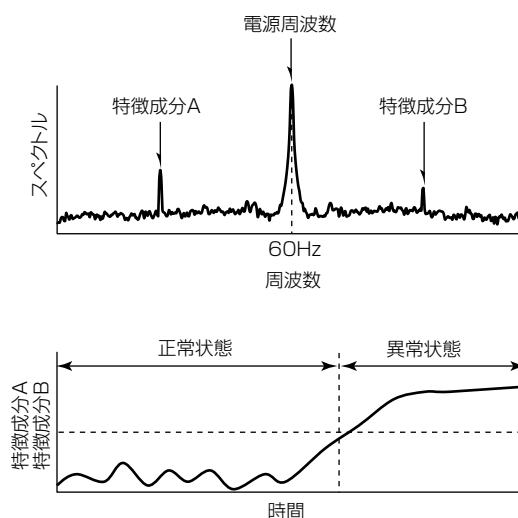
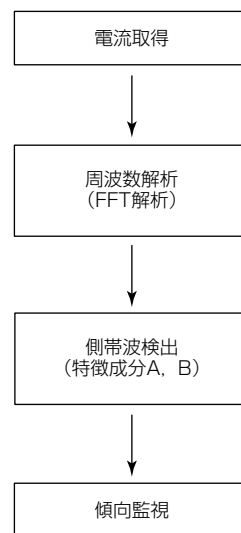


図7. 機械系異常検出手法

今後、これらの技術を取り入れた製品が出てくるものと推測する。

## 4. 直流配電技術の進展

地球環境問題や東日本大震災以降のBCP(事業継続計画)対策機運の高まり、電力自由化を代表とした市場環境の変化に伴い、電力インフラに対してスマート化・分散電源・エネルギーミックス等の新しい要求が増えている。

また、近年“建築物省エネ法”など省エネルギー規制強化の流れを受け、建設業界でのZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)実証設備の建設も増加し、従来の“エネルギー消費型”から自然光・周囲環境を利用した省エネルギー化に、自前の発電・蓄電設備に制御技術を応用する“エネルギーの地産地消型”へ変化している。

### 4.1 直流配電システムとEMS技術

このような背景の中、“省エネルギー”“創エネルギー”“蓄エネルギー”に対応した直流配電システムでは、今後の直流配電の普及促進に向けた技術力と製品力の強化が行われている。



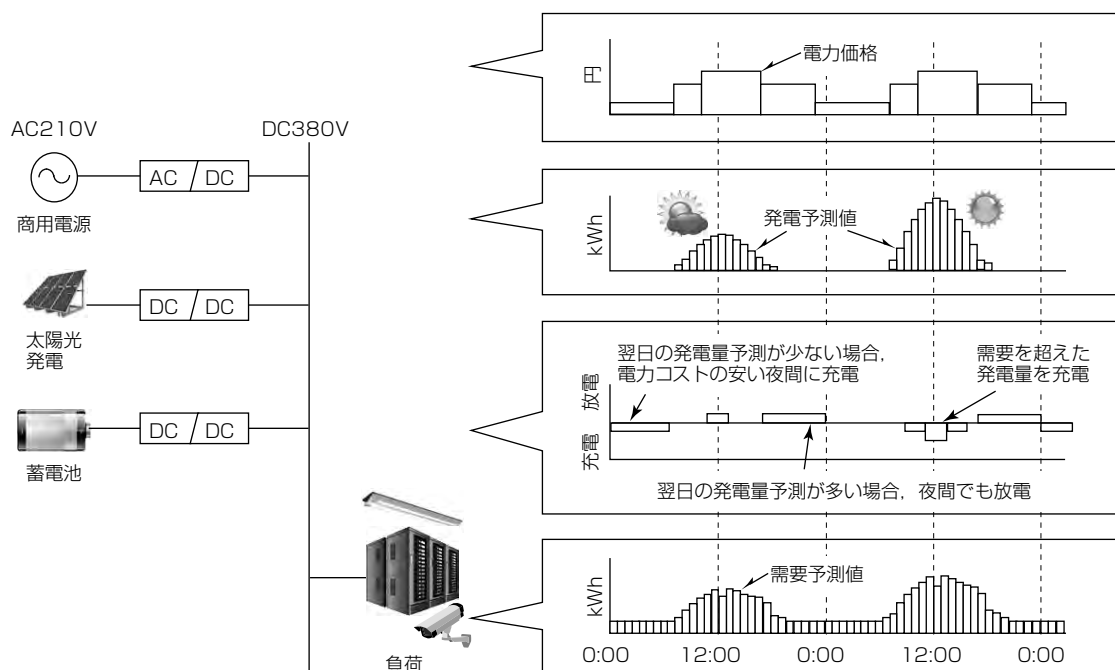


図8. 需要予測, 再エネルギー発電予測に基づく需給計画例

当社が開発したスマート中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”ではエネルギーを無駄なく活用するため、エネルギーマネジメントシステム(EMS)の機能を持っている。EMSは主に需要予測機能、再生可能エネルギー(再エネ)発電予測機能、需給計画・制御機能の3機能で構成しており、再エネを最大限に活用するためには、需要予測、再エネ発電予測からの需給計画に基づいた蓄電池の有効活用が重要になる。電力需要は気象との相関性が高いため、気象予報データから過去の実績データを基に回帰分析を用いて48時間先までの需要を予測する。また、当日分に関しては直近の実績データを基に予測カーブを補正している。図8に示すように再エネ発電予測機能としては、太陽光発電予測機能と風力発電予測機能を開発中であり、気象予報データ(日射量、風向、風量)と発電出力特性モデルから、翌日の発電量を予測する。また、当日の発電予測は、過去の実績データを基に幾つかの予測モデルを組み合わせることで予測精度を高めている。これらの予測を基に、蓄電池の有効活用と負荷制御を組み合わせ、ビル、工場などの設備運用に合わせた需給計画を行うことで、再エネ有効活用と商用電源からの給電を最小限にする運用を実現でき、今後市場に浸透していくと推測する。

## 4.2 直流高速遮断技術

スマートグリッドの進展によって、電源のベストミックスが必要になっている。太陽光発電などの再生可能エネルギーが直流であるのに対し、現状大部分の電力網は交流で構成されている。直流は交流に比べ遮断が難しく、これが直流の電力網が発展しにくい要因の一つになっている。電力損失の低減となる直流配電を進めるためには、直流遮断

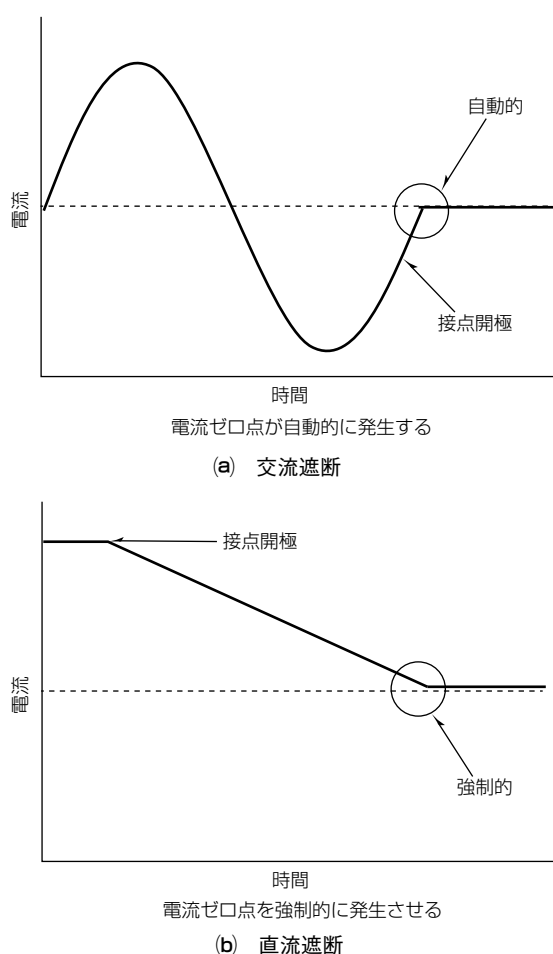


図9. 交流遮断と直流遮断

技術の革新が必要である。次に交流遮断と直流遮断の比較をし、今後の直流遮断技術を展望する。

交流回路の場合、電流ゼロ点があるため電極間に発生し

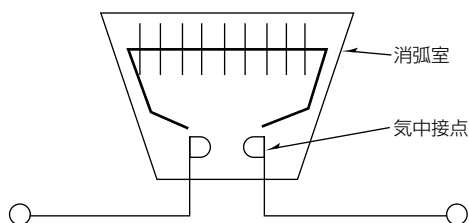


図10. 気中遮断方式

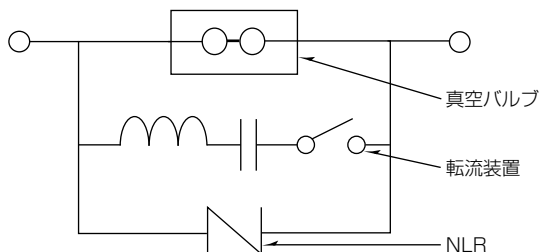


図11. 転流遮断方式

たアーク構成物質を拡散させることが容易であるのに対し、直流回路の場合は電流ゼロ点を持たないため、一旦発生したアークは拡散することがない。そのため直流回路では電流ゼロ点を強制的に作り遮断することになる。図9に交流遮断と直流遮断の違いを示す。

強制的に電流ゼロ点を作る方法として、比較的回路電圧が低い領域では限流で強制的に電流ゼロ点を作って遮断する気中遮断方式が主流であるが、真空バルブを使用して、コンデンサによって電流が流れる方向と逆方向に電流を流して電流ゼロ点を作って遮断する転流遮断方式もある。この方式はLCの振動電流で電流ゼロ点を作り、真空バルブで遮断して遮断後の回路エネルギーは非直線抵抗(NLR)で吸収する。図10に気中遮断方式、図11に転流遮断方式を示す。

真空バルブを使用した転流遮断方式は、気中アークが発生しないなどのメリットはあるものの、システムが複雑になることやユーザーサイドでのメンテナンスが容易でないことなどから最近では気中遮断方式の高速度遮断器(HSCB)への回帰も起きている。このような状況から高速検出、高速遮断などに新技術を適用して大容量化に対応した新形HSCBも開発されている。

また最近の直流配電の適用拡大に対応した直流遮断技術の開発も求められており、新技術の開発と要求にマッチした遮断器の製品化が今後更に進むものと推測している。

## 5. む す び

最近の技術・製品動向を主体にして受配電システム機器の技術展望を述べた。

受配電設備は社会インフラの基礎であることから、更なる安全性向上、グローバル化・規格の国際化、省エネルギー・環境負荷削減、IoT・高機能化、LCC削減、電力安定供給などの社会ニーズは、グローバル市場の中で、内部アーク対応などの重要性がますます高まると考えられる。また最近では、太陽光発電や風力発電のような自然エネルギーを利用した分散型電源の普及が推進されており、直流配電システムとこのEMSを含む再生可能エネルギー拡大に基づく電源の多様化による省エネルギーも進展すると予想される。また、IoTプラットフォームへの親和性向上によるCBMや自動点検による省力化、停電時間の短縮も進展すると予想されるなど、国内外を問わず社会ニーズは多様化し、要求も高度化している。このような社会変動の中にあって、今後も当社は、技術開発を更に進め、受配電システム機器として付加価値の高い製品を提供することによって社会に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 次世代電力システムにおける直流給配電調査専門委員会：次世代電力システムにおける直流給配電の研究動向，電気学会技術報告，電気学会，No.1215 (2011)
- (2) 真空遮断器・開閉器の技術動向調査専門委員会：真空遮断器・開閉器の技術動向，電気学会技術報告，電気学会，No.1278 (2013)
- (3) 密封形変電設備の劣化保全技術高度化，電気協同研究会，61，No.3 (2014)
- (4) ガス絶縁開閉装置の保全高度化，電気協同研究会，70，No.2 (2014)
- (5) 中電圧スイッチギヤにおける絶縁方式の技術動向，電気学会技術報告，電気学会，No.1349 (2015)

# 海外配変電向け 24／36kV“HS-X形”C-GIS

井上直明\* 河西克紀\*  
松永敏宏\*  
大坪孝年\*\*

24/36kV C-GIS "HS-X" for Overseas Power Distribution and Transmission Market

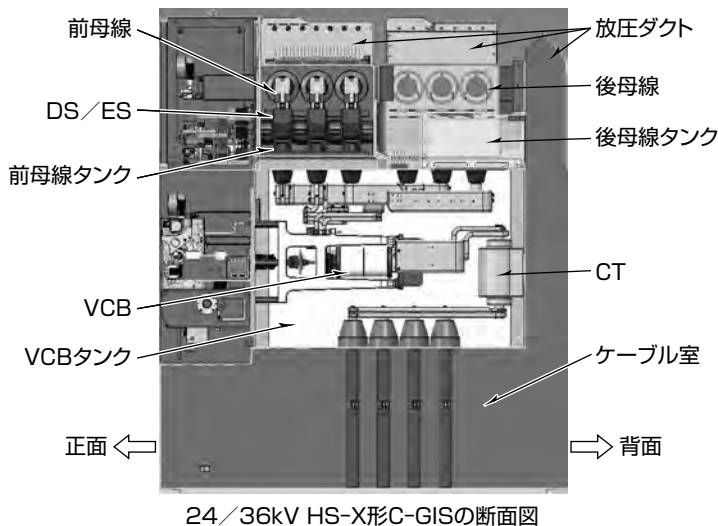
Naoaki Inoue, Toshihiro Matsunaga, Takatoshi Otsubo, Katsunori Kawanishi

## 要 旨

世界的に配変電に採用される電圧は24kV、36kVが一般的で、その需要は非常に多い。三菱電機はこれまでに24／36kVクラスのキュービクル型ガス絶縁開閉装置(C-GIS)として、定格電流1,250A、定格遮断電流25kA仕様の“HS-X形”C-GISを製品化している。一方、海外市場では2,500Aの定格電流、31.5kA及び40kAの定格遮断電流が要求されるとともに、最新の国際規格(IEC62271)に準拠した耐内部アーク性能の要求や、二重母線仕様、据付け時の現地ガス処理レスなどの顧客ごとの要望もある。このような市場要求に対して、今回海外配変電向け24／36kV HS-X形C-GISを開発した。このC-GISは、海外の配変電所及び各種プラントをターゲットとして開発したもので、既に市場への提供を開始している。

特長は次のとおりである。

- (1) 定格電圧24／36kV、定格電流2,500A以下、定格遮断電流31.5kA以下の定格をそろえており、単母線及び二重母線のどちらにも対応可能
- (2) 主母線はガス絶縁母線を用い、主母線間の接続部には固体絶縁アダプタを用いたプラグイン構造を採用しているため、据付けの際のガス処理が不要
- (3) 遮断器及び断路器のタンクを貫通する駆動軸には金属製ペローズシール及び回転シールを採用し、粉塵(ふんじん)の多い据付け場所での多数回開閉に対する気密性に配慮
- (4) 全ての遮断器及び断路器の操作装置を正面側に配置し、操作性と視認性に配慮



24／36kV HS-X形C-GISの断面図



24／36kV HS-X形C-GISの5面列盤構成

DS : Disconnecting Switch, ES : Earthing Switch, VCB : Vacuum Circuit Breaker, CT : Current Transformer

## 二重母線化及び耐内部アーク性能を実現した24／36kV“HS-X形”C-GIS

従来機種は単母線構成であったが、この機種では前母線、後母線の二重母線構造とした。それぞれの母線タンク内には母線用断路器／接地開閉器(DS／ES)を配置し、どちらの母線DS／ESも正面から操作可能としている。またケーブル室、真空遮断器(VCB)タンク、前後の母線タンクともに放圧ダクトを持っており、IEC62271規格で要求する耐内部アーク性能を満足している。

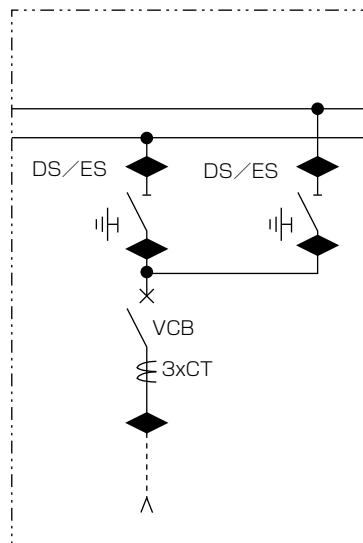
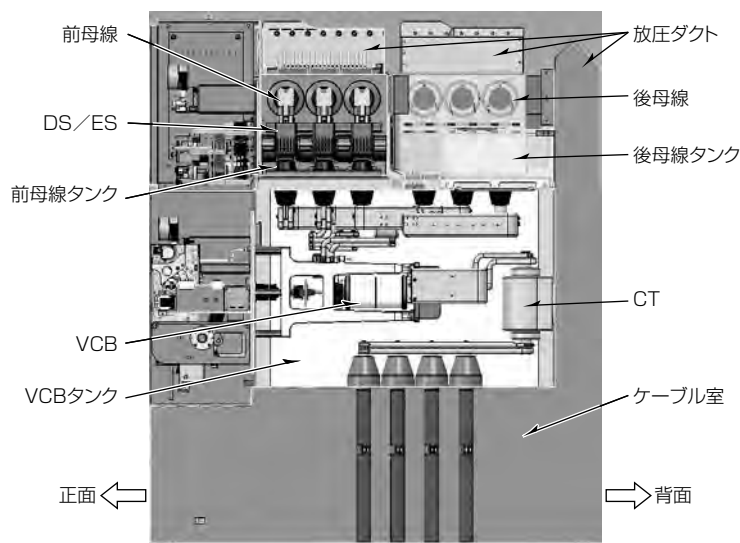
本稿では、HS-X形C-GISの仕様・構造及び採用技術について述べる。

HS-X形C-GISの受電盤の断面図及び単線図を図1に示す。海外市場では2,500Aまでの定格電流が求められることが多い。2,500Aの大電流を通電するためにはケーブルの通電断面積を拡大させる必要があるため、一相あたりに複数本のケーブルを接続しなければならない。また、海外市場では配変電設備で重要な母線の冗長性を高めるために二重母線構成が要求される。さらに、国際規格IEC (International Electrotechnical Commission)では、C-GIS内部で短絡事故が発生した際の周囲の人への安全性を考慮した耐内部アーク性能が要求される。このC-GISの

製品開発ではこれらの要求への対応を実施した。このC-GISの仕様を表1に示す。

HS-X形C-GISでは、図1で示した単線構成及び表1で示した大定格電流を実現するために、一相当たり最大4本のケーブルが接続できる構成とした。変流器(CT)はケーブル部に取り付けることも可能であるが、ケーブル本数が多い場合に複数のCTが必要となってコストアップするため、複数本のケーブル入力に対してはタンク内で1本の導体に通電経路を集約し、タンク内にCTを配置した構成としている。また、真空遮断器(VCB)が搭載されているVCBタンクの上に前母線タンク、後母線タンクを配置し、二重母線構造としている。前母線タンク、後母線タンク内にはそれぞれ前母線用断路器/接地開閉器(DS/ES)、後母線用DS/ESが配置されており、どちらのDS/ESも操作機構を正面に配置することで、盤正面から操作可能としている。さらに、IEC規格で

	項目	仕様
C-GIS	準拠規格	IEC 62271-200
	定格電圧	24／36kV
	定格電流	1,250A, 2,000A, 2,500A
	定格周波数	50／60Hz
	定格短時間耐電流	31.5kA-3s
	内部アーククラス	AFRL 31.5kA-1s
	封入ガス	SF <sub>6</sub> ガス
	ガス圧力	定格：0.03MPa 警報：0.02MPa
遮断器	準拠規格	IEC 62271-100
	種類	真空遮断器
	定格遮断電流	31.5kA
	操作機構	電動ばね操作
	クラス	S1, M2, E2, C2
断路器／接地開閉器	準拠規格	IEC 62271-102
	操作機構	電動／手動



(b) 単線図

図 1. HS-X形C-GISの断面図及び単線図

要求される耐内部アーク性能を達成するためにケーブル室、VCBタンクの背面側及び母線タンクの上に放圧ダクトを取り付けて内部アーク事故発生時の高温ガスを上部に放出し、C-GISの周囲にいる人の安全性を確保する構造としている。

### 3. HS-X形C-GISの採用技術

今回開発したHS-X形C-GISでは、①二重母線構造でのDS/ESの正面操作化及びDS/ESの低接圧化、②機器操作部のガスシール構造、③内部アーク発生時の高温ガスの流体解析、④母線接続部に固体絶縁母線アダプタを採用したプラグイン構造の大きく4つの技術を採用した。

#### 3.1 二重母線構造でのDS/ESの構造

HS-X形C-GISの二重母線構造の上面図を図2に示す。二重母線構造で前後の母線用DS/ESを正面操作可能とするために、母線タンクの幅を盤幅より小さくし、前母線タンクは盤の右側、後母線タンクは左側に配置した。これによって後母線DS/ESの操作棒は前母線タンクと干渉することなく正面制御箱まで延長し、前母線用及び後母線用DS/ES操作機構を盤正面に配置することで正面操作可能にしている。なお遮断器についても図1の断面図に示すように操作機構は前面に配置しており、全ての操作機構を正面に配置することで、操作性と視認性を確保した。

また、DS/ESには刃形開閉器構造を採用した。従来機

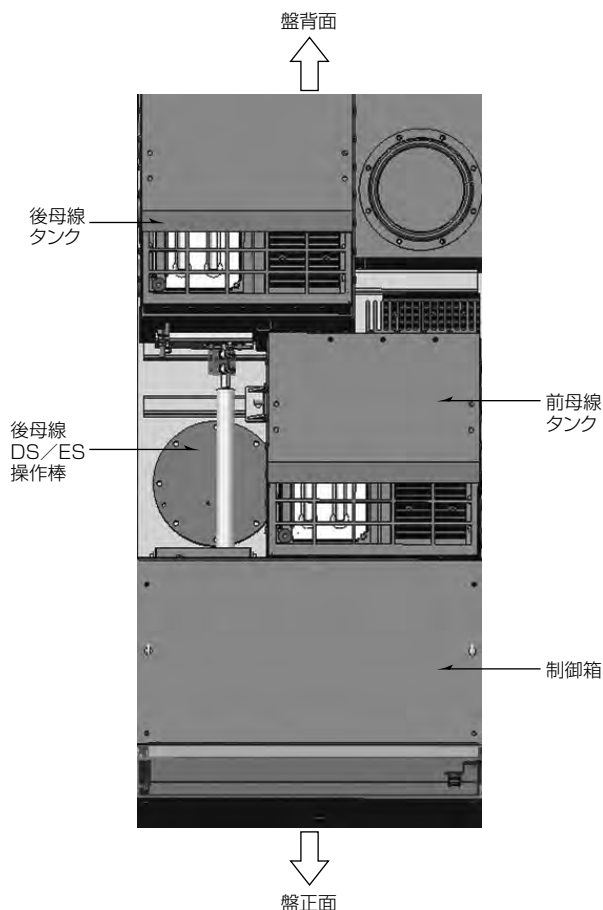


図2. HS-X形C-GISの二重母線構造の上面図

種では断路器端子又は接地端子に2枚1対の可動ブレードを嚙(か)み込ませて端子両面の2点で接触させ、接触部にばねによって接圧荷重を与える構造にしているが、負荷電流の通電性能に影響する接触抵抗の低減及び大電流通電時の接触部の溶着を防止するためには大きな接圧荷重が必要となるため、DS/ES操作機構に要求される操作力も大きくなっていった。これに対してこのC-GISのDS/ESでは、図3に示すようにブレード先端にスリットを設けることで、2枚1対のブレードが4点で断路器端子又は接地端子に接触する多点接触構造にすることで、1点当たりに流れる電流値を低減させている。これによって、低い接圧荷重でも接触抵抗の低減、耐溶着性能の向上が可能になり、従来機種(通電電流1,250A、短時間耐電流25kA)に対してこの機種は通電性能、短時間耐電流性能ともに向上させているが、接圧荷重は12%低減することができた。

