



家庭から宇宙まで、エコチエンジ



# 三菱電機技報

11 | 2020  
Vol.94 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」

時代の要請に応える受配電システムと  
絶縁材料・電流遮断技術……………

熊田亜紀子

卷頭言 1

The Latest Technologies of Power Distribution Systems

Insulating Materials and Current Interruption Technologies for New Power Distribution Systems  
Akiko Kumada

受配電システム機器の技術展望……………

長谷潤一郎

卷頭論文 2

Technology Outlook of Power Distribution Systems Equipment

Junichiro Hase

海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS

"HG-VG-A" ..... 8

香川耕一・吉田忠広・白井 隆

72.5kV C-GIS for Overseas Offshore Wind Turbine "HG-VG-A"

Koichi Kagawa, Tadahiro Yoshida, Takashi Shirai

36kVキュービクル型ガス絶縁開閉装置"HS-X-2" ..... 13

森 隆広・井上直明・大西健司

36kV Cubicle-type Gas Insulated Switchgear "HS-X-2"

Takahiro Mori, Naoaki Inoue, Kenji Onishi

海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤ

"MS-E形"のシリーズ化 ..... 17

濱田達哉・木村 透

Creation of Series of 7.2/12kV Switchgear "Type MS-E" for Overseas Market

Tatsuya Hamada, Toru Kimura

海外市場向け"20-VPR-D形"真空遮断器 ..... 22

難波晃平・山田 博・小林 稔

"Type 20-VPR-D" : Vacuum Circuit Breaker for Overseas Market

Kohei Namba, Hiroshi Yamada, Minoru Kobayashi

真空開閉器用真空バルブと新工場の生産革新 ..... 29

越智 聰・保井徹也・道念大樹

Vacuum Switch Tubes for Vacuum Switches

Satoshi Ochi, Tetsuya Yastu, Taiki Donen

駅内直流配電システムに向けた

短絡・地絡保護手法の検討 ..... 34

竹内勇人・福野研一・地道拓志・藤田敬喜・齋田洋平

Study on Short-circuit and Ground-fault Protections in DC Distribution System for Stations

Hayato Takeuchi, Kenichi Fukuno, Takushi Jimichi, Keiki Fujita, Youhei Sonoda

IoTを活用したモータ診断システム ..... 41

平田陽介・宮内俊彦・宗次 亮・三好将仁

Diagnostic System for Motor Equipment Using Internet of Things

Yosuke Hirata, Toshihiko Miyachi, Ryo Munetsugu, Masahito Miyoshi

関連拠点紹介 ..... 47

スポットライト

劣化判定センサによる絶縁物の劣化診断・余寿命推定技術

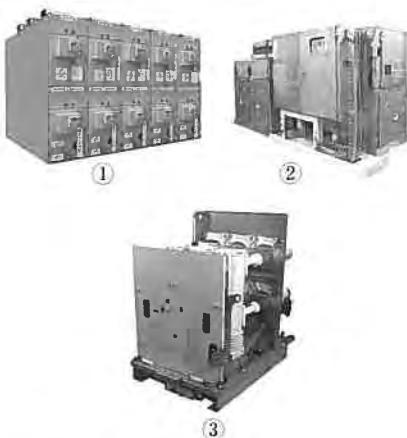
### 特許と新案

「ガス絶縁スイッチギヤ」

「移動機器出し入れ装置及び電気機器」 ..... 49

「電動機の診断装置」 ..... 50

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを  
申し上げますとともに、罹患(りかん)された皆さまとご家族及び  
関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。



表紙：受配電システムの最新技術

社会インフラを支える受配電システムは、技術の進展によって、安全・信頼性の更なる向上、小型・軽量化、省エネルギーによる環境負荷低減、運用・保守性の改善が行われた。近年でも社会のニーズに対応し、再生可能エネルギー、グローバル化・規格の国際化、IoT(Internet of Things)、LCC(Life Cycle Cost)削減、災害レジリエンス、電力安定供給などに対応し進化を続けた新製品が開発されている。

① 海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤ"MS-E"

② 洋上風力発電向け72.5kV C-GIS "HG-VG-A"

③ 24kV真空遮断器"20-VPR-D"

# 卷頭言

## 時代の要請に応える受配電システムと 絶縁材料・電流遮断技術

Insulating Materials and Current Interruption Technologies for New Power Distribution Systems



熊田亜紀子 *Akiko Kumada*

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 教授

*Professor, Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo*

電力伝送では、電気が流れてもほしい“時”“所”で、確実に流れることが要求される。高電圧絶縁技術と電流遮断技術は、この電力伝送の基盤技術である。これらの高電圧絶縁技術と電流遮断技術の(主に日本での)技術開発は、電力系統の送電電圧の上昇と共に歩み、飛躍的に発展を遂げてきた。1990年代半ばの交流によるUHV(Ultra High Voltage)送電技術の確立はその金字塔ともいえるものである。1990年代に入ると、バブル経済崩壊後の景気停滞や人口減少に伴う電力需要の飽和を受けた新規設備投資の縮小、機器の経年劣化といった時代背景を受けて、開発は、電力機器や絶縁材料のよりいっそうの合理化、高信頼化、環境適合化に移行してきた。海外市場を開拓していく上でも競争力を持てるだけの経済性の担保が課題であったことにもよる。

と、20年前の巻頭言に書かれていた文章から始めることをお許しいただきたい。私事のエピソードで恐縮だが、2019年度から電力システムのハードウェアに関する学部生向けの講義も本格的に担当することになった。学部生という比較的初学者向けの講義となると、まずは電力システムの基盤技術である高電圧絶縁技術と電流遮断技術の意義、そして高電圧三相交流による送電という電力システムの骨格的な考え方を教えるため、まさに上記の段落内容の話から始まることになる。講義資料を自分なりにアップデートしているが、担当している他の講義(放電物理や、誘電体材料)と異なり、この電力システムに関する講義は、教えるべき内容の背骨がここ数年で大きく変わろうとしていることを肌で感じている。

2000年代以降は徐々に先進国から“環境適合性”がキーワードとして現れるようになる。アル・ゴア元米副大統領が主演したドキュメンタリー映画“不都合な真実”が制作されたのは2006年、また1997年のCOP(Conference Of

the Parties)3で議決された京都議定書が発効されたのが2005年、日本で太陽光発電の余剰電力買取りが開始されたのが2009年、改正FIT(Feed-In Tariff)法が発効したのが2012年である。このような施策の効果で、日本の電力供給に占める新エネルギーの割合は8%を超えるようになっている。環境適合性の高い電源の開発に伴い、分散電源を持った受配電システム、エネルギー貯蔵技術、洋上風力発電システムなどへの直流送変電、データセンターへの直流給電、そして自励式HVDC(High Voltage DC)技術を用いた多端子直流送電技術の開発と、電力輸送・貯蔵技術の革新・開発が進んでいる。既存のAC送配電ネットワークに、DC送配電ネットワークが併存するシステムへと、世界各地の電力システムで、100年ぶりのパラダイムシフトが今まさに起きつつある。

さて、先に述べた電力システムに関する講義では、電源構成の変化は、直流技術の復権など電力輸送システムにこのような影響を与えていたという“第2章”を、大幅に増強する予定である(ちなみに、2020年度はオンライン講義に対応するため、講義資料は一から作り直しである)。

このように“直流の復権、環境適合性”という電力システムの根幹に大転換が生じると、当然、それを構成する機器には電圧階級を問わず新しいニーズが生まれる。機械学習やAI(Artificial Intelligence)に代表される計算機技術の新しい流れや、光計測技術などの周辺技術を“シーズ”として取り込み、機器開発のベースになる絶縁技術や遮断技術の研究開発も大きく進展する時機に来ていると考えている。また製造ラインも、コロナ禍を受け自動化・無人化が後押しされるだろう。講義資料に新しい絶縁技術・遮断技術、新しい機器製造技術等々の“第3章”を追加するため、一から作り直さねばならない日もかなり近いのではないだろうか。

# 受配電システム機器の技術展望

Technology Outlook of Power Distribution Systems Equipment



長谷潤一郎\*  
Junichiro Hase

## 要旨

受配電システム機器は、過去から社会のニーズに対応し、技術の進展によって、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善がされてきた。また、近年でも、変化する社会ニーズ(安全性向上、電力安定供給、グローバル化・規格の国際化、IoT(Internet of Things)・高機能化・高信頼性、LCC(Life Cycle Cost)削減、省エネルギー・環境負荷削減、災害レジリエンス)に対応した技術の進展によって、次に示すような技術が開発され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ケ放圧技術の進展

- ①スイッチギヤVCB／VMC 2段積構造のIAC(Internal Arc Classification) AFLR対応技術
- ②低圧モータコントロールセンタへのIAC対応技術

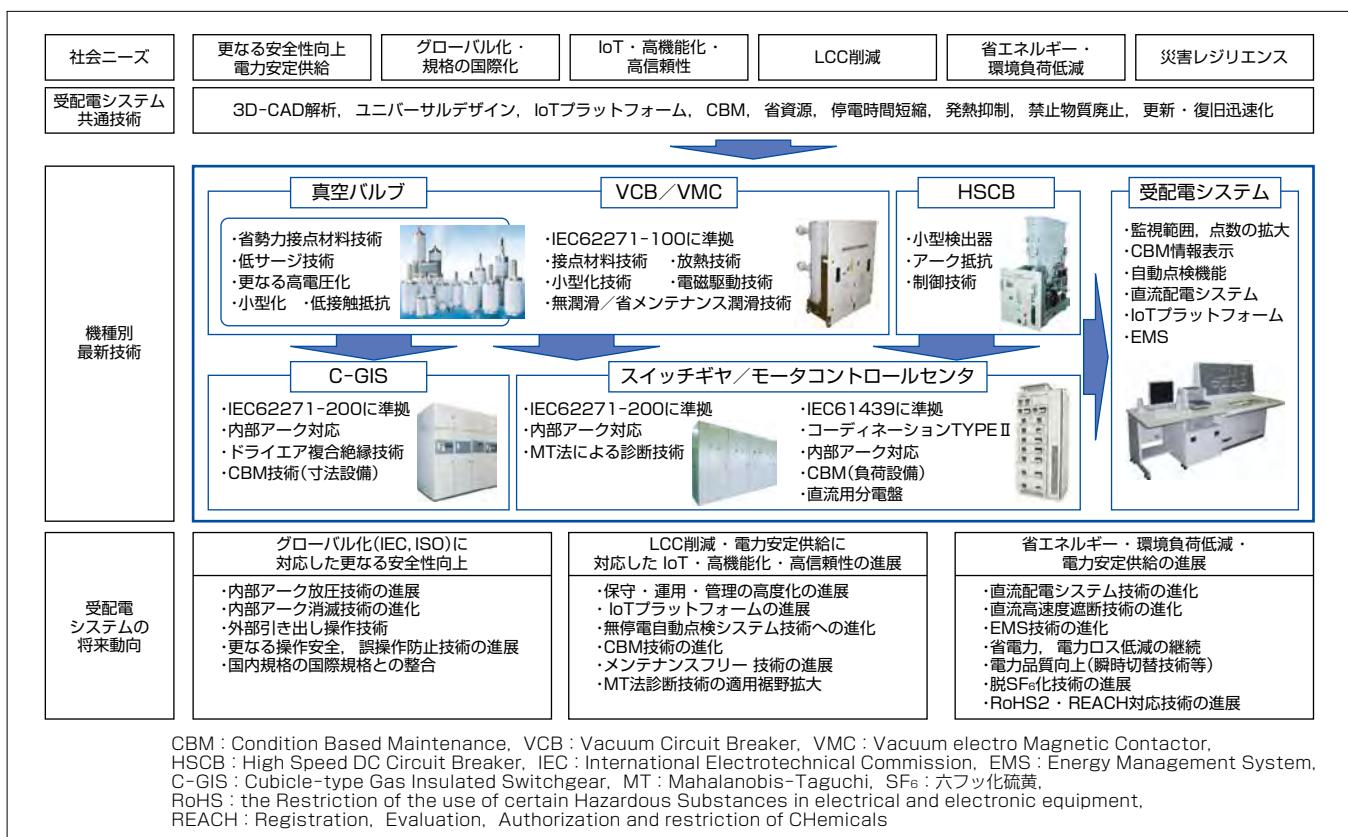
### (2) IoT・高機能化・高信頼性技術の進展

- ①受配電システム機器の高度化技術
- ②IoTプラットフォームの機能性向上技術
- ③電子機器の高信頼化技術
- ④モータ負荷設備のCBM技術
- ⑤絶縁物余寿命診断の簡便化

### (3) 直流配電技術の進展

- ①直流配電システムと当該EMS技術の進化
- ②直流高速度遮断技術の進化

今後も国内外を問わず顧客ニーズは多様化し、高度化するものと考えられる。これらの受配電システム技術を更に発展させ、製品開発に反映し、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至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は、過去から社会のニーズに対応し、技術の進展によって、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善がされてきた。また、近年でも、変化する社会ニーズ(更なる安全性向上、電力安定供給、グローバル化・規格の国際化、IoT・高機能化・高信頼性、LCC削減、省エネルギー・環境負荷削減、災害レジリエンス)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・高信頼性技術、直流配電技術が進展してきている。

本稿では、社会の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. 國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、万一のスイッチギヤ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、C-GIS下方にあるケーブルピットに向けて高温ガスが放圧した場合、ケーブルピット内の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

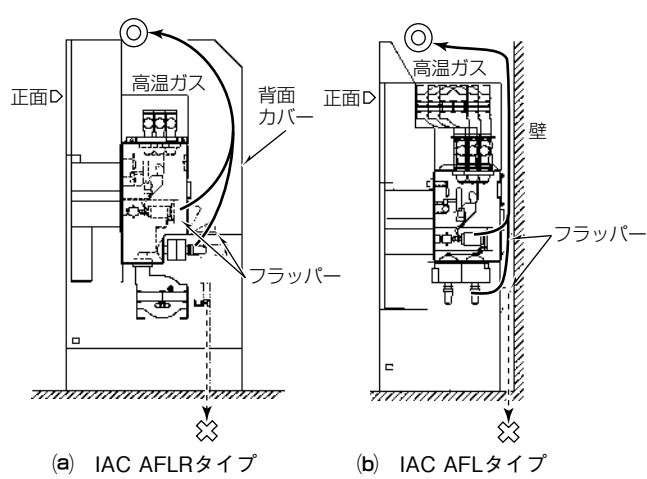


図1. C-GISの断面図

されている。

また、国内規格でも、国際規格との整合化によって内部アーク性能の要求が規定されるようになっている。

### 2.1 2段積構造への対応技術

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2に示すようなVCBやVMCの2段積化によって配列サイズ縮小を実現し、かつ、内部アーク対応では、最高クラスのAFLR 40kA-1secに対応する7.2/12kV定格の屋内気中絶縁スイッチギヤも製品化されている<sup>(1)</sup>。

内部アーク対応設計を行う際には、上／下段のVCB／VMC室・母線室・ケーブル室といった各区画に対して、内部アーク発生時の圧力上昇に耐え得るように筐体(きょうたい)の強度設計を実施する必要がある。

筐体の強度検討を行うに当たっては、盤内でのアークの挙動を考慮する必要があるが、アークの挙動は電磁力による駆動力や電界強度などに影響されるため、必要十分な強度を持つ最適設計を行うためにはアークの挙動予測が重要である。

近年、図3に示すような、高温ガスの流れ、電磁力、筐体の形状といった因子をパラメータとしたアークの挙動を予測する解析技術も登場しており、今後ますます内部アーク対応技術も向上していくと推測する。

### 2.2 モータコントロールセンタへの対応技術

モータコントロールセンタ(MCC)には内部アーク規格が制定されていないものの、IEC/TR61641によって試験指針が示され、海外市場では内部アークに対応したMCCが求められてきている。

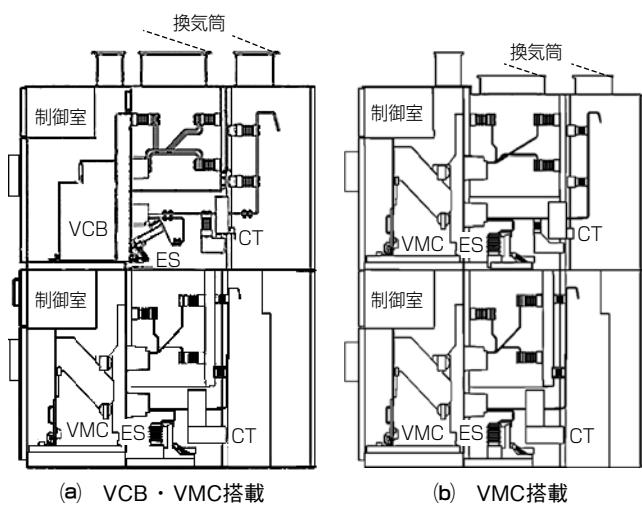


図2. 2段積スイッチギヤ



図3. 内部アーク時のアーク挙動解析

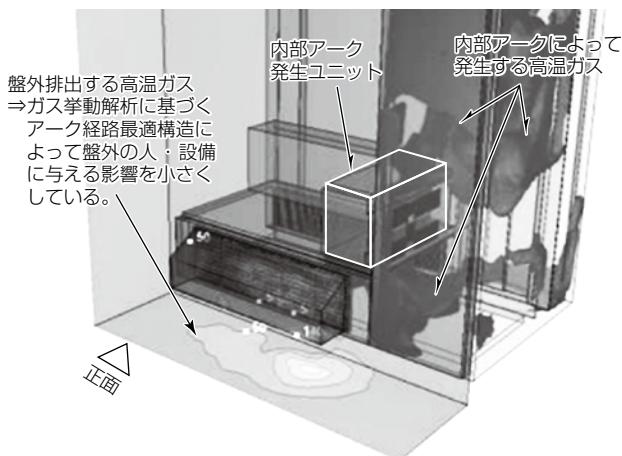


図4. D形MCCユニット内部アーク時の熱風流体解析例

MCCを内部アークに対応させるためには、高圧盤よりも過渡的に進む内部圧力変化と、事故点から移動するアークの経路を把握して、MCCの設計に反映することが必要になる。アーク挙動の知見蓄積と過渡現象の解析技術の向上によって、三菱電機の“D形”MCCを用いた実証試験では、IEC/TR61641の指針を満足するだけでなく、アーク挙動についても推測とよく一致していることが確認されている(図4)。MCCの内部アーク対応設計は、得られた知見の活用によって、より上流設計へのフロントローディング化が進むと推測する。

### 3. IoT・高機能化・高信頼性技術の進展

#### 3.1 受配電システム機器の高度化

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、求められている機能と代表的な実現技術を挙げる。

- (1) 使い勝手の向上(ユニバーサルデザイン技術(図5))
- (2) 環境性能向上(脱SF<sub>6</sub>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)
- (7) 災害・事故への耐性(二重化、部品交換容易な構造)

国内でも現在、電気の小売自由化が進められている中、今後は国内外でLCC低減の要求が、ますます高くなると想定できる。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、マルチリレーにオープンネットワークフィールドバスインターフェース(CC-Link等)を備え、受配電系統の監視・制御を可能にしてきた。

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になる。そのために



図5. ヒューマンエラー低減のためのユニバーサルデザイン例

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プラットフォームの親和性向上のための主な機能は次のとおりである。

- (1) データ収集容易性実現のためにデータ通信機能の無線化や、既存設備活用に適した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、これらの機能を搭載したマルチリレーや、設備の状態を把握するためのセンサ類の技術開発が進められていくと推測する。

### 3.3 電子機器の高信頼化技術

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発生すると重大事故につながる可能性が高くなる。万が一の機器故障による重大事故を防ぐため、定期的に設備の健全性を点検する必要がある。点検の際、設備を停電させる必要があるが、設備によっては十分な停電時間を確保できない場合がある。

そこで、図6に示すように故障を検出する回路を二重化(A/B系)したシステムが実用化されている。當時はA/B系の二重化回路で設備保護を実施する。さらに、保護リレーの特性点検を実施する場合は、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)で特性点検が可能なシステムにした。これによって設備運用中でも保護リレーの特性点検が可能になり、停電時に実施する作業が削減される。また、万が一、この点検によって故障が見つ

かった場合、保護リレーの故障検出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、さらに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にする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、電圧波形からFFT(Fast Fourier Transform)演算による特徴成分の検出及び逆相成分から評価式を用い、オンラインでモータの劣化度(寿命)を推定するシステムが実用化されている。

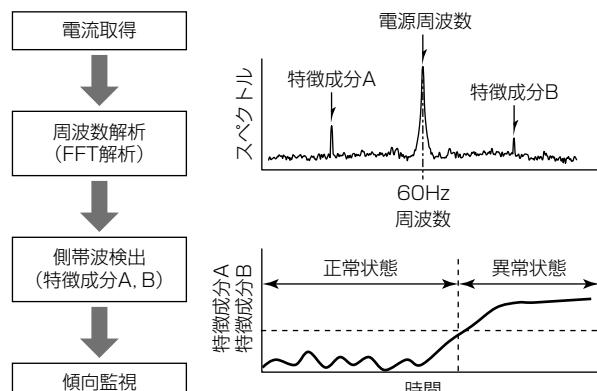


図7. モータCBM劣化診断技術の概念図

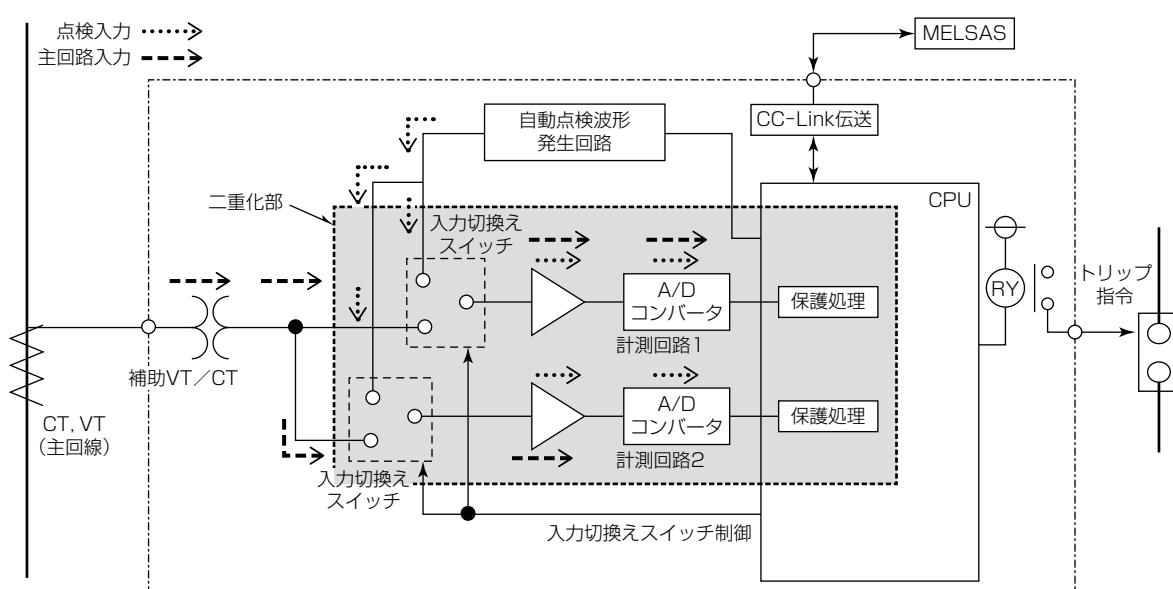


図6. 自動点検システムの構成と保護回路の二重化



図8. 劣化判定センサ

次に代表的なCBM技術を挙げる。

- (1) モータ機械系異常検出機能
- (2) レヤショート検出機能
- (3) モータ負荷トルク推定機能
- (4) 微少漏洩(ろうえい)電流検出機能

今後、診断信頼性の向上や診断対象負荷の拡大について、更に技術開発が進められていくと推測する。

### 3.5 絶縁物余寿命診断の簡便化

MT法に基づく絶縁物余寿命診断技術が実用化されて久しいが、LCCの最適化ニーズや設備更新による停電を計画的に実施するため、より信頼性を高め、かつ簡便に実施したいとの市場要求が高まってきている。そこで過去の診断結果と判定結果をデータベース化し、特定環境での絶縁物の劣化推定モデルを構築することによって、図8に示すような劣化判定センサを取り付けてデータ測定するだけで、技術者派遣不要で簡便に絶縁物余寿命診断を行う技術が実用化されている。今後、さらにIoTと融合したオンライン診断や、診断項目の拡大について技術が進展していくものと推測する。