#### 3.2 機器操作部のガスシール構造

一般にC-GISでは絶縁性ガスを密封したタンク内にVCBやDS/ESのような主回路機器を収納し、タンク外の操作機構によって操作する必要があるため、気密を維持した状態で操作機構の駆動力をタンク内に伝達する必要がある。このC-GISでは、VCBの駆動部には金属性のペローズシール構造を採用した。ペローズシールは金属を蛇腹状にして伸縮性を持たせた構造で真空バルブの可動部にも用いられており、気密信頼性に対して十分な実績がある。また、DS/ES部の気密駆動部はOリングを用いた回転シール構造としている。Oリングを用いた気密駆動構造には直線スライドシール構造と回転シール構造がある。直線スライドシール構造を粉塵が多い環境で使用するとスライドシール軸にたまった粉塵がOリングシール部に入り込み気密性を低下させる懸念があるが、回転シール構造の場合Oリングシール部と回転シール軸は常に密着しており、外部の粉塵が入り込む懸念がない。このように粉塵の多い場所

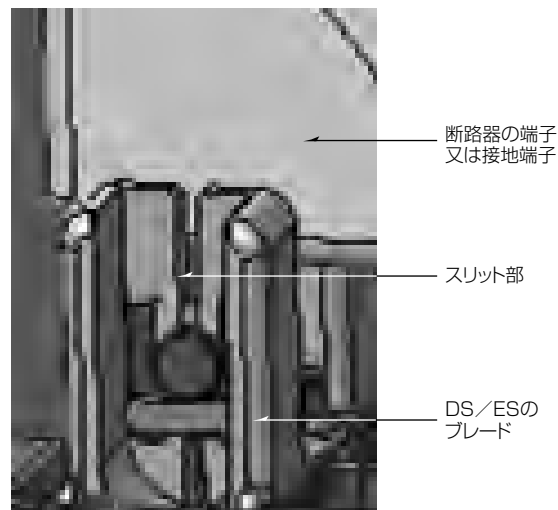


図3. DS/ESの接触部構造

での多数回開閉も考慮した構造にすることで、多数回開閉後の気密性能も確保できた。

### 3.3 高温ガスの流体解析

IEC規格では耐内部アーク性能のクラス分けが規定されており、表1に示すようにこのC-GISの仕様はクラスAFLR 31.5kA-1sである。このクラスAについてはC-GISを使用する許可を受けた人がC-GISに接近した場合の安全性が要求されており、FLRについては、C-GISの正面、側面、背面の全ての方向に対して、2mの高さまでの

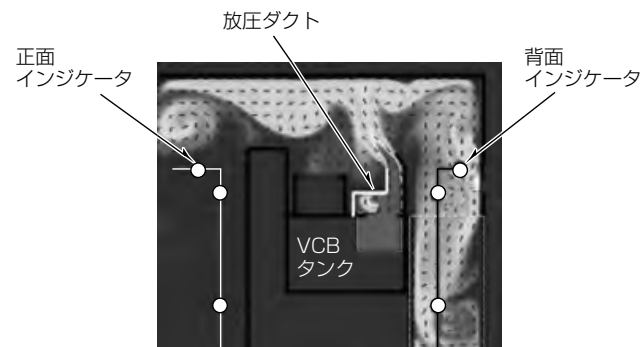


図4. VCBタンク内部アーク事故発生時の熱風流体解析結果

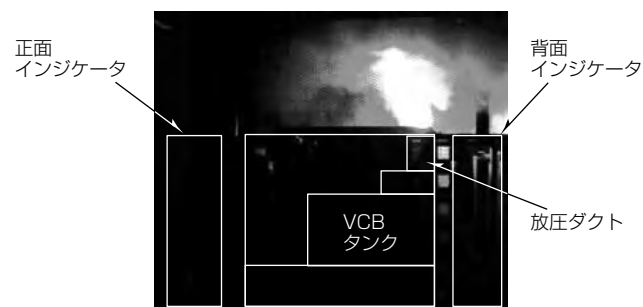


図5. VCBタンク内部アーク時の形成試験風景

安全性が要求されている。形式試験ではC-GISの周囲に高温で着火するインジケータを配置した状態でC-GIS内部で内部アーク事故を発生させて周囲のインジケータが着火せず、またアークによってバーンスルーが生じないことなどが要求される。このような規格要求を満足させるために、まず、タンク内で内部アーク事故発生時の圧力上昇、内部アークの熱による筐体(きょうたい)板のバーンスルー及び筐体の強度の検討が必要となる。このC-GISでは解析による検討を行い、タンクの必要強度を確保した。さらに、放圧ダクトから排出された高温ガスでインジケータが焼損しない構造とするために高温ガスの流体解析を行った。図4はVCBタンク内で内部アーク事故が発生した場合の流体解析結果を示しており、放圧ダクトの放出部を前方斜め上方向に角度をつけることで、インジケータが焼損しないことを確認した。

また、形式試験時の試験風景を図5に示す。試験でも高温ガスは図4の解析結果と同様の傾向を示していた。このような内部アーク試験でケーブル室、VCBタンク、母線タンクの3つの部位に対して解析及び試験を行い、IEC規格に準拠した形式試験に合格した。

### 3.4 母線のプラグイン構造

従来のガス絶縁母線式のC-GISの場合、C-GIS据付け時に母線を接続し、ガス処理を行う必要があるため、据付け時間が長時間必要となる。現地据付け時間の削減のため、このC-GISでは固体絶縁母線アダプタを用いたプラグイン構造を採用した。まず図1に示した前後母線タンク内には母線用DS/ESに加えて母線導体が配置されているが、この母線タンクの両端に図6のステップ1の図に示すような接続用ブッシングが配置されており、接続用ブッシングの先端には接触子が配置されている。据付け時はステップ2

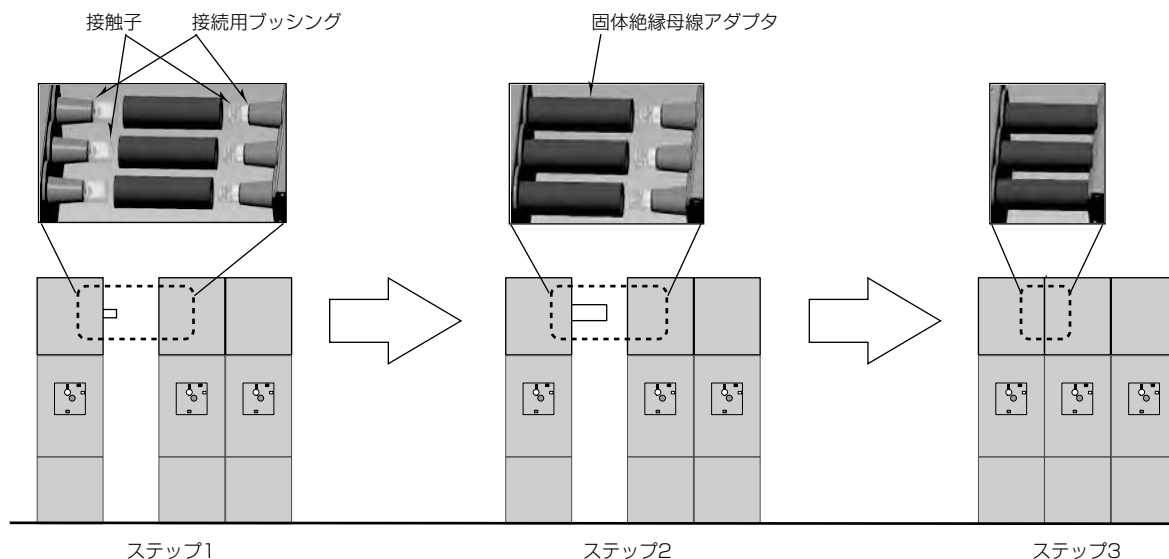


図6. 固体絶縁母線の列盤作業



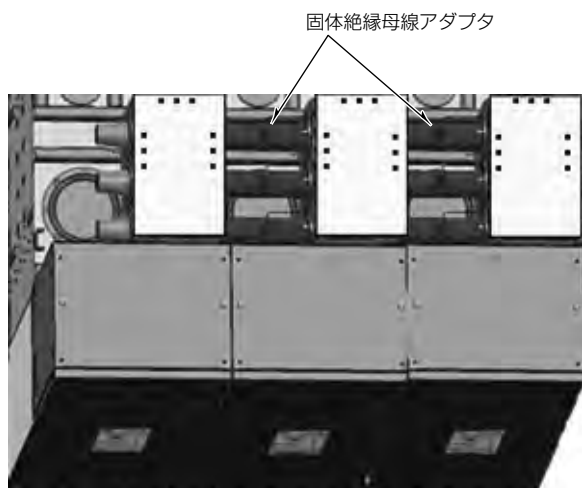


図7. 列盤時の上面図

に示すように接続用ブッシングに固体絶縁母線アダプタを接続し、ステップ3に示すようにC-GISを列盤すると、隣接盤の接続用ブッシングは固体絶縁母線アダプタに挿入される。このようにC-GIS本体を列盤することで母線も同時に接続される構造としたことで、現地据付け時のガス処理レスの構造を実現することができた。図7に列盤時の上面図も併せて示す。

なお接続部で、電流通電は接触子を通じて行い、絶縁は固体絶縁で行う構造となっている。この母線部に関しても短時間耐電流試験、負荷電流通電試験、耐電圧試験、長期課電試験等の一連の形式試験に合格し、目標とする性能を確保することができた。



図8. HS-X形C-GISの5面列盤構成

#### 4. む す び

今回開発した24/36kV HS-X形C-GISの仕様・構造及び採用技術を述べた。図8にこの製品の5面列盤構成を示す。今回は市場要求の大部分を占める遮断電流31.5kAクラスまでを開発完了し、2016年度から客先への提供を開始している。またこの製品は海外市場をターゲットとしており、開発初期から海外生産を視野に入れ、海外調達先からの部材調達・評価や、タンクのロボット溶接による品質安定化、溶接箇所をミニマム化したパネル構造を採用した。今後、海外市場の幅広い要求に対応するため、顧客ごとの特殊仕様についても順次メニュー拡大を進めていく。

# 海外RMU更新用12kV“HS-X形”C-GIS

松永敏宏\*  
江波戸輝明\*  
藤 謙一\*\*

12kV C-GIS "HS-X" for Overseas RMU Renewal Market

Toshihiro Matsunaga, Teruaki Ebato, Kenichi Fuji

## 要 旨

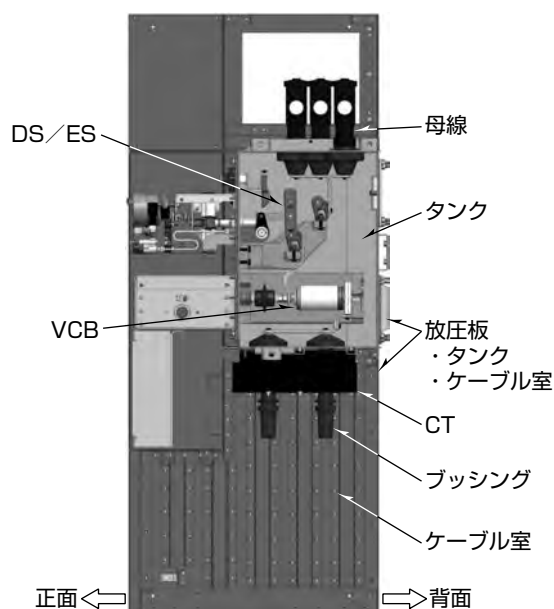
海外市場の12kVループ受電系統では、既設の分配用開閉器(Ring Main Unit : RMU)が更新時期を迎えている。既設RMUは市街地地下などの狭隘(きょうあい)な電気室に据え付けられている場合が多く、設置スペースの制約や既設ケーブルとの取り合いなど顧客ごとに要望が異なる一方で、耐内部アーク性能など最新のIEC(International Electrotechnical Commission)規格に対しても準拠する必要がある。

今回、このような海外RMU更新需要をターゲットとして、12kV“HS-X形”キュービクル型ガス絶縁開閉装置(C-GIS)を新たに開発した。この機種は次のような特長を持つ。

(1) 12kV専用機種として機器設計や配置を最適化することで、従来の24kV HS-X形C-GISと比較して、容積

比40%減の幅450×奥行820×高さ2,000(mm)を達成

- (2) 内部アーク事故時の高温ガス放圧に必要なC-GIS背面から電気室壁面までのスペースは最小100mmであり、狭隘な電気室にも据付け可能
- (3) 電力ケーブル接続部分は、圧縮端子とプラグインコネクタ両方に接続可能なブッシングを開発したことで、既設ケーブルの流用にも対応
- (4) 母線の接続部には固体絶縁アダプタを用いたプラグイン構造を採用し、据付けの際の現地ガス処理作業レスを実現
- (5) 気密タンクにロボット溶接を採用し、さらに欧州F(ふっ素)ガス規制改正に対し、運用中の定期検査が除外される年率0.1質量%以下のガスリークレートを達成



12kV HS-X形C-GISの断面図



12kV HS-X形C-GISの3面列盤構成

DS : Disconnecting Switch, ES : Earthing Switch, VCB : Vacuum Circuit Breaker, CT : Current Transformer

## 縮小化と狭隘スペースでの耐内部アーク性能を実現した12kV“HS-X形”C-GIS

従来機種ではタンク上側に設置していた放圧板を、背面側に設置して奥行き寸法を縮小した。放圧板から背面側へ噴出した高温ガスは、電気室壁面との間を伝い天井方向へと排出される。タンク下側に設置したブッシングは既設の圧縮端子と新設のプラグインコネクタ両方の電力ケーブル接続方式に対応している。

## 1. ま え が き

海外市場の12kVループ受電系統では、従来、真空遮断器(VCB)×1台と負荷開閉器(Load Break Switch : LBS)×2台を集約させた分配用開閉器(RMU)が多用されてきた。

近年、老朽化した既設RMUに対して、停電時間短縮を目的としたVCB×3台構成のキュービクル型ガス絶縁開閉装置(Cubicle-type Gas Insulated Switchgear : C-GIS)への更新需要が高まっており、それを受けて三菱電機では12kV HS-X形C-GIS(以下“HS-X形C-GIS”という。)を開発した。

本稿では、HS-X形C-GISの配列構成、構造・仕様及び採用技術について述べる。

## 2. HS-X形C-GIS

### 2.1 ループ受電系統とC-GISの配列構成

既設RMUを用いたOpen-Ring方式のループ受電系統を図1(a)に示す。各二次変電所(Consumer Substation : C/S)のRMUからはVCBが負荷側に接続され、2台のLBSは隣接するC/Sとつながり、一次変電所(Zone Substation : Z/S)のVCBを介してループ状の系統を成している。このような方式をOpen-Ring方式と呼び、系統のLBSのうち、1か所は常時開放されているため、事故発生時は事故点を挟んで常時開放のLBSからZ/SのVCBまでの間が停電する。その後は事故点両側のLBSを開放し、それ以外の系統を復旧させるが、その間数分間にわたり停電が継続する。

それに対し、図1(b)のようにLBSを全て事故電流遮断が可能なVCBに置き換えるとループ系統を常時閉じておくことが可能である。事故発生時は、事故点両側のVCBが即座に開放されるため、停電時間をほぼゼロ(瞬停のみ)にすることができる。これをClosed-Ring方式と呼ぶ。

図2にClosed-Ring方式でのC/SのC-GIS配列構成を示す。ループ系統に接続する受電盤2面と負荷側に接続するフィーダ盤1面が最小構成であり、負荷側の構成によってはフィーダ盤を増設可能である。

### 2.2 HS-X形C-GISの構造・仕様

HS-X形C-GISの構造を図3に、仕様を表1に示す。絶縁媒体としてSF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)ガスを封入したタンク内にはVCBと、その母線側に断路器/接地開閉器(DS/ES)が配置されている。それぞれ機器正面側には操作機構を備え、これらは全て1枚のフランジに取り付けられてユニット化されている。

タンク底面にはケーブル接続部となるブッシングが鉛直下方向に取り付けられており、変流器(CT)はこれらブッシングが貫通するようにタンク底面のケーブル室側(気中)に配置されている。一方、タンク天井には別のブッシング

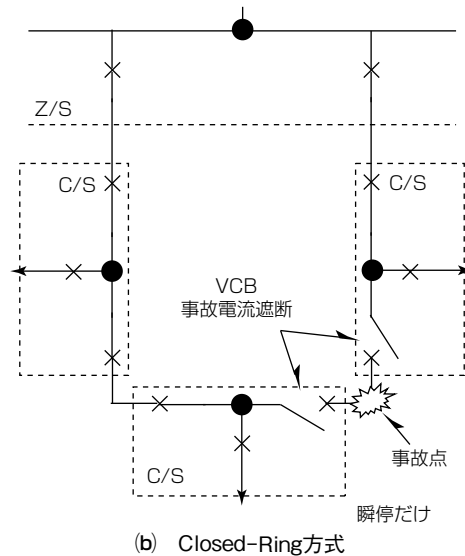
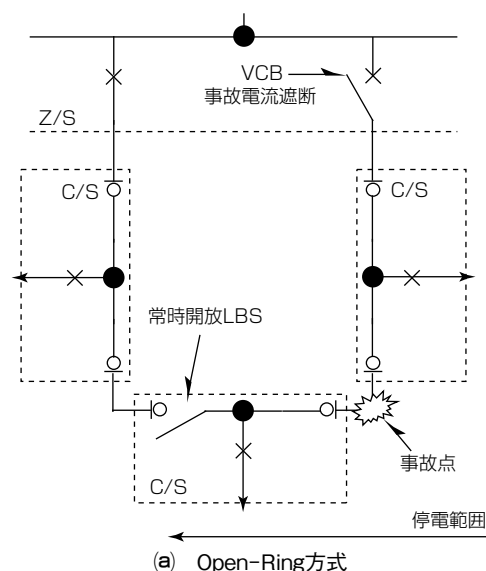


図1. ループ受電系統

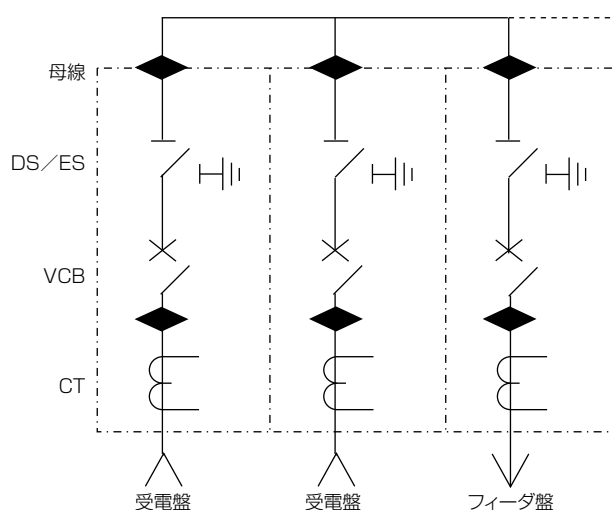


図2. Closed-Ring方式でのC/SのC-GIS配列構成

を介して、固体絶縁アダプタを用いたプラグイン構造の母線を接続する。

タンク、及びケーブル室の背面には、それぞれ放圧板が

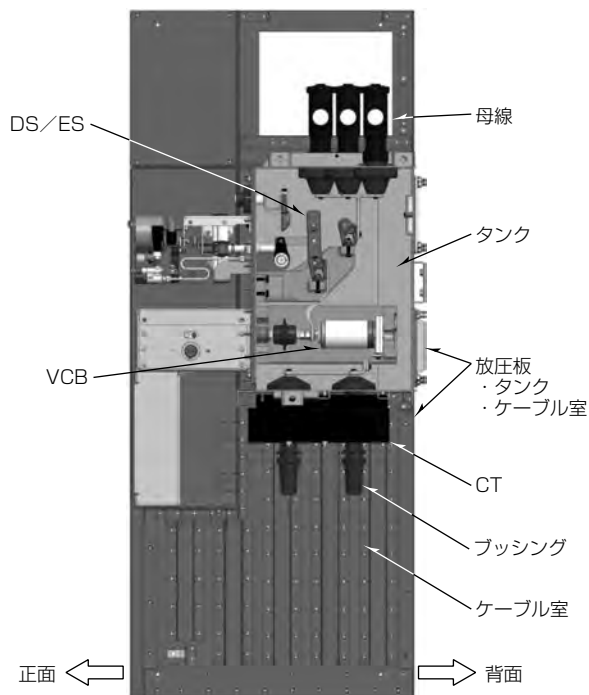


図3. HS-X形C-GISの構造

表1. HS-X形C-GISの仕様

機器	項目	仕様
C-GIS	準拠規格	IEC 62271-200
	定格電圧	12kV
	定格電流	630A
	定格周波数	50Hz
	短時間耐電流	21kA, 3s
	内部アーク	AFL 21kA, 1s
	封入ガス	SF <sub>6</sub> ガス
	ガス圧力	定格：0.03MPa-G 警報：0.02MPa-G
遮断器(CB)	準拠規格	IEC 62271-100
	種類	真空遮断器(VCB)
	定格遮断電流	21kA
	操作機構	電動ばね操作
	クラス	S1, M2, E2, C2
断路器/接地開閉器(DS/ES)	準拠規格	IEC 62271-102
	操作機構	手動操作
	クラス	M1, E0

取り付けられており、内部アーク事故が発生した場合は内圧の上昇に伴って放圧板が開放される。C-GIS背面側のスペースを通じて上方に高温ガスを排出するため、IEC規格での内部アーククラスはAFL(F：正面，L：側面)としている。

### 3. HS-X形C-GISの採用技術

今回開発したHS-X形C-GISでは、①機器の小型化・機器配置の最適化、②内部アーク事故時の高温ガス放圧、③圧縮端子(既設)/プラグインコネクタ(新設)両対応ケーブルブッシング、④固体絶縁アダプタを用いたプラグイン母線、⑤気密タンクのロボット溶接等の技術を採用している。

#### 3.1 機器の小型化・機器配置の最適化

HS-X形C-GISのVCB・DS/ESユニット構造を図4に示

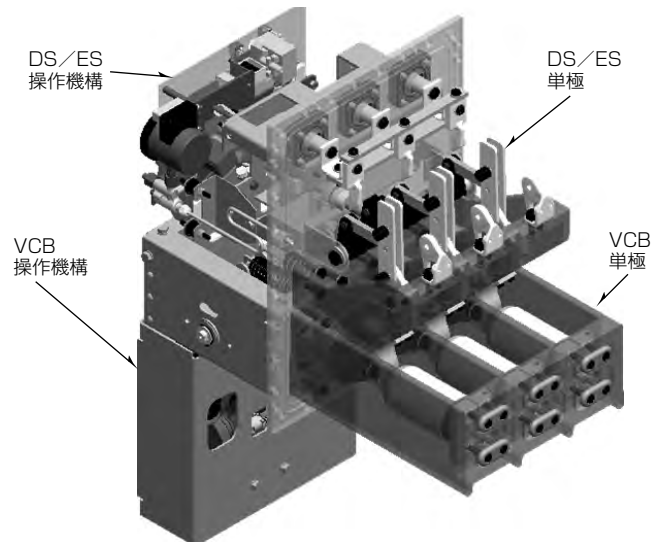


図4. VCB・DS/ESユニット構造

す。既存の24kV HS-X形C-GISのユニット構成をベースに12kV定格とすることで主回路部を刷新した。VCB・DS/ES単極を支持する絶縁物を三相一括化するなどして幅方向の寸法は約25%縮小した。また、デッドスペースとなっていた正面下側にVCB操作機構を配置するなどして、奥行き方向の寸法についても約13%の縮小化を実現した。その他、ブッシングやCTなどの配置についても最適化を行い、盤外形では幅450×奥行き820×高さ2,000(mm)を達成した。

#### 3.2 内部アーク放圧構造

HS-X形C-GISでは既設RMUの更新需要が主たるターゲットであるため、市街地地下などの狭隘な電気室への据付けが要求され、特に奥行き寸法の制約が大きい。ただし、それらは壁を背にした配置であることから、作業者がC-GISの背面“R”に回り込まないことを前提に、内部アーク事故時の高温ガス放出に対する安全性の確保を正面“F”，側面“L”に限定して内部アーククラスを“AFL”とした。なお，“A”は許可を受けた者のみがC-GISに接近できることを示す。

図5にこのC-GISと既存の24kV HS-X形C-GISとの放圧経路及び電気室概形の比較図を示す。24kV HS-Xはタンク天井に放圧板があるため、盤奥行きだけで1,150mm、さらに背面の安全性確保も必要な“AFLR”であることから、背面側スペースを含む奥行きは1,950mmとなる。一方、このHS-X形C-GISでは“AFL”に限定することで放圧板を背面側に設けることができ、前節のユニット小型化も相まって盤奥行きは820mm、背面側に放圧された高温ガスは盤と背面壁との隙間100mmのスペースを伝って上方へと排出されることから、背面側スペースを含めても奥行きは920mmとなる。また、盤天井側正面に高温ガスの排出方向を制限する障壁を設けることで、電気室の高さも3,400mmから2,600mmへと縮小できた。

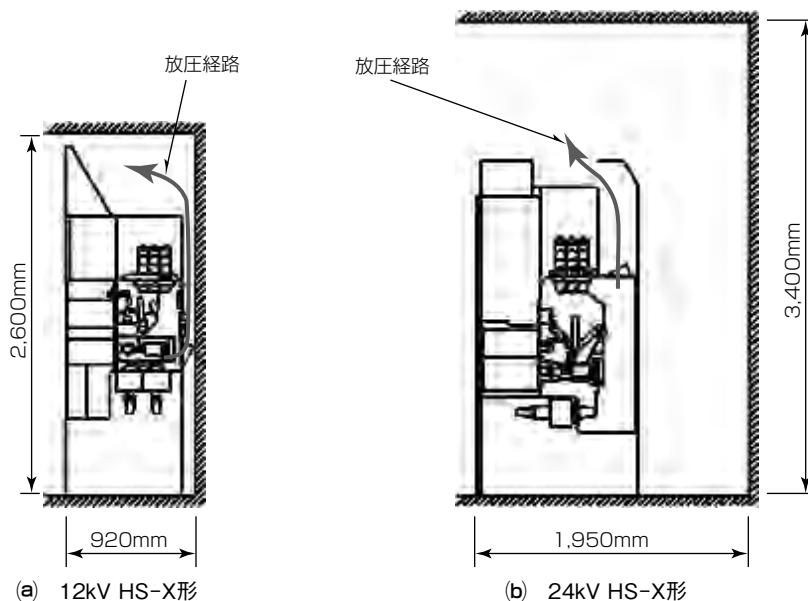


図5. 内部アーク放圧経路及び電気室概形

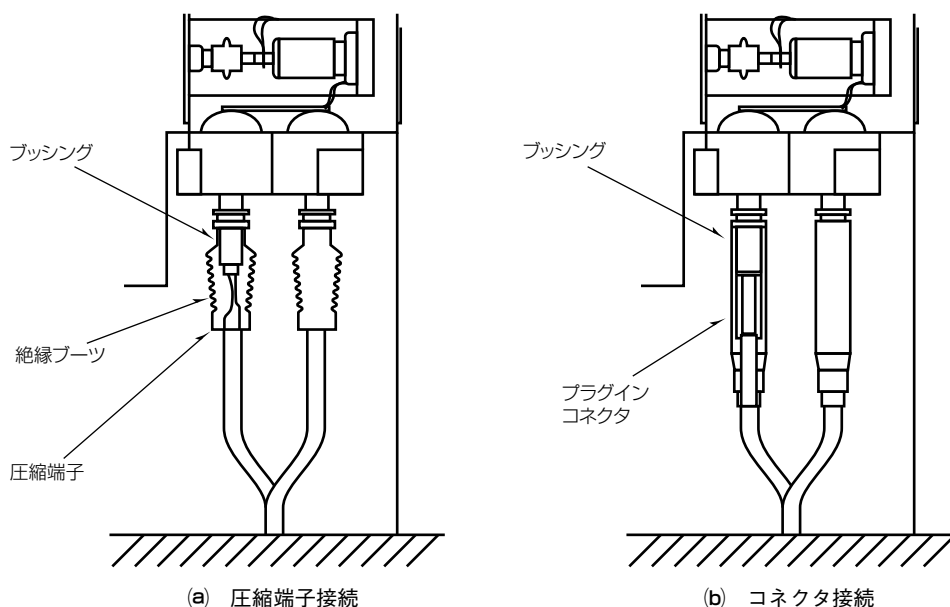


図6. ケーブル接続構造

### 3.3 ケーブルブッシング

HS-X形C-GISでは、一般的なDIN(Deutsche Industrie Normen)規格のコネクタを備えたケーブルを新規敷設することなく、既設ケーブルを圧縮端子で気中接続できるように、鉛直下方向に向けた特殊なケーブルブッシングを開発した(図6(a))。これによって既設RMUを更新する際の停電時間短縮が期待できる。

また、このブッシングは先端の樹脂形状がDIN規格(タイプC)になっていることから、端子を外せば新設ケーブルに対しても図6(b)のようにストレートタイプのプラグインコネクタを用いて接続できる。

### 3.4 固体絶縁プラグイン母線

HS-X形のC-GISでは、既存の24kV HS-X形C-GIS

でも使用実績を持つ固体絶縁アダプタを用いたプラグイン母線を採用することで、据付け・列盤の際の現地ガス処理作業レスを実現した。これによって、現地据付け時間の短縮やSF<sub>6</sub>ガス使用量の削減が期待できる。

### 3.5 ロボット溶接

今回、タンクの気密溶接にロボット溶接機(図7)を新たに導入した。タンク内側の溶接での動作制約や、新規設計、設計変更のたびにティーチングの実施が必要など、設計や試作の段階で配慮すべき点はあるが、量産時の溶接時間(段取り除く)は手作業の1/2~1/3程度に短縮可能で、溶接状態も良好である。

またこのC-GISでは、金属ベローズなどを使用した機構部ガスシール構造の信頼性向上や、前節の固体絶縁プラ



図7. ロボット溶接機

グイン母線を採用することによる現地ガス処理作業レスを実現できたことで、年率0.1質量%以下のガスリークレートを達成した。これによって、欧州(EU)でのFガス規制改正(No.517/2014)に対し、機器運用中の定期的なガスリーク検査が除外される条件を満足することができた。

#### 4. む す び

今回開発した12kV HS-X形C-GISの仕様・構造及び技術を述べた。今回は既設RMUの更新需要に焦点を当て、



図8. HS-X形C-GISの3面列盤構成

狭隘な据付けスペースに対応した内部アーククラスAFLでの開発を完了した。2017年度下期から客先への提供を開始する予定である。図8にこのC-GISの3面列盤構成を示す。

今後は、新設需要も視野に入れ、内部アーククラスAFLRへの対応や、定格電流等の格上げを検討し、更なる市場獲得を目指すとともに、海外調達の拡大や海外生産化についても尽力していく。



# 海外市場向け7.2／12kVスイッチギヤ“MS-E”

木村 透\*

7.2/12kV Switchgear "MS-E" for Overseas Market

Toru Kimura

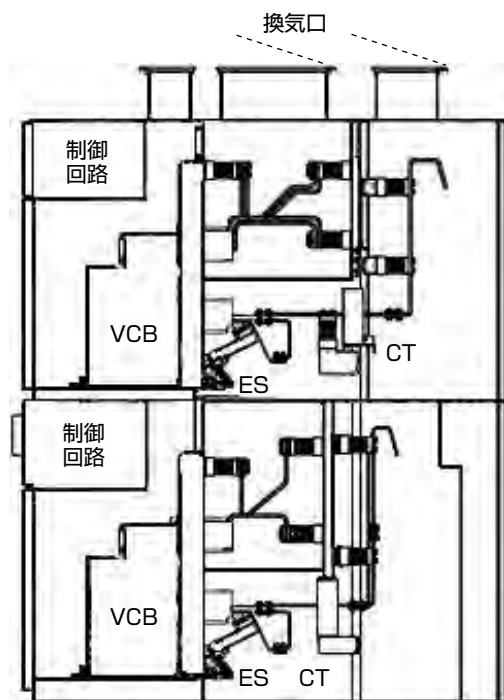
## 要 旨

受配電システムを構成するスイッチギヤは高電圧で受電した電力をモータ等の負荷に供給し、かつ事故から系統を保護する機能がある。受配電システムを取り巻く市場はグローバル化が進展しており、産業の発展が著しい新興国を中心に電力、社会インフラ需要が増加している。これに対して三菱電機は国際規格(IEC62271)に準拠したスイッチギヤを製品化し、市場投入している。海外市場では大規模な設備投資がある一方で、エンジニアリング会社からは、スイッチギヤを含む電気室設備全体の建設コストを抑制する目的で、配列サイズ縮小化の要求がある。この要求に対して、スイッチギヤ全体の構造を見直し、配列サイズの縮小化を実現した海外市場向け7.2／12kVスイッチギヤ

“MS-E”を開発した。

この製品の主な特長は次のとおりである。

- (1) 真空遮断器(VCB)を2段積構成とすることで、モデル配列(従来製品9面構成)で、保守スペースを含む実効スペースを約30%削減
- (2) 機器や部品の収納効率を改善することで、従来製品のモデル配列で製品質量を約27%削減
- (3) 2段積構成で、従来製品と同一のIEC(International Electrotechnical Commission)規格で要求される通電性能(放熱構造)と内部アーク性能(アークプルーフ構造)を確保



VCB 2段積MS-Eの基本断面図



VCB 2段積MS-Eの列盤

VCB : Vacuum Circuit Breaker, ES : Earthing Switch, CT : Current Transformer

## 通電性能と内部アーク性能を両立させてVCB 2段積化を実現した7.2／12kVスイッチギヤ“MS-E”

VCBを2段積化することで、保守スペース含む実効スペースを従来比で約30%削減できるスイッチギヤMS-Eを開発した。各区画間の放圧を可能にして天井部の換気口には放圧装置を設置し、通気スペースの確保、導体抵抗の低減、輻射(ふくしゃ)率の向上によって通電性能と内部アーク性能を両立させた。また、機器等の収納効率を改善することで2回路を1面に収納した。

## 1. ま え が き

受配電システムを取り巻く市場は、グローバル化とともに電力、社会インフラ需要が増加傾向にある。海外市場では大規模な設備投資がある一方で、エンジニアリング会社からは、スイッチギヤを含む電気室設備全体の建設コストを抑制する目的で、配列サイズ縮小化の要求がある。この市場要求への対応として、VCBの2段積化によって配列サイズ縮小を実現した海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤMS-Eを開発した。本稿ではMS-E及びその採用技術について述べる。

## 2. MS-Eの概要

### 2.1 VCB 2段積MS-Eの配列構成

今回開発したMS-Eは、市場要求である配列サイズ縮小化に対応するため、VCBを2段積化することで電気室占有面積の削減を狙った。電気室占有面積を削減することで、電気室全体の建設コストを削減でき、また、輸送面数の削減、据付け作業時間の削減も期待できる。図1にMS-Eのフィーダ盤の断面図及び単線図、図2に従来製品とMS-Eのモデル配列の比較を示す。

### 2.2 VCB 2段積MS-Eの構造

MS-Eでは図1に示した断面構成を実現するため、上段と下段にそれぞれ従来製品の1回路分を収納した。主母線は上下分割構造とし、接地開閉器(ES)とVCBの配置関係は、上下段で同じになり、ESの操作位置を低化させている。また、ヒューズ付き真空電磁接触器を搭載した場合に一次側と二次側の極性が上下段で変化しない構造と

した。制御室は操作性を向上させる目的で、下段に保護リレー等の通常時に操作する制御機器を集約し、上段には通常時には操作しない機器を収納した。電力ケーブルを接続する導体位置は、汎用ケーブルを適用する場合に十分な端末処理高さを確保した。下段のケーブル室には金属フレームの仕切り板を配置し、上段側に接続される電力ケーブルとの区画分けを行っている。これによって、上段が運転中の状況でも下段のメンテナンスが可能になり、運転継続性(LSC2B-PM)を満足することができた。

設置場所は屋内であるため、保護等級は工具等の先端からの保護を考慮した。筐体(きょうたい)は7.2/12kV兼用とし、定格電圧や定格電流による製品外形の変化を抑制して標準化している。この製品の仕様を表1に示す。

図3に従来製品とMS-Eの断面比較を示す。従来製品の標準外形は800(W)×1,500(D)×2,600(H)(mm)である。これに対してMS-Eの標準外形は800(W)×2,200(D)×2,600(H)(mm)であり、単体としては大型化している。しかし、フィーダ盤はVCBを2段積化し、受電盤はVCBとVTの2段積構成とすることで配列サイズの縮小化を実現している。これによって、モデル配列で、保守スペースを含む実効スペースを約30%削減した(図2)。標準断面は図3に示すとおりである。避雷器やサージサプレッサの要求がある場合や標準外ケーブルの取付け要求がある場合は、従来製品と同様に奥行きを延長して対応可能である。VCBの2段積化と機器や部品の収納効率の改善によって、モデル配列で、製品質量を約27%削減した。製品高さは2,600mmとすることで従来製品と同様にトラック搬送が可能である。

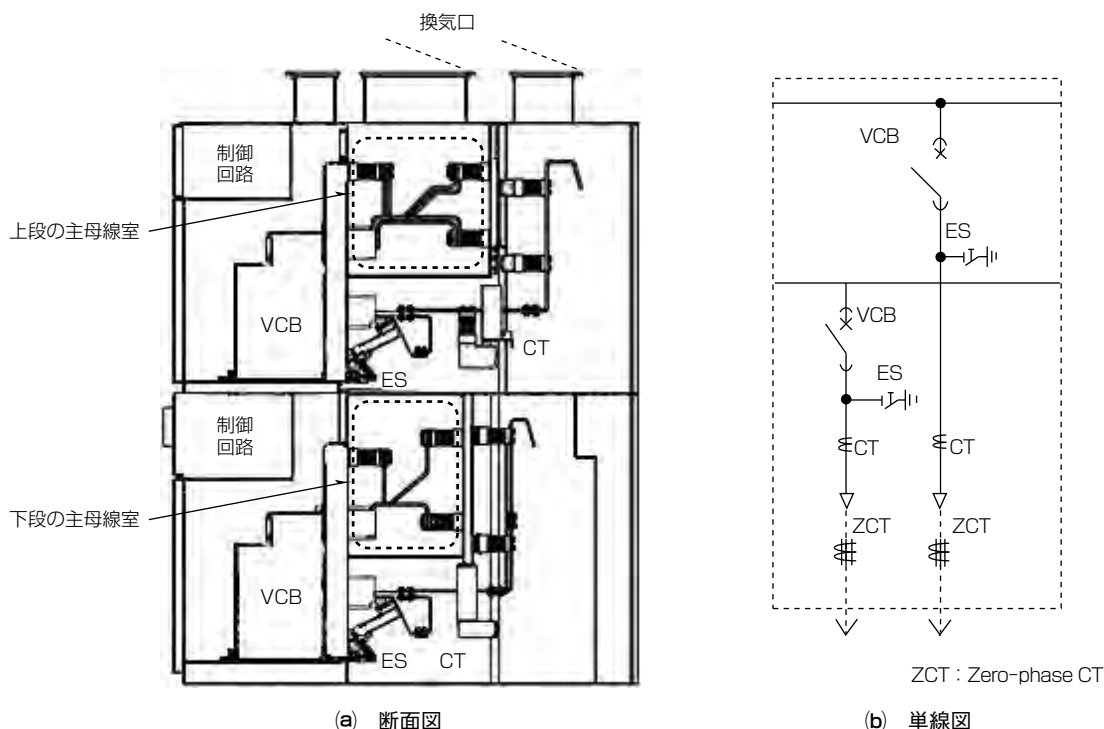
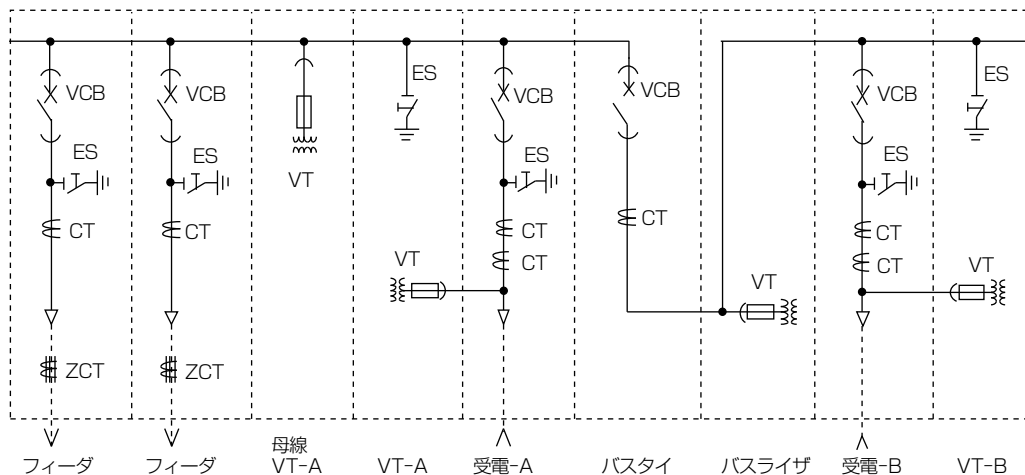


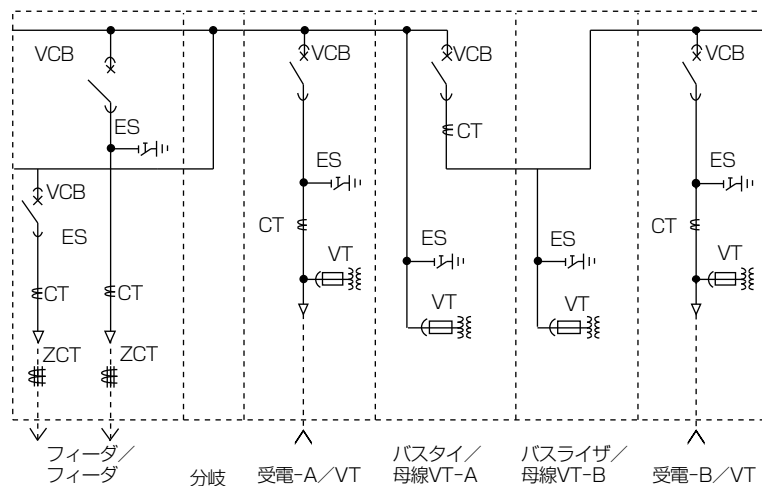
図1. MS-Eのフィーダ盤の断面図及び単線図



(a) 従来製品



実効スペース  
約30%削減



(b) MS-E

VT : Voltage Transformer

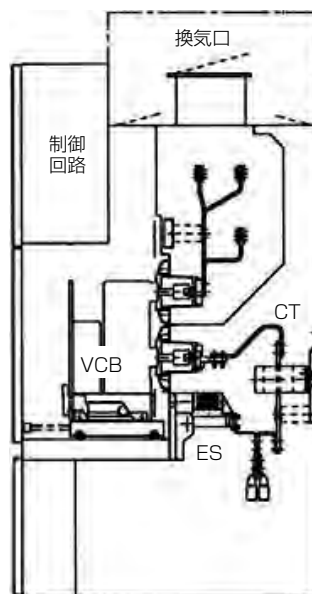
図2. モデル配列の比較

表1. MS-Eの仕様

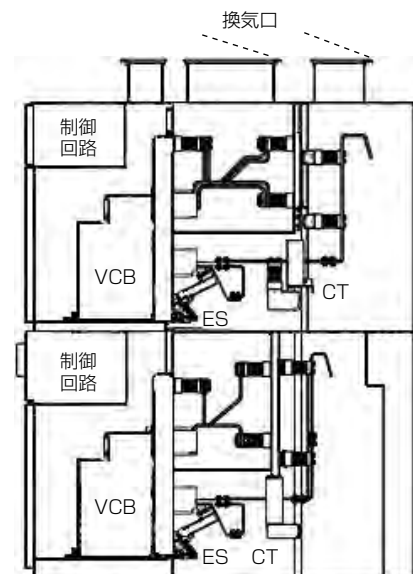
準拠規格		IEC62271-200
定格電圧		7.2／12kV
定格遮断電流		25, 31.5, 40kA
定格短時間耐電流		25, 31.5, 40kA-3s
定格電流	母線	3,150A
	分岐	1,250A
定格耐電圧	商用周波	20／28kV (1 min)
	雷インパルス	60／75kV
制御電圧		DC：100V／110V
定格周波数		50／60Hz
IAC級 (内部アーク)		AFLR 40kA-1s
据付け方式		LSC2B-PM
保護等級		外被：IP3X, 内部：IP2X
設置場所	屋内外	屋内
	標高	1,000m以下
	相対湿度	5～95% (結露なし)
	周囲温度	－5～40℃ (平均温度35℃)
	天井高さ	4.4m以上
アクセス方式		FR

IAC : Internal Arc Classified

FR : フロントオペレーション/リアメンテナンス



(a) 従来製品



(b) MS-E

図3. 断面の比較

### 3. MS-Eの採用技術

MS-Eは通電によって発生した熱を盤外に放出する通電性能(放熱構造)と、盤内の短絡事故等によって発生する高温高圧ガス(以下“ホットガス”という。)に耐える内部アーキ性能(アーキプルーフ構造)の両立が必要である。

#### 3.1 通電性能(放熱構造)

MS-Eは主母線を上下分割構造としている。そのため、定格電流3,150Aを通電する場合、フィーダ盤の上下主母線にはそれぞれ1,575A、主母線以降の導体からVCBを通過してケーブルまでは最大1,250Aを通電し、IEC規格で定められた温度上昇値を満足する必要がある。

VCB 2段積の構造で、上段は下段からの発熱の影響を受けるため、上段の母線導体の断面積を増加して主回路の発熱量を低減している。各区分間の仕切り板にはスリットを設けており、上段のVCB室、母線室、ケーブル室には防塵(ほうじん)フィルタとスリットを備えた換気口を配置している。これによって、自然対流による換気を促進している。主回路導体には樹脂コーティングを施しており、放射率を向上させた。設計時に通電性能の目処(めど)をつけるため、熱流体解析によって温度上昇値を算出した。解析結果の例を図4に示す。

#### 3.2 内部アーキ性能(アーキプルーフ構造)

IEC(62271-200)では、盤内で短絡事故が発生した際の周囲の人への安全性を考慮した内部アーキ性能が要求される。MS-Eは、7.2/12kV定格の屋内スイッチギヤで最高クラスのAFLR 40kA-1sに対応している。頭文字はスイッチギヤへの接近性を制限するタイプを示しており、タ

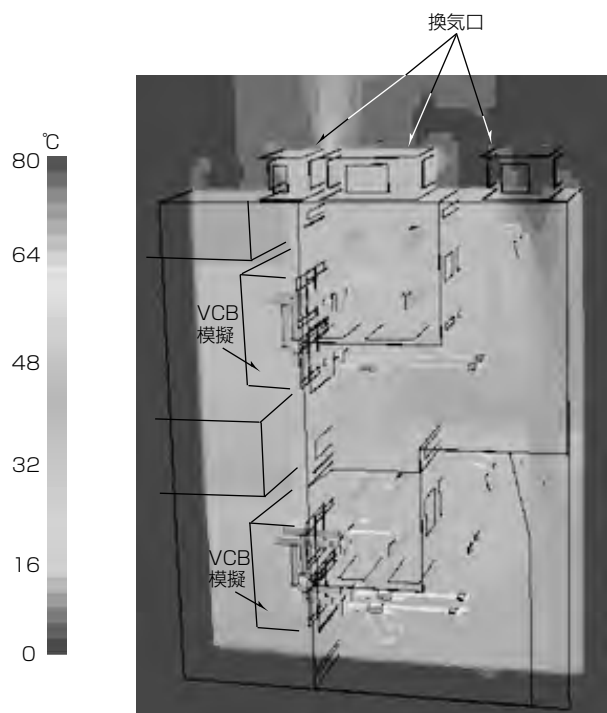


図4. 熱流体解析結果例

イプAは許可された人員だけに制限する。FLRはそれぞれ正面(F)、側面(L)、背面(R)に対して高さ2mまでの安全性が要求される。

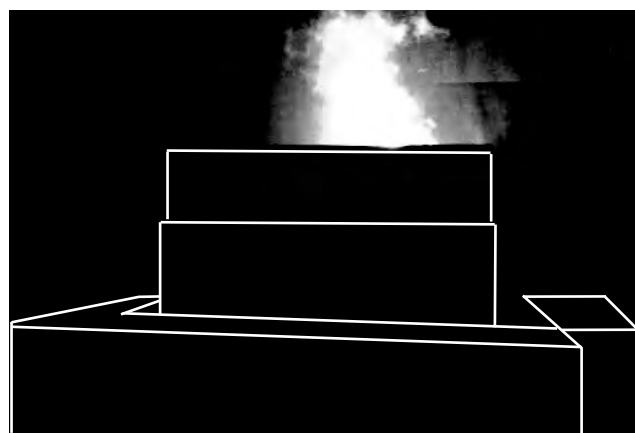
内部アーキ性能を確認するための形式試験は、スイッチギヤが設置される電気室を模擬した壁や天井を設け、また、