## 4. 直流配電技術の進展

近年、地球温暖化対策の観点から、省エネルギーに対する需要が高まっている。ビルや商業施設でZEB(net Zero Energy Building)を始めとした省エネルギー建築の市場が拡大し、太陽光、蓄電池といった直流由来の創蓄電源の導入が促進されてきている。

また、国内では2018年の北海道胆振東部地震による北海道全域の停電、2019年の台風15号による千葉県を中心とした大規模停電など度重なる自然災害を起因として、BCP(Business Continuity Planning : 事業継続計画)意識が高まっている。BCP対策

のため、電源の安定供給(高信頼化)が求められるようになってきている。直流配電システムは、これらの課題を解決する配電方式として、注目を集めている。

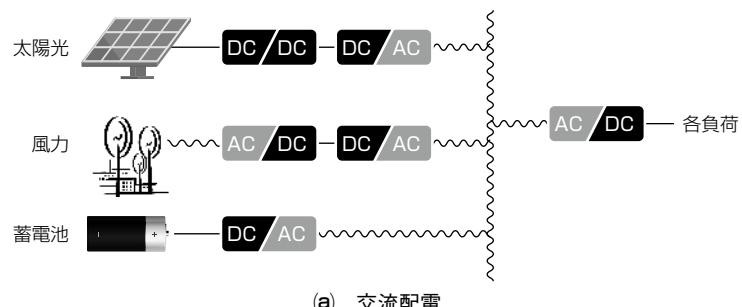
### 4.1 直流配電システムの特長と保護技術

直流配電システムは、電源(商用、太陽光、蓄電池等)から負荷までを直流の配電網で結ぶ構成であり、従来の交流配電に比べ、電力の変換回数を抑えることができるためエネルギー損失を減らすことができる(図9)。また、交流特有の周波数や位相や無効電力に関する考慮が不要であるため、各種電源を並列運転する際に比較的簡素な設備構成で安定的な電源を供給できる。構成要素が減少することで、設備全体の故障率が下がり、信頼性向上にもつながる。

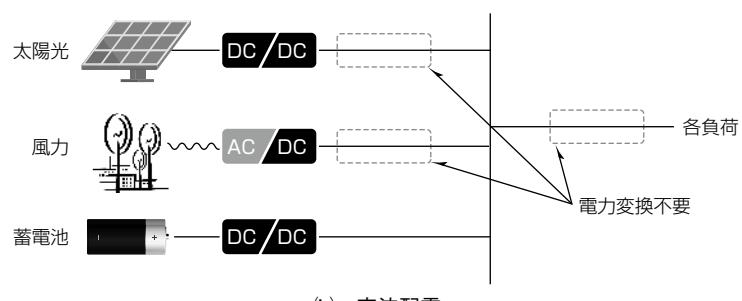
省エネルギーと設備の簡素化の実現を目指し、現在、鉄道会社と共に駅内配電システムの直流化に向けて取り組んでいる。まずは直流化することによる省エネルギー効果の定量的評価を行い、一例としてモデル駅での直流化による効果試算の結果、交流配電と比べて省エネルギー効果が見込めるこことを確認している。

今後、普及を進めていく上では、省エネルギーに加え、電源の信頼性向上に向けた短絡／地絡保護技術の確立が必要になる。

短絡保護では保護協調の確立に向け、充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流による健全回線の配線用遮断器やヒューズが誤遮断しないかをシミュレーションで確認するため、所内人工短絡試験波形を基に等価回路モデルを作成し、短絡事故発生時の放電電流を模擬できるシミュレーションモデルを確立した(図10)。

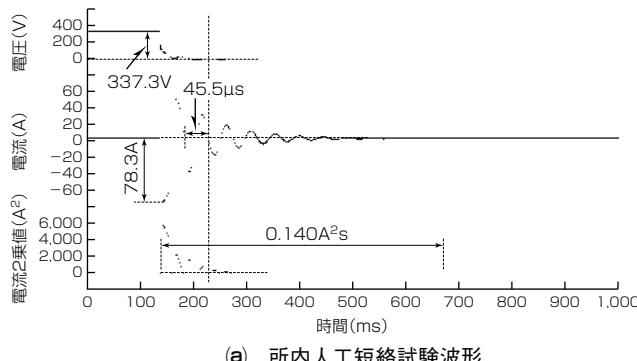


(a) 交流配電

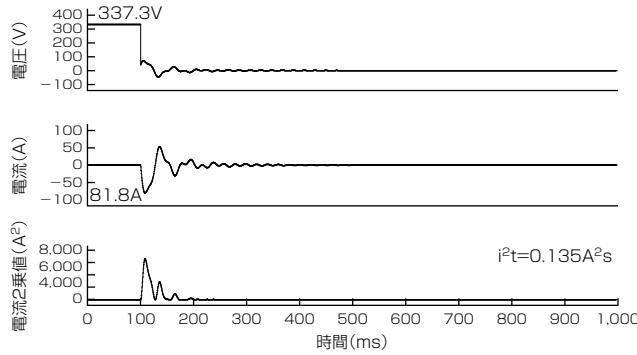


(b) 直流配電

図9. 電力変換回数削減イメージ



(a) 所内人工短絡試験波形



(b) 短絡シミュレーション波形

図10. 短絡波形の一例

また、地絡保護では不平衡電流保護装置(51G)を適用した場合で地絡回線数による誤不動作、健全回線数による誤動作の発生を防ぐ最大分岐回線数の算出法を導出した。

今後、直流配電は保護技術の進展によって、データセンターのほかに、ビル、駅、工場等へ適用されていくことが期待される。

#### 4.2 直流高速度遮断技術の進化

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。直流は交流に比べて遮断が難しく、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て、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たアーカ構成物質を拡散させることが容易であるのに対し、直流回路の場合は交流回路のように電流ゼロ点を持たないため、一旦発生したアーカを拡散することができない。

そのため直流回路では電流ゼロ点を強制的に作って遮断することになる。図11に交流遮断と直流遮断の違いを示す。

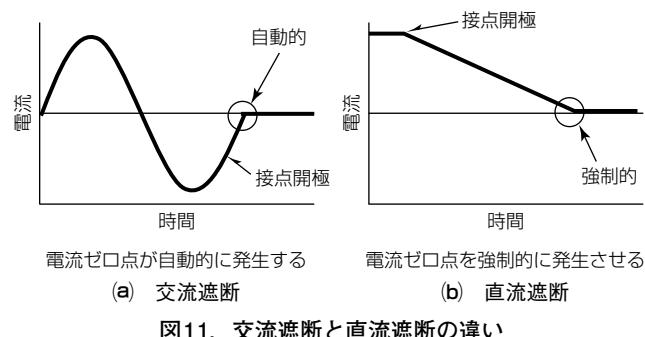


図11. 交流遮断と直流遮断の違い

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によって強制的に電流ゼロ点を作つ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つて遮断する転流遮断方式もある。

今後、省エネルギー・災害レジリエンス等のニーズ増大によって直流配電や直流遮断器の適用拡大・規格化議論が進んでいくと思われ、これに対応した新技術開発・製品化が今後更に進んでいくものと推測する。

## 5. む す び

受配電システム機器の技術展望を、最近の技術・製品動向を主体に述べた。

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、省エネルギー・環境負荷削減、電力安定供給などの社会的ニーズは今以上に高まると考えられる。特に大型自然災害等による地域全体への電力供給停止は、LCP(Life Continuity Planning: 生活継続計画)の中で、受配電設備の重要性を改めて認識させられた。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進み、直流配電技術を活用した蓄電システムと再生可能エネルギー電源の併用による高効率運用・省エネルギーの促進が予想される。また、IoTプラットフォームの親和性向上によるCBMや自動点検による保守作業の省力化、停電時間の短縮も進展すると予想されるなど、国内外を問わず顧客ニーズは多様化し、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、活力とゆとりある社会の実現に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 木村 透: 海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤ“MS-E”, 三菱電機技報, 91, No.11, 609~613 (2017)

# 海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS “HG-VG-A”

72.5kV C-GIS for Overseas Offshore Wind Turbine "HG-VG-A"

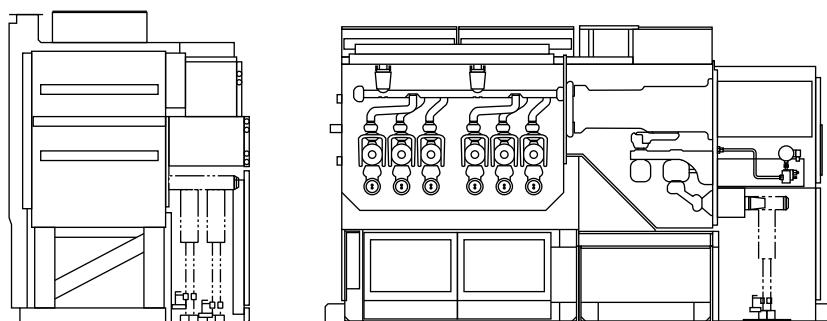
香川耕一\*  
Koichi Kagawa  
吉田忠広\*  
Tadahiro Yoshida  
白井 隆†  
Takashi Shirai

## 要旨

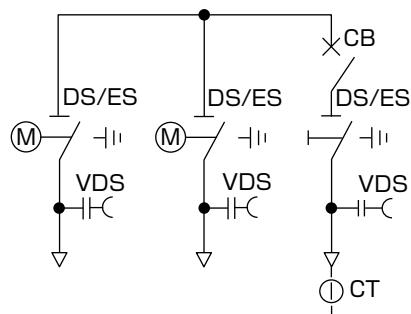
洋上風力発電用の風車に適用されるキュービクル形ガス絶縁開閉装置(Cubicle-type Gas Insulated Switchgear : C-GIS)は、風車の発電容量拡大に伴う系統電圧格上げ(36kVから72.5kV)への対応を求められており、三菱電機では風車への搭載に特化した海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS “HG-VG-A”を製品化した。

一般に広く適用される特高C-GISでは、それぞれ異なる回路に用いる盤を複数列盤して構成されていた。今回製品化したC-GISでは、風車のタワー内という限られた空間に設置し、さらに保守に必要な時間を極力短縮するために一体化された盤に必要な機能を集約することをコンセプトとして開発を行った。

機能集約、短時間設置を実現させるためには一つのガス区画に風車の発電機を保護する回路に用いるVCB(真空遮断器)1台、DS/ES(接地装置付き断路器)1台と風車間を連携する回路に用いるDS/ESを2台収納する構造を実現することが必要であった。以前に同定格の国内向けC-GISの開発で縮小化を行ったDS/ESを流用し、開閉器の配置刷新と圧力タンクの構造を見直すことで、一つの盤に合計4台の開閉器を収納して風車内のスペース制限内へ搭載可能なC-GISの大きさを実現した。また、内部アークに対応したパネル構造や海外規格に準拠したケーブル接続端末を採用することで、欧州の風力発電市場に適したC-GISにした。



洋上風力発電向け HG-VG-A の構造



風車に搭載するC-GISの単線図



洋上風力発電向け HG-VG-A

CB : Circuit Breaker, VDS : Voltage Detecting System, CT : Current Transformer

## 海外洋上風力発電向け風車への搭載に特化した72.5kV C-GIS“HG-VG-A”

風車の運用に必要な開閉器を一体化された盤に集約することによって風車へ搭載可能な外形寸法を達成した上で、設置及び保守点検に必要な時間の短縮を図った海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS “HG-VG-A”を製品化した。

## 1. まえがき

欧州では再生可能エネルギーの導入が促進されており、その中でも風力発電は単基発電量が大きい風車を洋上に建設する大規模な洋上風力発電プラントの整備が進められている。風車の発電容量拡大に伴って送電ロスを削減するために系統電圧の格上げも進められており、風車に用いられる変圧器、C-GIS等の機器や風車間をつなぐ連系ケーブルも36kVから72.5kVへの格上げが進められてきた。三菱電機では、その需要に対応するために海外洋上風力発電向け72.5kV C-GIS“HG-VG-A”（以下“HG-VG-A形C-GIS”という。）を製品化した。

本稿では、HG-VG-A形C-GISの概要及び採用技術について述べる。

## 2. HG-VG-A形C-GISの概要

### 2.1 洋上風力集電システムとC-GISの役割

図1は洋上風力集電システムの全体構成を示す。図のように風車は海底ケーブルによって直列に接続されて、風車で発電した電気エネルギーは洋上に設置された変電所に集められる。そのため複数の連系回路が洋上変電所から放射状に配置され、一つのプラントを構成する。集めた電気エネルギーは昇圧された後、海底ケーブルを介して陸上変電所へ送られる。図2では直列に接続された風車間の連系回路を、図3に風車に搭載するC-GISの単線図を示す。発電機で発生した電気エネルギーは変圧器で72.5kVまで昇圧され、海底ケーブルへ供給される。風車に搭載されているC-GISは破線で囲われた部分の回路を持っており、風車を保護するブレーカと海底ケーブル相互を接続及び断路の役割を担う。

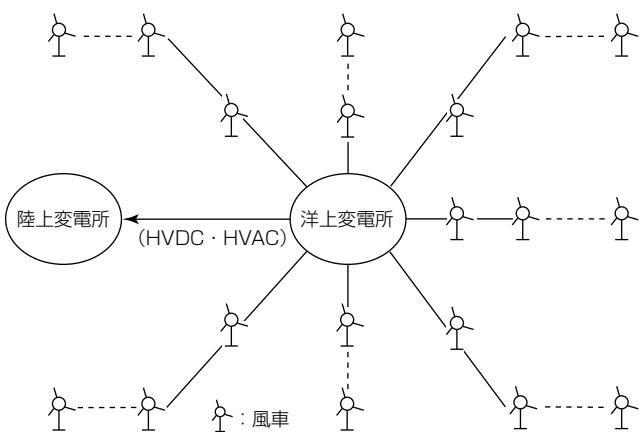


図1. 洋上風力集電システムの全体構成

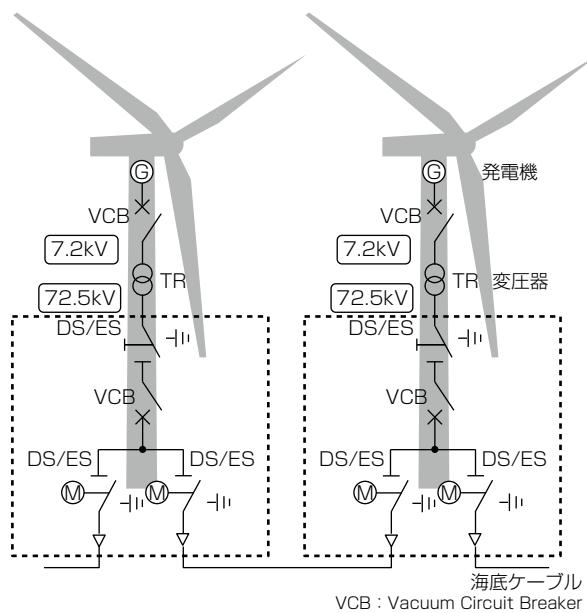


図2. 風車間の連系回路

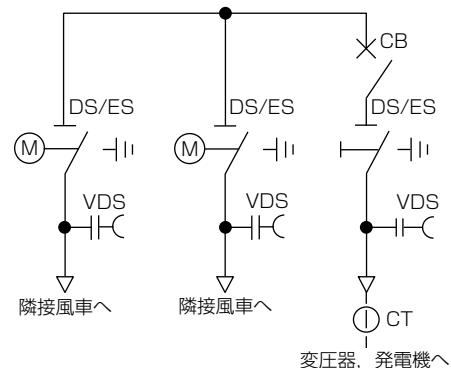


図3. 風車に搭載するC-GISの単線図

1章で述べた単基容量の増加に伴って、従来の系統電圧(36kV)では連系ケーブルの本数を増やす必要があった。連系ケーブル及びその敷設工事に要するコストはプラント建設に占める割合が大きいため、連系ケーブルの本数を増やすよりも系統電圧を格上げして本数を抑制することでコストを抑えられると判断され、最近導入されている6～10MW風車のプラントでは72.5kV採用が主流になっている。

### 2.2 風車搭載での制約とC-GISの構造

#### 2.2.1 風車内レイアウト

三菱電機がC-GISを供給した風車には設置スペースの制約があり、それをクリアするためにC-GIS構造の見直しを行った。C-GISはタワー内の比較的低い位置に設置されるが、風車内部レイアウト及びハッチ寸法の都合から幅4,200mm、奥行き1,600mmのスペースに2.1節で述べた回路を持つC-GISを収める必要があった。三菱電機では、既に製品化していた国内向け72/84kV C-GISを流

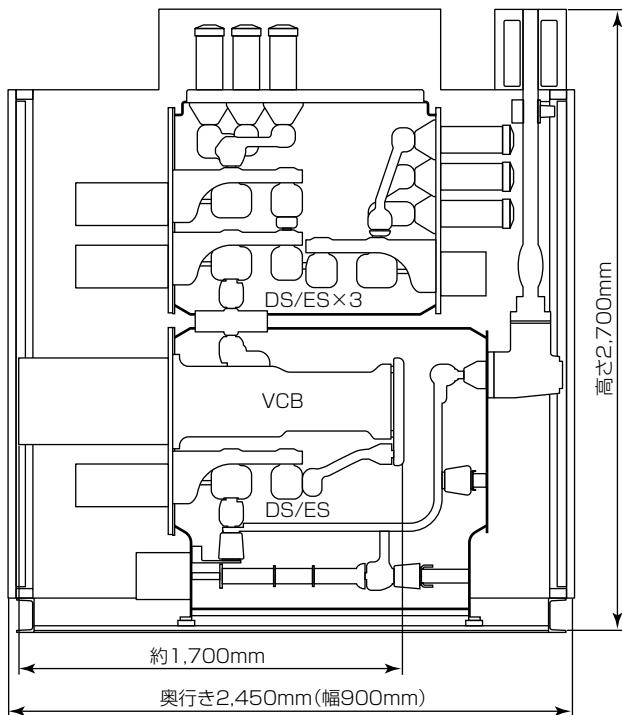


図4. 国内向け72/84kV C-GIS “HG-VG-A”の構造

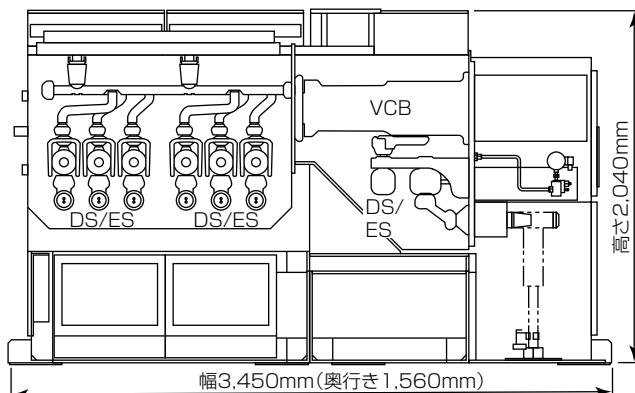


図5. HG-VG-A形C-GISの構造(つり金具除く)

表1. HG-VG-A形C-GISの仕様

項目	仕様
準拠規格	IEC 62271-203 IEC 62271-200(内部アーク)
定格電圧	72.5kV
定格電流	1,250A
定格周波数	50/60Hz
定格短時間耐電流	25kA・3s
封入ガス	SF <sub>6</sub> (六フッ化硫黄)
定格ガス圧力	0.05MPa-g(at20°C)

用して洋上風力送電向けに適用する構想があった。図4に構造を示す国内向け製品は1回路ごとに1面を構成しており、2.1節で述べた洋上風力発電向けC-GISの単線から3回路・3面の構成になることが想定された。しかし、幅及び奥行きの寸法は幅2,700mm、奥行き2,450mmと先述の風車内寸法制限の奥行き寸法を超てしまうため、C-GISの構造を見直す必要があった。C-GISの回路で最も寸法の大きい開閉器であるVCBは奥行き寸法が約1,700mmあり、VCB単体で風車内奥行きの寸法制限を超えていたため、国内向けC-GISでは奥行き方向に配置されているVCBを90°回転して幅方向に配置することでC-GISの奥行き寸法を短縮し、風車内の寸法制限に収めた。

## 2.2.2 コンテナ輸送

風車内部への設置で、C-GIS高さ寸法の制限はなかったが、欧州まで大量輸送に対応するためにはコンテナに収納する必要があった。コンテナ収納に際しては、C-GIS本体の高さだけでなく木製スキッドを用いたフォークリフトによる移動が必須になるため、それらを考慮して2,200mm以内にC-GIS本体の高さを抑える必要があった。そこでつり金具の縮小化やガス絶縁部の電界最適化によって高さ寸法の制限をクリアした。

図1の集電システムからガス区画の分割は不要と判断して、従来の構造では各回路及び回路同士を接続する母線が独立したガス区画を持っていたが、必要な3回路分の開閉器を一つのガス区画に収納することで各回路間の距離を

短縮してC-GISの幅寸法を最小化した。このようにしてHG-VG-A形C-GISは図5に示す構造を採用した。また、仕様は表1に示すとおりである。

## 3. HG-VG-A形C-GISの採用技術

今回製品化したHG-VG-A形C-GISで採用した主要な技術は、①機械的インタロック、②内部アーク対応、③海外規格に準拠したケーブル接続端末、④ENA(Energy Networks Association)規格への対応である。それらについて述べる。

### 3.1 機械的インタロック

今回は欧州市場で要求があるES(Earthing Switch)位置の機械的インタロックを備えた。その目的は、制御電源が消失している場合でもインタロックが確実に機能する必要があるためである。HG-VG-A形C-GISでは、ケーブルの接続端末を囲うケーブル室のカバーとDS/ESの操作装置をワイヤで機械的に接続することで、DS/ESの操作装置をES接続状態(回路が接地された状態)に操作した場合だけカバーの開放が可能になり、なおかつそのカバーが開放された状態ではESの接続解除及びDS(Disconnecting Switch)接続の操作を行えなくする機械的なインタロック機構にした。DS/ES操作装置とケーブル室の関係を図6に示す。

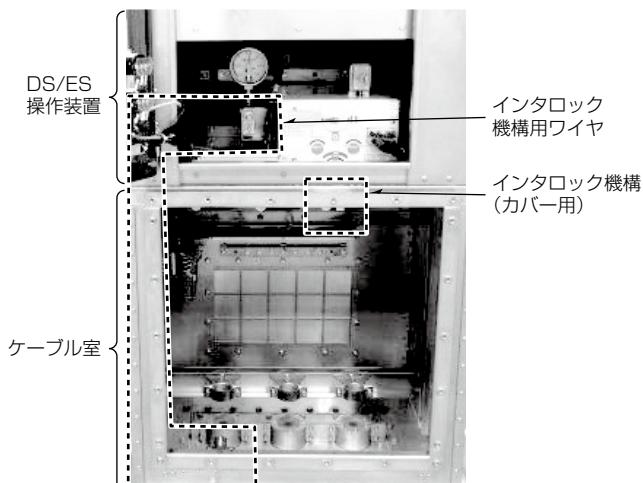


図6. DS/ES操作装置とケーブル室

### 3.2 内部アーク対応

C-GISの内部及びケーブルの接続端末付近で地絡又は相間短絡の事故が発生した場合、短絡によって発生したアークによる爆発(内部アーク)が起こる。仮に風車のメンテナンスを行っている際に内部アークが発生すると、生じた爆発によって作業員が危険にさらされる可能性があるため、洋上風力発電向けC-GISでは、IEC(International Electrotechnical Commission) 62271-200にあるAFLR相当の安全性の要求があった。AFLRとは、内部アークによって発生したアークガスの、C-GISの正面(F)・側面(L)・後面(R)への噴出を許容しないというものである。この要求に対して洋上風力発電向けC-GISでは、C-GIS内部で短絡事故が発生しても圧力タンク及び筐体(きょうたい)が破壊されることなく、発生したアークガスをC-GISの上方向へ噴出することで周囲の安全確保を可能にした。