(a) 試験形態



(b) 試験前



(c) 試験中

図5. 内部アーキ試験風景

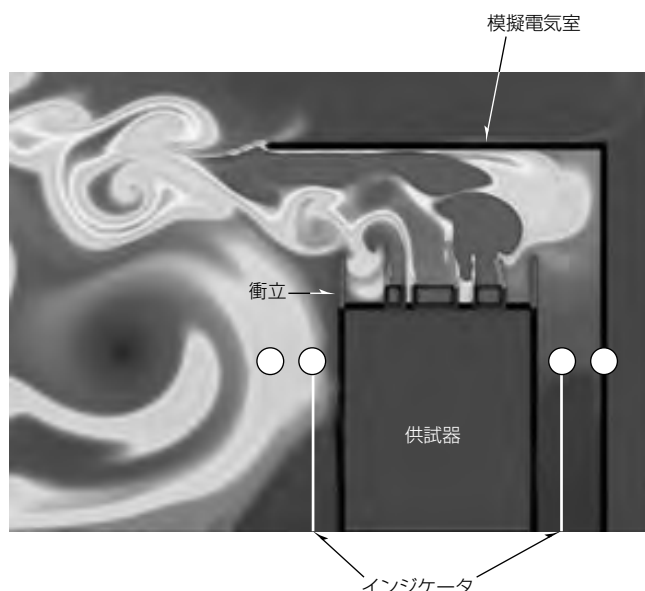


図6. 熱風流体解析の結果例

ホットガスの熱的影響を確認するためのインジケータ(黒い綿布)をスイッチギヤ周囲に配置した状態で行う。試験合格の条件は、規定条件で内部短絡を発生させて扉等の開放がないこと、60gを超える飛散物がスイッチギヤから出ないこと、2m以下の接近可能な範囲にバーンスルーによる穴がスイッチギヤに開かないこと、インジケータがホッ

トガスによって焼損しないこと、筐体の接地が維持されることである。設計時に合格の目処をつけるため、解析によって内部短絡発生時の圧力を算出し、筐体の強度検討を実施した。強度検討には品質工学のパラメータ設計を導入し、あらかじめ製造条件・使用条件・使用環境のばらつき要素を解析に取り入れて効率的に評価した。

さらに、スイッチギヤ天井部から放出されたホットガスによってインジケータ部が焼損しないことを確認するため、熱風流体解析を行い、インジケータ部周辺の温度を確認した。図5に試験風景、図6に熱風流体解析の結果例をそれぞれ示す。

品質工学のパラメータ設計を導入した圧力設計、及び熱風流体解析を反映した供試器を製作し、第三者認証機関で形式試験を実施した。試験は上段/下段のVCB室、母線室、ケーブル室の計6区画に対して実施し、全てに合格した。

#### 4. む す び

海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤMS-Eの仕様・構造及び採用技術について述べた。今回は市場要求の大部分を占める定格電流3,150Aまでを開発完了しており、2018年に市場投入予定である。また、MS-Eは海外市場をターゲットとしており、将来の海外生産化を視野に入れた構造としている。

# 海外市場向け 低圧モータコントロールセンタ“D”

関 孝一郎\*  
宮内俊彦\*  
金丸 誠\*\*

Low Voltage Motor Control Center - "D" for Overseas Market

Koichiro Seki, Toshihiko Miyauchi, Makoto Kanamaru

## 要 旨

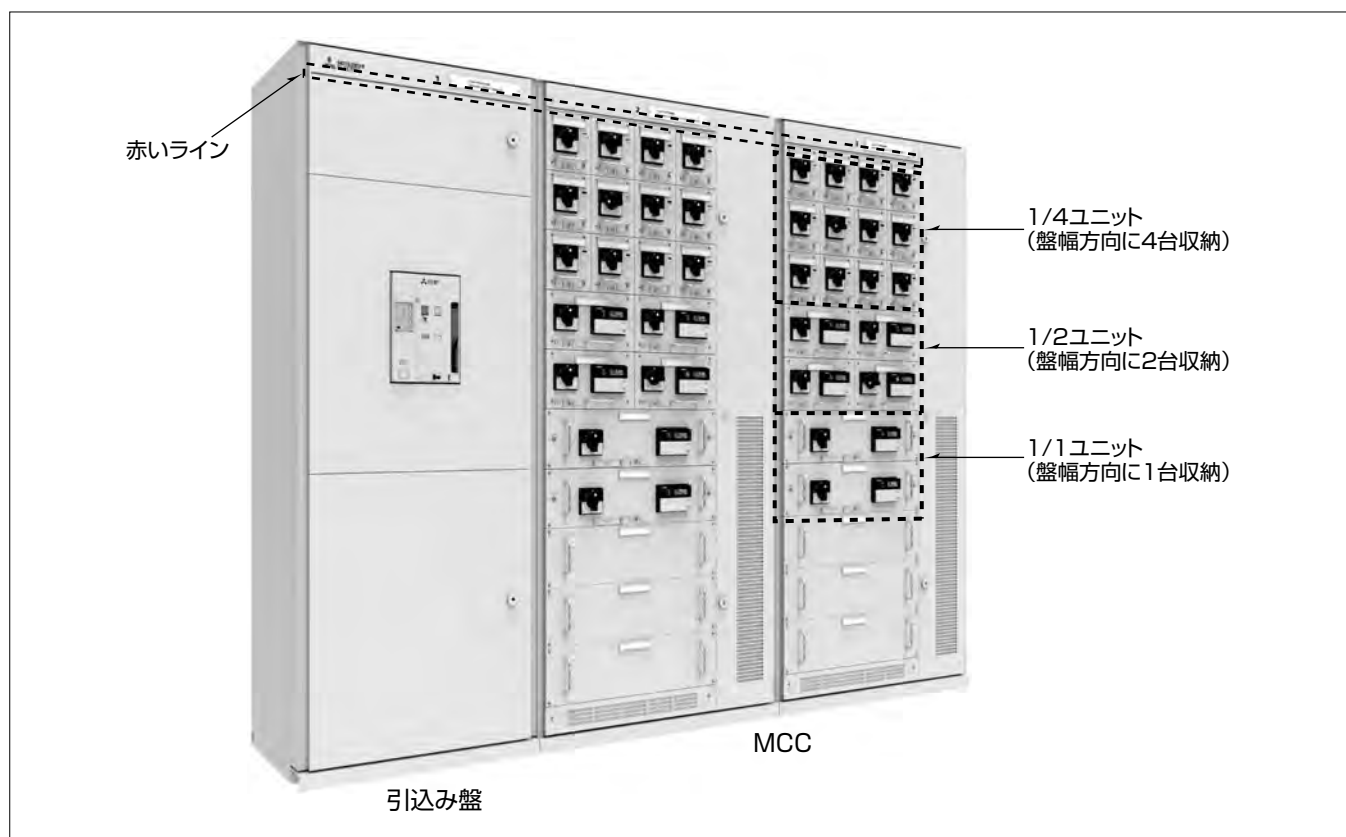
近年の東南アジア・中東・南米などの新興国でのプラント建設では、工期短縮を始め工事費用の削減、品質確保のため、あらかじめモータコントロールセンタ(MCC)などの電気品をコンテナ状のパッケージハウスに設置して、現地に輸送・設置するパッケージハウス型電気室が増加している。

一方、パッケージハウス型電気室に従来機種の両面形MCCを壁面設置する場合、片面が使用できなくなるため、ユニット収納力の向上や操作性・保守性の改善が課題であった。

今回三菱電機では、片面形で高い収納力、高い操作性・保守性を実現し、海外市場向けにIEC(International

Electrotechnical Commission)規格に適合させた低圧モータコントロールセンタ“D”(以下“MCC-D”という。)を開発した。MCC-Dの主な特長は次のとおりである。

- (1) IEC規格(IEC61439-1/2：2011)に適合
- (2) 前面操作・保守対応
- (3) 保守の効率化
- (4) 高いユニット収納力
- (5) 省スペース
- (6) 安全性向上
- (7) ヒューマンエラー低減のためのデザインを採用
- (8) 負荷劣化診断機能付き“EMC-B形”マルチモータコントローラ搭載



## 低圧モータコントロールセンタ“D”

引込み盤とMCCの奥行き寸法や主回路母線の位置を統一することで、従来機種で必要であった盤間接続のための母線変換盤や不要スペースを削減した。コンパクトな1/2・1/4ユニットの採用によって、高いユニットの収納力を実現した。また、盤の正面上部に赤いラインを設けることで、列盤配置時にシステム全体に統一感を与えるとともに、ラインの上に盤番号と盤名称の表示を設けることで、保守作業員が設備を判別しやすくしている。



# 1. ま え が き

MCCは工場や上下水道プラント、発電所などで使用されるモータ群の制御・保護・計測・監視などを一括で集中管理する開閉装置である。東南アジア・中東・南米などの新興国の海外市場では、MCCを含め新規設備投資が活発であり、そうした国々のプラント建設では、工期短縮や工事費用の削減、品質確保のために、MCCなどの電気品をパッケージハウス型電気室に設置して現地に輸送・設置するケースが多い。このような状況に対し、片面形で高い収納力、高い操作性・保守性を実現し、パッケージハウス型電気室への設置に適したMCC-Dを開発して2016年に発売した。

本稿では、MCC-Dの仕様や特長について述べる。

## 2. MCC-Dの概要

MCC-Dの主な仕様を表1に示す<sup>(1)</sup>。

MCC-Dの特長を次に示す。

### 2.1 IEC規格に適合

海外プラント向けで多く要求される低圧開閉装置及び制御装置の国際規格IEC61439-1/2：2011(Low-voltage switchgear and controlgear assemblies)に適合させた。

表1. MCC-Dの仕様

項目		仕様
規格		IEC61439-1/2：2011
盤構造		片面形
盤外形 高さ×幅×奥行き(mm) (チャンネルベース含まず)		2,200×1,000×600
定格絶縁電圧		1,000V(主回路母線) 800V(ユニット)
定格使用電圧		～480V
定格周波数		50／60Hz
水平母線定格電流		～4,000A
定格短時間耐電流		85kA-1s
内部仕切り		～Form 4b
保護等級		IP20～IP43
短絡保護装置との協調 <sup>(注1)</sup>		タイプ1／タイプ2
引出しユニット	主回路接続	自動連結
	制御回路接続	自動連結
	最大容量	最大300kW at 480V
内部アーク <sup>(注2)</sup>		85kA-0.3s at 480V(オプション)

<sup>(注1)</sup> IEC60947-4-1：2009(Contactors and motor-starters-Electromechanical contactors and motor-starters)で規定されている短絡保護装置とスタータの協調(定義を表2に示す)。

<sup>(注2)</sup> 内部アーク事故時の人・設備の保護。IEC/TR61641：2014(Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies-Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault)で定める試験方法によって確認。

表2. 短絡保護装置との協調の定義

短絡保護装置との協調	定義
タイプ1	機器は短絡時に人又は設備に危害を与える要因になってはならない。ただし、部品の修理又は交換をしないで引き続き用いることができなくてもよい。
タイプ2	機器は短絡時に人又は設備に危害を与える要因になってはならない。かつ、引き続き用いることができないなければならない。

### 2.2 前面操作・保守対応

部品の配置や取付け方法の見直しによって、前面からの操作や保守を実現し、MCCの壁面設置を可能にした(図1)。

### 2.3 保守の効率化

ユニットの主回路接続部に従来機種の主回路グリップを採用し、制御回路接続部に新規開発した自動連結制御コネクタを採用することで(図2)、引出しユニットの完全自動連結を実現し、保守の際のユニット脱着を容易にした。自動連結制御コネクタは可動式にすることで、ユニットの試験位置で主回路を未接続状態にしつつ、制御回路は接続された状態を構築しており、安全・容易に試験ができる構造になっている。

### 2.4 高いユニット収納力

MCC-Dでは盤幅方向に4台収納可能な1/4ユニット、

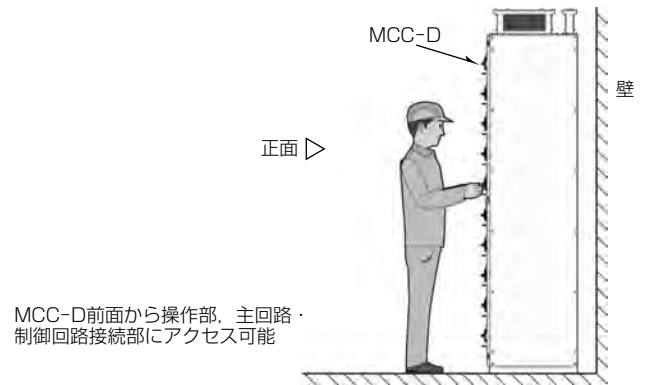


図1. 前面操作・保守

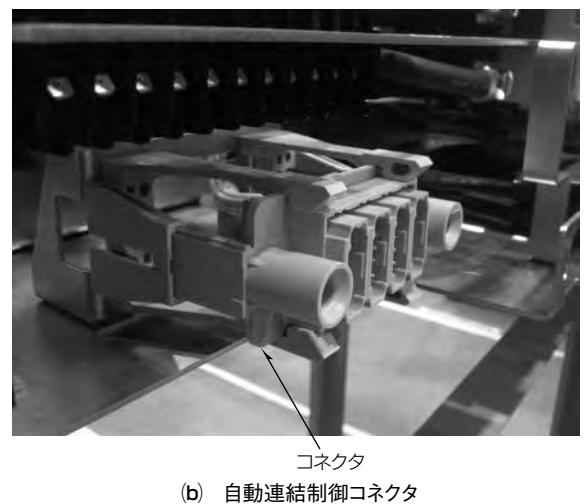


図2. 主回路グリップと自動連結制御コネクタ

及び盤幅方向に2台収納可能な1/2ユニットを新規開発し(図3), 1面当たり最大40ユニット収納を実現した(当社従来機種は1面当たり最大18ユニット収納)。

## 2.5 省スペース

従来機種の引込み盤と両面形MCCをパッケージハウス型電気室に壁面配置した場合、引込み盤の奥行き寸法が大きく母線変換盤が必要であることから、盤の設置スペースが大きくなっていた。また、両面形MCCの片面が使用できなくなるため、ユニット収納力の向上が課題であった。それに対し、MCC-Dでは引込み盤とMCCの奥行き寸法や主回路母線の位置を統一することで、母線変換盤やデッドスペースを削減し、また3.4節で述べた高いユニット収納力の実現によって、パッケージハウス型電気室に省スペースで盤を設置することが可能になった(図4, 図5)。

## 2.6 安全性向上

内部アークの規格IEC/TR61641:2014(Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault)の試験に合格し、近年海外市場で要求が増えている内部アーク仕様(短絡事故時のアークガスから周囲の人・設備を保護)に対応可能となり、安全性が向上した。



図3. 1/4ユニットと1/2ユニット

## 2.7 ヒューマンエラー低減のためのデザインを採用

ヒューマンエラー低減のため、次の3つのデザインを採用した(図6)。

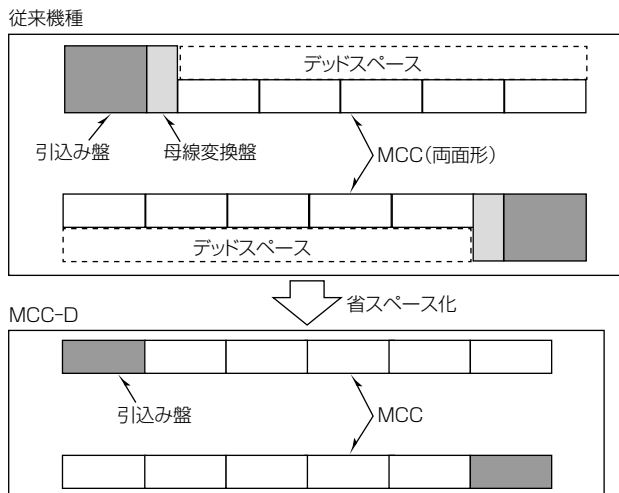


図4. パッケージハウス型電気室のMCC配置(上面図)



図5. パッケージハウス型電気室



(a) MCC-Dの正面上部



(b) MCCB操作ハンドル (c) EMC-B形マルチモータコントローラ

図6. ヒューマンエラー低減のためのデザイン

- (1) 各盤の正面上部に赤いラインを設け、ラインの上に盤番号と盤名称の表示を設けることで、運転・保全時に該当設備を一目で判別可能
- (2) MCCB(Molded Case Circuit Breaker)操作ハンドルには2分割したコントラストの高いデザインを採用し、斜め方向からでも運転状態の確認が容易
- (3) EMC-B形マルチモータコントローラの運転状態を示すLED表示器は本体から突出させ、横方向からでも運転状態の確認が容易

## 2.8 負荷劣化診断機能付きEMC-B形マルチモータコントローラ

連続運転が要求される石油・化学プラントでは、点検周期の延長によって、モータの設備診断技術による異常予兆把握の重要度が増している。また、メンテナンス部門の人員不足、世代交代による技術力低下、素人化及び設備の老朽化傾向が指摘され、安全・効率に対する関心が高まっており、故障診断機能のニーズは高いことから、EMC-B形マルチモータコントローラに負荷劣化診断技術を開発して搭載可能とした。

### 2.8.1 機械系異常検出機能

変流器で取得したモータ負荷電流を周波数解析(FFT(Fast Fourier Transform))解析し、特徴成分を監視することによってモータ稼働中に機械系異常(偏心、ミスアライメント、軸受異常、振動異常等)を検出する機能である。

#### (1) 検出原理

機械系異常が発生すると、固定子と回転子間のエア・ギャップ間の空間磁束線に機械振動が影響を与え、逆起電力によって固定子電流へ反映される(図7)。その結果、モータの機械振動が電流信号に変換され、電流スペクトルの電源周波数近傍の特定周波数信号強度が変化する。そのため、周波数解析して特徴成分を監視することで機械系異常を検出できる。

#### (2) 検出手法

機械系異常検出手法を図8に示す。変流器で取得した負荷電流をFFT解析する。そして、電源周波数(例えば60Hz)を中心に、左右均等に側帯波として発生する特徴を捉え、特徴成分Aと特徴成分Bを抽出する。2つの特徴成分はモータの回転速度に依存し、モータの定格情報から発生周波数帯を理論的に特定できる。その後、抽出した特徴成分Aと特徴成分Bの信号強度の傾向監視を行う。正常状態の信号強度を学習させ、しきい値を決定し、信号強度がしきい値以上となったときに機械系異常と判定する。

### 2.8.2 レジャショート検出機能

変流器と計器用変成器で取得したモータ負荷電流と電源電圧の不平衡成分を監視することによってモータ稼働中にレジャショート(巻線短絡)を検出する機能である。

#### (1) 検出原理

レジャショートが発生するとモータ巻線のインピーダンス

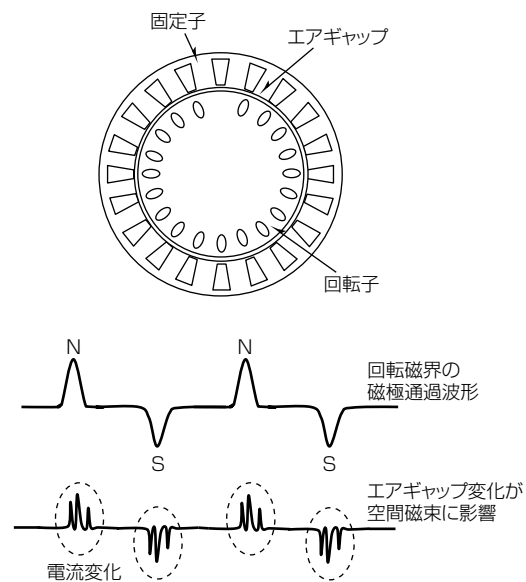


図7. 検出原理

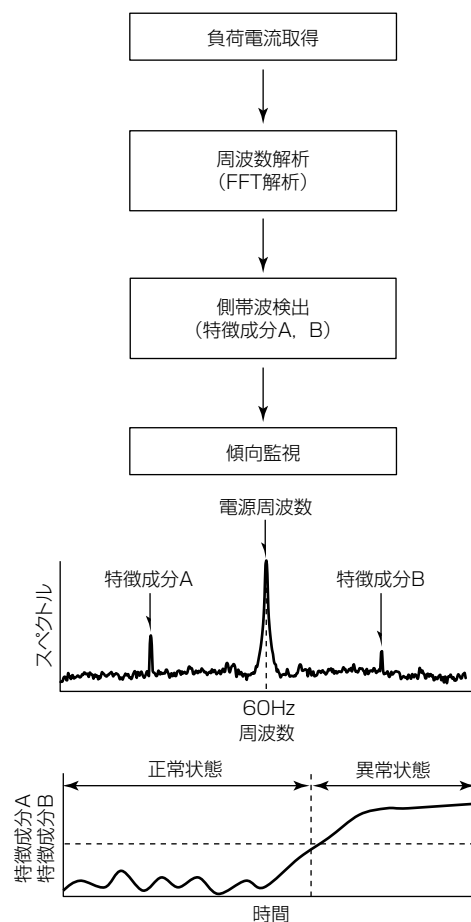


図8. 機械系異常検出手法

が不平衡となる(図9)。そのため、負荷電流と電源電圧の不平衡性を解析することで、レジャショートを検出できる。

#### (2) 検出手法

レジャショート検出手法を図10に示す。変流器でモータ負荷電流情報、計器用変成器で電源電圧情報を取得する。次に、取得した負荷電流と電源電圧を式(1)と式(2)で対称

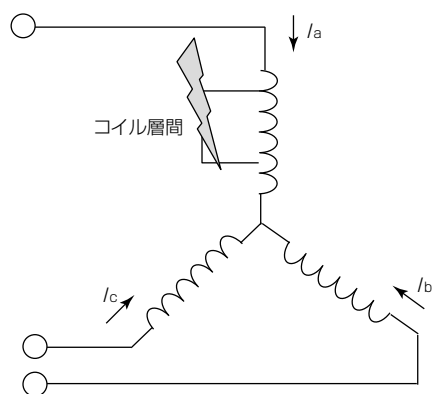


図9. レヤショートの原因

座標変換し、逆相電流 $I_n$ と逆相電圧 $V_n$ を算出する。 $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ は三相負荷電流,  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ は三相電源電圧,  $\alpha$ はベクトルオペレータである。

$$I_n = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_n = \frac{1}{3}(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

電源不平衡時も逆相成分が変化することから、逆相電流 $I_n$ と逆相電圧 $V_n$ の両方を考慮して式(3)のレヤショート評価値 $\Delta I_n$ を定義した。

$$\Delta I_n = |I_n - Y_n V_n| \quad \dots\dots\dots (3)$$

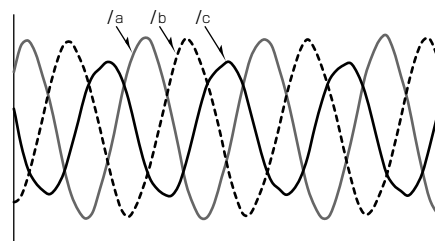
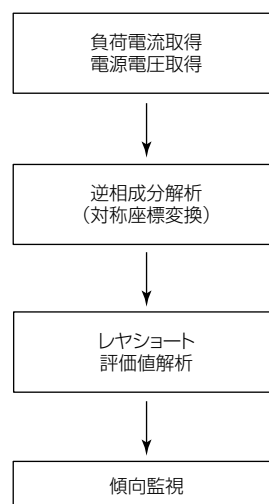
ここで、 $Y_n$ は初期逆相アドミタンスで、測定開始時に算出できる。そして、レヤショート評価値 $\Delta I_n$ の傾向監視を行い、信号強度が増加したときにレヤショートと判定する。