C-GISに接続されるケーブルは、表面に接地層を持つ端末と、接地層を持つCVケーブルの組合せが主なので相間短絡は発生しにくいと想定されるが、IEC 62271-200ではケーブル室でも二相短絡条件での内部アーク対応が要求される。そのためケーブル室の筐体(きょうたい)には内部アークで発生する圧力を耐える構造を具備するとともに、ケーブル室をC-GIS前面に配置した関係でAFLRを満たすにはC-GISの幅方向から上方又は奥行き方向から上方へアークガスを噴出させる必要があった。図6に示すようにケーブル接続箇所は、ケーブル接続作業時のアクセスを考慮して各回路DS/ESの下方でC-GIS本体の前方に向いて配置されているため、図7に示すように金属のパネルで構成されたケーブル室の中で発生したアークガスを、同じく金属のパネルで構成して圧力タンク下方に配置したダクトと後方に配置した煙突を介して確実にC-GISの上方向へ噴出できる構造にしている。

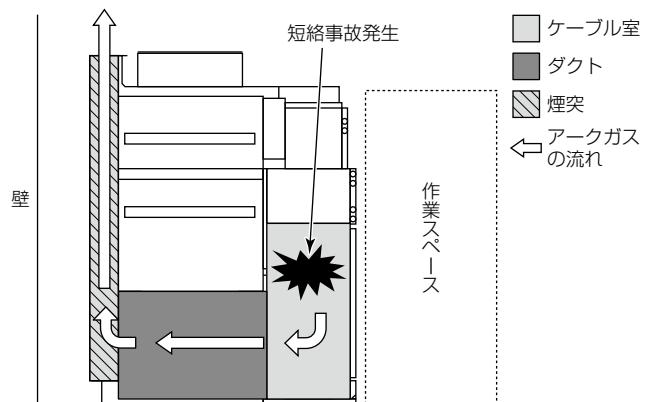
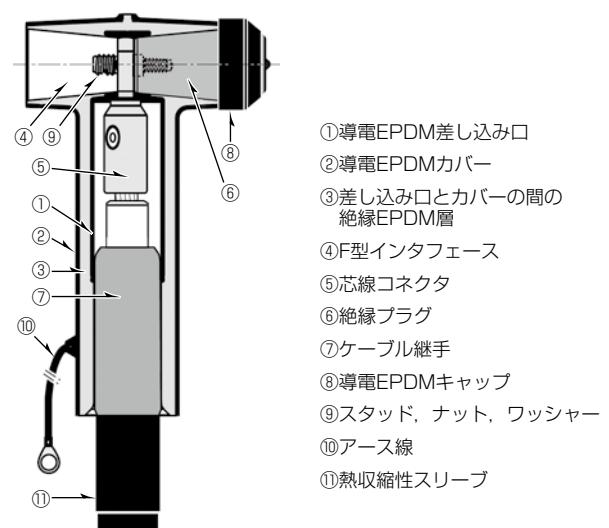


図7. 短絡事故発生時のアーカガス放出経路

### 3.3 海外規格に準拠したケーブル接続端末

C-GISへケーブルを接続する方法として、日本国内の72/84kVクラスではT型又はI型の終端箱が用いられることが多い。これに対して洋上風力発電システムに用いられるケーブルではEN(European Norm)規格(EN 50181)のF型インターフェースという端末が選定された(図8)。F型インターフェースは、24/36kVクラスの同規格C型インターフェース(DINともいう)の適用電圧を格上げしたものであり、ケーブル端末にはT型のコネクタが適用される。これは洋上にある風車内でのケーブル接続作業を短時間で完了させるための配慮から選定されている。三菱電機の洋上風力発電向けC-GISは、DS/ES下部にケーブル接続端末を手前方向に配置し、ケーブル施工時のアクセス性を確保している。ケーブル接続端末を収納するケーブル室は、ケーブル施工に必要な作業スペース(高さ)を確保しており、C-GIS本体から下方での作業が不要な構造にしている。



EPDM : エチレンプロピレンジエンゴム

図8. ケーブル端末<sup>(1)</sup>

### 3.4 ENA規格への対応

風車が英国圏内に建設される場合、搭載されるC-GISにENA規格(英国の電気製品に関する安全規格)への準拠を要求される場合がある。今回対応した主な内容について述べる。

C-GISの主回路について、単線や開閉器の状態及び回路の充電状態を視覚的に表示する要求があり、その対応を図9に示す。ここでは風車の発電機につながる回路を表示しており、単線を模擬した図に配置された表示器が各開閉器の操作に連動して開閉器の状態を表す。また、VDS(電圧検知器)の表示部も配置されており、当該回路の充電状態を表示している。

開閉器の状態表示は状態ごとに色分けを行う必要がある。また、開閉器の操作装置は操作する部分ごとに施錠できなければならない。それらへの対応を図10に示す。三位



図9. ENA規格対応の表示(主回路の単線)

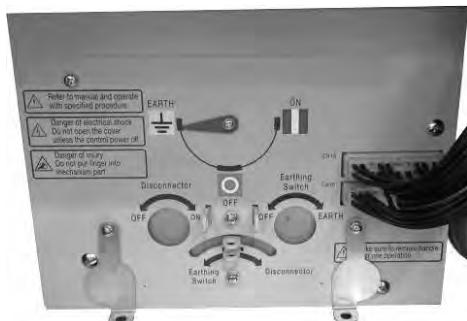


図10. ENA規格対応の表示(DS/ES操作装置)

置DS/ESの操作装置で、ES入、DS/ES切、DS入の状態をそれぞれ指定された色と記号で表示している。図の中央下寄りにはDS/ESを手動で操作する場合に操作ハンドルを挿入する操作口があり、その操作口に対してパドロックを施錠することで操作ハンドルが挿入できなくなるシャッターを設けている。

## 4. む す び

今回製品化した海外洋上風力発電向け 72.5kV C-GIS “HG-VG-A”について述べた。既に製品化されていた国内向け72/84kV C-GIS “HG-VG-A”的ユニット及び構成技術を流用して最適化することで、新市場へ投入できる製品が完成した。

洋上風力発電は欧州を中心にアジア、北米でも2040年頃まで導入が促進される見通し<sup>(2)</sup>であり、再生可能エネルギー普及のために更なる供給の拡大を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) Nexans : カタログ“High Voltage Accessories up to 72.5kV”
- (2) IEA : “World Energy Outlook 2019” Figure 14.12 (2019)

# 36kVキュービクル型ガス絶縁開閉装置 “HS-X-2”

36kV Cubicle-type Gas Insulated Switchgear "HS-X-2"

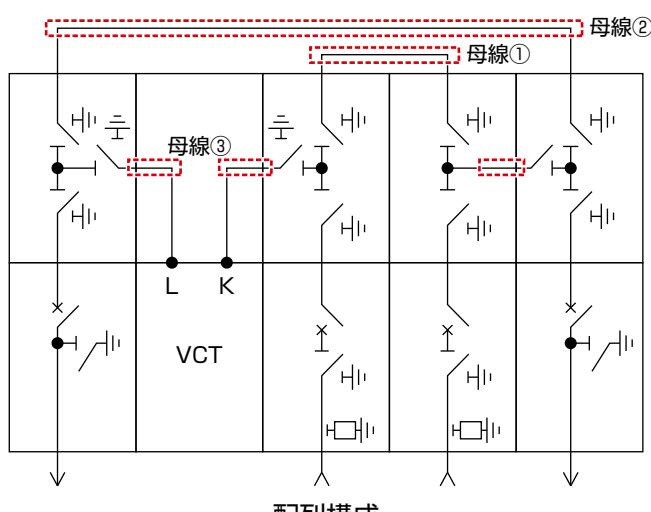
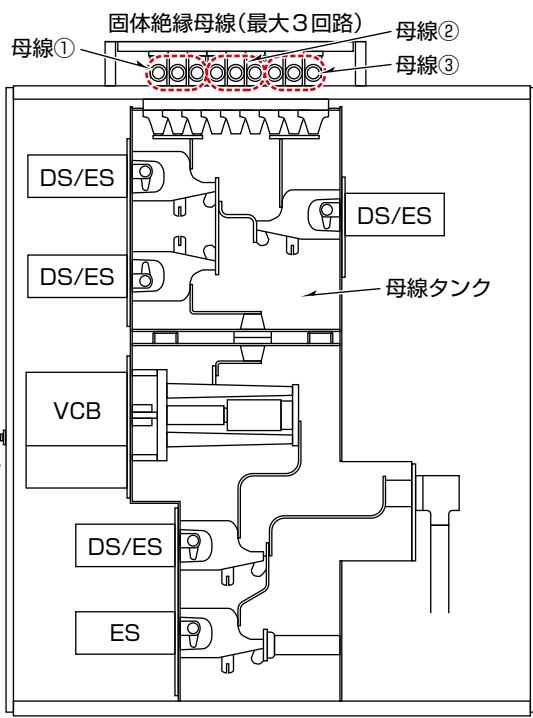
森 隆広\*  
Takahiro Mori  
井上直明\*  
Naoki Inoue  
大西健司†  
Kenji Onishi

## 要旨

国内特高受配電設備に適用される、キュービクル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)に対する設置面積縮小化及び高集積化の要望を受けて、今回、36kV C-GIS “HS-X-2”を開発した。運用中のVCT(Voltage Current Transformer)定期メンテナンス時の停電時間短縮要求に対応して、バイパス開閉器及び区分開閉器を追加した回路構成になった場合、従来の特高C-GISでは12面で構成されていた。今回の開発では、バイパス・区分開閉器付きであってもバイパス・区分開閉器なしの場合と同じ面数及び設置面積で構成できる高集積配列を開発コンセプトとして、開発に着手した。高集積配列を実現させるためには、C-GIS母線タン

クに母線用、バイパス用及び区分用の開閉器を最大3台収納し、かつ、隣接するC-GISと接続する母線を最大3系統配置する構造を実現することが必要であった。そのため、母線・バイパス・区分開閉器に用いられるDS/ES(接地開閉装置付き断路器)の小型化に取り組むとともに、36kV定格の絶縁性能を持つ固体絶縁母線を適用した。

この開発によって、バイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2パンク回路をバイパス・区分開閉器なし回路と同じ設置面積で構成することが可能になり、配列全体の設置面積を従来機種比で約40%削減できた。



VCB : Vacuum Circuit Breaker, DS : Disconnecting Switch, ES : Earthing Switch

## 高集積化を実現した36kVキュービクル型ガス絶縁開閉装置“HS-X-2”

従来機種では12面で構成されていたバイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2パンク回路を、5面で構成できる技術を搭載したC-GIS “HS-X-2”を新規開発した。左の図はHS-X-2受電盤の構造、右の図はHS-X-2で適用したバイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2パンク回路の配列(5面構成)である。

## 1. まえがき

電力需要家の特高受配電設備には、複数の機器を一つの圧力タンク内に集約した三相一括構成のC-GISを適用することが多い。近年のC-GISの更なる縮小化及び高集積化の要望を受けて、“HS-X-2”の開発を行い、2020年に市場投入を計画している。

本稿では、HS-X-2の概要及び採用技術について述べる。

## 2. HS-X-2の概要

### 2.1 HS-X-2の配列構成

特高受配電設備で採用されることが多い2回線受電1VCT2バンク回路のうち、特に運用中での停電時間短縮の要求が高い場合に適用されるバイパス付き回路を構成する場合、バイパス開閉器及び区分開閉器を追加する必要がある。従来製品では機器の追加に合わせて面数が増加するため、設置面積が大きく市場競争力を失っていた。そこで、今回開発したHS-X-2は、次の構想で構造面の検討を行った。

- (1) バイパス・区分開閉器付き回路であっても、バイパス・区分開閉器なしと同じ設置面積(5面構成)での構成を実現する。
- (2) 2系統のうち片側の系統を運転しながら、もう片方の系統を更新できる配列構成にする。

このように、開発コンセプトの段階で配列集約を考慮したC-GIS構成として図1に示す配列構成を設定し、これらの実現を念頭に開発着手した。

### 2.2 HS-X-2の構造

HS-X-2の配列構成(図1)に対して、従来機種“HS-X”では実現できないのは次の3点であった。

- (1) 母線タンク内に母線用開閉器及び区分開閉器を最大3台収納
- (2) 隣接するC-GISと接続する母線(図1の破線部)を最大3系統配置
- (3) 母線用開閉器での多数回開閉仕様への対応

(1)は、母線タンクに収納するDS/ES単体の縮小化及びタンク前面・背面の両方からDS/ESを収納する構造を採用することで実現した。また、(2)を実現するために、従来24kV定格で適用事例が多い接地シース付きの固体絶縁母線と同じコンセプトで36kV定格品を採用した。さらに(3)については、開閉器の可動ブレードにスリットを入れて、DS/ES操作力を低減し、DSの耐用回数を向上させること

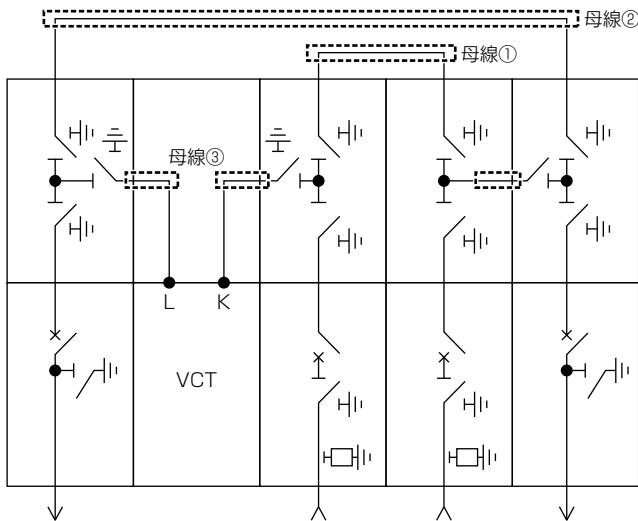


図1. HS-X-2の配列構成  
(バイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2バンク回路)

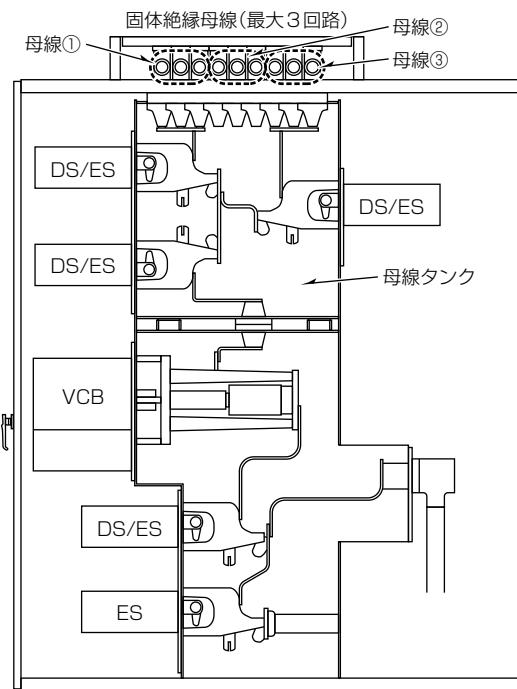


図2. HS-X-2の受電盤構造

で実現した。

これらの対応を含めて図2に示すHS-X-2の受電盤構造を採用した。図2の母線①～③は、図1の母線番号と対応している。併せてHS-X-2の仕様を表1に示す。

## 3. HS-X-2の採用技術

今回開発したHS-X-2で採用した主要な技術は、①固体絶縁母線の採用、②DS/ESの低接圧化、③DS/ESの高集積化、④DSの電流開閉性能の確保である。また、HS-X-2の遮断器構造についても述べる。

表1. HS-X-2の仕様

対象	項目	仕様
C-GIS	準拠規格	JEM 1425 : 2011
	定格電圧	36kV
	定格電流	630A
	定格周波数	50/60Hz
	定格短時間耐電流	25kA, 1s
	封入ガス	SF <sub>6</sub> ガス
	ガス圧力(at20°C)	定格: 0.03MPa 警報: 0.02MPa
遮断器	耐震性	JEM - TR 144 水平3.92m/s <sup>2</sup>
	準拠規格	JEC - 2300 - 2010
	種類	真空遮断器
	定格遮断電流	25kA
	操作機構	電動ばね操作
	定格遮断時間	3サイクル
	断路器／接地開閉器	準拠規格 JEC - 2310 - 2014 操作機構 電動／手動

JEM: 日本電機工業会規格, SF<sub>6</sub>: 六フッ化硫黄,  
JEC: 電気規格調査会

### 3.1 固体絶縁母線の採用

従来のガス絶縁母線方式のC-GISの場合、相間及び対地間の絶縁距離確保が必要であるため、縮小化には限界があった。また、工場内の組立て・解体及び現地客先での据付け・増設作業で、母線組立て後のガス処理(ガス回収、真空引き、絶縁ガス封入)工程が必要になるため、作業時間の短縮が困難であった。これに対して、今回開発したHS-X-2で採用した固体絶縁母線は、シリコーンゴムで形成された絶縁層、絶縁層内面に導電ゴムで形成した電界緩和シールド、絶縁層の表面に導電ゴムで形成した接地シースで構成している。固体絶縁母線間には絶縁距離を設ける必要がないため、母線の高密度配置を可能にした。また、タンク上面に母線を集約したため、現地作業スペースを集約できる。さらに現地据付け時のガス処理が不要であるため、据付け作業時間を短縮できる。

図3にHS-X-2での固体絶縁母線の接続例を示す。固体絶縁母線は、HS-X-2母線タンク上部に設置されている専用ブッシングに接続アダプタを取り付けて、接続アダプタ間に母線を配置する。ブッシングは図3に示すように相方向及び奥行き方向に斜めに合計3列配置し、内部導体の電界配置最適化・簡略化を考慮することで、母線タンクでのブッシング及び高電圧導体配置の高集約化を実現している。最終的に、図3に示すように固体絶縁母線を母線タンク上面に3系統配置できる構成を実現した。

### 3.2 DS/ESの低接圧化

HS-X-2のDS/ESユニットの接触部構造を図4に示す。DS/ESユニットの可動部には刃形開閉器構造を採用した。接地端子又は断路器端子に2枚1対のDS/ES可動ブレー

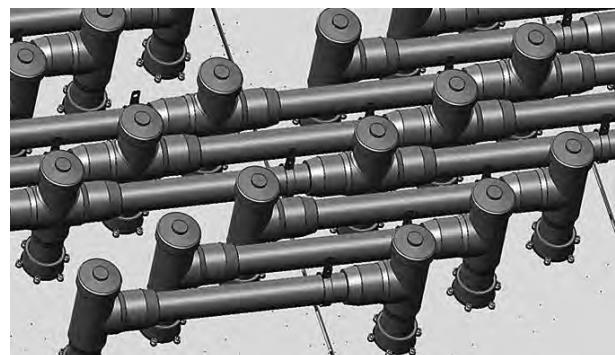


図3. 固体絶縁母線の接続例

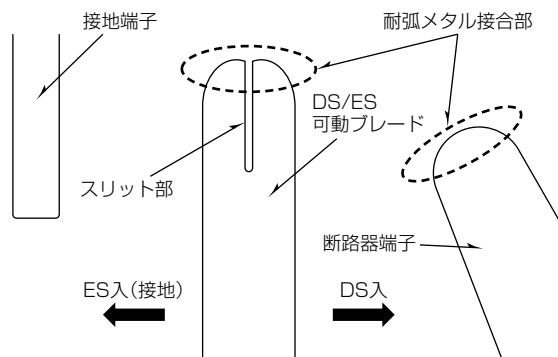


図4. DS/ESの接触部構造

ドを噛(か)み込ませて端子両面の2点以上で接触させ、外付けのねばねによって接触部に接圧荷重を与える構造である。従来機種では、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大きな接圧荷重が必要であり、DS/ESユニットのDS入の状態又はES入(接地)操作で必要な操作力が大きかった。

これに対してHS-X-2のDS/ESユニットでは、図4に示すようにDS/ES可動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点以上で接地端子又は断路器端子に接触する多点接触構造になり、1点当たりに流れ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、結果的に従来機種に対して接圧荷重を35%低減できた。

また、HS-X-2では接触部の低接圧化を図ったことで、従来機種に対してDS/ESユニット入切に必要な操作力も低減できた。その結果、DS機構部の耐用回数が向上し、従来機種(DS開閉回数2,000回仕様)に対して、HS-X-2は交通市場向けの多数回開閉仕様(DS開閉回数10,000回仕様)に対応している。

### 3.3 DS/ESの高集積化

図5(a)に従来機種を列盤した場合の模式図を示す。受電盤・母線区分盤・VCT盤・フィーダ盤からなる12面でバイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2パンク回路

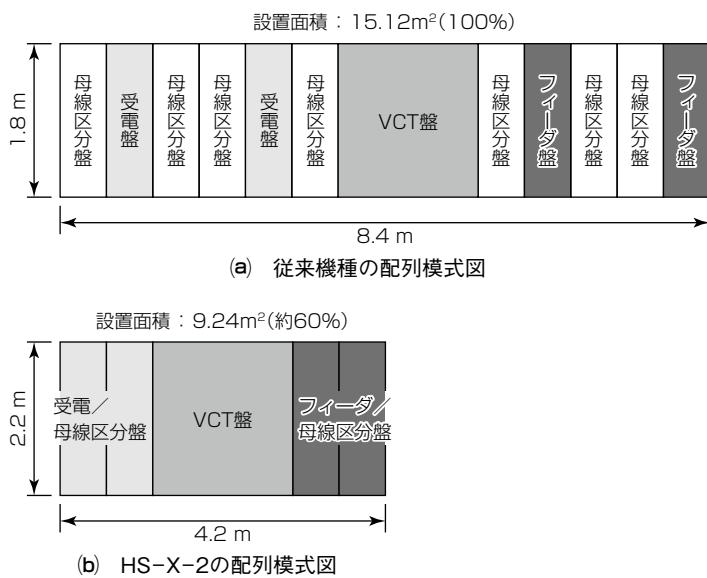


図5. 配列構造の比較  
(バイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2バンク回路)

を構成している。同様な回路をバイパス・区分開閉器なしの配列と同じ設置面積(5面)で構成するために、母線区分盤の機能を受電盤・フィーダ盤に集約する構成を検討した。機能集約のためには、図2に示すようにC-GIS母線タンク内に最大3台のDS/ESユニットを収納する必要がある。DS/ESユニットの小型化に当たり、電界解析を用いて充電部位の端部Rの最適化、相間・対地間・極間寸法の最適化を実現した。これによってHS-X-2では、図5(b)に示すようにバイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2バンク回路を5面で構成し、図5の従来機種に比べて設置面積が約40%縮小した。

### 3.4 DSの電流開閉性能確保

回路内のVCT盤では、バイパス回路を設けて一方の母線だけを停電させてVCTの交換を行うことを想定しており、DS/ESを用いてVCTループ電流を遮断する必要がある。電流遮断時にDS/ES可動ブレードと断路器端子間に発生するアーケでDS/ES可動ブレードが溶融しないよう、断路器端子と係合し始める図4の破線部に示すブレード先端部と断路器端子に耐弧メタルを接合している。バイパス回路へ切り替える際のアーケの発生点を銅製のブレード上から耐弧メタル上に移動させることで、ブレードの損耗を抑制している。これによってDSのループ電流開閉性能を確保でき、バイパス回路を用いることで停電の伴わないVCTの交換が可能になったため無停電運用が実現できる。

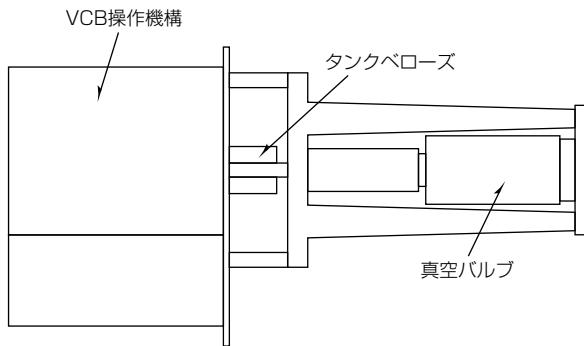


図6. 真空遮断器

### 3.5 遮断器ユニット

HS-X-2には図6に示す電動ばね操作式の真空遮断器を搭載している。開閉回数10,000回の仕様に耐え得る強度設計を実施した。また遮断器の可動するガスシール部にはベローズを採用し、気密信頼性を高めている。タンクベローズ(タンク内と気中との気密可動部のベローズ)、及び真空バルブ内のベローズ(真空バルブとタンク間の気密可動部に使用)のベローズ形状を一致させることで、タンク内の温度変動に伴ってガス圧力が変動した場合でも、真空バルブの自閉力が変動しない構造にしており、温度変動に対して高い均一性を持つ。

## 4. むすび

今回開発した36kV C-GIS“HS-X-2”的仕様・構造及び採用技術について述べた。固体絶縁母線の適用、電界解析を用いた充電部品の端部Rの最適化、相間・対地間・極間寸法の最適化によって、母線用開閉器・区分開閉器の高集積化を実現し、バイパス・区分開閉器付き2回線受電1VCT2バンク回路(現行12面)をバイパス・区分開閉器なしの回路と同じ据付け面積(5面)で実現した。これによって、配列全体の設置面積を従来機種に対して約40%削減できた。

また、可動ブレードにスリットを設けることでブレード接触部を低接圧化し、DS/ES操作力の低減を図り、交通市場向けのDS10,000回開閉仕様に対応した。さらに、可動ブレードと断路器端子へ耐弧メタルを接合することによってDSのループ電流開閉性能を確保している。

今回達成したDS/ESの集積化、固体絶縁母線の採用、DS開閉回数の向上を基本に、36kV受配電設備への適用拡大を進めていく。

# 海外市場向け7.2／12kVスイッチギヤ “MS-E形”のシリーズ化

濱田達哉\*  
Tatsuya Hamada  
木村 透\*  
Toru Kimura

*Creation of Series of 7.2/12kV Switchgear "Type MS-E" for Overseas Market*

## 要旨

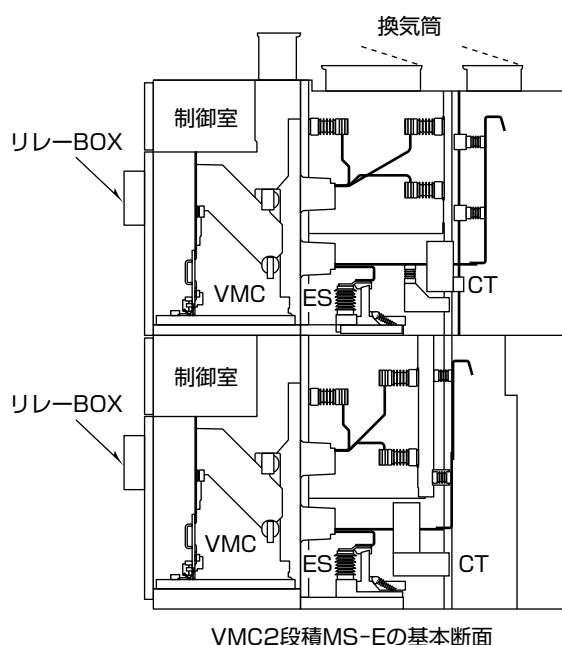
受配電システムを取り巻く市場はグローバル化が進展しており、産業の発展が著しい新興国を中心に電力、社会インフラ需要が増加し、大規模な設備投資がある一方で、スイッチギヤを含む電気設備全体の建設コストを抑制する目的で配列サイズ縮小化の要求がある。これに対して三菱電機は、海外市場向け7.2／12kVスイッチギヤ“MS-E形”で国際規格(IEC(International Electrotechnical Commission)62271)に準拠し、真空遮断器(VCB)を2段積とすることで配列サイズを縮小化した“VCB2段積MS-E”を市場投入している。

今回、モータフィーダ等の多数回開閉が必要な負荷へ対応するために、真空電磁接触器(VMC)と電力ヒューズを組み合わせたVMCユニットを搭載するシリーズ製品

“VMC2段積MS-E”を開発した。また、多数の制御機器の収納要求に対して、制御室の拡張を行った。

VMC2段積MS-Eの主な特長は次のとおりである。

- (1) VMCを2段積構造とすることで、モデル配列(従来製品10面構成)で、保守スペースを含む設置スペースを従来比で約30%削減した。
- (2) VMCユニット及び固定枠構造を最適化することで、VCB2段積MS-Eとユニットの挿入／引き出し操作、ES(Earthing Switch)の開閉操作のインターフェースを統一した。
- (3) マルチ電子リレーを搭載したリレーBOXを各フィーダの正面扉に設置することで、制御機器の収納効率を向上させた。



VMC2段積MS-Eの列盤

CT : Current Transformer

## VMCユニットの2段積化及び収納制御機器数増加を実現したスイッチギヤ“MS-E形”

VMCユニットを2段積化することで、モデル配列で保守スペースを含む設置スペースを従来比で約30%削減できるスイッチギヤMS-E形を開発した。VMCユニット及び固定枠構造の最適化を行うことで、VCB2段積MS-EとESの開閉操作のインターフェースを統一した2段積構造を実現した。また、リレーBOXを各フィーダの正面扉に設置することで、制御扉・制御室に配置できる制御機器の数を大幅に増加させた。

## 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。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、当社は海外市場向け7.2/12kVスイッチギヤ“MS-E形”で、VCBの2段積化によって配列サイズを縮小化したVCB 2段積MS-Eを市場投入している。更なる市場の要求として、電動機等の始動・停止回数が頻繁に行われるフィーダ(モータフィーダ)等の多数回開閉が必要な負荷への対応がある。そこで、この要求に対して、多数回開閉が可能なVMCと電力ヒューズを組み合わせたVMCユニットを2段積化したシリーズ製品“VMC 2段積MS-E”を開発した。

また、市場では配列サイズの縮小化の要求がある一方で、多数の制御機器の収納要求もある。そこで、従来1段目の制御室に配置していたマルチリレーをVCB及びVMC室の正面扉に搭載し、制御室に配置可能な機器数を大幅に増やすことで、幅広い顧客のニーズへの対応を可能にした。

本稿ではVMC 2段積MS-Eの概要及び採用技術について述べる。

## 2. VMC 2段積MS-Eの概要

### 2.1 VMC 2段積MS-Eの配列構成

今回開発したVMC 2段積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、VMCユニットを2段積化することで設置スペースの削減を行った。設置スペースを削減することで、電気室全体の建設コストを削減できる。また、配列サイズ縮小(面数削減)によって、据付け作業時間の削減や輸送費用の削減も期待できる。図1にVMC 2段積MS-Eのフィーダ盤の断面図及び単線図を示す。

### 2.2 VMC 2段積MS-Eの構造

開発品では図1で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回路分を収納している。主母線は上下分割構造とし、VMC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にした。ESとVMCの配置関係は、上下段で同じになるように構成し、操作性を考慮してES操作位置をVMCの下方に配置している。また、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。さ

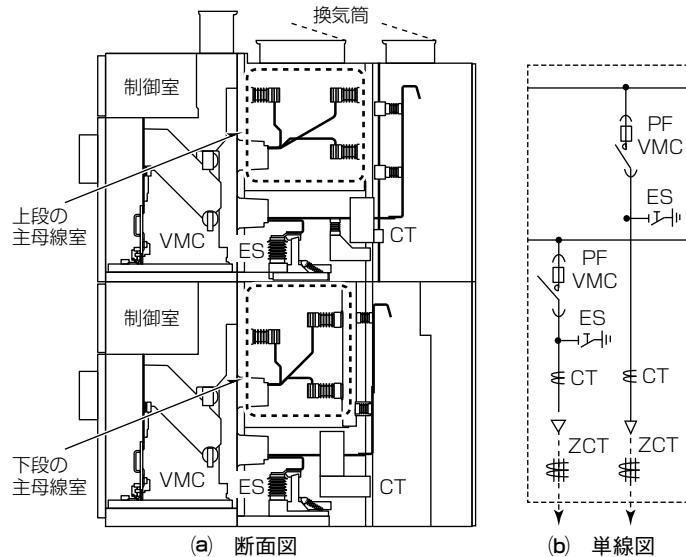


図1. VMC 2段積MS-Eのフィーダ盤の断面図及び単線図

らに、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)を実現している。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。2段積MS-Eの仕様を表1に示す。

図2に従来品と開発品の正面及び断面比較を示す。従来品は1面に2フィーダを横並びに配置したVMC盤であり、標準外形は1,200(W) × 1,500(D) × 2,600(H)(mm)である。これに対してこの製品はVMCを2段積化することで、標準外形を800(W) × 2,200(D) × 2,600(H)(mm)とし、縮小

表1. 2段積MS-Eの仕様

盤種	VCB盤	VMC盤
準拠規格	IEC62271-200	
定格電圧	7.2/12kV	7.2kV
定格遮断電流	25.0, 31.5, 40.0kA	
定格短時間耐電流	25.0, 31.5, 40.0kA-3sec	
定格母線電流	3,150A	
定格分岐電流	1,250A	400A
定格商用周波	20/28kV(1 min)	20kV(1 min)
耐電圧	雷インパルス 60/75kV	60kV
制御電圧	DC: 100/110V	
定格周波数	50/60Hz	
IAC級(内部アーケ)	AFLR 40kA-1sec	
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°C(平均温度35°C)
天井高さ	4.4m以上	
アクセス方式	FR	

IAC : Internal Arc Classified, FR : Front Operation/Rear Maintenance

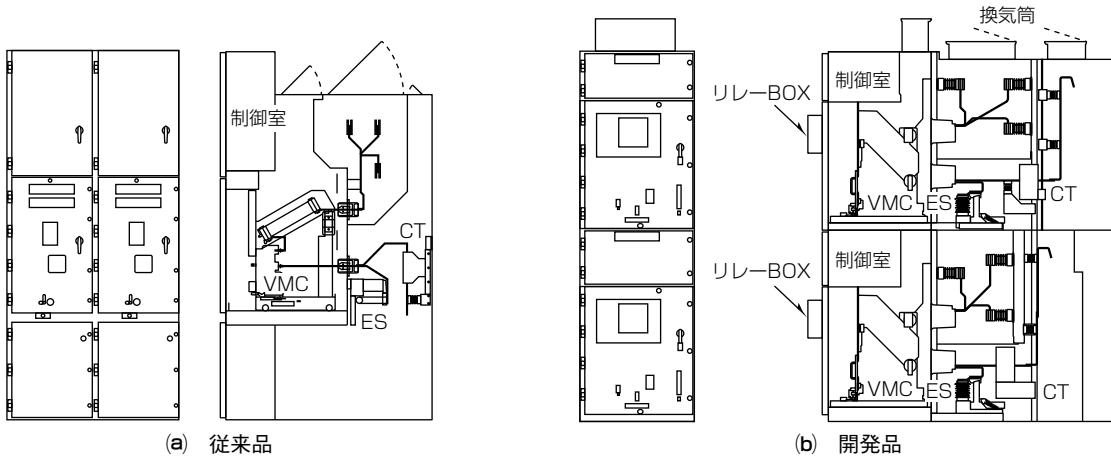


図2. 正面・断面の比較

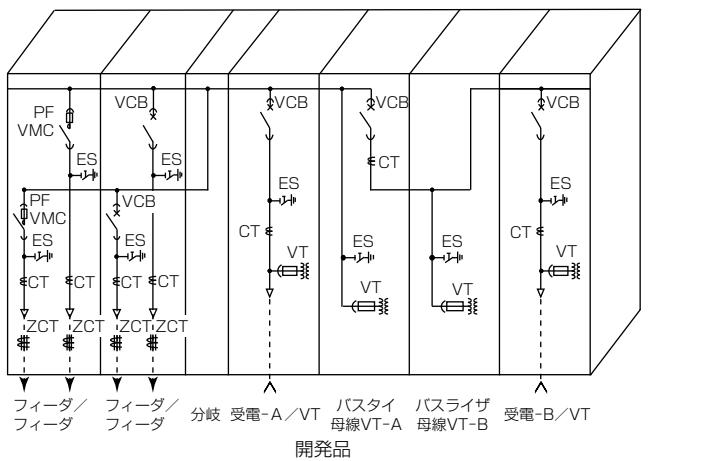
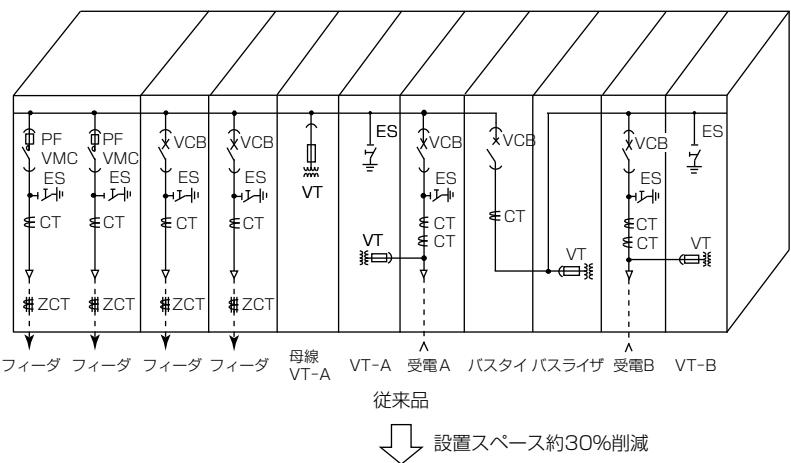


図3. モデル配列での設置スペースの削減

化を実現している。また、配列サイズでも、フィーダ盤はVCB及びVMC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設置スペースを約30%削減した(図3)。2段積構造は、熱流体解析の精度向上による放熱性能確保の技術と、圧力解析及び熱風流れ解析の精度向上によるアークブルーフ性能の技術の確立によって実現可能にした<sup>(1)</sup>。標準断面は図2に示す。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。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。

### 3. VMC 2段積MS-Eの採用技術

#### 3.1 VMCユニットの2段積化

電動機等の始動・停止が頻繁に行われるフィーダ(モータフィーダ)では、開閉保証が1万回のVCBよりも、25万回の開閉保証及び600回/時の開閉頻度に対応したVMCが採用されるケースが多い。また、海外市場では、メンテナンスの容易性を考慮して、移動式(引き出し式)のVMCの需要が高い。さらに、2章で述べたとおり、配列サイズの縮小の要望もある。そこでこの市場ニーズに対応するため、2段積構造に対応可能なVMCと電力ヒューズを組み合わせた移動式VMCユニットを開発した。また、VMCフィーダに最適なESを選定・採用した。それらの技術について次に述べる。

##### 3.1.1 外部操作引き出し機構対応VMCユニット

IEC 62271-200では、盤内の短絡事故等によって発生した高温高压ガス(以下“ホットガス”という。)からの安全性を確保するために、扉を閉めた状態で移動式の開閉機器(ユニット)を断路・試験位置から接続位置へ移動させる機能要求がある。そこで、VMC 2段積MS-Eでは外部操作引き出し機構をVMCユニットに標準装備とした。VMC

ユニットを図4に示す。VMC 2段積MS-Eの外部操作引き出し機構は、従来製品の回転方式とは異なり、カムスライド方式を採用している。これによって、スイッチギヤの扉を閉めた状態で、操作ハンドルを①挿入、②横方向へスライド、③ハンドルを抜くという3ステップでVMCユニットを容易に断路・試験位置から接続位置へ移動できる。引き出し操作の様子を図5に示す。これによって、ホットガスから操作者の安全性を保つのはもちろんのこと、VMCユニットの出し入れ時間の短縮やスイッチギヤ据付け時の試験時間の短縮も可能になった。また、外部操作引き出し機構では、作業者の安全を考慮したインタロックが備えられ、同時に操作性にも配慮している。まず、VMCユニットが接続位置にあるときは、外部操作引き出し機構と扉で、扉の開閉を防止する機械的なインタロックを設けており、運転中に誤って扉を開いた状態で作業者が操作することも防止している。また、接続位置でVMCが運転中(閉回路時)は、盤外から外部操作を行うことを防止する機械的なインタロックを設けており、運転中に作業者が誤ってVMCユニットを回路から引き外せない構造にしている。さらに、VMCユニットの外部操作引き出し機構の操作イ

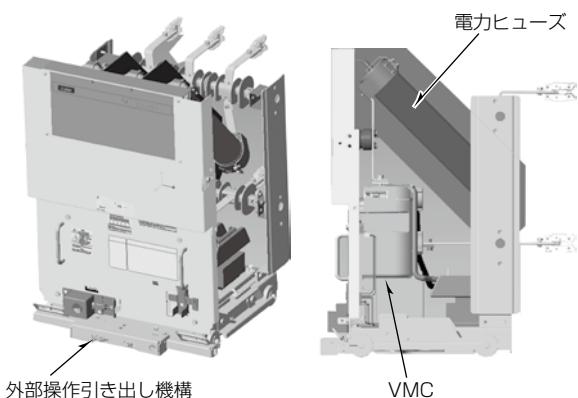


図4. VMCユニット

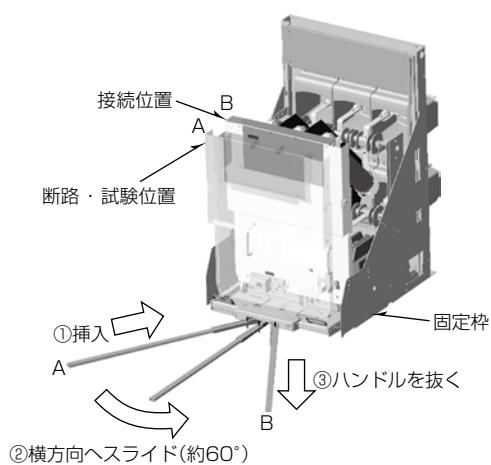


図5. VMCユニットの引き出し操作の様子

ンタフェースは、VCB 2段積MS-Eと同じ構造にしているため、VCBとVMCユニットで同一の操作ハンドルを使用し、同様の手順で移動操作ができるようになっている。これによって、配列での付属部品の削減や、作業者の操作誤りを防止している。

### 3.1.2 接地開閉器(ES)

海外市場では、主回路の保全及び保守作業でアクセスする人と電気機器を守るために、当該主回路の電位を接地母線に放電し、無電圧状態を維持させるESの取付け要求があるが、VMCフィーダとVCBフィーダでは要求されるESの性能が異なっている。そこで、VMC盤では、VCB盤とは異なる、VMCフィーダに最適なESを選定・採用した。また、ESの接点開閉動作を行う機構(可動軸を動かす機構)にVCB盤で使用しているES操作機構を接続できるよう、リンク機構を新規開発することで、VCB盤とVMC盤で異なるESでありながら、同一の操作ハンドルを使用し、同様の手順で移動操作ができるようになっており、開閉操作のインターフェースの統一を実現している。図6に、ESの開閉操作の様子を示す。これによって、配列での付属部品の削減や、作業者の操作誤りを防止している。

### 3.1.3 固定枠

2段積MS-Eの配列で、VCB及びVMCのフィーダ数が奇数であった場合、VCBとVMCユニットの混載(2段積)ができなければ、VCB盤とVMC盤それぞれの盤が必要になり、配列サイズが拡大する一因となる。そこで、VMCユニットのヒューズとVMCの配置の最適化を行った。また、VCB盤とVMC盤の固定枠部品の共用化を図り、固定枠の外寸を同一にした。固定枠は図5に示す。その結果、各区画を同スペースかつ同部品で構成することを実現し、VCBとVMCユニットを同じスイッチギヤ中に段積で対応

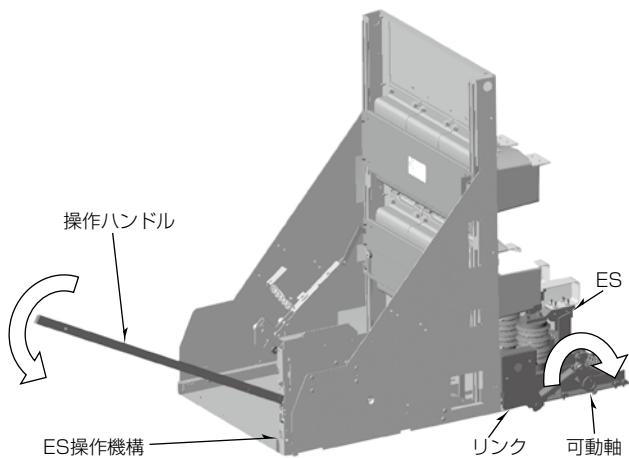


図6. ESの開閉操作の様子

可能にした。これによって、奇数フィーダのモデル配列で、保守スペース含む設置スペースを約50%削減した(図7)。

図8にVCBとVMCユニットを搭載した2段積MS-Eの断面図を示す。

### 3.2 制御機器の収納量の拡張

スイッチギヤの市場では、配列サイズの縮小化要求がある一方で、多数の制御機器の収納要求がある。従来の2段積MS-Eで採用していた1段目の制御室扉に上下のフィーダ回路用マルチ電子リレーを集約した構造の場合、当該扉の裏面に制御機器を取付けできなかった。また、各フィーダ回路で使用する制御機器が1段目、2段目の制御室にまとめて配置されるため、各制御室間で制御機器同士の渡り線が多量に発生し、各制御室内を占有していた。その結果、制御機器の収納量が制約されるケースがあった。

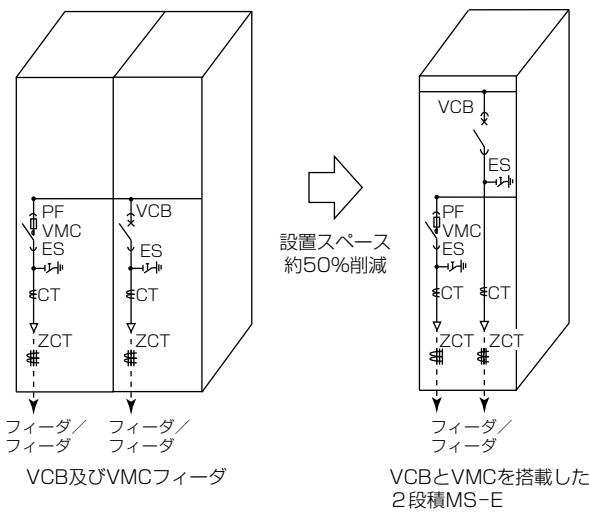


図7. 奇数フィーダのモデル配列での設置スペース削減

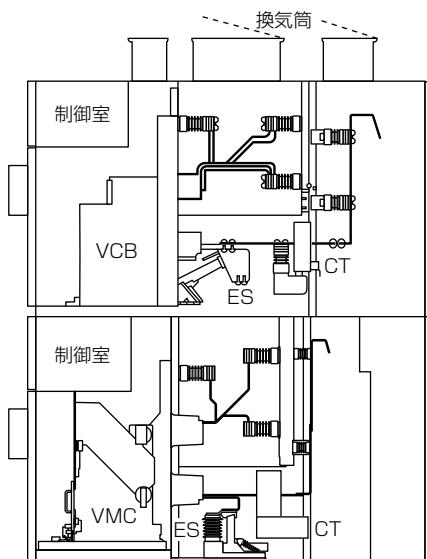
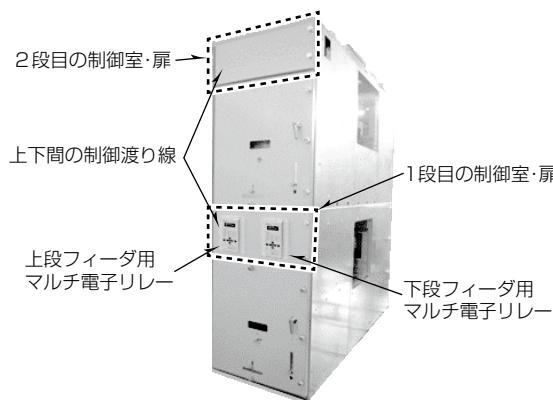
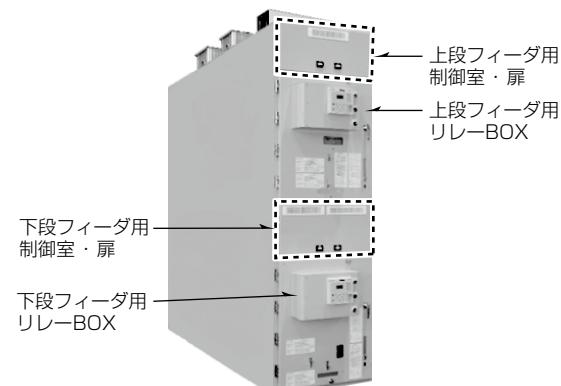