### 2.8.3 負荷トルク推定・監視機能

変流器と計器用変成器で取得したモータ負荷電流と電源電圧を解析することによって、負荷トルクを推定・監視する機能である。

負荷トルク $T_e$ の理論式は、固定子電流と鎖交磁束を用いて式(4)のように表される。 $P$ は極数,  $\phi_d$ ,  $\phi_q$ は固定子のコイル鎖交磁束,  $i_d$ ,  $i_q$ は固定子電流である。

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\phi_d \cdot i_q - \phi_q \cdot i_d) \quad \dots\dots\dots (4)$$



レヤショート時の三相負荷電流波形

レヤショート評価値  
 $\Delta I_n = |I_n - Y_n V_n|$   
 $\Delta I_n \geq \sigma$ : レヤショート  
 $\Delta I_n < \sigma$ : 正常

図10. レヤショート検出手法

## 3. む す び

今回、海外市場向けの低圧モータコントロールセンタ“D”を開発した。今後は国内市場向けに対しても客先要求に応じて開発する。

## 参 考 文 献

- (1) 関 孝一郎, ほか: 新市場向け低圧配電盤, 三菱電機技報, 88, No.11, 705~708 (2014)

# 停電時間を大幅に削減する 保護リレー自動点検システム

平田陽介\*

Automatic Inspection System for Protection Relays to Drastically Reduce Power Failure Time

Yosuke Hirata

## 要 旨

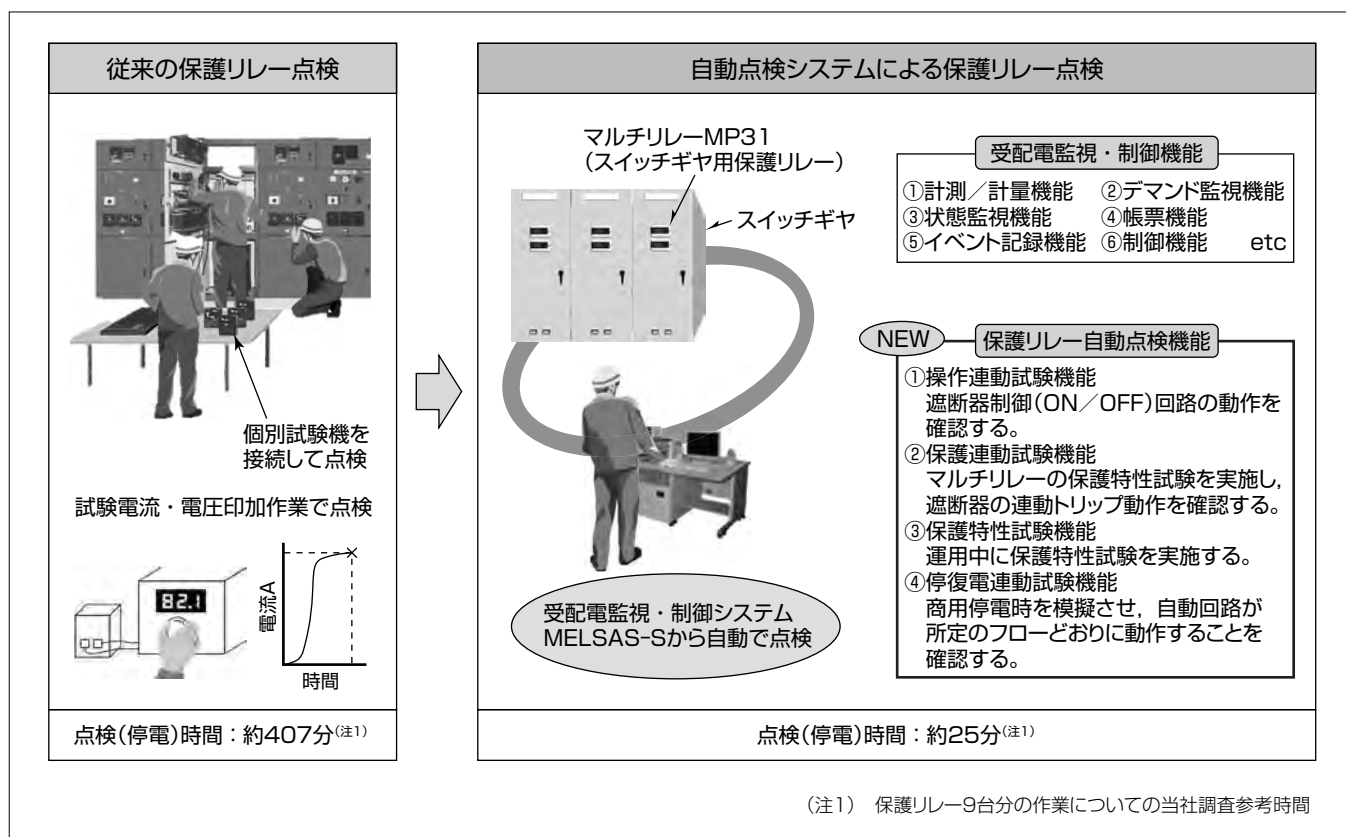
日本では受配電設備などの電気工作物に対して、電気事業法の規程によって保安規定を作成して経済産業省に提出する義務がある<sup>(1)</sup>。これによって各設備に対して点検方法や点検スケジュールを定めている。特に、特高受配電設備や高圧受配電設備に対する点検は知識や経験を要する上に、点検中は停電にするため長時間各負荷への電力供給が停止される。

工場での生産ライン停止時間や、施設の運用停止時間を考慮するとこれら点検(停電)時間の削減は重要課題の1つとして考えることができる。また、近年では人口減少、高齢化が進み、熟練点検作業員不足の問題も挙げられ、今後ますます受配電設備の点検作業についての問題点が顕著化することが予測される。三菱電機の受配電監視・制御シス

テム“MELSAS-S”では、従来の受配電設備の監視・制御機能に加えて次のスイッチギヤ用の保護リレー点検試験を自動で実施することができるシステムを開発した。

- (1) 操作連動試験
- (2) 保護連動試験
- (3) 保護特性試験
- (4) 停復電連動試験

これによって、熟練作業員がいなくても試験を実施することができる。また、保護特性試験については受配電設備の運用中に保護機能を有効にした状態で点検試験を実施できるため、停電点検前に実施しておくことで点検(停電)時間を大幅に削減できる。



## スイッチギヤ用保護リレー点検の自動化

従来の保護リレー点検と今回開発した自動点検システムによる保護リレー点検、及び点検(停電)時間の比較を示す。保護リレー自動点検システムは、受配電監視・制御システムMELSAS-Sから点検指令を受ける。

## 1. ま え が き

電気工作物などの電気設備を安全かつ長期利用するためには点検作業が重要な作業の1つである。特に高圧電気設備の点検作業は危険を伴うため、専門知識を持った熟練作業員が必要であるが、少子高齢化の影響から今後熟練作業員は減る方向にあると言える。また、点検には長時間設備の停電が必要となるため、点検作業中は工場の生産ラインや、ビルの営業が停止する。

そこで当社は受配電設備の点検作業を少人数で簡単かつ効率的に実施できる保護リレー自動点検システムを開発した。

## 2. 自動点検システム

### 2.1 システム構成

保護リレー自動点検システムは当社製の次の製品を組み合わせてことによって実現している。図1にこのシステムの構成を示す。

#### (1) マルチリレー“MP31”

MP31(図2)は、保護機能、制御機能、計測機能を1台で担うスイッチギヤ用の保護リレーである。自己診断機能や、事故時の故障電流、動作時間などの履歴表示も可能である。さらに利用者の操作性、視認性についても従来機種から大幅に改良している。液晶の視野角拡大や斜めから見た場合のランプの視認性向上、使いやすいボタン配置など改良を重ね、2016年にGOOD DESIGN賞を受賞している。

#### (2) 受配電監視・制御システム“MELSAS-S”

MELSAS-Sは、受配電設備での通常運転時の監視制御や、故障時、停電時の自動処理支援、さらには保全省力化などをトータルに行う。また、2013年に画面の操作性・

使いやすさを考慮したユニバーサルデザインを製品に導入しており、老若男女画面を見ただけで操作できるよう使いやすさを向上させた(図3)。

### 2.2 保護リレー点検試験

保護リレー自動点検システムでは、MELSAS-Sのデータ処理ユニット(以下“PC”という。)からMP31に点検開始指令を出して結果を取得することによって、次の4試験を実行して良否判定、結果表示、データ保存を行う。

#### (1) 操作連動試験

遮断器への制御操作機能を持つMP31の制御回路から遮断器を動作させ、遮断器動作時間を計測して遮断器動作の良否を判定する。遮断器制御回路の健全性の確認を行うとともに、計測された遮断器開閉動作時間から遮断器の劣化を発見するなどの保全支援を行う。

#### (2) 保護連動試験

MP31の機能によって、試験用の保護特性試験信号を発生させ、保護回路を動作させる。トリップまでの動作時間



図2. MP31

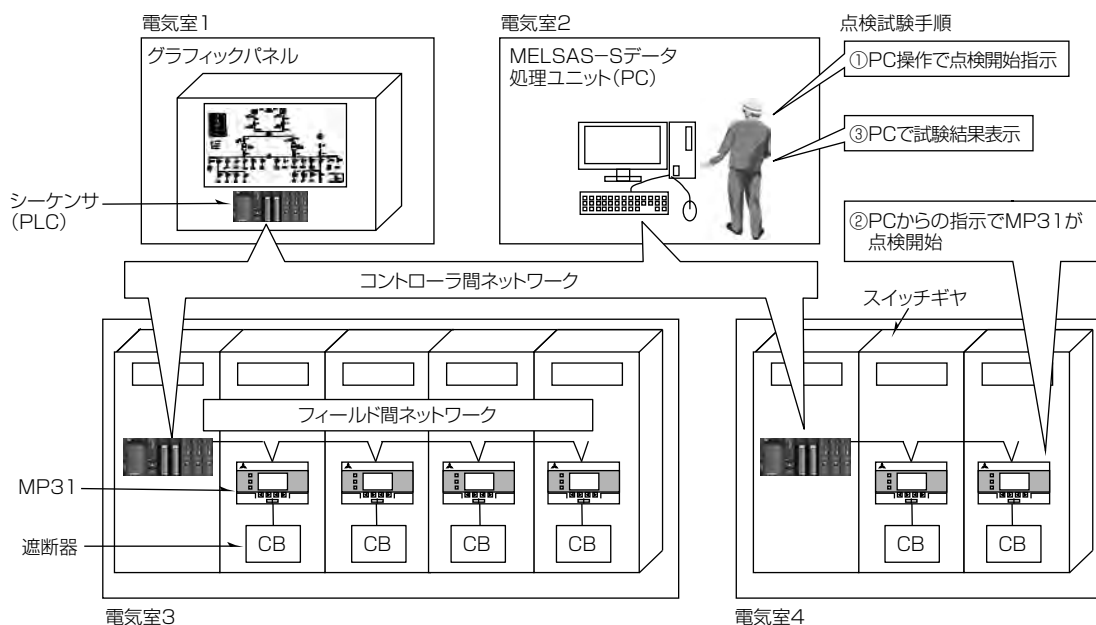
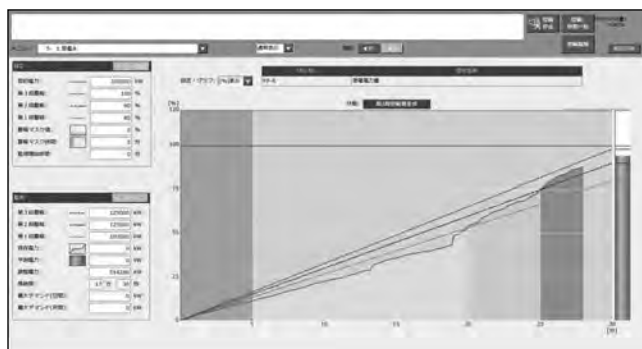


図1. システム構成





(a) デマンド監視画面



(b) アナログメータ画面

図3. MELSAS-S画面サンプル

を計測して保護特性の良否判定を行うとともに、遮断器の連動トリップ動作の確認を行う。これによって周辺補助リレーの動作を含めたシーケンス回路の健全性の確認を行う。

### (3) 保護特性試験

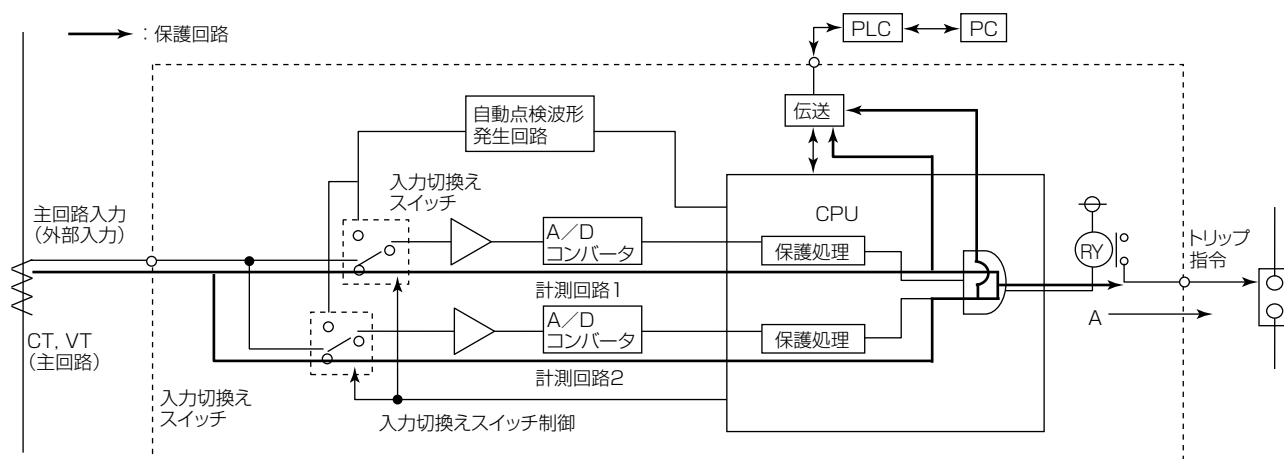
MP31では計測回路(保護検出回路)が二重化されている。これによって、点検時に片系回路で保護状態を保ちながら片系回路にだけ試験用の保護特性試験信号を内部で発生させる。これを交互に回路を切り換えて点検を行う。これによって受配電設備の運用中にMP31の保護検出回路の健全性の確認を行う。

### (4) 停復電連動試験

停電時に自家用発電機を起動して系統を切り換えるような自動回路を組み込んでいる場合、MP31から模擬信号を発生させることによって自動回路を動作させ、登録されたフローどおりの順序・時間で動作するか確認することによって自動回路と動作させる機器の健全性の確認を行う。

## 3. MP31での保護特性試験

MP31は計測回路を二重化している。これによって片系の計測回路が故障しても運用を継続できる。二重化した計



A/D : Analog to Digital, RY : Relay, CT : Current Transformer, VT : Voltage Transformer

図4. MP31通常運用時の回路状態

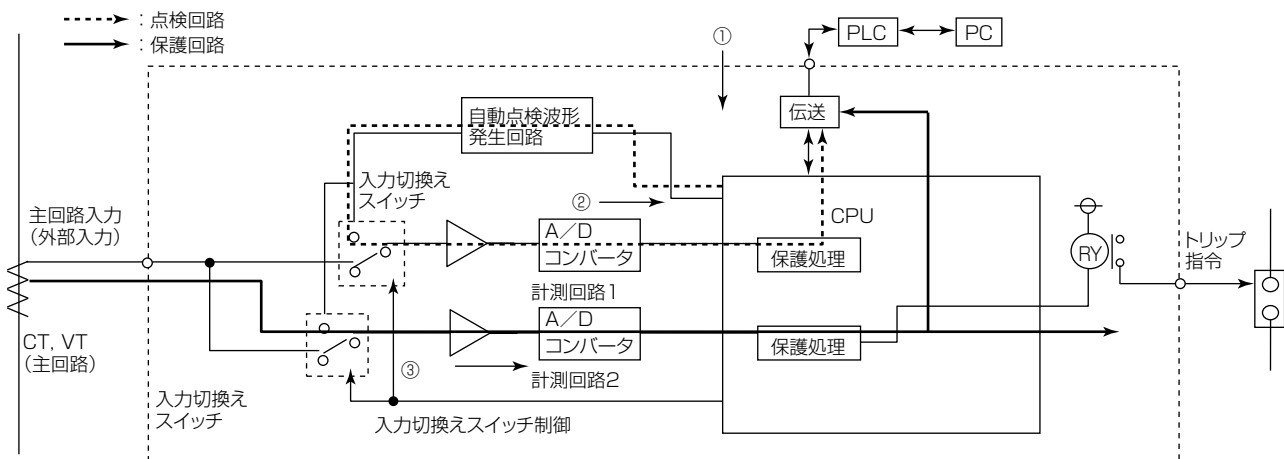


図5. MP31保護特性試験時の回路状態

測回路を利用して保護特性試験を受配電設備の運用中に実施することによって、無停電の保護特性試験を実施できる。

MP31の通常運用時の回路状態を図4に、保護特性試験中の回路状態を図5に示す。MP31では計測回路を二重化しているため、一方の計測回路では外部からの入力、もう一方の計測回路では保護特性試験信号の監視を行うことで、設備運用中に保護特性試験の実施を可能にした。

PCからの保護特性試験開始指令を図5の①のように受信すると、まず図5の②のように計測回路1で保護特性試験を実施する。計測回路1の保護特性試験中は、図5の③のように計測回路2によって外部入力の監視を行う。計測回路1の保護特性試験終了後は、計測回路1と2の動作を切り換え、計測回路1で設備保護のため外部入力監視、計測回路2で保護特性試験を行う。外部入力と自動点検波形発生回路は、入力切換えスイッチによって電氣的に切換えを行う。

保護特性試験中に外部入力監視側回路で設備の事故を検出した場合、点検を中止して遮断器に対してトリップ指令を出すことで設備保護を行う。また、MP31は各計測回路の健全性確認を常に行っており、片系の計測回路に異常が発生した場合、MELSAS-Sに異常を通報して異常となった計測回路を停止し、正常な計測回路だけで運転を継続する。この状態の場合、保護特性試験開始指令を受け付けない。また、試験中にこの状態になった場合は試験を中止する。

#### 4. MELSAS-Sでの自動点検機能追加

MELSAS-SのPCにMP31と連携する点検機能や、点検作業を効率化する機能を追加した。

##### 4.1 点検機能

MELSAS-SのPCからMP31の点検を実施、良否判定、結果の表示、データを保存する機能を追加し(図6)、PCで受配電設備の情報を一元管理できるようになった。

さらに、受配電設備の運用中に実施する保護特性試験についてはスケジュール機能を搭載しており、カレンダーで指定した実施スケジュールに基づいて自動で保護特性試験が実行可能になる(図7)。

保護連動試験と保護特性試験では、各保護要素の故障を試験的に発生させ故障検出回路の健全性を確認している。保護連動試験は故障検知後トリップ信号を出力するが、保護特性試験は故障検知後トリップ信号は出力しないという違いがある。また、MP31が故障を検知してトリップさせるためのトリップ回路は図4のAのとおり、各保護要素で共通した回路を使用している。つまり、任意の1要素で保護連動試験を実施することで、トリップ回路の健全性が確認できるため、受配電設備の運用中に保護特性試験で各保護要素の健全性を確認しておけば、停電後、保護連動試験を行う項目を少なくできるため、停電時間を削減できる。

#### 4.2 点検作業効率化機能

##### 4.2.1 整定値・設定値取得機能

PCはMP31の保護機能の動作条件(以下“整定値”という。)にしたがって試験指示コマンドを送信する。つまりMP31を点検する前に必ず最新の整定値をPCに設定しておく必要がある。そこで、MP31の整定値を変更した際、自動でPCの整定値を更新する機能を追加した。これによって、いつでも最新の整定値で試験できるため、現場のMP31とPCの設定を確認しなくても点検作業に入ることができる。

また、CT比やVT比などMP31の計測・計量に関する設定値についてもPCがデータを取得し、このMP31の計測・計量用のスケールを自動で修正する機能を追加した。これによって複雑な設定がなくなり、変更内容に合わせてPCの設定が正しく行われる。

##### 4.2.2 整定値・状態比較機能

通常、年次点検時にMP31の整定値と遮断器状態を変更するため、点検前にMP31の整定値と遮断器状態をメモしておき、点検終了後に点検前の状態に戻ったことを確認する作業を行っていた。

そこで、点検作業の支援機能として整定値・状態比較機能を搭載した(図8)。点検前と点検後の整定値や状態信号

日時	装置ID	場所	相	項目	結果	単位	備考
2017/06/03 10:13:42	L2F1	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.450	0.550	0.500
2017/06/03 10:13:42	L2F1	B	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.450	0.550	0.500
2017/06/03 10:13:42	L2F2	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.450	0.550	0.500
2017/06/03 10:13:42	L2F2	B	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.450	0.550	0.500
2017/06/03 10:13:42	L2F3	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	1.800	2.200	2.000
2017/06/03 10:13:42	L2F3	B	67(電機方向)	A0130% V0150%	1.800	2.200	2.000
2017/06/03 10:13:42	L2F4	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.270	0.330	0.300
2017/06/03 10:13:42	L2F4	B	67(電機方向)	A0130% V0150%	0.270	0.330	0.300
2017/06/03 10:13:42	L2F6	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	1.800	2.200	2.000
2017/06/03 10:13:42	L2F6	B	67(電機方向)	A0130% V0150%	1.800	2.200	2.000
2017/06/04 02:28:55	L2F6	A	67(電機方向)	A0130% V0150%	1.800	2.200	2.000

図6. 点検結果の表示例

日	時	分	秒	装置ID
2	3	4	5	6
7	8	9	10	11
12	13	14	15	16
17	18	19	20	21
22	23	24	25	26
27	28	29	30	31

図7. スケジュール設定例

		点検前	点検後
デバイスNo.	保護要素名	設定値	点検値
S1	動作電流	210	250
	動作時間	INST	0.5
	CB投入ロック選択	LOCK	UNLOCK
	動作電圧	OFF	100
	特性カーブ	-	2

図8. 整定値・状態比較結果の表示例

表 1. 点検時間の比較

点検作業項目	従来の点検	自動点検システムによる点検	
試験準備・後片付け	60分	5分	試験用部材不要 整定値・設定値取得機能を使用
保護リレー整定値控え	18分	1分	整定値・状態比較機能を使用
保護特性試験	236分	(通常は受配電設備運用中に実施)	MELSAS-Sから実施
操作連動試験	5分	12分	MELSAS-Sから実施
保護連動試験	50分		
停復電連動試験	20分	6分	MELSAS-Sから実施
保護リレー整定値確認	18分	1分	整定値・状態比較機能を使用
合計(停電時間)	407分	25分	—

の差分を比較，表示・印刷する機能を追加した。これによって，作業時間短縮と人為的ミスの削減に貢献する。

## 5. 点検時間の比較

従来の保護リレー点検作業と自動点検システムによる点検作業の点検(停電)時間の比較を表1に示す。ここでは保護リレー9台の点検作業を想定した点検時間の比較をしている。従来の点検の場合は試験機を用意して1台ずつ点検する。自動点検システムによる点検の場合は運用中に保護特性試験を実施しておいた状態にし，停電後，このシステムで点検を実施する。

結果として407分程度必要としていた点検(停電)時間が25分で完了できるようになり，保護リレーの点検(停電)

時間を382分(約6時間)削減できる。また，人に頼る作業や確認を排除しているため人為的ミスも少なくなる。

## 6. む す び

従来の受配電監視・制御機能に加え，保護リレー自動点検機能を取り込み，停電時間大幅削減による操業率向上や人為的ミス削減に貢献するシステムを開発した。今後も信頼性が高く，効率的なシステムを創出していく。