図8. VCBとVMCユニットを搭載した2段積MS-Eの断面図



(a) 従来の2段積MS-E



(b) 制御室拡張構造の2段積MS-E

図9. 2段積MS-Eの構造

そこで、今回の開発では、各フィーダの正面扉にマルチ電子リレー及び操作機器を搭載したリレーBOXを開発し、各フィーダの正面扉に取り付けた。また、上段フィーダ用の制御機器は2段目の制御室内に、下段フィーダ用の制御機器は1段目の制御室内に区分けして配置した。これによって1段目の制御扉に制御機器の取付けスペースを確保でき、制御室間での制御機器の渡り線を最小限に抑えることが可能になった。その結果、制御機器の収納量が大幅に向上了。図9に、従来の2段積MS-Eの構造と制御室を拡張した2段積MS-Eの構造を示す。

## 4. む す び

開発したVMC 2段積MS-Eの仕様・構造及び採用技術について述べた。VMCユニット及び制御室拡張構造の2段積MS-Eは2020年投入予定である。また、この製品は海外市場をターゲットにしており、将来の海外生産化を視野に入れた構造にしている。

### 参 考 文 献

- 木村 透：海外市場向け7.2／12kVスイッチギヤ“MS-E”，三菱電機技報，91，No.11，609～613 (2017)

# 海外市场向け“20-VPR-D形”真空遮断器

"Type 20 - VPR - D" : Vacuum Circuit Breaker for Overseas Market

難波晃平\*  
Kohei Namba  
山田 博\*  
Hiroshi Yamada  
小林 稔\*  
Minoru Kobayashi

## 要旨

真空遮断器(Vacuum Circuit Breaker : VCB)は、小型・軽量、保守の容易性等の多くの特長から幅広く適用されている。三菱電機の“20-VPR-D形”真空遮断器は、台湾市場を中心に適用されている海外市場向け真空遮断器の主力機種である。近年、遮断器を収納するスイッチギヤの各国の規格で、スイッチギヤの安全性の観点から国際規格であるIEC(International Electrotechnical Commission)62271-200に沿った仕様を採用する気運が世界中に高まりつつある。IEC62271-200は、内部アーク試験が規定化されている等、安全性に配慮されている。このような背景の中、安全性重視に必要なオプションの拡充を図るため、20-VPR-D形真空遮断器を最新のIEC規格に対応させた。

20-VPR-D形真空遮断器の特長は次のとおりである。

### (1) 安全性の追求

スイッチギヤ扉を閉めた状態で遮断器の移動が可能な外部引き出し操作方式、安全性の高い金属シャッターの標準装備、投入責務を備えたES(Earthing Switch)

### (2) 環境負荷低減の追求

有害6物質が規制値以下及び真空バルブの小型化

### (3) 外形寸法の同一化

定格電流2,000Aまで同一の外形寸法によって、スイッチギヤ設計の標準化が可能

### (4) 保守・点検の省力化

長寿命グリースや無注油軸受適用による注油間隔の延長(3年→6年)

(2) 環境負荷低減の追求  
・有害6物質が規制値以下  
・真空バルブの小型化

(3) 外形寸法の同一化  
定格電流2,000Aまで同一の外形寸法  
によって、スイッチギヤ設計の標準化  
が可能

(4) 保守・点検の省力化  
長寿命グリースや無注油軸受適用に  
による注油間隔の延長(3年→6年)

(1) 安全性の追求  
・外部引き出し操作方式  
・金属シャッター  
・ES



外部引き出し操作機構



金属シャッター

## 海外市场向け“20-VPR-D形”真空遮断器の特長

20-VPR-D形真空遮断器は、小型・軽量、環境負荷低減、保守・点検の省力化、安全性の高い金属シャッターの標準装備、IEC規格に対応した安全性の高いオプションメニューを持っており、多種多様な顧客ニーズに対応した製品である。また、定格電流2,000Aまで同一の外形寸法であり、スイッチギヤ設計の標準化を可能とした。

## 1. まえがき<sup>(1)</sup>

遮断器は平常運転時には負荷電流を通電させ、事故発生時には即座に定格電流の数十倍以上の事故電流を遮断することによって、接続されている機器を保護する機能を持っている。遮断器の消弧媒体にSF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)ガス、油、真空、空気などを用いた様々な遮断器が存在するが、中でも真空バルブを用いたVCBは、絶縁性、遮断性、保守性・安全性が高い等多くの特長から、特高電圧まで幅広い分野で適用されている。

VCBの多くはスイッチギヤに搭載され、配電系統で、電力を安定供給する上で重要な役割を担っている。VCBには、操作性、信頼性、安全性等従来求められていた基本性能に加え、地球環境保護及び低炭素化社会への関心の高まりなどによって環境負荷低減、ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost : LCC)削減等が求められている。

また、スイッチギヤの国際規格であるIEC62271-200が改定されて以降、日本を始めとして、台湾などでも国内規格がIEC規格に整合化されている。IEC62271-200では、内部アーク試験や運転連続性喪失区分(Loss of Service Continuity category : LSC)が規定されており、使用者の安全性に配慮した規格になっている。

20-VPR-D形真空遮断器は2008年に製品化して以降、台湾市場を中心に幅広く適用されている海外向けVCBの主力機種である。先に述べた背景から、当社では、IEC62271-200に対応させた20-VPR-D形真空遮断器を開発した。

本稿では、近年の遮断器を取り巻く環境、技術動向とそれに対応した20-VPR-D形真空遮断器について述べる。

## 2. 20-VPR-D形真空遮断器の定格事項

図1に20-VPR-D形真空遮断器の外観、表1にその定格事項を示す。



図1. 20-VPR-D形真空遮断器

表1. 20-VPR-D形真空遮断器の定格事項

形名	20-VPR-16D	20-VPR-25D
準拠規格	JEC-2300, IEC 62271-100	24
定格電圧(kV)		
定格遮断電流(kA)	16	25
定格電流(A)	630, 1,250	630, 1,250, 2,000
定格周波数(Hz)		50/60

## 3. 安全性の追求

スイッチギヤに要求される安全対策として規格IEC62271-200に内部アーク事故を模擬した試験・評価方法が規定化され、操作・作業者への安全を配慮している。また、国内のスイッチギヤ規格もIECへの整合化が検討されており、国内外で操作・作業者への安全性の配慮が拡大している。それに対応した外部引き出し操作方式を製品化し、スイッチギヤ扉を開めた状態で挿入／引き出しハンドルを操作することでVCBを断路・試験位置から接続位置に移動することを可能にしている(図2)。

### 3.1 据付け方式<sup>(1)</sup>

遮断器の構造は、据付け方式から大きく分けて固定形、搬出形、引き出し形があり、保守・点検などを考慮して機器選定が行われている。

固定形は屋外に設置する屋外形単独据付けタイプと屋内

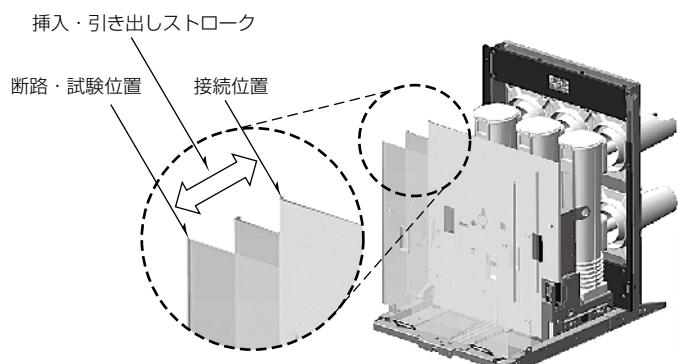
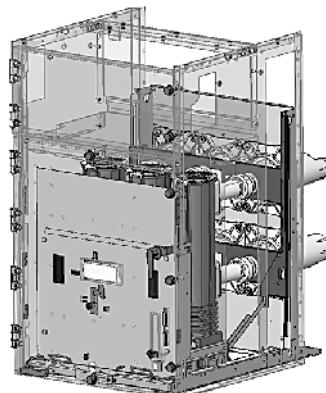


図2. 外部引き出し操作方式

に設置する単独据付けタイプ及びスイッチギヤに取り付けるパネル取付け形がある。

搬出形はVCB主回路端子接続部がボルト等によって固定接続されるためVCBの移動は停電状態で行う必要がある。

引き出し形では主回路接続部を自動接続・断路できるため保守・点検が容易であり、スイッチギヤ用の遮断器として多用されている。引き出し形はスイッチギヤ内の挿入・引き出し操作が必要になるため、誤操作を防止して安全性を確保する観点から、スイッチギヤの規格から次のインターロックが要求されている。

- (1) 挿入・引き出しは遮断器が開のときだけ可能であること
- (2) 遮断器が運転位置、試験位置、断路位置、引き出し位置にあるときに限り遮断器の開閉ができること
- (3) 遮断器が運転位置にあるときは、制御回路に接続されているときに限り遮断器の閉路が可能であること

**表2**に引き出し形遮断器の位置による主回路・制御回路との接続状態の関係を示す。**表2**では試験位置と断路位置を分かりやすいように別々に示しているが、断路位置で制御回路を接続すれば試験位置として扱われる所以、試験位置と断路位置は同じ位置でもよく、ほとんどの場合このような対応をしている。

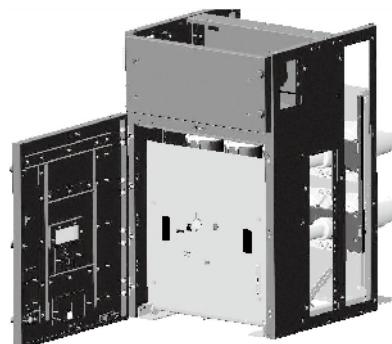
### 3.2 外部引き出し操作機構<sup>(2)</sup>

スイッチギヤ扉を開めた状態で挿入・引き出しハンドルをスイッチギヤ外から操作することでVCBを断路・試験位置から接続位置に移動することを可能にする外部引き出し操作機構を製品化した。**図3**に内部引き出し操作と外部引き出し操作を示す。

内部引き出し操作と外部引き出し操作で、VCBの外形

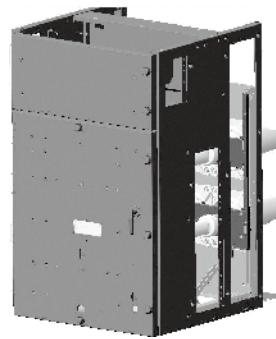
表2. 引き出し形遮断器の位置による接続状態の関係

遮断器の位置	接続状態	
	制御回路	主回路
運転位置 (接続位置)	引き出し形遮断器 盤 主回路 制御回路	接続 ON 接続 ON
試験位置		接続 ON 断路 OFF
断路位置		断路 OFF 断路 OFF



扉を開けて遮断器を挿入・引き出し

(a) 内部引き出し操作



扉を閉めて遮断器を挿入・引き出し

(b) 外部引き出し操作

図3. 内部引き出し操作と外部引き出し操作

寸法を同一にするために、外部引き出し操作を行う外部引き出し操作機構をVCB内の空きスペースに配置する。**図4**に示す従来のねじ送り機構はねじ棒とナットで構成されておりシンプルな構造ではあるが、全移動域をねじで送るためVCB内の空きスペースに外部引き出し操作機構を配置する薄型化は困難である。

そこで、外部引き出し操作機構には**図5**に示すトグルリンクとウォームギヤ(ねじ歯車と斜歯(はすば)歯車を合わせた機構)を組み合わせたトグルリンク機構を採用した。機能上寸法が大きくなるねじ部は寸法の制約のない前面に配置し、空きスペース部で高さ寸法の制限のある空間には高さを抑えた板金部品でトグルリンクを構成し、ギヤで駆動させる方式にした。また、操作軸に対して歯車を左右対称に二つ配置することで歯車の面圧を低減させ、操作力を倍にした。

従来のねじ送り機構では、最大負荷に対して必要な推力を基にねじサイズが選定されるため、この値から操作回転数が決まる。トグルリンク機構はねじ送り機構と同様に**図6**のように回転操作で遮断器を挿入していくが、主回路接触子が係合して推力が大きくなる接続位置近傍でトグルリンクの特性を利用して推力を増加させることが可能である。また、必要とする推力が小さいところではストロークを大きくとることでねじ送り機構に比べ約1/3の回転数での操作を可能にした(**図7**)。

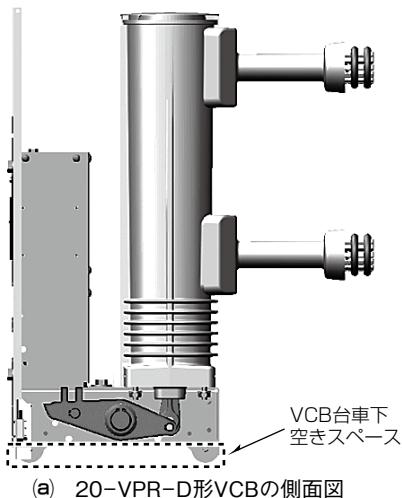


図4. 外部引き出し操作機構(ねじ送り機構)

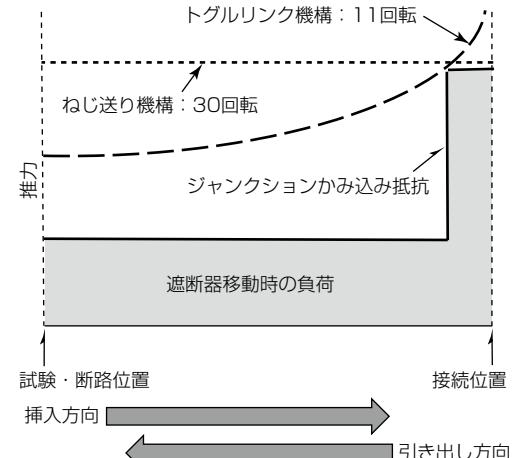


図7. 外部引き出し操作機構の操作回転数と推力

### 3.3 シャッター構造<sup>(2)</sup>

スイッチギヤ内部では人が接近可能なコンパートメントと充電部との間に、充電部との接触から保護する目的で仕切り板やシャッターを設ける場合がある。

スイッチギヤ規格IEC62271-200では、メンテナンス性に視点を置いた運転連続性喪失区分(LSC)を用いてコンパートメントを構成する仕切り板、カバー及び扉の構成を規定している(表3)。

引き出し形遮断器で遮断器室を構成する場合、接続位置や試験位置での遮断器動作に関連するインタロックや主回路接続部のシャッター構造などに関連してスイッチギヤや遮断器との取り合い部分が重要になるため、引き出しレールやシャッター機構、インタロックなどの機能を一体化した固定枠として遮断器製造業者側が遮断器と一体で提供している場合が多い。このため、この仕切り構造に合わせて、シャッター部についても遮断器側で接続位置や引き出し位置での性能評価が行われている。この仕切り板やシャッターには非金属製(絶縁材料製)のものと金属製のものとがあり、絶縁材料で構成された非金属仕切り板及びシャッターについては、耐電圧試験及び漏れ電流の測定を実施するように規定されており、安全性は高い。最近では、金属シャッターを装備した更に安全性の高い構造への要求が増加しており、こうした金属シャッター装備への要求に対

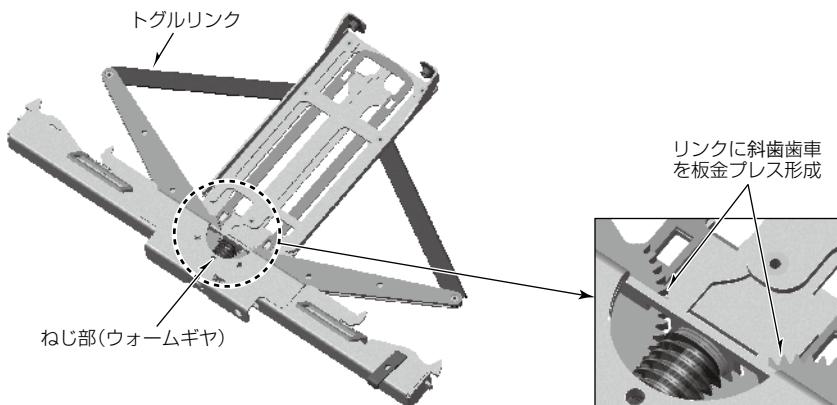


図5. 外部引き出し操作機構(トグルリンク機構)

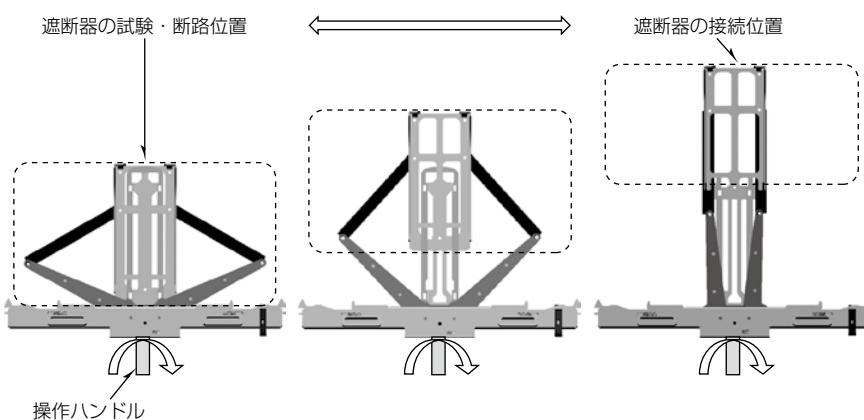


図6. トグルリンク機構(機構上面図)による挿入／引き出し操作

表3. LSCの一例

	LSC1	LSC2B-PI <sup>(注1)</sup> / LSC2B-PM <sup>(注2)</sup>
単線 母線	主母線	主母線
	CB CB CB	CB CB CB
	CT CT CT	CT CT CT
接続 (ケーブル)	ZCT ZCT ZCT	ZCT ZCT ZCT
	無 母線-遮断器	有 母線-遮断器
	無 遮断器-ケーブル	有 遮断器-ケーブル
仕切り	無 隣の盤との仕切り	有 隣の盤との仕切り

(注1) 全てのコンパートメントに仕切りあり(仕切り又はシャッターの一部が絶縁物)

(注2) 全てのコンパートメントに仕切りあり(仕切り又はシャッターの全てが接地金属)

CT : Current Transformer, ZCT : Zero-phase sequence CT

応している。金属シャッターの場合、非金属製シャッターに比べて絶縁距離を大きくとる必要があり、LSC2B-PIとLSC2B-PMの要求に応じて絶縁ブッシングを使い分けるなどして必要な絶縁距離を確保する必要がある。また、絶縁距離が変わり絶縁ブッシングが変わることに伴い、VCBの奥行き方向の寸法が変わる。

そこで、金属シャッターと絶縁シートを組み合わせることによって耐電圧性能を向上させ(図8)，金属シャッター適用時にも非金属製シャッター適用時と同等の絶縁距離を実現することによってLSC2B-PIとLSC2B-PMの異なる仕様でも同一の外形寸法を達成してスイッチギヤ設計標準化が可能になり、顧客メリットを高めた。

### 3.4 ES<sup>(2)</sup>

ESは海外市場からの要求が増えつつあり、保守点検時に容易に安全が確保できる安全関連機器として多く使用されている。図9に20-VPR-D形真空遮断器用ESの外観、表4にその定格事項を示す。

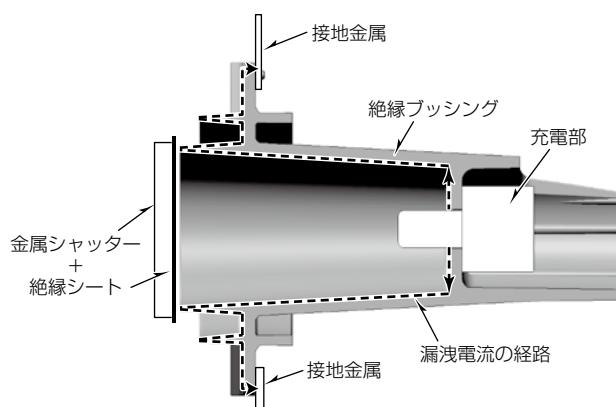


図8. シャッター構造

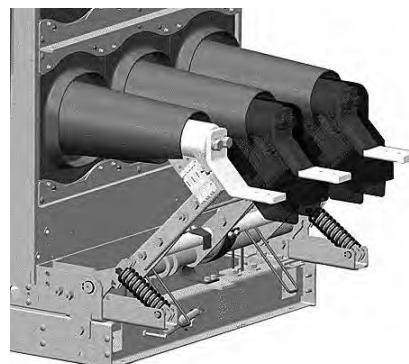


図9. ES

表4. ESの定格事項

形名	20-ESV-M25D
準拠規格	IEC62271-102
定格電圧(kV)	24
定格周波数(Hz)	50/60
定格投入電流(kAp)	65
定格短時間耐電流(kA)	25(3s)

VCBが試験位置状態ではじめてESが開閉できるインターロック機能も持っており、スイッチギヤの前面から操作ハンドルで安全に入切操作できる。また、短絡電流を投入通電する責務があり、投入時のアーク電磁反発力(接触子の電流による電磁反発力)に打ち勝つために投入方向と同じ方向に電磁力(接続導体の電流による電磁力)を発生させるよう通電経路を三次元の電磁力解析によって最適配置検討を行った(図10)。

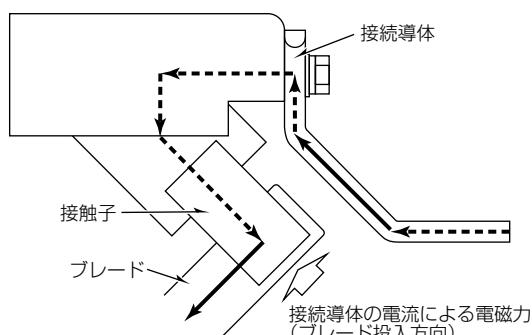
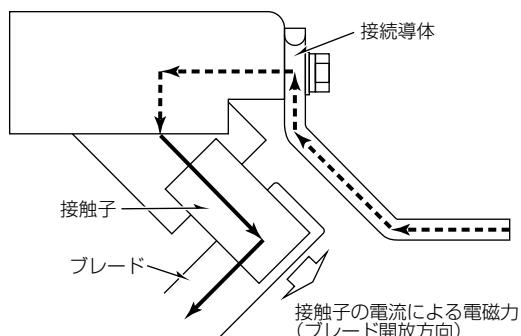


図10. 投入時の電流経路と電磁力

ESは気中投入であり、図11のように投入過程でプレーアークが発生する。投入電流はプレーアーク時間を経て接触子からブレードへ流れるが、図12のようにチャタリングOFF時間の長い部位と投入電流ピークが一致した場合、大電流で発弧してESの接触部の損傷が大きくなる。短絡電流の投入を達成するためには、投入時に発生する接触部の損傷を低減する必要があり、そのためにはチャタリングOFF時間を抑制する必要がある。