## 参 考 文 献

- (1) 電力設備保守近代化研究会：電力設備の保守近代化，オーム社（1994）

~~~~~

# 再生可能エネルギー・EMSと組み合わせた三菱スマート 中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”

越智良輔\*

Mitsubishi Smart MVDC Distribution Network System "D-SMiree" Coordinated with Renewable Energy and EMS

Ryosuke Ochi

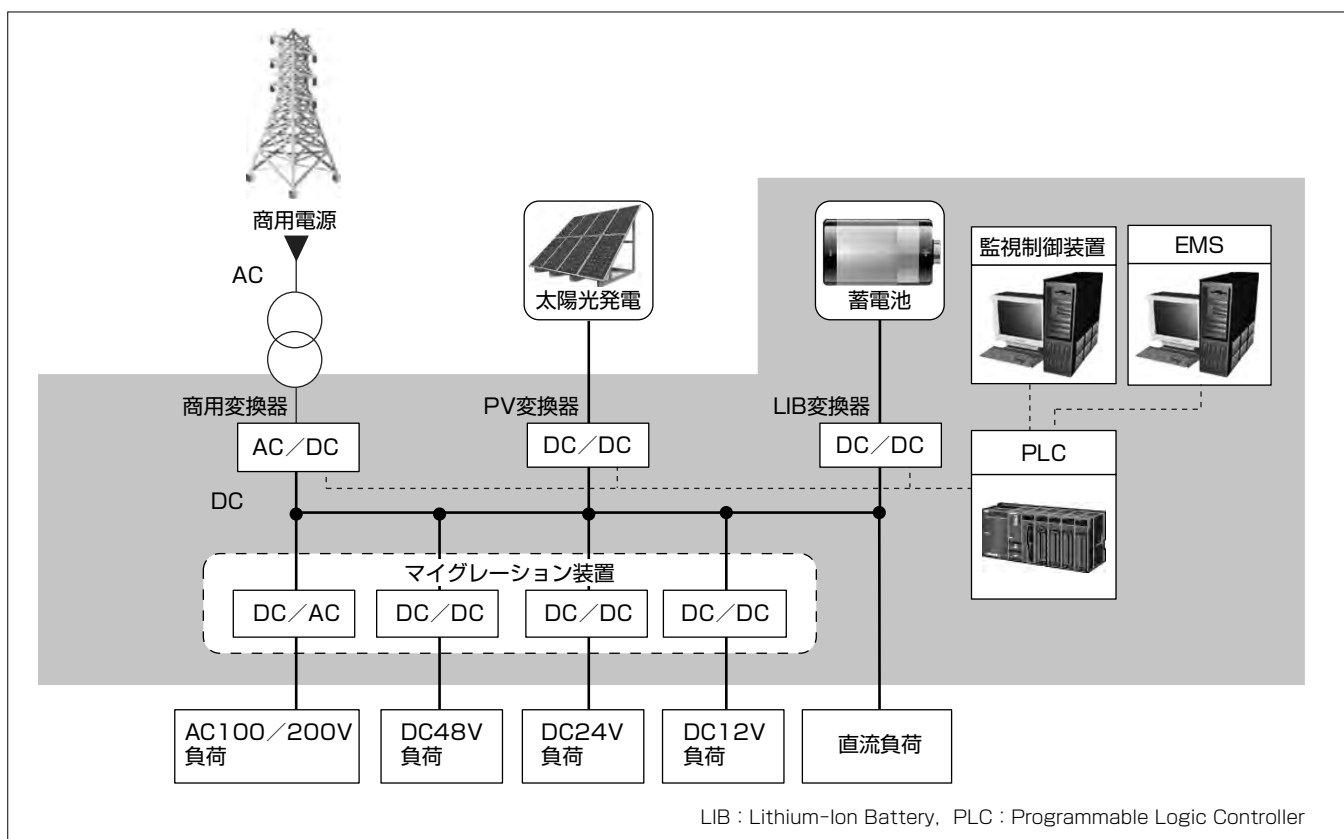
## 要 旨

COP21(気候変動枠組条約締約国会議)で採択されたパリ協定に基づき、日本は温室効果ガス2030年度26%削減(2013年度比)に向けた対策の実施が求められている。このような世界的な環境問題への取組み意識が高まる中、近年、低炭素社会実現に向けた供給力の一つ、又はエネルギー安全保障を担う供給力の一つとして、太陽光発電(Photo Voltaic: PV)・風力発電(Wind Turbine: WT)等の再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)が注目されている。また、同時に効率的かつ安定した電力供給を目指し、エネルギー貯蔵装置としての蓄電池を組み合わせた環境配慮型の創蓄連系システムが普及している。

PV等は直流で発電するが、一般的に交流に変換して送配電され、電気機器の多くが機器内部で直流電力で動作するた

め、コンセント等から受電した交流電力を機器内部で直流電力に再度変換して使用している。これらの変換の際に生じる電力損失の削減が省エネルギー化を進める上での課題の一つである。今回、構築したスマート中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree(Diamond-Smart MVDC<sup>(注1)</sup> distribution network system innovative, reliability, economy, ecology)”は、発電した直流電力を直流配電することで交流に変換する回数を極力削減し、電力損失の低減や電気機器での部品点数削減による故障率の低減等を実現した。また、再エネ、EMS(Energy Management System)及び蓄電池と組み合わせることで省エネルギーを実現する次世代の配電システムである。

(注1) MVDC: Medium Voltage Direct Current



## スマート中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”の仕組み

スマート中低圧直流配電ネットワークシステムD-SMireeは、直流配電技術に加え、最新のスマートグリッド関連技術や蓄電池最適制御技術などを組み合わせたシステムである。商用変換器は商用電源を直流に変換し、直流母線電圧を一定に制御する。監視制御装置とEMSは、発電・需要予測から需給計画を行い、LIB等の蓄電池へ充放電の指示を行う。マイグレーション装置は負荷機器に応じた電圧に変換する。

## 1. ま え が き

デジタル化・クラウド社会の到来によるデータセンター需要の拡大や、東日本大震災以降のBCP(事業継続計画)対策や電力自由化を代表とした市場環境の変化に伴い、電力インフラに対して省エネルギー化・分散電源・エネルギーミックス等の新しい要求が増えている。

また、近年“建築物省エネ法”など省エネルギー規制の強化の流れを受け、建設業界でのZEB(ネット・ゼロ・エ

ネルギー・ビル)実証設備の建設も増加し、従来の“エネルギー消費型”から自然光・周囲環境を利用した省エネルギー化に、電力の発電・蓄電・制御技術を応用する“エネルギーの地産地消型”へ変化している。

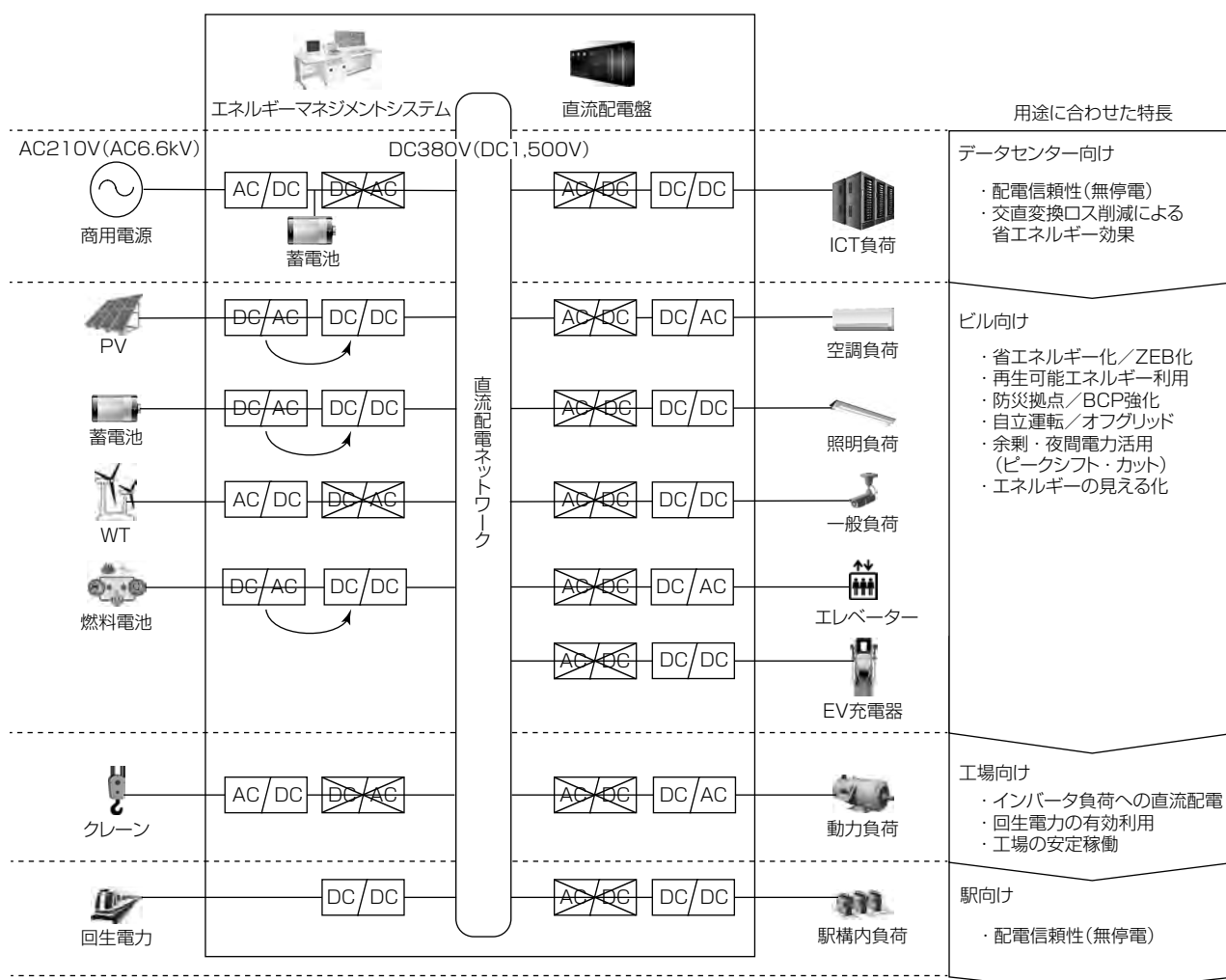
このような背景の中、三菱電機は、2016年7月、スマート中低圧直流配電システム実証棟を当社受配電システム製作所内に建設し(図1)、今後の直流配電の普及促進に向けた製品開発やエンジニアリング強化を図るための開発検証とこのシステムの事業展開を開始した。

本稿では、スマート中低圧直流配電ネットワークシステムD-SMireeのコンセプトと用途に合わせた特長について述べ(図2)、続いてD-SMireeの主な製品群であるエネル



|            |                                                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 所在地        | 香川県丸亀市蓬萊町8番地                                                                                          |
| 実証棟構造・建築面積 | 地上3階建／175.2m <sup>2</sup> (延床面積507.44m <sup>2</sup> )                                                 |
| 導入設備       | 整流装置、PV、WT、蓄電池、EMS、EV用パワーコンディショナ、各種変換器、LED照明、サーバ、監視カメラ／セキュリティ、テレビ／サイネージ、換気扇、無人受付機、盤用冷却装置(空調、エレベーター)ほか |
| 直流系統電圧     | DC400V以下(今後DC1,500V以下まで拡大予定)                                                                          |

図1. スマート中低圧直流配電システム実証棟



ICT : Information and Communication Technology

図2. スマート中低圧直流配電ネットワークシステムD-SMiree<sup>(2)</sup>

ギーマネジメントシステム(EMS)、直流給電システムとDC連系変換装置、直流分電盤とマイグレーション装置の特長について述べる。

## 2. D-SMireeの用途に合わせた特長

電力を無駄なく活用できる、信頼性と経済性を両立させたスマート中低圧直流配電ネットワークシステム“D-SMiree”を、データセンター、ビル、工場、駅などの用途に合わせて提供する(図2)。

### (1) データセンター向け

従来の無停電電源装置(UPS)を通じてIT機器へ給電する交流給電システムではなく、直流給電システムによってシステム全体の変換段数を削減した。また、IT機器の消費電力に応じて電源ユニットの運転台数を最適制御する電源アダプティブ制御技術“ダイヤモンド・エコ・ドライブ機能”を確立し、常に運転効率の高い状態を維持することを実現した。さらに、PVやDC空調等との組合せによって、もう一段高い省エネルギーが可能となる。

### (2) ビル向け

電源システム自体の効率化に加え、PV・蓄電池とのDC連携、DC照明等との組合せによって、創蓄連携システムの効率化が図られ、ZEB化に貢献できる。

### (3) 工場向け

生産効率向上・合理化を図る工場で、産業用ロボットや生産ラインで使用されるモータの導入はより一層加速すると考えられる。これらの回生電力を直流給電システム内の他の機器で使用し、さらに余ったエネルギーは蓄電池に充電することで、無駄なくエネルギーを使用する。また、EMSと組み合わせることでピークカット、ピークシフトによる電力コスト削減が期待できる。

### (4) 駅向け

省エネルギー化を進め、電車の回生電力・再生可能エネルギーを有効活用することが期待できる。

## 3. D-SMireeの主な製品群の特長<sup>(1)</sup>

### 3.1 EMS

#### 3.1.1 EMSの電力需給計画・制御機能

D-SMireeでは、“創エネ”“蓄エネ”の最適制御を実現するため、EMSを導入している(表1)。EMSの電力需給計画・制御機能は、大きく需要予測機能、再エネ発電予測機能、需給計画機能、負荷制御機能の4機能から構成されており、再エネを最大限に活用するためには、需要予測、再エネ発電予測からの需給計画に基づいた蓄電池の有効活用が重要になる。

#### (1) 需要予測機能

需給計画のためには、その基本となる“需要予測”を行う必要がある。一般的に、需要は気温との相関性が高く、需

要予測は、気象予報データの気温、過去の気温と需要の実績データを基に、回帰分析を用いて、48時間先までの需要を予測する。また、当日の需要予測に関しては、直近の実績データを基に予測カーブを補正して、より実態に近い予測値で計画するようにする。

#### (2) 再エネ発電予測機能

スマート中低圧直流配電システム実証棟には再エネ発電としてPV、WTを導入しており、いずれも発電出力が気象に左右されることから、気象予報データ(日射量、風向、風量)と発電出力特性モデル(PV、WT)から、翌日の発電量を予測する。当日の発電予測は、予測精度を高めるため、過去の日射量実績、PV発電実績データを利用し、気象予報に基づく“予報モデル”、直近の発電出力が持続すると考える“持続モデル”、過去の天候変化を予測に反映する“時系列モデル”を組み合わせた予測を行っている。

#### (3) 需給計画機能

需要予測、再エネ発電予測を基に、ビル、工場などの設備運用に合わせた需給計画を行う。商用電源からの給電を最小限にして再エネ発電を蓄電池と組み合わせることで最大限活用する運用を実現する。図3に需給計画例を示す。

#### (4) 負荷制御機能

生産・運転スケジュールに合わせたスケジュール制御、契約電力以下の運転を監視制御する30分デマンド制御、照明、空調の制御等、負荷側機器に対する制御を目的に合わせて組み合わせることが可能である。正味の電力使用量低減にも寄与する。

### 3.1.2 不確定性を考慮した需給運用計画

従来の発電出力予測手法ではPV出力、WT出力変動の不確定性が考慮できず、これらの導入量が増加すると停電確率(Loss Of Load Probability: LOLP)や燃料コストの増加につながることもあった。そこで不確定性を考慮可能な確率的手法によって、PVやWTの導入比率が増加した

表1. 主なEMS機能

| 項目           | 機能                                                                             |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| スケジュール機能     | 設備・機器の運転スケジュールのパターンを設定可能、1年単位の運転スケジュールを設定可能                                    |
| デマンド監視制御機能   | 30分間の平均使用電力が、契約電力を超えないように30分単位で監視し、必要に応じて警報表示や負荷制御が可能                          |
| 空調監視制御機能     | 三菱電機製コントローラを介し、空調機の監視・制御を実施                                                    |
| 照明監視制御機能     | 三菱電機照明製照明ゲートウェイを介し、照明器具の監視・制御を実施                                               |
| 蓄電池オンライン診断機能 | 蓄電池の残量、容量劣化度をオンラインで診断可能                                                        |
| 電力需給計画制御機能   | 過去の電力使用実績と気象情報からの電力需要予測や過去の日照量・発電実績と気象情報からの再生可能エネルギーの発電予測に、蓄電池を組み合わせた需給を計画して制御 |
| グラフィック表示機能   | グラフィック画面作成アプリケーションで画面を作成し、各設備の機器状態、異常、計測値を表示                                   |
| プレイバック機能     | 設備異常や機器故障などのイベント発生前後の設備稼働状態を記録し、グラフィック画面上でイベント発生当時の設備状態を再生可能                   |

場合にもLOLPを現状から悪化させることなく燃料コストの削減を実現できる。

### 3.2 直流給電システムとDC連系変換装置

D-SMireeの電源は直流給電システムとDC連系変換装置で構成している。標準機である“D-SMiree Standard”を例に各機器の特長を次に述べる。

#### (1) 直流給電システム

D-SMiree Standardに採用する変換器は、2009年のNEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）委託研究で製品化開発したものであり<sup>(2)</sup>、商用電源AC210Vを変換してDC380Vを出力する中核機器として適用している。主な特長は、消費電力変動に応じて電源ユニットの運転台数を最適制御する。“ダイヤモンド・エコ・ドライブ”で、低負荷時から定格負荷時まで全領域で高い運転効率の維持を実現して省エネルギー化に貢献している。DC連系変換装置と連系することで、PVやリチウムイオン蓄電池(LIB)との協調運転も可能にした。

#### (2) DC連系変換装置

DC連系変換装置は、PVとLIBを連系させ、直流電力を

制御する装置で、PV用、LIB用のDC/DC変換器で構成されている。PV用DC/DC変換器ではMPPT(Maximum Power Point Tracking)制御を行い、発電エネルギーを負荷へ給電しており、余剰分はLIB用DC/DC変換器を充電制御し、LIBへ蓄えることができ、発電エネルギーを無駄なく利用できる。また、中央監視制御装置からの指令によって、LIBの充放電制御が可能で、先に述べた変換器との協調運転によって、様々なパターンによる給電を可能にした(図4)。さらに、商用停電時にはLIBから給電することで、停電補償機能も持つ。

### 3.3 直流分電盤とマイグレーション装置

#### 3.3.1 直流分電盤

D-SMireeで使用する直流分電盤は、NEDO委託研究の開発成果を基に製品化しており、①各分岐MCCB(Molded Case Circuit Breaker)収納ユニットの負荷電流、漏洩(ろうえい)電流、電力量等の計測・表示が可能な電子式マルチDC計測器を搭載した高機能型、②マルチDC計測器を搭載せず1面当たりの分岐MCCB実装台数を多くした高収納型の2機種がある<sup>(3)</sup>。

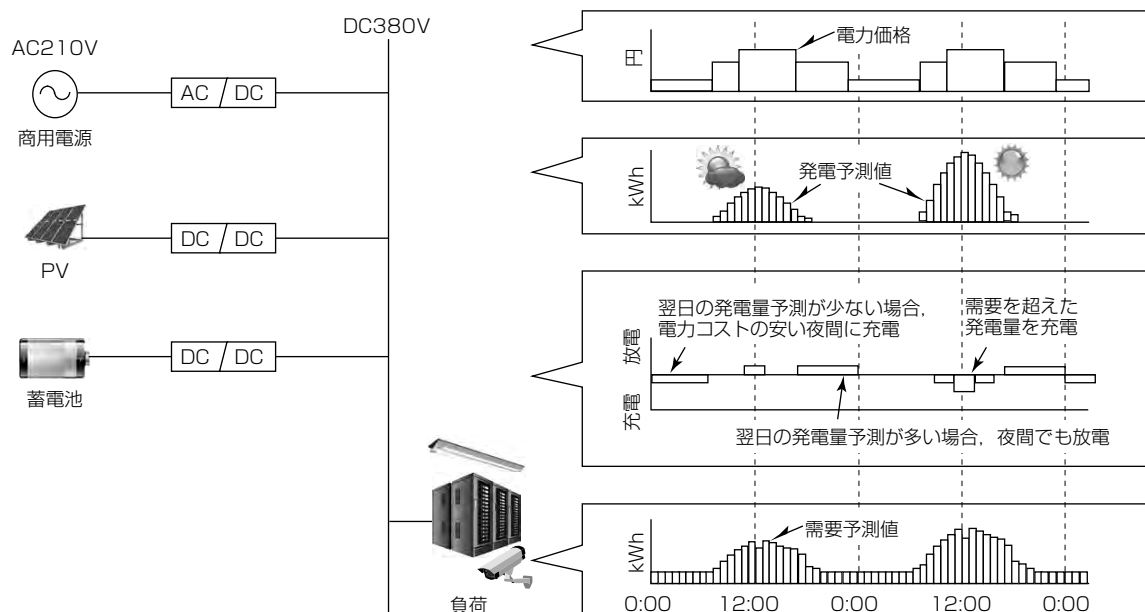


図3. 需要予測と再エネ発電予測に基づく需給計画例<sup>(2)</sup>

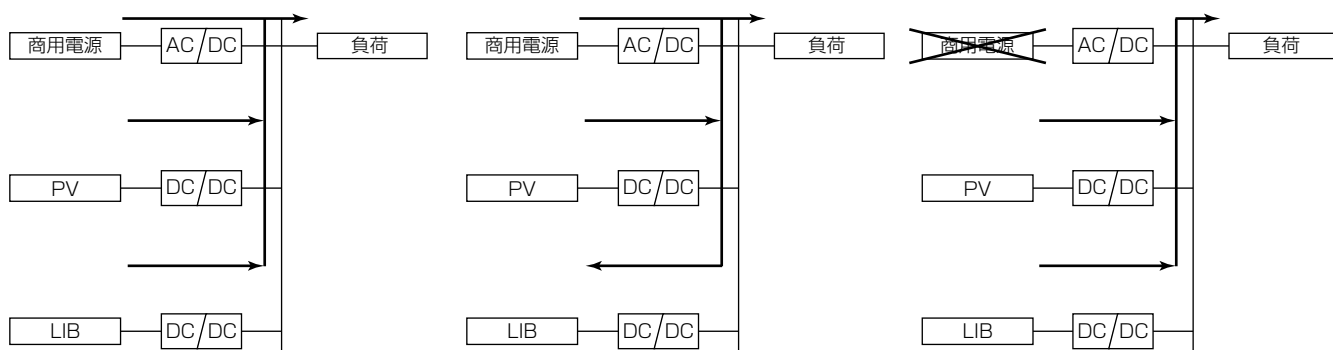


図4. 給電パターンの一例<sup>(2)</sup>

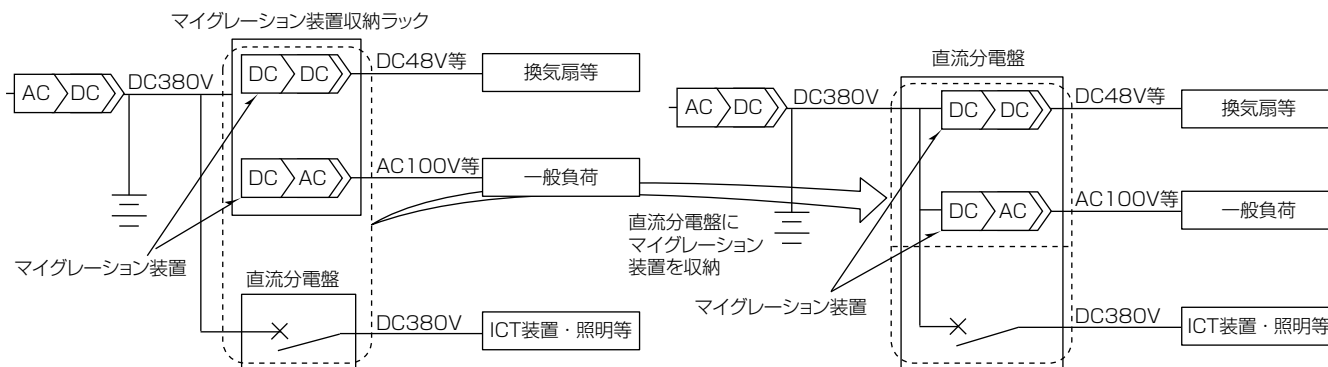