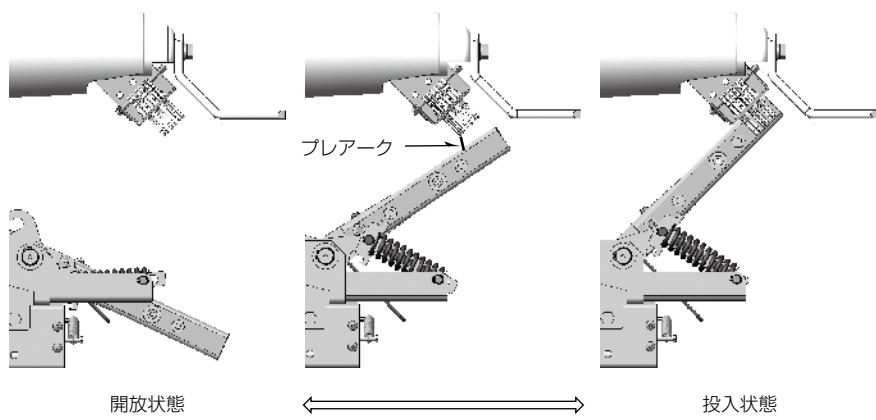


図11. ESの開閉動作

チャタリング : 投入時に発生する機械的振動によって主接点の開閉を反復する現象  
チャタリングOFF時間 : チャタリングによって主接点がOFFとなる時間

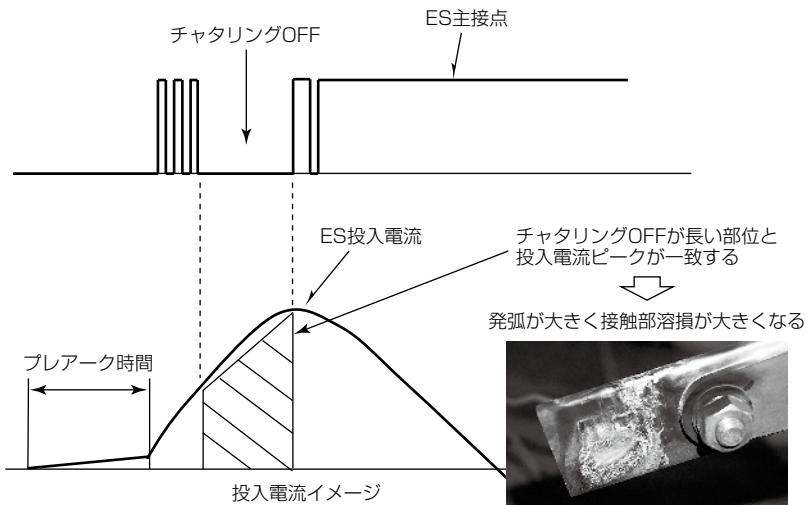


図12. ES投入電流

チャタリングOFF時間の抑制に当たり、高速度カメラを用い投入時の接触子及びブレードの挙動を観測した(図13)。観測の結果、投入時にワニ口形の接触子に挿入するブレードの動作衝撃によって、ワニ口形の接触子先端がブレードに弾(はじ)かれる挙動になり接触子に微細な振動が発生、この振動によってチャタリングOFF時間が発生していることが分かった。そこで、接触子ガイド・接触子反跳ストッパーによって投入時に接触子の挙動を抑制するチャタリング抑制構造(図14)によってチャタリングOFF時間の低減を図った。その結果、安定した短絡投入性能が得られた。

### 3.5 VCBの構造<sup>(3)</sup>

主回路充電部への小動物進入による短絡事故防止を図るため、充電露出部を極小化した筒形状の絶縁モールド構造を採用して安全性を追求するとともに、粉塵(ふんじん)と水滴が内部に入りにくい構造にすることで耐環境性にも配慮している。また熱流体解析を行い(図15)、筒形状内部の熱を効率良く放熱する形状にし、

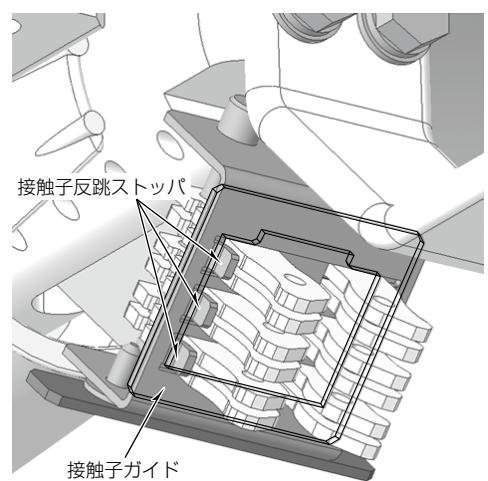


図14. チャタリング抑制構造



図13. 高速度カメラによる挙動観測

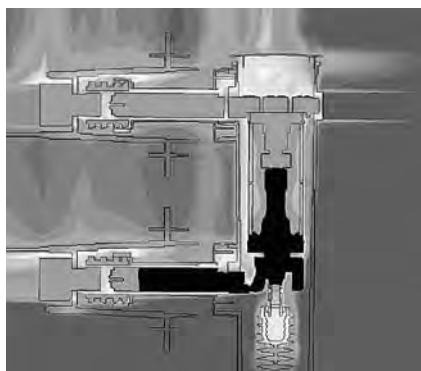


図15. 热流体解析結果の一例

定格電流2,000Aまで自冷式を実現した。さらに、保護カバーなど充電部付近の主要絶縁物に難燃性UL94(V-0)グレードの樹脂を採用することで万一の類焼・延焼を回避している。

#### 4. 環境負荷低減の追求<sup>(1)</sup>

欧州でのRoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical equipment)指令等の動きに対応して、有害6物質が規制値以下である定格電圧24kVの新形VCBを開発した。ボルト、ピン、ねじ類の亜鉛めっきに使用する六価クロメート処理を廃止し、三価クロメート処理を採用了。採用了に当たっては、耐食性など各種評価試験を実施し、長期信頼性を確認した。また主要樹脂部品に使用材料を表示することでリサイクル・廃棄時の分別容易化への配慮も行っている。

図16にVCBに使用する真空バルブ(24kV・16kA)小型化の変遷を示す。この真空バルブは銅系接点を適用し、アーク挙動解析に基づく最適な電極構造の開発と電極コン

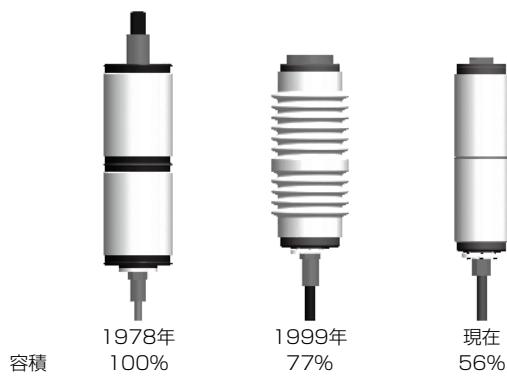


図16. 真空バルブ小型化の変遷

ディシヨニングの最適化によって、遮断性能と耐電圧性能の向上及び小型化を実現させ使用材料の削減を図った。

#### 5. 外形寸法の同一化<sup>(3)</sup>

熱流体解析に基づき設計した高い放熱効率を持つVCBの主回路構造を実現することで主回路充電部を完全に覆うモールドタイプとして絶縁信頼性を向上させながらも、定格電流2,000A品では遮断器全体として約10%の軽量化を達成するとともに、定格電流2,000Aまで同一の外形寸法を達成した。また、金属シャッターでの絶縁シートを採用することで、より広い定格領域でスイッチギヤ設計の標準化を可能にするなど、顧客メリットを高めた。

#### 6. 保守・点検の省力化<sup>(1)</sup>

遮断器の操作機構が駆動する際、グリースの経年的な劣化が起こり、動作不良を引き起こすことがある。そのため、遮断器の保守・点検として操作機構などの摺動(しゅうどう)部への注油が定期的に必要である。しかし、近年LCC削減を目的とした保守・点検の効率化が求められている。この要求に対し、三次元機構シミュレーションによる動作信頼性の向上を図るとともに、長寿命グリースの適用や小勢力で駆動する部位の軸受にグリースの塗布が不要な無注油軸受を採用了することで、安定した動作特性を実現し、注油間隔を従来の3年から6年に延長した。

#### 7. むすび

受配電設備の重要な役割を担う遮断器に対する安全性、信頼性向上、環境負荷低減、LCC削減などの社会ニーズは、グローバル市場の中で、ますます重要性が高まると考えられ、それに対応した20-VPR-D形真空遮断器について述べた。今後も国内外問わず顧客ニーズは多様化し、高度化するものと考えられる。電気設備に対する一層の省メンテナンス化、環境負荷低減など社会に貢献していく。

#### 参考文献

- (1) 難波晃平：遮断器に求められる性能、電設技術、66, No.814, 27~30 (2020)
- (2) IEC62271-200対応“20-VPR-D型”真空遮断器、三菱電機技報、93, No.1, 59 (2019)
- (3) IEC62271-200対応真空遮断器(定格電流2,000A)“20-VPR-25D”、三菱電機技報、94, No.1, 11 (2020)

## 特集論文

# 真空開閉器用真空バルブと新工場の生産革新

Vacuum Switch Tubes for Vacuum Switches

越智 聰\*  
Satoshi Ochi  
保井徹也\*  
Tetsuya Yasui  
道念大樹†  
Taiki Donen

### 要旨

三菱電機では1965年に6.6kVコンタクタ用真空バルブを製品化して以来、半世紀以上にわたり、接点材料や電極構造の開発、真空バルブ構造の最適化及び製造工程の確立等を進めてきており、様々な進歩を遂げた結果、今日では非常にコンパクトで高性能かつ長寿命を実現している。

真空バルブは環境負荷の大きいガスや油を使用しないことや欧州RoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electronic equipment)等で規制される有害物質を使用していないことなど他の絶縁媒体と比較して環境適合性が高い機器として近年大きく注目されている。用途は多岐にわたり、生産本数は累計450万本を突破している。

当社の真空バルブの製造は1965年に伊丹地区の通信機製作所で開始し、1990年から丸亀地区の受配電システム製作所で生産しているが、従来同敷地内の別々の建屋にあった遮断器工場と真空バルブ工場を統合した一貫生産工場を新設し、2018年から稼働させている。

新工場では約15%の生産能力向上を図るとともに、四つのコンセプト(一貫生産・自動化・IT活用・環境改善)を取り組んでいる。特に、IT活用については当社のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を導入し、工場全体のIoT(Internet of Things)化を推進し、生産革新の実現を追求している。



当社真空バルブの特長

- ・高性能でコンパクト
- ・高信頼性
- ・高環境適合性
- ・幅広いラインアップ



受配電システム製作所の新工場

### 真空開閉器用真空バルブと受配電システム製作所の新工場

真空バルブのラインアップとしては、定格電圧1.5~84kV、定格電流最大4,000A、定格遮断電流最大63kAの幅広い定格の製品群をそろえている。自社の真空遮断器や真空コンタクタ向けのほかにも国内や欧米などの真空開閉器メーカーへの真空バルブ単品での販売も実施している。右の図は、当社受配電システム製作所に新設した遮断器と真空バルブの一貫生産工場である。

## 1. まえがき

真空バルブは真空遮断器などの開閉機器に主接点として組み込まれ、電力系統に幅広く使用されている。当社では、1962年に基礎研究を開始し、1965年に6.6kVコンタクタ用真空バルブを製品化して以来、半世紀以上にわたり、電極構造と接点材料の開発及び製造技術の確立等を進めて、様々な進歩を遂げてきており、今日では非常にコンパクトで高性能、長寿命な設計を達成している。また、真空バルブは他の絶縁媒体と比較して環境適合性が高いことから、用途が拡大して需要が増加しているため、当社では2018年に工場を新設し、生産能力の約15%向上を図っている。新工場では自動化による生産性向上、当社独自のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を利用したIT活用、環境改善等を図っている。

本稿では、この真空バルブについての最近の技術、適用分野及び新工場での生産革新について述べる。

## 2. 真空バルブの技術

### 2.1 真空バルブの特長

真空の絶縁耐力は、空気、SF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)ガス、絶縁油などの絶縁媒体よりも優れており、この真空が持つ高い絶縁耐力によって真空バルブはコンパクトな設計が可能になっており、次の特長を持っている。

- (1) 短い空間距離で高電圧化が可能
- (2) 電流遮断時のアーク電圧が低いため接点消耗量が少ない
- (3) 長寿命・メンテナンスフリー
- (4) 電流開閉時のアークの外部噴出がない
- (5) 環境負荷の大きいガスや油を使用しない
- (6) 欧州RoHS等で規制される有害物質を使用しない

また、SF<sub>6</sub>ガスについては温暖化係数が高いことから近年は欧米を中心に中電圧及び高電圧の開閉機器で規制の動きが活発になっている。真空バルブではこのような温暖化ガスを使用せず、またRoHSで規制される有害6物質を使用しないこと等によって環境適合性が高いため、ますます注目されている。

### 2.2 真空バルブの電極構造

真空バルブは図1のように、セラミックスの絶縁容器中に固定接点及び可動接点が設置されており、可動接点は可動電極棒及びベローズを介してフランジと接合されているため、絶縁容器内を真空に保ったまま外部操作機構による接点の開閉が可能な構造になっている。アークシールドは

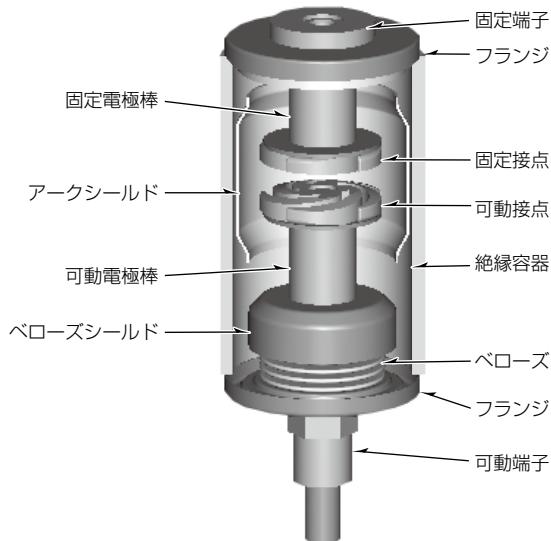


図1. 真空バルブの構造

大電流遮断時に接点間から発生する金属蒸気が絶縁容器の内面に付着し、耐電圧性能が低下するのを防いでいる。

当社では、表1に示すように主に3種類の電極構造を採用しており、用途に応じて使い分けている。遮断電流が小さい場合は真空中のアークは拡散モードになるため平板電極構造で遮断可能であるが、遮断電流が大きくなるとアークが集中して1点にとどまり、接点の局所部が過熱されることによって接点間に金属蒸気が蔓延(まんえん)し、遮断性能が低下する。スパイアラル電極ではスパイアラルの羽に沿って流れる電流によって電磁力を発生させ、集中アークが接点外周に沿って回転することによって接点の局所部の過熱を防ぎ、遮断性能を向上させている。当社では独自のスパイアラル電極構造を開発し、従来の電極構造より約25%の接点径の縮小化を達成している<sup>(1)</sup>。一方、縦磁界電極では、接点の裏側に配置されたコイルに沿って流れる電流によって接点間に軸方向の磁界を発生させ、この磁界によって集中アークを接点表面全体に瞬時に拡散させることで接点の局所部の過熱を防ぎ、遮断性能を向上させている。

これらの電極構造については磁界解析で大電流遮断時に発生する磁界を計算することによって構造を最適化している。また、電極を真空チャンバ内に配置し、実際に電流遮

表1. 真空バルブの電極構造

電極構造	平板電極構造	スパイアラル電極構造	縦磁界電極構造
形状			
適用例	・遮断電流12.5kA以下の遮断器及び負荷開閉器用 ・コンタクタ用	・遮断電流16kA以上の遮断器及び負荷開閉器用	・低サージ遮断器用 ・大容量多段回遮断器用 ・高電圧遮断器用

断中のアーカー挙動を高速度カメラ測定することや電流遮断直後の接点表面の温度測定を赤外線カメラで行うこと等によって、更なる解析精度の向上を図っている<sup>(2)</sup>(図2、図3)。

### 2.3 接点材料技術

接点材料は真空バルブの性能を左右する非常に重要な要素であり、当社は真空バルブの製品化以来、それぞれの用途に合致した独自の接点材料を開発している。大電流の遮断性能が要求される用途には遮断性能に優れる銅クロム接点が使用されているが、この銅クロム接点については独自の不純物レベルの管理等によって性能の向上及び安定化を実現している。遮断器の操作力が限られる用途については銅クロム接点に添加元素を追加して、接点溶着力を低減させた接点材料を開発しており、高電圧用真空バルブについては耐電圧性能に優れるクロムの割合を高めた銅クロム接点を開発している。また、真空バルブでは、真空の高い絶縁耐力による裁断現象によって負荷側に過電圧が発生することがあるが、低サージ接点材料を使用することで裁断電流を低減し、過電圧を抑制することが可能になっている。当社では銀系の接点材料に添加物を加えることで遮断性能を向上させ、低サージとしては世界最大の定格遮断電流(7.2kV, 40kA)の真空バルブを1997年に開発し、更なる

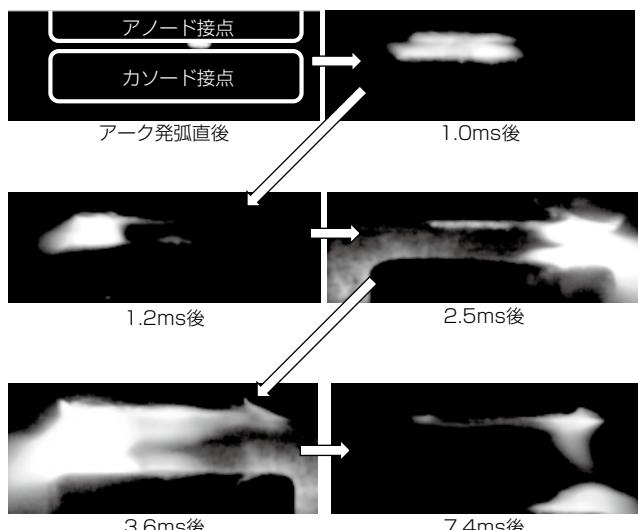


図2. 真空チャンバでのスパイラル電極のアーカー観測

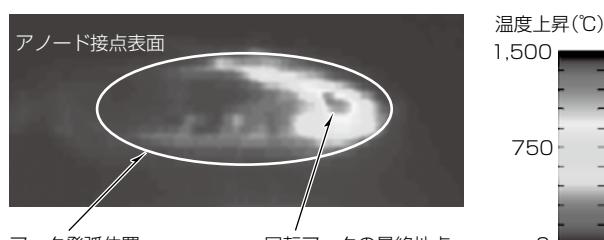


図3. 電流遮断直後の接点温度測定

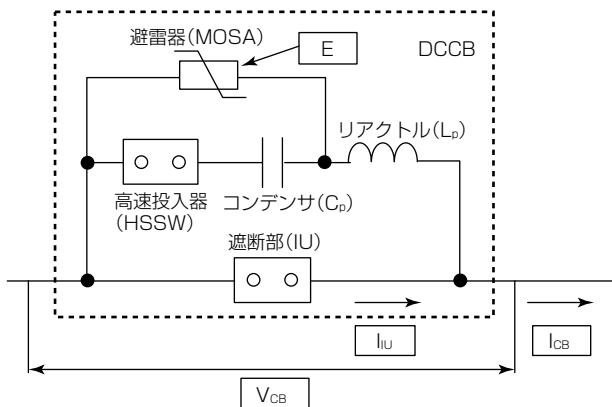


図4. 他励発振方式DCCBの回路図

縦磁界電極構造の最適化によって、2009年に同定格で容積を約20%低減させた真空バルブの開発にも成功している。

### 2.4 最近の真空バルブ適用分野

真空バルブはその優れた絶縁特性とコンパクトな設計や信頼性によって真空遮断器(VCB), 真空コンタクタ(VMC), キュービクル型ガス絶縁開閉装置(C-GIS)等にとどまらず、負荷時タップ切替え器やオートリクローザー、キャパシタスイッチ、リングメインユニットにも使用されており、大容量化や高電圧化が進んでいる。近年では長距離送電で普及してきている高電圧直流送電(HVDC)のシステム内のAC/DC変換器で、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のバイパススイッチに接点開極距離を短く設定できる真空バルブが採用されており、IGBTの故障時に高速で保護回路を形成することを可能にしている。また、分散電源を統合する多端子HVDC送電では、健全回線への事故の波及を防ぐために、直流遮断器(DCCB)を設置して、10ms以内に10kA以上の事故電流を除去する必要があり、当社では図4のような回路によるコンデンサ(Cp)とリアクトル(Lp)による共振回路での高周波電流の重畠で強制的に電流零点を形成する方式によって、真空バルブの高い絶縁回復特性を利用して、第1遮断零点での80kV, 16kAの遮断に成功している<sup>(3)</sup>。

## 3. 新工場の生産革新

### 3.1 新工場のコンセプト

当社受配電システム製作所では、2018年8月、四つのコンセプト(一貫生産・自動化・IT活用・環境改善)を導入した真空バルブと遮断器の一貫生産工場を本格稼働させた。特にIT活用は、当社のFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を導入し、社内のe-F@ctoryモデル工場として、九つの領域に対して工場全体のIoT化を推進し、

生産革新の実現を追求している(図5)。

### 3.2 自動化による生産革新

真空バルブの製造工程は、主に部品表面処理、ろう付け組立て、試験、仕上げに分けられる。新工場では、量産機種を対象にろう付け組立て、試験、仕上げ工程に自動化設備を導入し、生産能力を約15%向上させた。試験工程に導入した設備(図6)は、機械開閉試験、耐電圧試験、真空度試験の各装置を当社製ロボットによって工程連結し、約15~20%のリードタイム短縮を実現している。試験データは、各製品の個体番号を読み取り、紐(ひも)付け処理した後、上位のビッグデータ基盤で生産情報を一元管理しており、トレーサビリティ管理の強化を図っている。

### 3.3 e-F@ctory導入による取組み

#### 3.3.1 データ収集と見える化

新工場のe-F@ctory導入に当たり、対象設備の選定、収集データの抽出を行い、各種設備、人、部材、製造条件などから、約4,000点のデータを収集し、生産現場の可視化を実現している(図7)。設備データは、各種センサなどアナログ入力信号のデジタル値への変換、温度調節器や計測器などからMODBUS<sup>(注2)</sup>通信<sup>(注3)</sup>やCC-Link通信<sup>(注4)</sup>を用いて、PLC(Programmable Logic Controller)へデータ伝送を行い、リアルタイムでデータ収集を行っている。

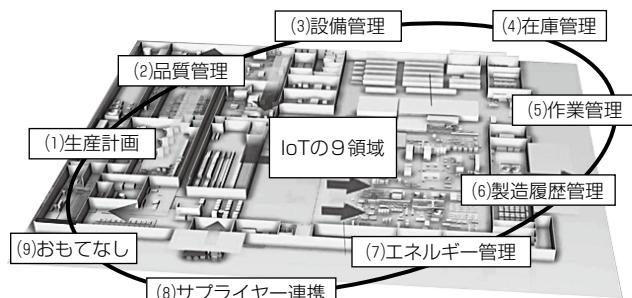
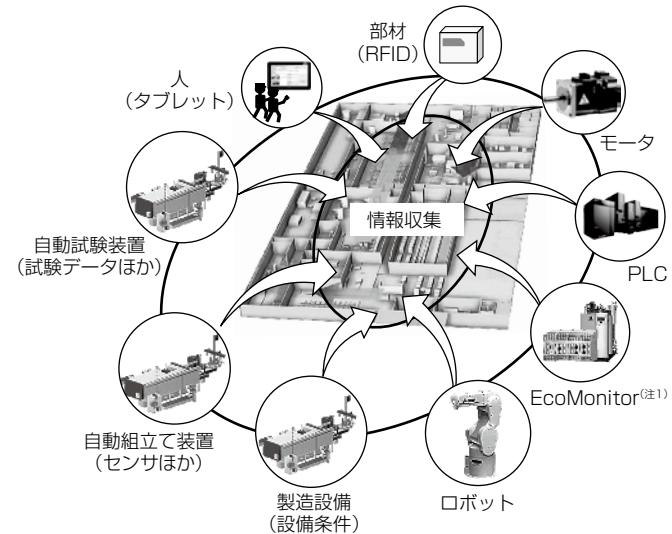