図5. マイグレーション装置の構成<sup>(2)</sup>

### 3.3.2 マイグレーション装置

DC380V直流給電システムは導入の過渡期であり、負荷側設備が完全にDC380Vに対応していないため、給電システム移行(マイグレーション)用の電圧変換装置(マイグレーション装置)が必要になる。そこで、次の特長を持った装置を開発している(図5)。

- (1) 当社製の直流分電盤に実装可能で分岐MCCB収納ユニットと置き換えが可能である。
- (2) 当社製の直流分電盤に実装可能とするため、マイグレーション装置の電源側は分岐MCCB収納ユニットと同様のグリップ構造とする。

これらによって、負荷側がDC380Vに対応した際に、マイグレーション装置を撤去した部位に分岐MCCB収納ユニットを配置することが可能であり、分電盤の追加設置が不要となる。

## 4. む す び

2016年7月に稼働開始したスマート中低圧直流配電システム実証棟を主要拠点として、DC380V以下の製品、システム群の実証試験を進めるとともに、顧客向けにシステムのPR活動を展開している。2017年度以降は、DC1,500V級システムへの適用範囲拡大検討や、国内・海外市場への展開をする予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 竹内勇人：データセンター・ビル施設向け中低圧直流配電ネットワークシステム，三菱電機技報，**91**，No.9，500～503（2017）
- (2) 志摩悠介，ほか：高効率・大容量の無停電電源装置，三菱電機技報，**91**，No.9，504～507（2017）
- (3) 関 孝一郎，ほか：新市場向け低圧配電盤，三菱電機技報，**88**，No.11，705～708（2014）



# 電鉄変電所向け直流高速度遮断器

遠矢将大\*  
 佐々木 央\*  
 仲田知裕\*

*High Speed Circuit Breaker for Railway Substation*

*Nobumoto Tooya, Hiroshi Sasaki, Tomohiro Nakata*

## 要 旨

電鉄車両に電力を供給している直流系統(DC1,500V)で、人口が集中する都市圏を中心に、近年運転ダイヤの過密化・車両の構造の変化等によって、電力供給量は増加傾向にある。このような状況から、電鉄変電所に用いられる直流高速度遮断器(High Speed Circuit Breaker : HSCB)には遮断容量の増加要求とともに、HSCBが長年運用されてきた国内規格JEC-7152を踏襲したJIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>への適合が求められている。

三菱電機は、JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>に準拠し、規格最大の遮断容量である100kAに対応した“JH形”HSCBを開発・製品化した。

開発品の特長は次のとおりである。

### (1) 遮断性能の向上

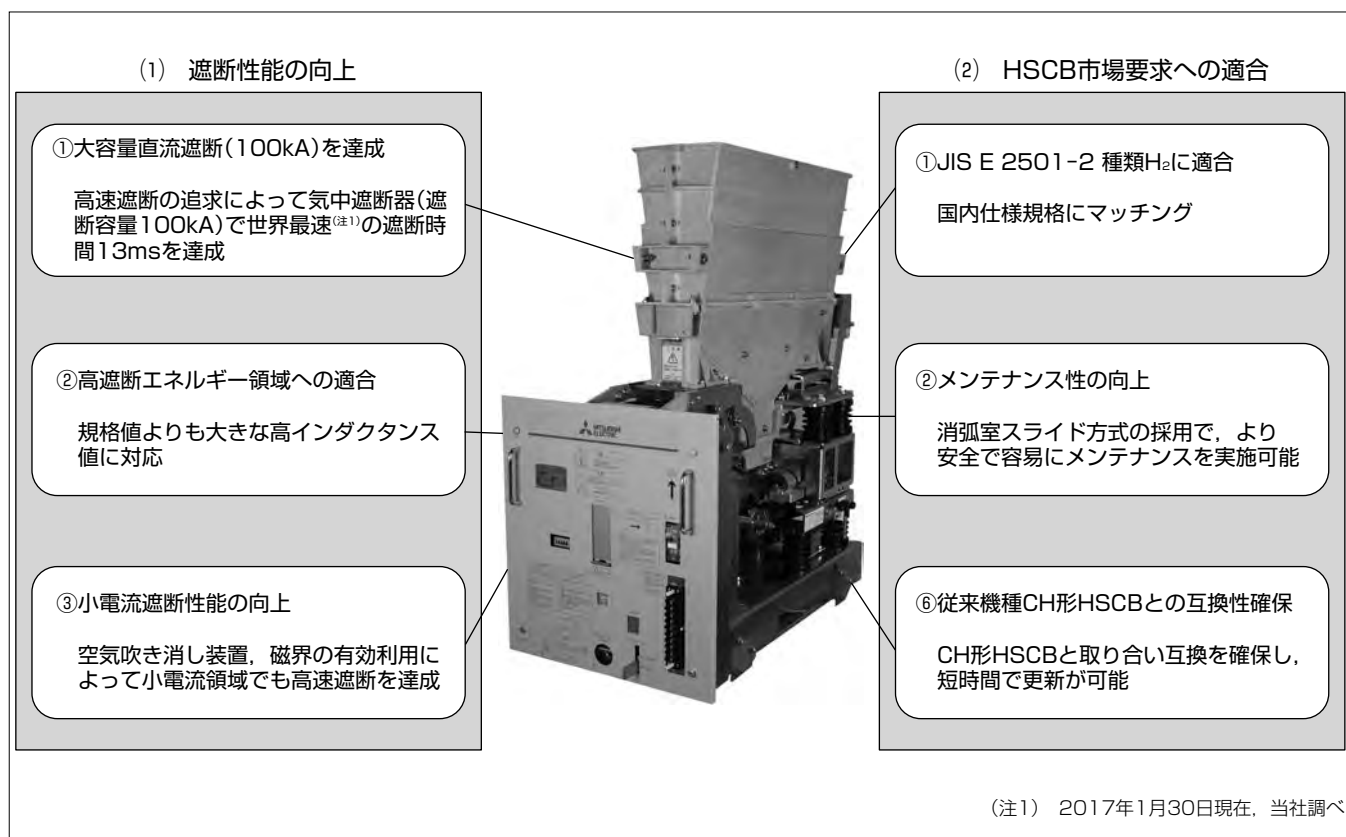
高速遮断の追求によって、全ての電流領域(5A~100kA)で遮断性能を向上させた。

- ①大容量直流遮断(100kA)を達成(従来機種“CH形”HSCBの遮断容量50kAから倍増)
- ②高遮断エネルギー領域への適合
- ③小電流遮断性能の向上

### (2) HSCB市場要求への適合

最新規格への適合、使いやすさ、更新しやすさを追求した。

- ①JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>に適合
- ②メンテナンス性の向上
- ③従来機種CH形HSCBとの互換性確保



## “JH形”HSCBの特長

電鉄変電所向けJH形HSCBは、最新規格への適合、使いやすさ、更新しやすさを追求して市場要求に適合させた。また、高速遮断の追求によって、規格最大の遮断容量(100kA)に対応し、世界最速の遮断時間(13ms)を達成した。

# 1. ま え が き

直流回路は交流回路に比べ表皮効果がないため送電効率に優れているが、世の中の大部分の電力網は交流で構成されている。その理由の1つとして直流回路では遮断が難しいことが挙げられる。直流回路で短絡等の事故が発生すると、時間とともに電流が増大して遮断に必要な電流ゼロ点が自然には来ないため、遮断が経過時間に比例して困難になる。よって、直流回路を遮断するには高速で遮断することが重要で、限流効果によって電流ゼロ点を強制的に作りだす直流高速度遮断器(HSCB)がその役割を担っている。HSCBの遮断性能が直流回路の遮断容量限界であり、送電効率のよい直流回路の適用範囲を広げるにはHSCBの遮断容量増加が必要となる。現在、高圧(DC1,500V)の直流回路は電鉄の分野で広く用いられ、当社のHSCBも40年以上運用されているが、近年人口が集中する都市圏を中心に、電車本数の増加等によって、HSCBの遮断容量増加が求められている。

このような状況の中、当社は電鉄変電所向けとしてJH形HSCBを開発・製品化した。JH形HSCBは高速遮断を

追求することで、規格JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>の最大遮断容量(100kA)に世界に先駆けて対応し、HSCBとして世界最速の遮断時間(13ms)を達成した。

本稿では高速遮断技術を中心に、JH形HSCBの特長について述べる。

# 2. JH形HSCBの定格事項

表1にJH形HSCBの定格事項、図1に外観、図2に構造を示す。

# 3. 遮断性能の向上<sup>(1)</sup>

## 3.1 大容量直流遮断(100kA)の達成

JH形HSCBは規格JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>の最大遮断容量(100kA)に適合させるため、高速遮断を追求した。JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>ではカットオフ電流(遮断時の電流ピーク値)を55kA以下に制限する規定がある。時間に換算すると13ms以下で遮断を完了する必要がある。カットオフ電流は直流回路で短絡事故が発生した場合に、接続する機器への影響を抑えるために規定しているもので、直流遮断器としてはカットオフ電流が小さい(遮断時間が短い)ほど、

表1. JH形HSCBの定格事項

| 項目            | 仕様                            |         |
|---------------|-------------------------------|---------|
| 形名            | JH-B-20/30                    | JH-B-40 |
| 準拠規格          | JIS E 2501-2 種類H <sub>2</sub> |         |
| 方向性           | 両方向                           |         |
| 定格短絡遮断容量(kA)  | 100                           |         |
| 定格線路時定数(ms)   | 10                            |         |
| 定格電圧(V)       | DC1,500                       |         |
| 定格電流(A)       | 2,000/3,000                   | 4,000   |
| 定格カットオフ電流(kA) | 55                            |         |
| 質量(kg)        | 285                           | 300     |



図1. JH形HSCB

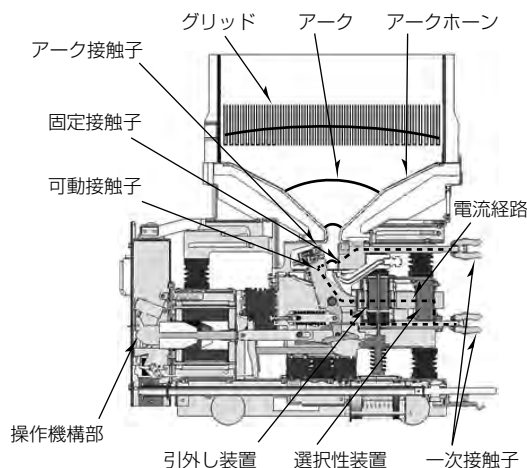
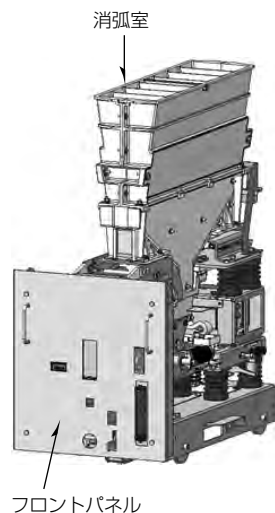


図2. JH形HSCBの構造

遮断性能が優れているといえる。

JH形HSCBは高速遮断を実現するため、次の(1)~(4)の各過程で高速化を追求した。図3に遮断過程を示す。

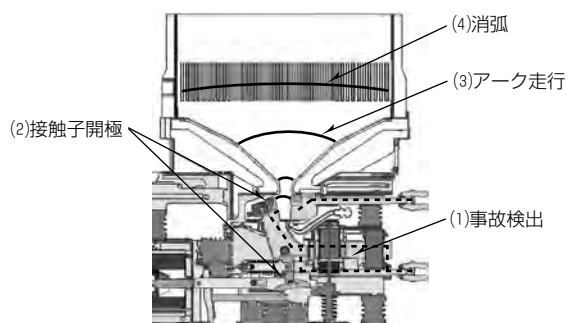


図3. 遮断過程

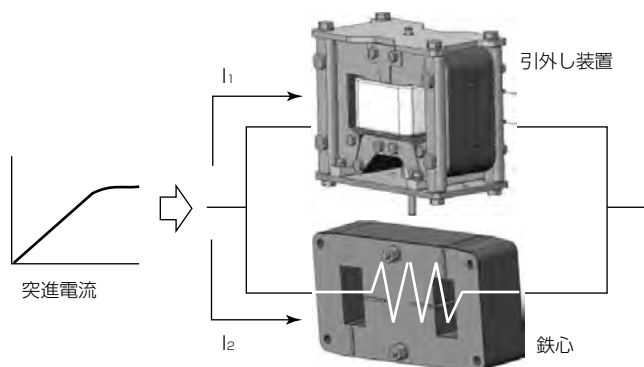
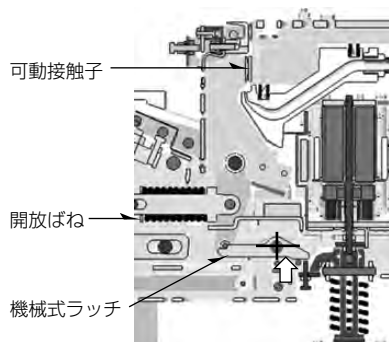
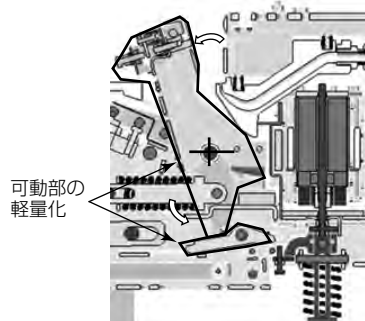


図4. 選択性装置



(a) 入状態



(b) 切状態

図5. 接触子開極

### (1) 事故検出<sup>(2)</sup>

HSCBには事故電流を検出する引外し装置が内蔵されており、電流が事前に設定した目盛り値を超えると、電磁石として構成された引外し装置が作動して異常な電流が流れたことを検出する。JH形HSCBでは図4に示す選択性装置(引外し装置と並列回路に鉄心を設ける)を採用した。短絡事故時に発生する突進電流(時間変化する電流)によって、引外し装置にはより大きな電流( $I_1$ )が流れ、事故時だけ設定した目盛り値よりも早く事故電流を検出する。

### (2) 接触子開極

引外し装置の動作に連動し、機械式ラッチを高速で外し、開放ばねの力で可動接触子が停滞なく開極する。JH形HSCBでは、可動部(可動接触子、機械式ラッチ)の軽量化によって接触子開極の高速化を実現した(図5)。

### (3) アーク走行

接触子開極後、接触子間にはアークが発生する。アークは、アーク近傍の電流経路からの電磁力によって、消弧室に運ばれ、消弧室内を広がりながらアークホーンを走行し、グリッドに到達する。

JH形HSCBではアーク周辺に磁極板を配置し、電磁力の有効利用とアーク走行性に優れたアークホーン材の採用によって、アークの高速走行を実現した(図6)。

### (4) 消弧

グリッドに到達したアークは、グリッド部にとどめることで、電源電圧と逆方向に発生するアーク電圧が最大となり、限流することで消弧する。

JH形HSCBでは、U字形のグリッドを採用し、安定的にアークをグリッド部にとどめ、再点弧を抑制し、短絡電流の高速限流消弧を実現した(図7)。

(1)~(4)の高速遮断技術によって、JH形HSCBは、世界最速の遮断時間(13ms)を達成した。

## 3.2 高遮断エネルギー領域への適合

変電所から事故点までの距離に応じて、線路長や高圧リアクトルによってインダクタンス値が上がるため、遮断時の限流効果が減少する。よって、遮断時間が長くなり、遮断エネルギーが大きくなる。JH形HSCBでは、高速遮断を追求したことによって、規格値よりも大きな遮断エネルギー領域に対応できることを確認した(図8)。

## 3.3 小電流遮断性能の確保

HSCBの遮断原理は、HSCB内に流れる電流が発生する電磁力によって、アークを伸張して遮断するが、小電流(5~500A)では電流が小さいため発生する電磁力も小さくなり、アークが広がらず遮断が困難になる。JH形HSCBでは、空気吹き消し装置の採用(図9)と磁場の有効利用によって小電流遮断性能を向上させ、規格値(15mH)を上回る高インダクタンス(100mH)でも、全ての小電流領域で高速で安定して遮断できることを確認した。

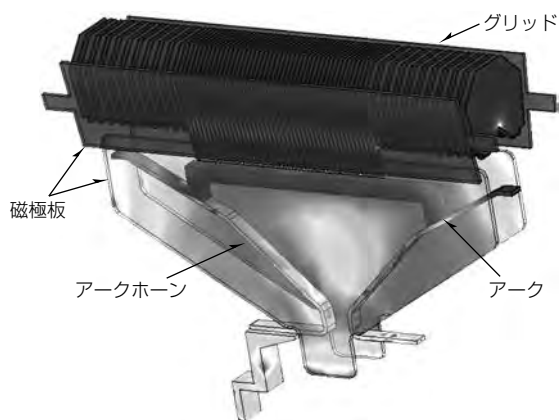


図6. 消弧室内アークの電磁界解析

## 4. HSCB市場要求への適合

### 4.1 JIS E 2501-2 種類H<sub>2</sub>に適合

国内の電鉄変電所向けHSCBは国内規格JEC-152/7152に準拠し、長年にわたり運用され、規格も国内の使用状況に応じて改定されてきた。一方で国際標準化の観点から、国際規格IEC61992とJEC-7152を統合したJIS E 2501が2010年に発行された。JIS E 2501内では国内規格と国際規格の両方が存在し、国際規格は種類H<sub>1</sub>、国内規格は種類H<sub>2</sub>と種別されている。JH形HSCBは国内使用環境に適合させるため新規格のJIS E 2501のうち、国内規格を踏襲した種類H<sub>2</sub>に準拠した。表2にHSCB規格の比較を示す。

表2に示す比較項目は、国内規格の方がより厳しい規定内容であり、種類H<sub>2</sub>に準拠した製品開発で困難なポイントであった。特に遮断時間は国際規格の半分程度に短縮する必要がある、製品開発で最も注力した項目である。

### 4.2 メンテナンス性の向上

大電流を遮断する気中遮断器では、遮断時に接点が荒れるため、接点部のメンテナンスは欠かせない。一方、遮断

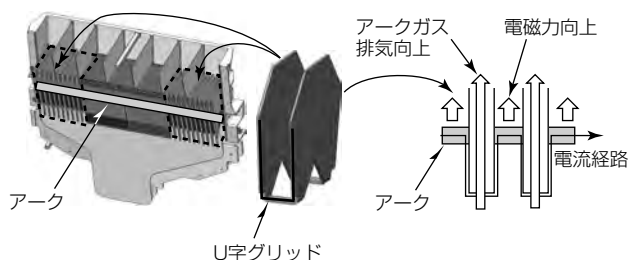


図7. U字グリッド

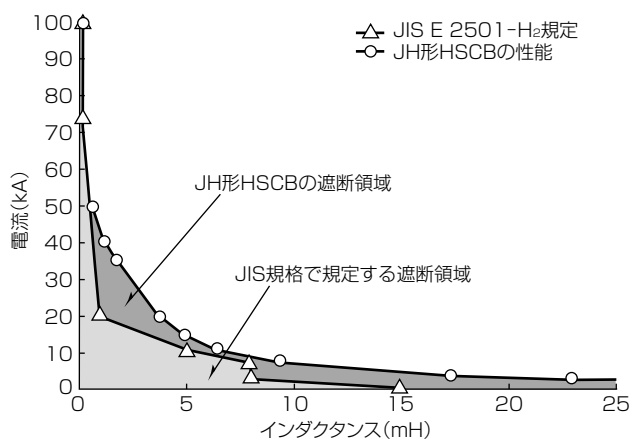


図8. JH形HSCBの遮断領域

| 比較項目        | IEC61992(国際規格) | JEC-152/7152(国内規格) |
|-------------|----------------|--------------------|
| 遮断時間 (ms)   | 20             | 13(相当)             |
| 温度上昇値 (K)   | 100            | 75                 |
| 小電流遮断領域 (A) | 25~100         | 5~500              |

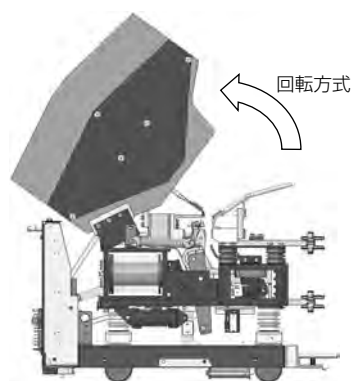
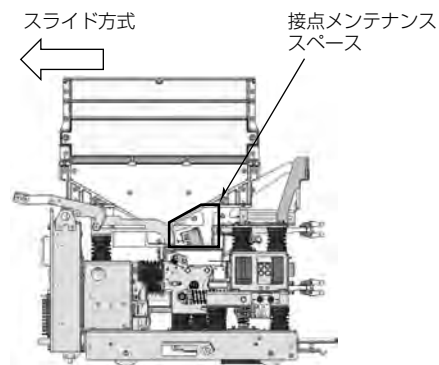


図9. 空気吹き消し装置

(a) CH形HSCB



(b) JH形HSCB

図10. 消弧室開閉方式の比較

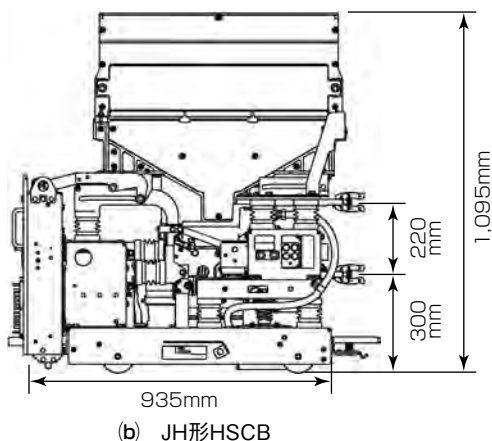
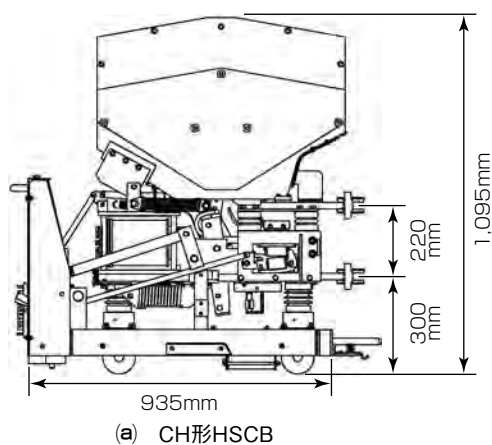


図11. 外形・取合部の比較

時に接点近傍で導電性のガスが発生するため、遮断容量の増加に応じて接点近傍の密閉性を向上させる必要がある。しかし、メンテナンスの容易性と接点近傍の密閉性向上は相反する構造となるため、従来機種CH形HSCBでは、メンテナンスの容易性を重視して消弧室を回転移動させる方式を採用していた(図10)。

JH形HSCBでは消弧室の開閉にスライド方式を採用することで、接点のメンテナンスをより安全で容易にしながら、遮断容量の増加(接点近傍の密閉性の向上)を実現した。

#### 4.3 従来機種との互換性

当社従来機種CH形HSCBは約40年の納入実績があり、主に電鉄会社で使用されてきた。HSCBを更新する時間は電車の運行のない夜間の数時間しか取れない場合が多い。よって、JH形HSCBはCH形HSCBと互換性(外形、主回路接続部、制御回路接続部)をとり、短時間でHSCBを更新できる構造とした。JH形HSCBはCH形HSCBと外形互換をとりながら、遮断容量は倍(CH形：50kA⇒JH形：100kA)とし、遮断器としての機能集約を実現した。図11にCH形HSCBとJH形HSCBの外形、取合部の比較を示す。