図5. 新工場のIoT化領域



図6. 自動試験ライン



RFID : Radio Frequency IDentifier  
(注1) 当社のエネルギー計測ユニット

図7. 新工場のデータ収集イメージ

収集したデータは、BI(Business Intelligence)ツールで、生産現場のリアルタイムな状況把握、生産情報管理、設備予防保全、品質未然防止、環境改善に活用している(図8)。

(注2) MODBUSは、Schneider Electric USA, Inc.の登録商標である。

(注3) Modicon社がPLC向けに定めた通信プロトコルである。

(注4) 産業用オープンネットワークである。

#### 3.3.2 改善サイクルの高速化による生産革新

##### (1) ラインモニタ

ラインモニタは4画面で構成しており、“生産進捗”“工程間仕掛数”“設備稼働”“工程内品質状況”を30秒~1分周期でデータ更新し、生産現場のリアルタイムな状況把握が可



図8. BIツールで作成した画面(抜粋)

能になった。各画面は、計画／実績数に加えて、直感的に正常／異常を把握する手段として、信号機で状態を示している。新工場2階に位置する管理・設計事務所では、ラインモニタで生産現場を常時監視しており、異常時の迅速な対応が可能である(図9)。

#### (2) 生産情報管理

生産スケジューリングシステムの導入によって、作業進捗確認や設備投入計画などの作業計画を自動化し(図10)，間接業務の効率化を実現した。生産スケジューリングシステムの運用定着には、計画精度の向上が必須であった。そこで、納期情報、製品ごとの経路、作業条件、制約条件、所要時間、使用設備、使用治工具、作業者数など、工程ごとの詳細情報を計画ロジックに組み込み、計画精度の向上を図っている。詳細なマスター情報を管理が重要であり、システム部門と使用部門が連携し、マスターの細分化、最新化を継続して実施している。作業支援ナビゲーションを開発し、生産スケジューリングシステムから出力された生産メニューの表示、及び作業着完、製造履歴などの作業実績を生産現場に設置されたタブレット端末で入力できるようにした。従来、紙で管理していた製造履歴を電子化することによって、製造条件の分析、品質管理の強化、作業時間分析(個人ごとの能率管理が可能など)が効率的に行えるようになり、改善サイクルの高速化と深化を実現している。

#### (3) 設備予防保全

設備日常点検、定期点検結果をタブレット端末で入力で

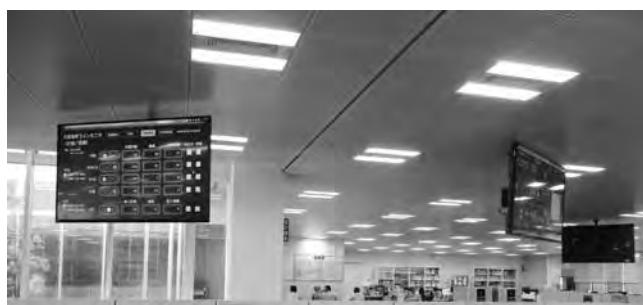


図9. ラインモニタの設置(管理・設計事務所)

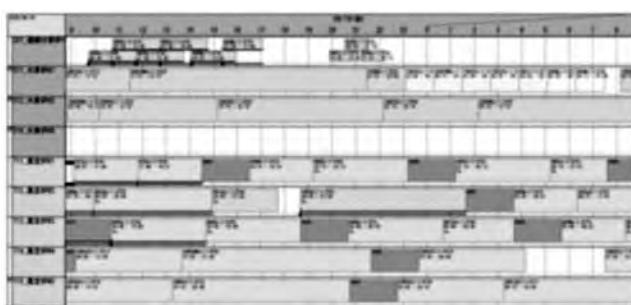


図10. 生産スケジューリングシステムの画面

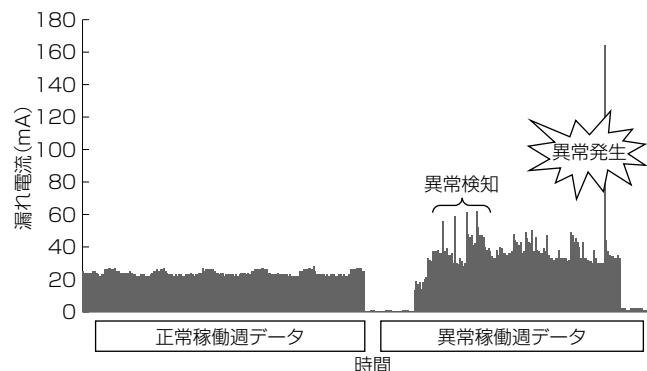


図11. 設備漏れ電流測定による予防保全

きるオペレータ支援システムを開発している。点検結果のデータを時系列グラフで監視し、数値変化の把握によって、劣化具合や異常の早期発見が容易になって設備の安定稼働が期待できる。また、設備稼働データを短周期で自動収集しており、管理データが設定値を超えると通知メールが届くシステムを構築している。漏れ電流を測定している設備については、正常稼働週に対して、異常が発生した週のデータは漏れ電流の増加を確認できる(図11)。このシステムによって、故障発生前にメンテナンス計画や生産負荷調整など、生産ロスを最小限にした設備保全が可能になり、突発故障の削減につながっている。

#### (4) 環境改善

ろう付け組立てを実施しているクリーンルームは、従来、ダスト量の変化に関係なく室内循環機器をフル稼働していた。新工場では、ダスト量を自動計測し、データをPLCで自動演算処理する。その結果を循環ファンの周波数調整にフィードバックし、風量を自動調整することで過剰な運転の抑制と省エネルギーを図っている。この制御によって、年間約25tのCO<sub>2</sub>削減が見込まれる。

## 4. む す び

当社の真空バルブに関して、電極構造、接点材料及び新工場での生産革新について述べた。今後も環境適合性の高い製品が求められることから、真空バルブの需要は拡大することが期待されるが、更なる技術開発によって顧客のニーズに対応した製品をそろえて、電力の安定供給に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 古賀博美：真空開閉器用真空バルブ，三菱電機技報，88, No.11, 701~704 (2014)
- (2) Donen, T., et al.: Temperature Measurement and Arc Rotation Observation of Spiral-type Contact, XXVIIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 255~258 (2016)
- (3) 常世田 翔, ほか：高電圧直流送電向け直流遮断器，三菱電機技報，92, No.11, 616~620 (2018)

# 駅内直流配電システムに向けた 短絡／地絡保護手法の検討

Study on Short-circuit and Ground-fault Protections in DC Distribution System for Stations

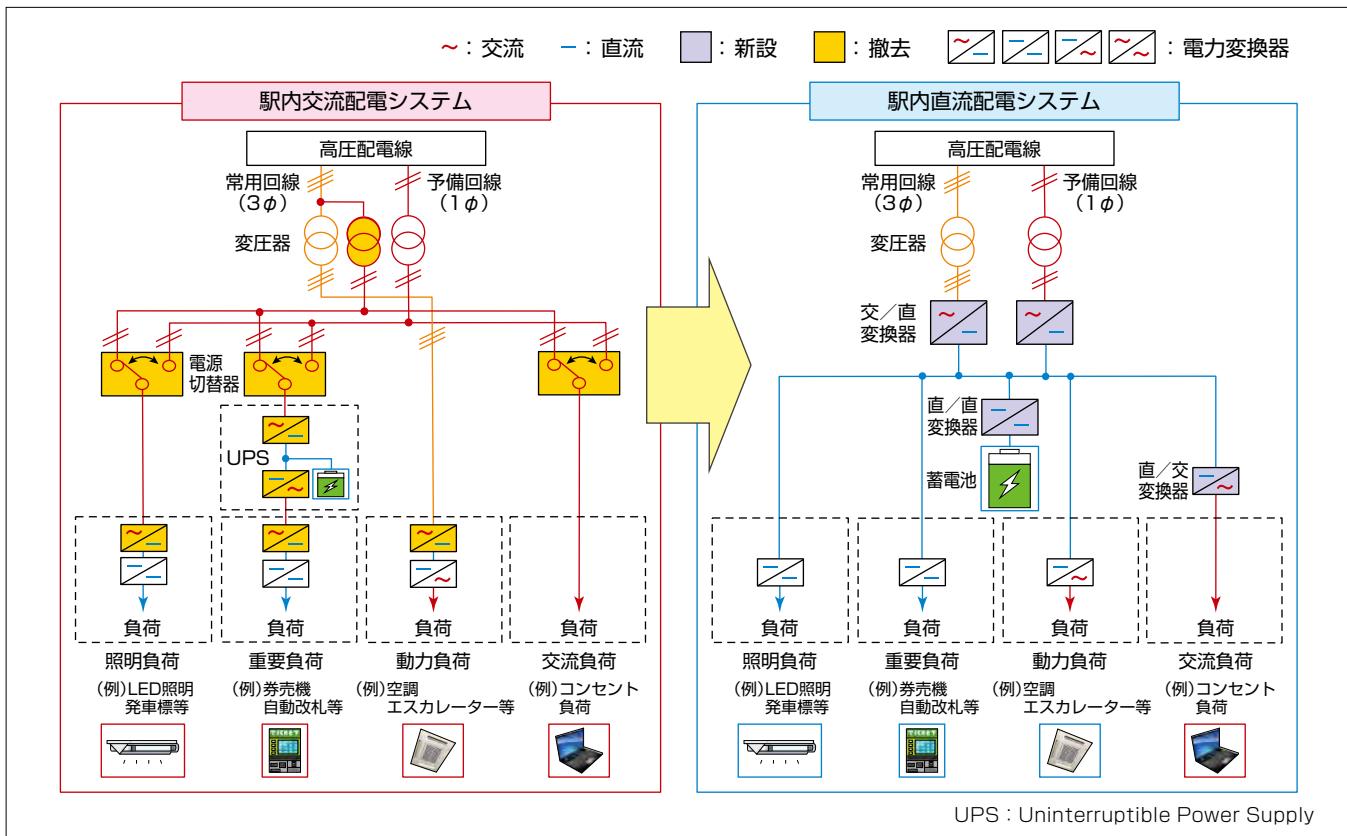
竹内勇人\*  
Hayato Takeuchi  
福野研一\*  
Kenichi Fukuno  
地道拓志†  
Takashi Jimichi

藤田敬喜‡  
Keiki Fujita  
園田洋平§  
Youhei Sonoda

## 要旨

現在、駅内配電は変圧や保護が容易な交流配電が採用されている。近年、駅では営業時間内の停電がサービス上許容できない出改札機器や、エスカレーター等の電力変換を多用する電機設備が増備され、配電設備が複雑化するとともに電力変換による電力損失が増加する傾向にある。また、無停電電源装置や電源切替器等の高価な停電対策が整備されていない駅に停電リスクが残存している。そこで、電力変換の電力損失の抑制、安価な停電対策の実現を目的にした直流配電の可能性を探るため、“電源の信頼性向上”“設備の簡素化”“省エネルギー”を検討課題として駅内配電システムの開発を西日本旅客鉄道株と共に進めている。これまで駅内直流配電システムに省エネルギー効果があること

を確認したが、さらに“電源の信頼性向上”に向けて駅内直流配電内の短絡／地絡保護手法の検討を行った。短絡保護の課題のうち“充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流による健全回線の配線用遮断器やヒューズが誤遮断”について検討し、駅電機設備の電力変換器を用いた所内人工短絡試験で収集した電圧電流波形データを基に、短絡シミュレーションモデルを確立した。また、地絡保護装置を用いた地絡保護を検証し、地絡保護装置は地絡回線の分岐数が多いと誤不動作し、健全回線の分岐数が多いと、誤動作する可能性があることを確認し、これらの発生を防ぐ最大分岐線数の算出法を導出した。



## 駅内配電システムの直流化の概念図

従来の駅内交流配電システムを直流化した場合の概念図を示す。現在の駅内配電方式は交流を標準としており、受電した交流電源を受電設備から各駅電機設備に“交流”で配電する。一方、駅内配電の直流方式は受電した交流電源を直流変換して各駅電機設備に“直流”で配電する。駅内配電システムの直流化によって、“電源の信頼性向上”“設備の簡素化”“省エネルギー”的実現が期待される。

## 1. まえがき

駅内配電での三つの課題(電源の信頼性向上、設備の簡素化、省エネルギー)の課題に対して、配電システムの直流化による課題の解決を西日本旅客鉄道(株)と共に目指している。駅内配電システムの直流化によって省エネルギー効果を見込めることが定量的に示されている<sup>(1)</sup>。

従来の交流配電システムを直流化した場合の概念図を2回線受電している駅を例にして図1に示す。現在の駅内配電方式は交流を標準としており、受電した交流電源を受電設備から各駅電機設備に“交流”で配電する。一方、駅内配電の直流方式は受電した交流電源を直流変換して各駅電機設備に“直流”で配電する。

駅内配電システムの直流化には、技術面及び法制度・関連規格面の課題がある。

技術面の課題は次のとおりである。

- (1) 省エネルギー効果の定量化
- (2) 電力変換器の変換損失の削減(電力変換の高効率化)
- (3) 導入費用の削減(既存の電機機器の再利用)
- (4) 直流配電内の短絡／地絡保護協調の確立
- (5) 配電線、電力変換器、蓄電池の仕様の決定

また、法制度・関連規格面の課題は、直流向け法制度や関連規格の整備である。

本稿では“直流配電内の短絡／地絡保護協調の確立”に向けた取組みについて述べる。

## 2. 短絡保護手法の検討

### 2.1 短絡保護に関わる問題点

短絡保護に関わる問題点は次のとおりである。

- (1) 短絡電流による電力変換器の保護機能(動作停止)で、電力変換器の二次側が全停電に至る(図2)。
- (2) 充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流(以下“負荷側放電電流”という。)によって

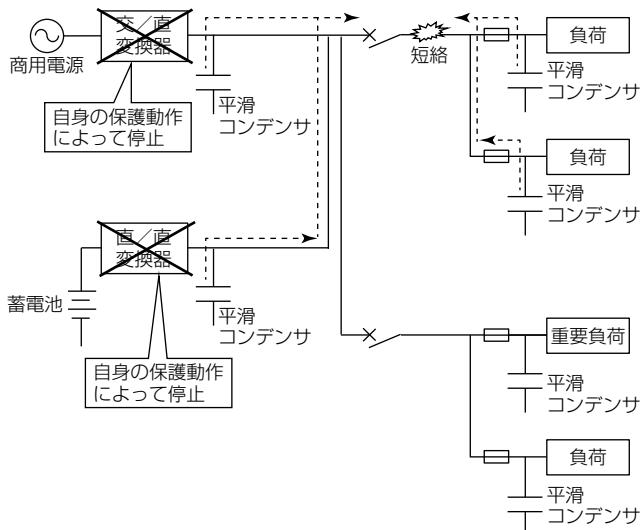


図2. 短絡保護に関わる問題点(1)(現在)

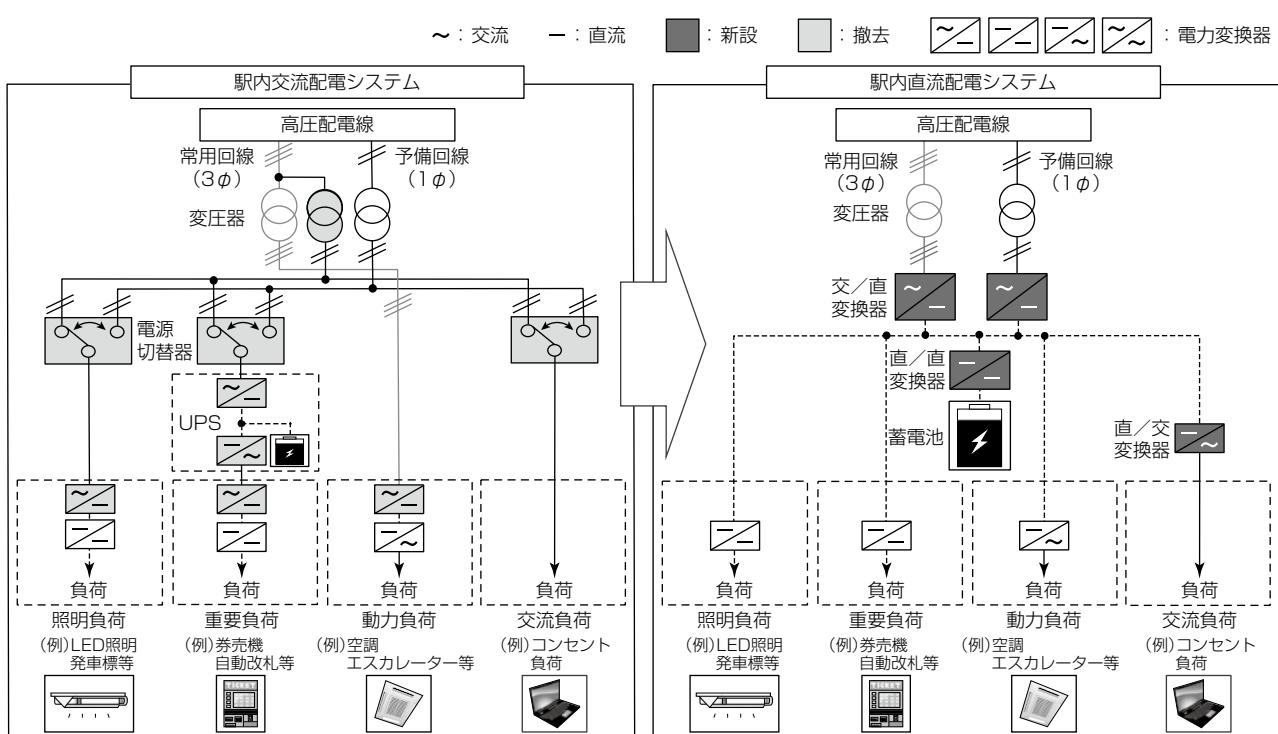


図1. 駅内配電システムの直流化の概念図

健全回線の配線用遮断器やヒューズが誤遮断する可能性がある(図3)。

(3) 短絡事故発生から事故回線の配線用遮断器やヒューズが短絡電流でトリップするまでの時間、配電電圧が低下することによって、健全回線内の負荷の動作に影響を与える可能性がある(図3)。

問題点(1)に対して、短絡時の保護協調を実現するためには、交流系統のように短絡時にも継続的に短絡点へ電力を供給して短絡事故回線だけを分離させる必要がある。継続的に電力供給する方法として、電力変換器に短絡電流抑制機能を具備させたり、ダイオード整流器を用いたりする方法が考えられる。将来、問題点(1)が克服された際に問題点になるのが問題点(2)(3)である。問題点(2)に対しては負荷側放電電流で誤遮断しない配線用遮断器やヒューズを選定する必要があり、問題点(3)に対しては負荷の許容最低電圧等を加味した保護協調をとる必要がある。

## 2.2 短絡保護の検討

2.1節の三つの問題点のうち、問題点(2)に対する解決策について述べる。具体的には、駅電機設備の電力変換器を対象に所内人工短絡試験で収集した電圧／電流波形データからモデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成するとともに、これを用いて負荷側放電電流による健全回線の誤遮断を招かない短絡保護装置の設定方法を検討した。

## 2.3 短絡保護の実施内容

次のとおりモデル駅を設定の上、短絡シミュレーションモデルを作成して短絡保護動作の健全性を確認した。

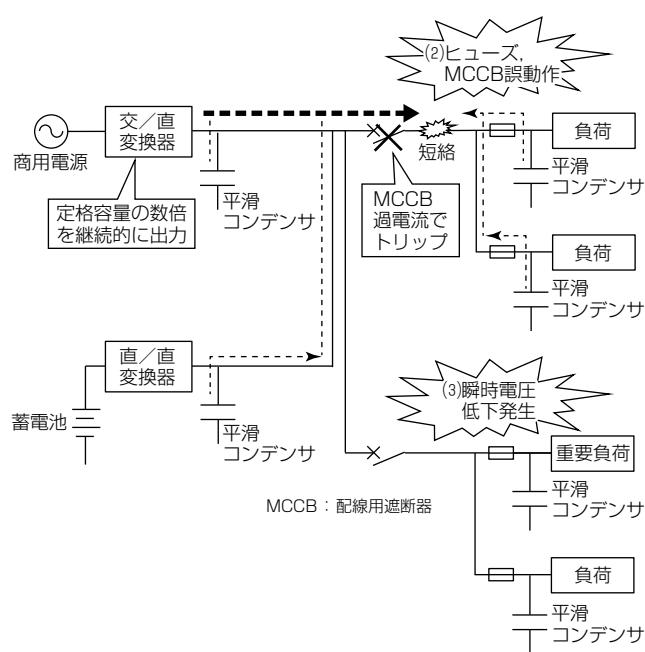


図3. 短絡保護に関する問題点(2)(3)(将来)

### 2.3.1 モデル駅の設定

小規模駅(地上駅・1面2線ホーム)をモデル駅に設定した。このモデル駅の配電ブロック図は図4とし、交／直変換器から直流母線、幹線用分電盤、幹線、分岐線用分電盤、分岐線、負荷の順に電力供給する。

### 2.3.2 短絡事故シミュレーションモデルの作成

次のとおり、Powersim社の電気回路シミュレーションソフトウェアPSIMを使用して、直流配電内の短絡シミュレーションモデルを作成した。

#### (1) 短絡シミュレーションモデルの前提条件

短絡シミュレーションモデルの前提条件を次のとおりとした。

- ①今回、負荷側放電電流による影響を最大にするため、母線の交／直変換器を直流電源に等価とし、各駅電機設備を無負荷状態とする。
- ②幹線用分電盤で照明負荷(LED照明やLED発車標等)回線、重要負荷(券売機と自動改札機)回線に分岐するものとし、分岐用分電線で各負荷設備に分岐するものとする。また、両分電盤内の全回線には過電流保護装置が設置されているものとする。
- ③幹線及び分岐線の線種には一般的に駅に導入されている“600V CV-T38mm<sup>2</sup>”及び“600V VVR8mm<sup>2</sup>”を選定する。また、幹線及び分岐線の長さを“10m”に設定することとする。これは現実的に最短と思われる数値であるが、短絡保護の検討で、配線長が短い(配線イ

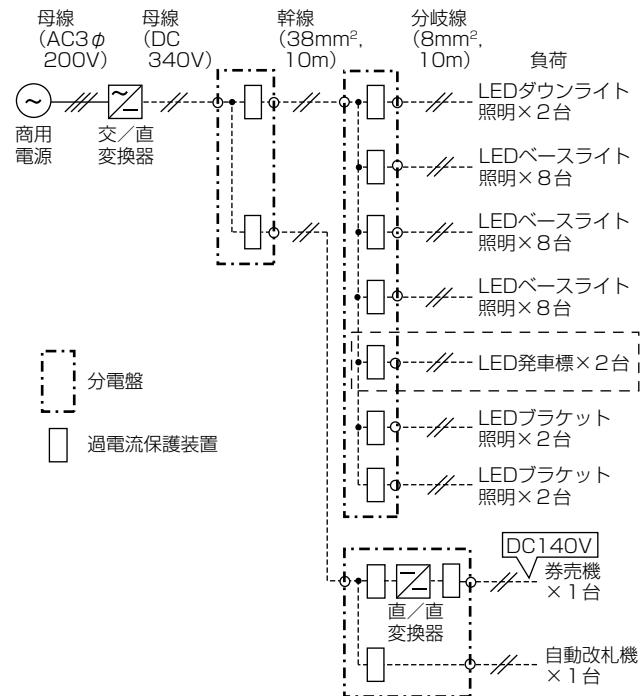


図4. モデル駅の直流配電ブロック図

ンピーダンスが小さい)すなわち短絡電流が大きい条件下で検討することで、より安全側の結果を得ることができる。なお、配線抵抗では“日本電線工業会 技資103号A”にのっとるものとする。

④駅内直流配電システムの導入費用削減を目的とし、LED照明を除く駅電機設備については既存の設備内に使用されている電力変換器を再利用することとする。

## (2) 短絡事故のモデル化

短絡事故を次のようにモデル化した。

- ①短絡事故点(短絡点抵抗  $0\ \Omega$ )を幹線用分電盤の出力部、分岐線用分電盤の入出力部、各駅電機設備の入力部から任意に選択できるものとする。
- ②各駅電機設備については、各設備内の電力変換器(実機)を対象にそれぞれ所内人工短絡試験を実施し(図5)、得られた電圧／電流波形データから各設備単体の等価回路モデルを作成することにする(図6、図7)。
- ③所内人工短絡試験については、対象の電力変換器を無