### 5. む す び

直流高速度真空遮断器(HSVCB)や半導体遮断器などの直流遮断器のうち、使用実績が最も多く、遮断過程がシンプルな気中遮断器として、高速遮断を追求したJH形HSCBを開発・製品化した。これによって、都市圏を中心とした電車本数の増加要求に伴う、電鉄変電所の容量増加に対応可能となった。また、近年、直流配電は良好な送電効率によって、直流配電ビルなどへの適用拡大が図られており、JH形HSCBで再構築した直流遮断技術を活用し、今後も広がりを見せる直流配電網へマッチした遮断器を供給していくことで、広く社会に貢献していく。

### 参 考 文 献

- (1) 遠矢将大, ほか：電鉄変電所用直流高速度遮断器の開発, 平成29年度電気学会全国大会 (2017)
- (2) 相良雄大, ほか：電鉄変電所用直流高速度遮断器の高速遮断技術, 平成29年度電気学会全国大会 (2017)

# 大規模電磁界解析技術とタービン発電機への適用例

元吉研太\* 空 信之†  
米谷晴之\*\*  
前田 進\*\*\*

Large-scale Electromagnetic Field Analysis Technique and Example of Application to Turbine Generator

Kenta Motoyoshi, Haruyuki Kometani, Susumu Maeda, Nobuyuki Sora

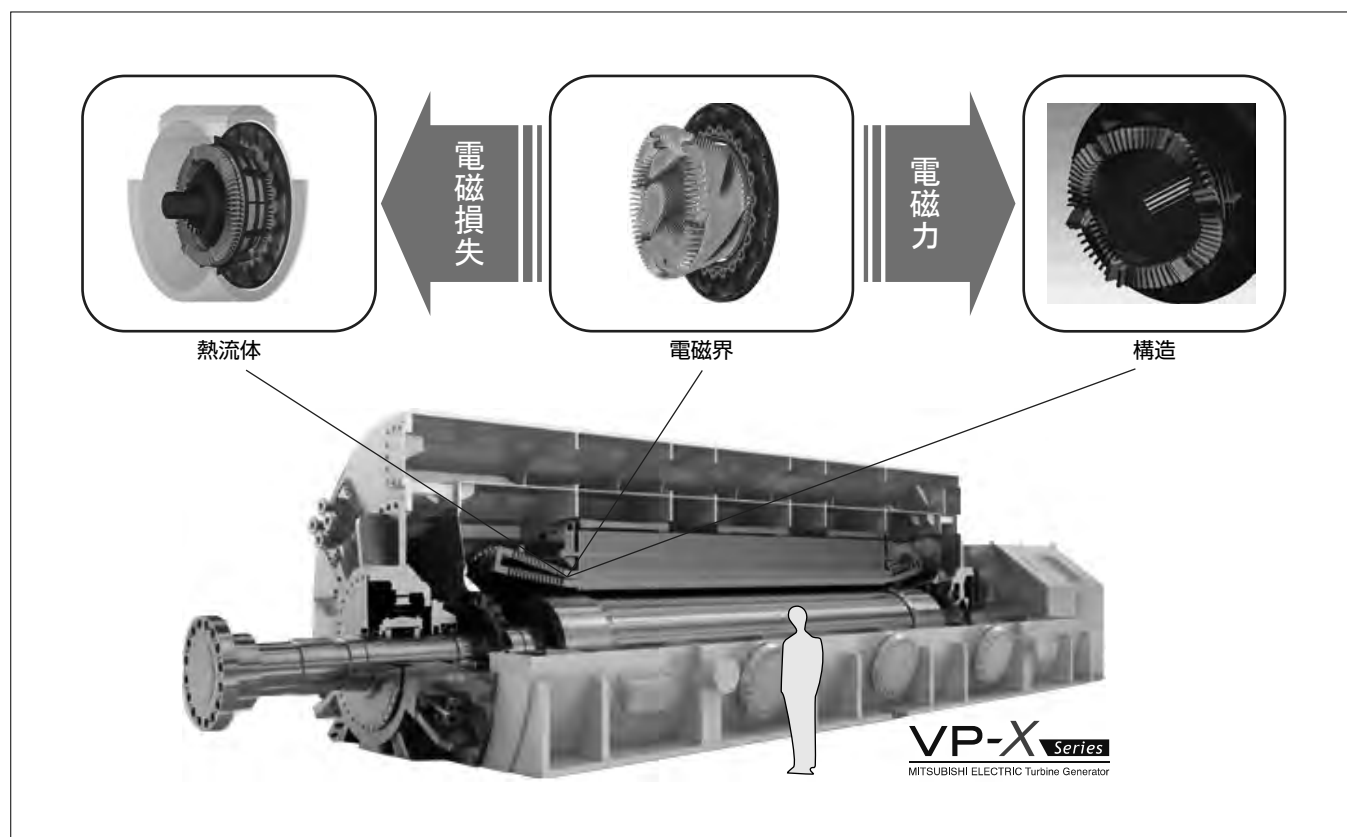
## 要 旨

地球温暖化や電力需給の増加を背景に省エネルギー要求が高まっており、電気機器の高効率化が求められている。特にタービン発電機の高効率化は重要な課題であり、プラントのライフサイクルを考慮すると、0.01%の効率改善が大幅な燃料費の削減に貢献する。発電機の損失を低減し、効率を改善するには、損失発生部位の特定と詳細な損失密度分布の把握が必要である。発電機の各構造体に発生する渦電流損失は構造体表面近傍に分布しており、この損失を詳細に計算するには、1 mm以下のメッシュで構造体表面を分割してモデル化する必要があるが、総メッシュ数は3,000万メッシュ規模となる。このような大規模モデルの計算は従来不可能であった。

今回、三菱電機では、3,000万メッシュ規模の大規模電磁界解析モデルを現実的な計算時間で解析できるシステムを開発した。さらに、機械的又は熱的な信頼性向上を目的として、大規模電磁界解析結果を構造解析及び熱流体解析に適用する大規模連携解析システムを構築した。

タービン発電機の固定子端部及びコイルエンド素線の電磁界解析を実施し、3,000万メッシュ規模の大規模電磁界解析が有効なツールとなることを確認した。

今後は、実際の開発設計にこの連携解析システムを導入して発電機の高効率化と信頼性向上を達成し、電力の安定供給に貢献していく。



## タービン発電機の大規模連携解析の概念図

タービン発電機の“熱流体”←“電磁界”→“構造”の連携解析概念図である。大規模電磁解析を用いて計算したタービン発電機の固定子端部構造での電磁損失(損失密度分布)を熱流体解析に、電磁力を構造解析に引き渡して連携解析を行っている。

## 1. ま え が き

多くの電気機器で、所要の性能・信頼性を確保するために、有限要素法を代表とする様々な数値解析技術が適用されている。主な数値解析として、構造解析、熱流体解析及び電磁界解析がある。これらの数値解析を用いることによって、小型の機器では、試作試験回数を削減し、開発期間を短縮することが可能である。この数値解析技術は、試作・試験が難しい大型の機器で重要性が更に増し、試作・試験をすることなく、機器の性能及び信頼性を確保するには、数値解析による十分な予備検討が必要となる。小型の機器では数値解析の確からしさを試作試験の結果を用いて検証することが可能であるが、大型の機器で、機器の信頼性を確保するためには数値解析の精度向上が求められている。さらに、大型の機器では実負荷運転試験を実施することが難しいケースもあり、無負荷試験などの比較的容易な試験から実負荷時の状態を推定する精度も要求される。これにも数値解析技術を駆使することで対応する必要がある。

本稿では大型機器として、タービン発電機を取り上げる。発電機では、世界的な省エネルギー要求の高まりと電力の安定供給が求められており、高効率化、信頼性向上が急務となっている。これを達成するための数値解析技術として、次の解析技術が必要となる。

### (1) 電磁界解析技術

損失の発生部位を特定するとともに、電磁力(電磁加振力)分布を正確に把握し、高効率化、冷却設計、構造解析などの精度を高める。

### (2) 熱流体解析技術

損失発生部位に対し、効果的な冷却設計を行うことで、熱的信頼性を確保する。

### (3) 構造解析技術

振動抑制や高精度な強度評価によって、機械的信頼性を確保する。

当社では、これらの構造-熱流体-電磁界の連携解析システム(図1)を構築し、これを大型機器に適用する技術を開発した。

本稿ではこれら3種類の解析のうち、電磁界解析技術について述べる。

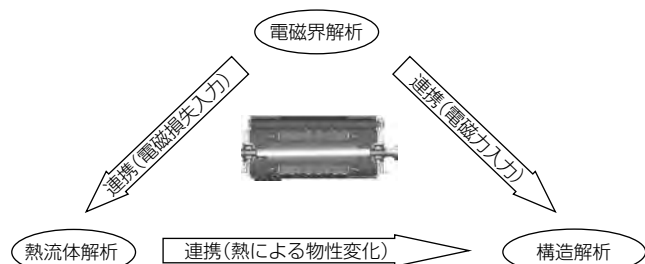


図1. 連携解析の概念図

## 2. 電磁界解析技術

航空機や自動車などの空力特性の詳細検討をする熱流体解析技術では、数千万メッシュ以上の規模の解析がされており、数億メッシュにいたる大規模解析をした例が存在する。これに対して、電磁界解析の解析規模は、従来100万メッシュ程度<sup>(1)</sup>が主であり、数年前でも数百万メッシュ<sup>(2)</sup>が上限であった。しかし、大型の電気機器の信頼性評価精度を高めるには、1,000万メッシュ規模を超える解析が必要と考えられる。

タービン発電機の固定子端部の断面模式図を図2に示す。この図の固定子鉄心端部やシールドコアは積層された電磁銅板であり、この面内には固定子コイルエンド及び回転子コイルエンドからの磁束が鎖交することによって渦電流損失が発生する。また、クランパやコアボルトは塊状の鉄体であり、やはり渦電流損失が発生する。フィンガプレートやシールド押さえは非磁性の金属であるが、ここにも渦電流損失が発生する。

外部からの変動磁場によって発生する渦電流は、主に表皮深さ内に流れる。表皮深さ $\delta$ は、次式で表される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f$ : 周波数、 $\mu$ : 透磁率、 $\sigma$ : 導電率であり、鉄体の表皮深さ $\delta$ は $f=60\text{Hz}$ としてもおよそ1mm以下となる。したがって、これらの固定子端部の渦電流損失を解析するためには少なくとも部材表面を表皮深さ $\delta$ 以下のメッシュに分割する必要がある。しかし、これらの部材は、数mの径及び数10mmの厚みを持っており、表皮深さ $\delta$ 以下のメッシュに分割すると、分割数は1,000万メッシュを

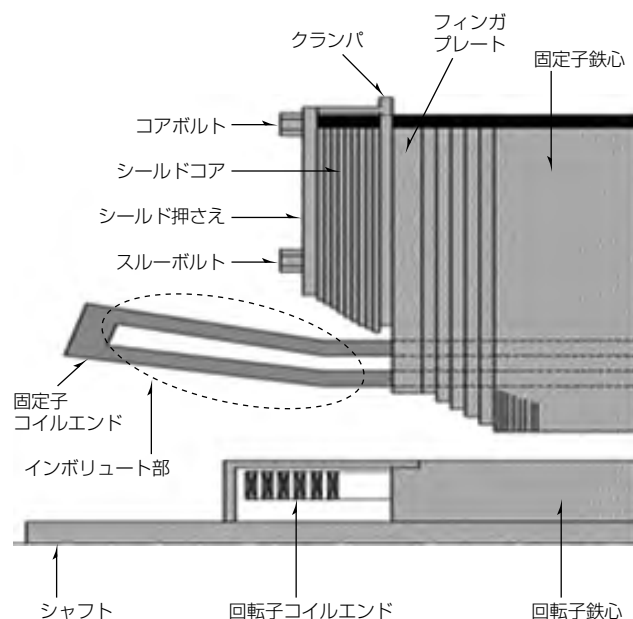


図2. タービン発電機の固定端子部の断面模式図

◇一般論文◇

超える。このため、従来の数百万メッシュの電磁界解析では、シールドコア部と固定子鉄心端部をそれぞれ別の解析として行うことで損失を評価していた。しかし、近年の研究でシールドコア部の損失は固定子鉄心端部に流れる磁束量に影響を受けることが分かってきており、固定子端部全体で解析を実施することによって精度が向上することが分かってきた。つまり、より詳細な損失把握と更なる効率改善には、1,000万メッシュを超える大規模解析が必要である。図3に今回作成した固定子端部全体モデルのメッシュ分割図を示す。なお、固定子コイルは表示していない。

また、図4に固定子コイルエンドの分割図を示す。発電機の固定子コイルは1導体に対して約100本の銅素線で構成されている。素線1本は厚み1～3mm程度で、幅5～10mm程度である。このため、素線1本に対しても渦電流

損失が発生する。この固定子コイル素線に発生する渦電流損失を解析するためには、素線1本ごとに渦電流損失密度分布を計算する十分なメッシュ分割を施す必要があり、全ての素線に対してメッシュ分割を行うと、3,000万メッシュ規模の解析となる。

### 3. 大規模電磁界解析システム

先に述べた最大3,000万メッシュの大規模電磁界解析を現実的な時間内に計算するために、大規模電磁界解析システムを構築した。計算機としては128並列マシンを導入し、マシン間のデータ通信速度を向上させるために通常のギガビットイーサネット通信ではなくインフィニバンド通信を用いている。さらに、解析ソルバーには、解析領域を計算機のコア数に応じて分割する領域分割法<sup>(3)</sup>を採用した。領域分割法によって領域分割された固定子端部のメッシュ(鉄心端部のみ)を図5に示す。なお、図には表示されていないが、空間部も領域分割されている。この解析システムを用いることで、従来の数百万メッシュ規模の解析とほぼ同等の計算時間で3,000万メッシュ規模の解析が可能となった。

電磁界解析では、各要素の磁束密度や渦電流損失密度分布が結果として得られるが、大規模解析の場合、このデータ量が膨大となる。このため、解析結果を可視化するシステムも構築する必要がある。このシステムでは、既に大規模解析を実施している熱流体解析に用いられる表示ソフトウェアを電磁界解析にも適用することで対応した。

電磁界解析と構造解析又は熱流体解析では、メッシュを細かくする部分が異なるため、電磁界解析のメッシュを用いない。このため、解析結果をマッピングする技術が必要である。このため、共通のCADデータを用いて個別に解析モデルを構築し、電磁界解析から得られる電磁力や電磁加振力分布を構造解析に引き渡すためのマッピング、及び電磁界解析によって得られた損失密度分布を熱流体解析に引き渡すためのマッピングを行うソフトウェアを構築し、連携解析を行えるようにした。図6に今回構築した大規模連携解析システムの概念図を示す。

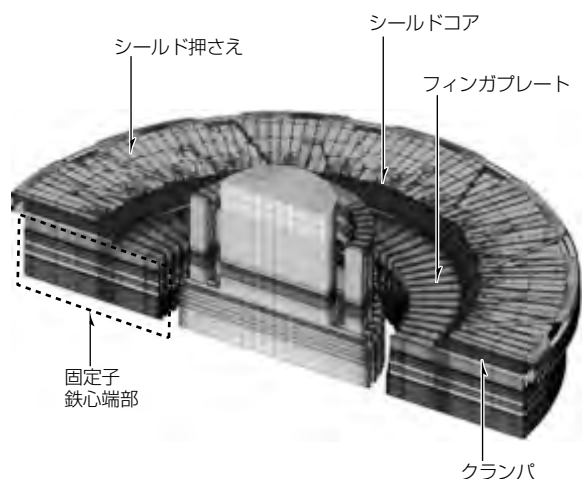


図3. 固定子端部全体モデルのメッシュ分割図

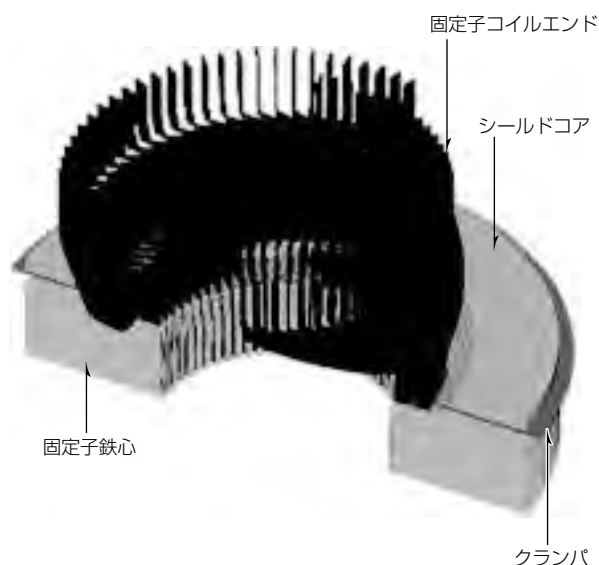


図4. 固定子コイルエンド素線モデルのメッシュ分割図



図5. 固定子鉄心端部メッシュの領域分割例



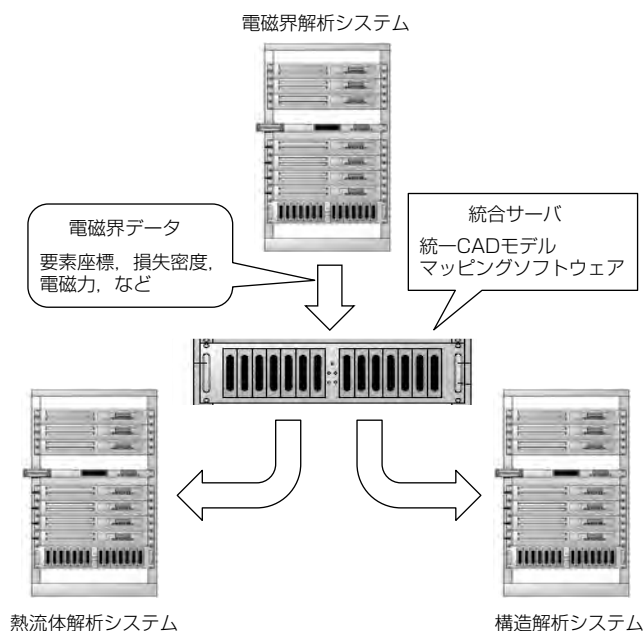


図6. 大規模連携解析システムの概念図

#### 4. 大規模電磁界解析例

図7に銅損時(電機子巻線を三相短絡し、界磁電流を与え定格回転数で回転子を回転させた場合で、電機子電流が定格電流となる場合)の固定子端部の大規模電磁界解析結果(損失密度分布)を示す。この図から、シールドコアの機外側内周面やフィンガプレートの内周側角部に損失が集中していることが分かる。なお、この図は電磁界解析結果から得られる渦電流損失密度分布を示しており、熱流体解析に引き渡す損失密度分布は、電磁界解析結果から得られた各要素の磁束密度履歴を用いて計算した鉄損を、各要素の渦電流損失密度に合計した値である。

この発電機の銅損試験を実施し、固定子端部各部の温度を測定して解析値と比較した。図8に熱流体解析から得られた温度分布と測定値との比較結果を示す。図8に示す解析値と測定値を比較した結果、図8(b)に示すように解析結果は誤差5%以内で測定値と一致しており、固定子端部解析の妥当性が分かる<sup>(4)</sup>。

図9はコイルエンド素線に発生する渦電流損失密度分布の解析結果である。この図から、コイルエンドのインボリユート部に差し掛かったあたりで、発熱が最も大きくなる現象が再現できている。

これらの解析は3,000万メッシュ規模の大規模解析をして初めて得られるものである。すなわち、この大規模解析システムは大型機器の詳細な発熱分布を求めることによる熱的信頼性向上や、本稿では述べなかったが、構造解析との連携<sup>(5)</sup>による機械的信頼性向上に貢献できるものと考えられる。さらに、損失密度分布を定量的に把握することで、高効率設計、最適な冷却設計への指針を得ることができ、高性能で信頼性の高い機器の設計に貢献できると考えられる。

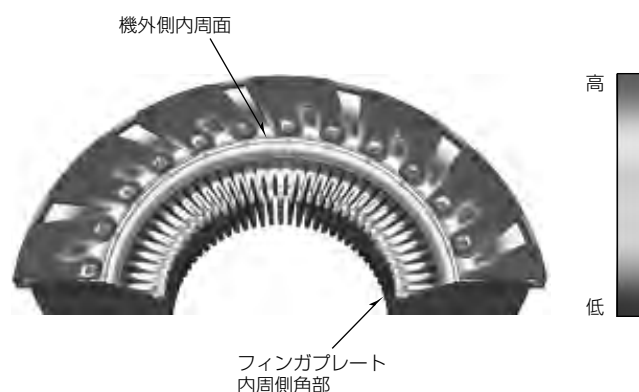
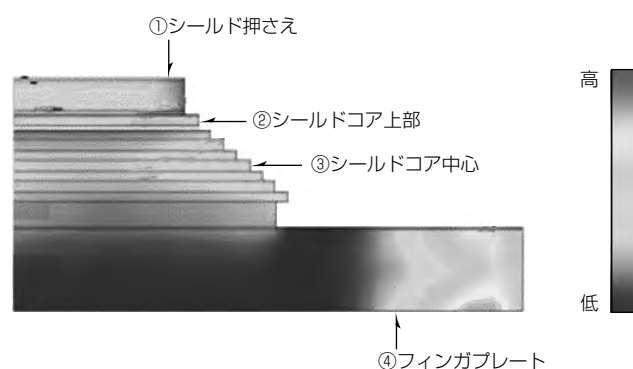
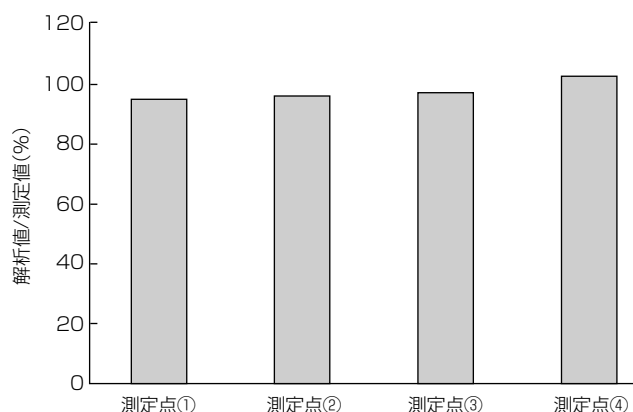


図7. 固定子端部の過電流損失密度分布



(a) 温度分布



(b) 測定値との比較

図8. 固定子端部の温度分布及び測定値との比較

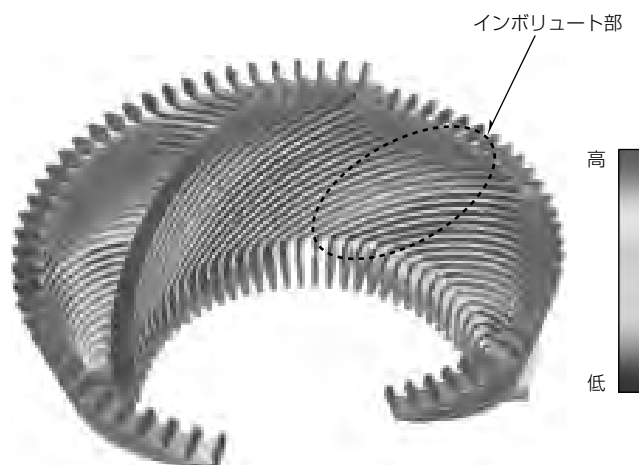


図9. コイルエンド素線の渦電流損失密度分布

## 5. む す び

大型電気機器の性能・信頼性向上を目的として、詳細な電磁力(電磁加振力)分布や、発熱分布を、試作・試験なしに推定できる大規模連携解析システムを構築した。このシステム内で用いられる大規模電磁界解析は、これまでに製品設計への適用例がない3,000万メッシュ規模の大規模解析であり、本稿では精度確保には1,000万メッシュ以上の解析規模が必要となることを示した。また、タービン発電機の固定子端部全体モデルやコイルエンド素線モデルの解析例を示し、固定子端部モデルでは実測温度と解析結果の比較を行い、精度の高さを証明した。

今後は、実際の開発設計にこの連携解析システムを導入して発電機の高効率化と信頼性向上を達成し、電力の安定供給に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) Kometani, H., et al.: Application of Electromagnetic Numerical Analysis for Large Indirectly Hydrogen Cooled Turbine Generator, CIGRE 2008 SC A1-109
- (2) Motoyoshi, K., et al.: Large-Scale 3D Electromagnetic Field Analysis for Estimation of Stator End Region Loss in Turbine Generators, ICEMS2016, LS4C4 (2016)
- (3) Nakano, T., et al.: Parallel Computing of Magnetic Field for Rotating Machines on the Earth Simulator, IEEE Trans.Magn., **46**, No.8, 3273~3276(2010)
- (4) 空 信之, ほか: 870MVA水素間接冷却方式タービン発電機固定子鉄心端部損失解析, 平成27年電気学会全国大会論文集, 5-043 (2015)
- (5) 長嶋孝明, ほか: タービン発電機の大規模構造解析, 第30回計算力学講演会講演論文集, F02-3 (2017)

~~~~~