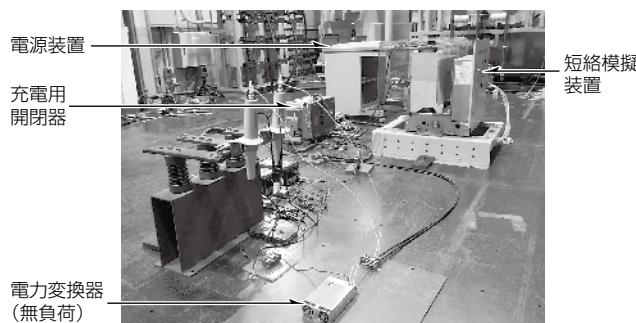


図5. 所内人工短絡試験

負荷状態かつ直流340V(券売機だけ直流140V)の充電状態で電源を切り離した後に短絡したときの線間電圧及び線電流の波形を収集することにする。

- ④これらの方法で各設備単体の等価回路モデルを作成後、それらを組み合わせてモデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成することにする。

## 2.3.3 短絡保護の設定方法

各分岐線単体での短絡事故時に過電流保護装置へ流れる短絡電流から、次の条件で配線用遮断器及びヒューズを選定した。

### (1) 配線用遮断器の選定条件

配線用遮断器については負荷の合計定格電流の1.2倍以上のものを選定することとする。

### (2) ヒューズの選定条件

ヒューズについてはカタログにのっとって選定することとする。具体的にはヒューズの劣化に対してサイクル寿命も考慮して(“通電休止の繰り返しで休止時間が十分にある場合”を仮定して負荷率0.7、通電実効値電流 = 設備定格電流として)、設備定格電流に対して1.45( $= 1.0 / 0.7$ )倍以上

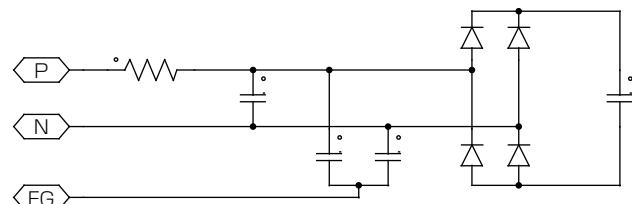
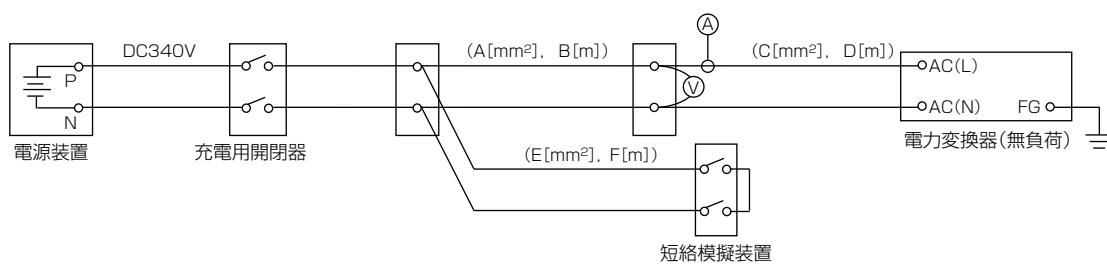
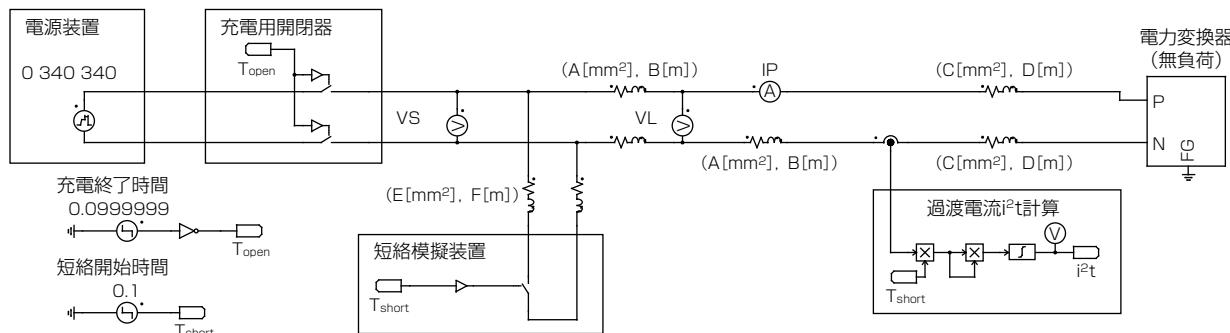


図6. 電力変換器のモデル化の一例



(a) 所内人工短絡試験回路



(b) 短絡シミュレーションモデル

図7. 短絡事故のモデル化の一例

のヒューズ定格電流とともに、過渡電流(短絡電流) $i^2t$ がヒューズ溶断 $i^2t$ の50%以下になるように選定することとする。

### 2.3.4 短絡保護動作の健全性検証

モデル駅の短絡シミュレーションモデルを作成の上、各短絡保護装置を対象に短絡保護を設定(配線用遮断器とヒューズを選定)した後、モデル上で短絡事故を発生させた際に負荷側放電電流によって健全回線の短絡保護装置が誤遮断を招かないことを確認する。

### 2.4 短絡保護の所内人工短絡試験と短絡シミュレーション結果

#### 2.4.1 短絡シミュレーション波形の精度の確認

モデル駅の一部回路を模擬したもので短絡シミュレーション波形の精度を確認した。一例として、図4の破線内の分岐線(LED発車標×2台)を対象に所内人工短絡試験と短絡シミュレーションの波形を比較した(図8)。 $i_{max}$ と $i^2t$ を比較すると差異が±5%以内の誤差に収まっており、各駅電機設備の等価回路モデルに一定の精度があることを確認できた(表1)ので、この手法で作成した各駅電機設備の等価回路モデルを組み合わせてモデル駅の短絡シミュレーションモデルを構築することにした。

#### 2.4.2 短絡保護動作の健全性の確認

モデル駅の各短絡保護装置を対象に短絡保護を設定(配線用遮断器とヒューズを選定)した(図9)。一例として、分岐線Aa(LEDダウンライト照明回線)の送電端で短絡が発生した場合の健全回線(分岐線Ab: LEDベースライト照明回線)の短絡保護装置での波形を示す(図10)。短絡保護装置で、 $i_{max}$ が240.5Aになって配線用遮断器の動作領域に至らなかったこと、及び過渡電流(放電電流) $i^2t$ が3.23A<sup>2</sup>sになってヒューズ溶断 $i^2t$ (19.00A<sup>2</sup>s)に至らなかったことから、負荷側放電電流によって健全回線の短絡保護装置が誤遮断を招かないことを確認できた。

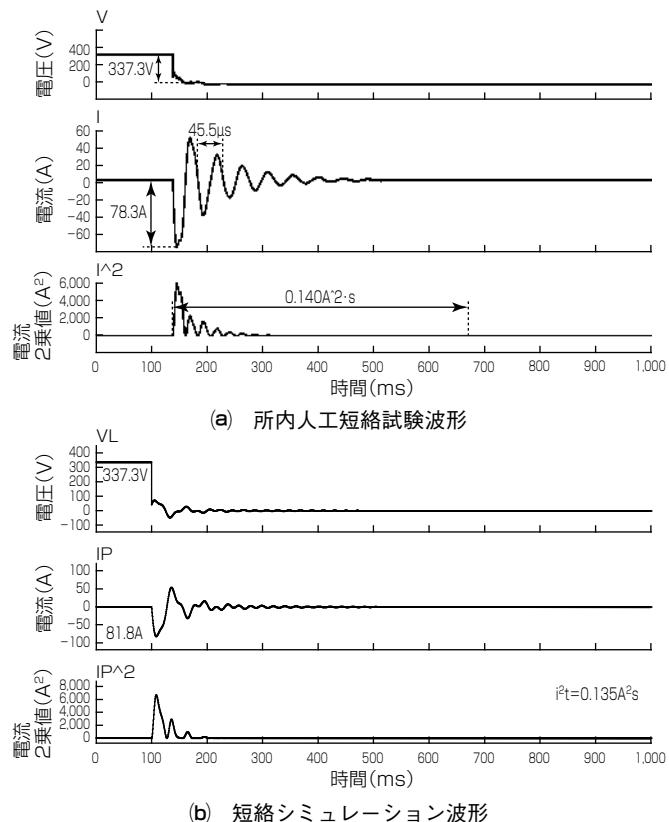


図8. 短絡波形の一例

表1. 所内人工短絡試験波形と  
短絡シミュレーション波形との比較結果

	$i_{max}$	$i^2t$
所内人工短絡試験波形	78.3A(0.0%)	0.140 A <sup>2</sup> s(0.0%)
短絡シミュレーション波形	81.8A(+4.5%)	0.135 A <sup>2</sup> s(-3.6%)

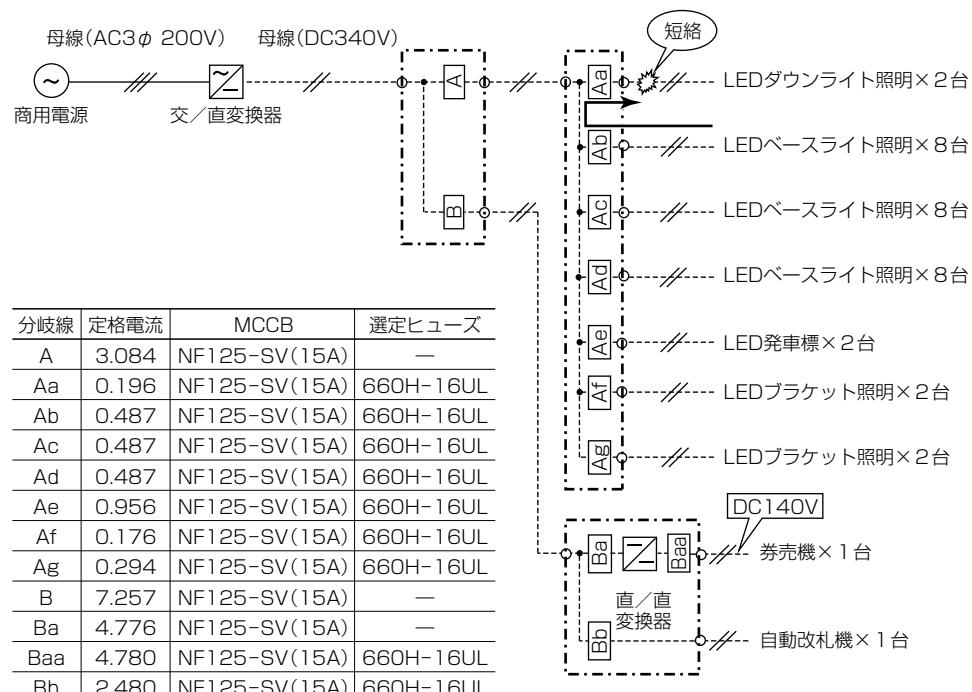


図9. モデル駅の短絡保護設定一覧及び短絡事故点

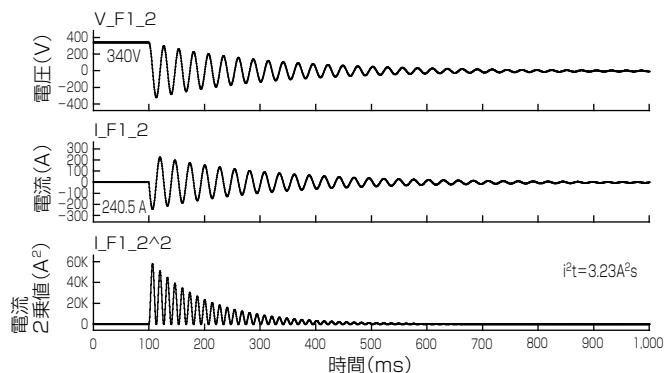


図10. 分岐線Abの短絡保護装置でのシミュレーション波形

### 3. 地絡保護手法の検討

#### 3.1 直流配電内の地絡事故の検出方法

簡略的に交流電源から負荷までの電力供給フロー(交流電源→交／直変換器→直流母線→幹線用分電盤→幹線→分岐線用分電盤→分岐線→負荷)を示した直流配電ブロック図に地絡保護装置(以下“51G”という。)の配置イメージを反映した(図11)。直流配電内の地絡保護として、幹線用分電盤と分岐線用分電盤に51Gを設置することを想定した。これで幹線と分岐線のP相とN相の電流差を監視して地絡箇所を各線単位で特定可能である(図12)。

#### 3.2 分岐線数の増加による51G動作への懸念事項

ITU-T L.1200にのっとってデータセンターの直流配電で採用されている中性点高抵抗接地を駅内配電に適用した際の地絡回線や健全回線の分岐線数による51G動作への影

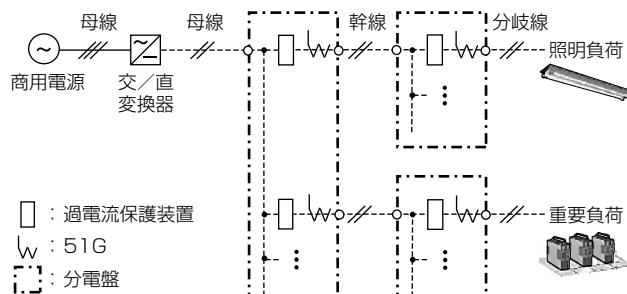


図11. 51Gの配置イメージ

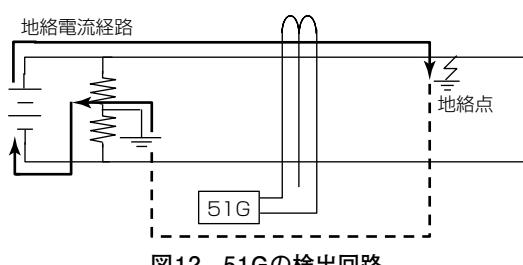


図12. 51Gの検出回路

響について述べる。この接地方式による地絡電流の抑制で感電時の身体的影響を低減できるが、保護装置の検出が困難になるので検出感度を高める必要がある。ここで、P相地絡時の地絡点電流 $I_g$ は中性点接地抵抗 $R_e$ 及び各分岐線の対地絶縁抵抗 $R_z$ を介してN相母線に流れるルートに分かれるので、分岐線ごとのN相母線への吸込み電流を $I_{gz}$ 、地絡回線及び健全回線の分岐線数を $m, n$ とおくと、両回線(両幹線)の不平衡電流 $I_{g51G}, I_{s51G}$ は次式になる(図13)。

$$I_{g51G} = I_g - I_{gz} * m \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$I_{s51G} = I_{gz} * n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ゆえに、 $m$ が増えると $I_{g51G}$ が減って51Gの検出感度電流より下回ると誤不動作の懸念が、 $n$ が増えると $I_{s51G}$ も増えて51Gの検出感度電流より上回ると誤動作の懸念が考えられる。

#### 3.3 駅内直流配電内での51Gの動作検証

51Gの駅内直流配電への適用の可能性を検証するため、模擬試験回路を構築して、異なる地絡条件の所内人工地絡試験で各保護装置の動作有無を確認した。

##### 3.3.1 検証方法

###### (1) 保護動作条件

51Gの最小動作時間が400msであるため、幹線：800ms、分岐線：400msに設定して協調を確保することにした。また、地絡電流による感電電流をIEC/TS60479-1 Ed4.1(感電電流と継続時刻の関係)の領域DC-2内に收めることにし、分岐線での感電時間は配線用遮断器の開放時間(20ms)と裕度を見て500msにして $I_g$ の上限を40mAと設定した。ゆえに、地絡電流遮断時間検出51Gの検出感度を最低値の20mAとした。ただし、最大不動作電流は検出感度電流の50%(10mA)である。

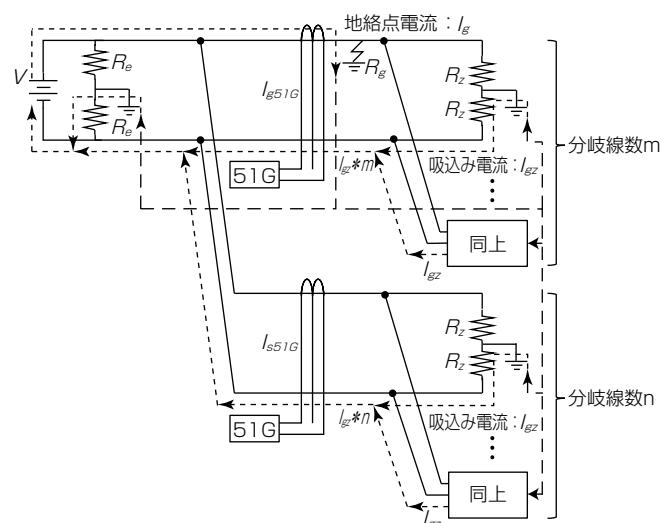


図13. 地絡電流ルート

## (2) 所内人工地絡試験

図14の試験回路を対象に地絡回線と健全回線の分岐線数  $m, n$  を変数として、直流母線電圧  $V$  (380V) を印加中にP相模擬地絡(地絡点抵抗  $R_g$  : 1 kΩ)を発生させた際の地絡回線と健全回線の幹線用51G(51G<sub>g</sub>, 51G<sub>s</sub>)の動作有無を確認することにした。なお、分岐線の対地絶縁抵抗については、直流母線のP相～アース間とアース～N間に分岐線の合成対地絶縁抵抗  $R_{zg}$ ,  $R_{zs}$  を挿入して模擬した。ここで、地絡事故時の全分岐線数  $x$ (この試験では  $m+n$ ) の等価回路を考えると、P相とN相の合成抵抗  $Z_p$ ,  $Z_n$  及び  $I_{gz}$ ,  $I_g$  は次式になる(図15)。

$$Z_p = (1/R_e + x/R_z + 1/R_g)^{-1} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$Z_n = (1/R_e + x/R_z)^{-1} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$I_{gz} = Z_n / (Z_p + Z_n) * V / R_z \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$I_g = Z_p / (Z_p + Z_n) * V / R_z \quad \dots \dots \dots (6)$$

式(1)～式(6)から  $I_{g51G}$ ,  $I_{s51G}$  の理論値を導出することにした。

## 3.3.2 検証結果

$m, n$  を変化させた場合の51Gの動作有無結果の一例を表2に示す。51G<sub>g</sub>は  $m=0, 16$  のときに動作したが、 $m=27$  のときに誤不動作した。これは、地絡回線の  $I_{gz}$  が  $I_g$  を打ち消して  $I_{g51G}$  が51G検出感度を下回ったためと考えら

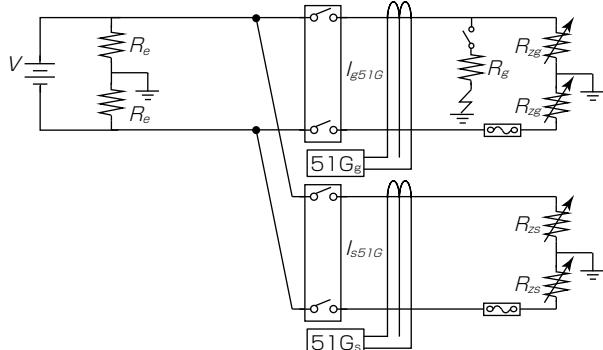
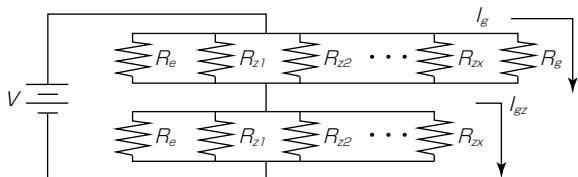


図14. 人工地絡試験回路



$R_{z1}, \dots, R_{zx}$ : 各分岐回路ごとの絶縁抵抗(ここでは  $R_z$  とする)

図15. 地絡事故時の全分岐線数  $x$  の等価回路

表2. 所内人工地絡試験結果の一例

分岐線数		地絡電流 $I_{g51G}$		検出器動作	
地絡回線	健全回線	地絡回線	健全回線	地絡回線	健全回線
0	27	31.1mA	23.6mA	動作	誤動作
16	11	17.1mA	9.6mA	動作	不動作
27	0	7.5mA	0.0mA	誤不動作	不動作

れる。また、51G<sub>s</sub>は  $n=0, 11$  のときに不動作であったが、 $n=27$  のときに誤動作した。これは、健全回線の  $I_{gz}$  が51G検出感度を上回ったためと考えられる。

## 3.4 駅内直流配電の地絡保護の安全性・安定性向上

3.3節から、51Gは地絡回線の分岐線数が多いと誤不動作し、健全回線の分岐線数が多いと誤動作することを確認した。駅内直流配電( $V: 340V$ ,  $R_e: 33k\Omega$ )を想定すると、感電電流  $I_g$  が最大かつ  $I_{s51G}$  が最大になる最悪条件( $R_g: 0\Omega$ ,  $R_z: 400k\Omega$ (電気設備技術基準の許容対地絶縁抵抗))でも感電電流が領域DC-2内にあり ( $I_g < 40mA$ )かつ51Gが誤動作しない ( $I_{s51G} < 10mA$ ) 条件は、式(1)～式(6)から  $x < 35$ かつ  $n < 12$  (1幹線当たりの最大分岐線数は10)になる。

## 4. むすび

駅内配電システムの直流化によって、駅で“電源の信頼性向上” “設備の簡素化” “省エネルギー”的効果が期待されると考え、駅内直流配電システムの開発を進めている。本稿ではこの開発の課題の一つである“直流配電内の短絡／地絡保護協調の確立”に向けて、短絡保護の三つの問題点のうち“充電状態の負荷内部コンデンサ容量や寄生容量に起因した放電電流による健全回線の配線用遮断器やヒューズの誤遮断”について検討した。具体的には、駅電機設備の電力変換器を用いた所内人工短絡試験で収集した電圧／電流波形データを基に短絡シミュレーションを確立した。また、これを活用して小規模モデル駅の照明負荷や重要負荷を対象に設定した短絡保護装置(配線用遮断器及びヒューズ)が誤遮断を招かないことを確認し、実機への設定方法の適用について可能性を示唆した。

また、本稿では課題の一つである“電源の信頼性向上”に向けて51Gを用いた地絡保護を検証した。この結果、51Gは地絡回線の分岐線数が多いと誤不動作し、健全回線の分岐線数が多いと誤動作する可能性があることを確認した。また、これらの発生を防ぐ最大分岐線数の算出法を導出し、適当な分岐線数の設定によって、51Gの駅内直流配電への適用の可能性を示した。ただし、最悪条件での導出のため、駅の特情に応じて分岐線数を決定することが望ましい。今後、動力負荷の短絡保護検討や、51G以外の地絡保護手法の確立等を進める予定である。

## 参考文献

- 竹内勇人, ほか: 中低圧直流配電システムの取組み一駅舎直流配電の省エネルギー効果ー, 第56回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 603 (2019)
- 蘭田洋平, ほか: 駅内直流配電の短絡保護に関する一考察, 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 5~41 (2019)
- 蘭田洋平, ほか: 駅内直流配電における地絡保護装置の動作検証, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 5~186 (2020)

# IoTを活用したモータ診断システム

Diagnostic System for Motor Equipment Using Internet of Things

平田陽介\*

Yosuke Hirata

三好将仁†

Masahito Miyoshi

宮内俊彦\*

Toshihiko Miyauchi

宗次亮\*

Ryo Munetsugu

## 要旨

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設備に関しては、故障停止による被害が甚大になることから定期的な点検作業を実施している。敷地内に点在するモータ設備に対して巡回点検が必要になることから、点検作業には多大な時間を必要としている。また、点検には音やにおい等、熟練作業者の五感に頼るノウハウによって点検される場合も多いが、少子高齢化が進み、熟練作業者の不足も問題の一つとして挙げられる。

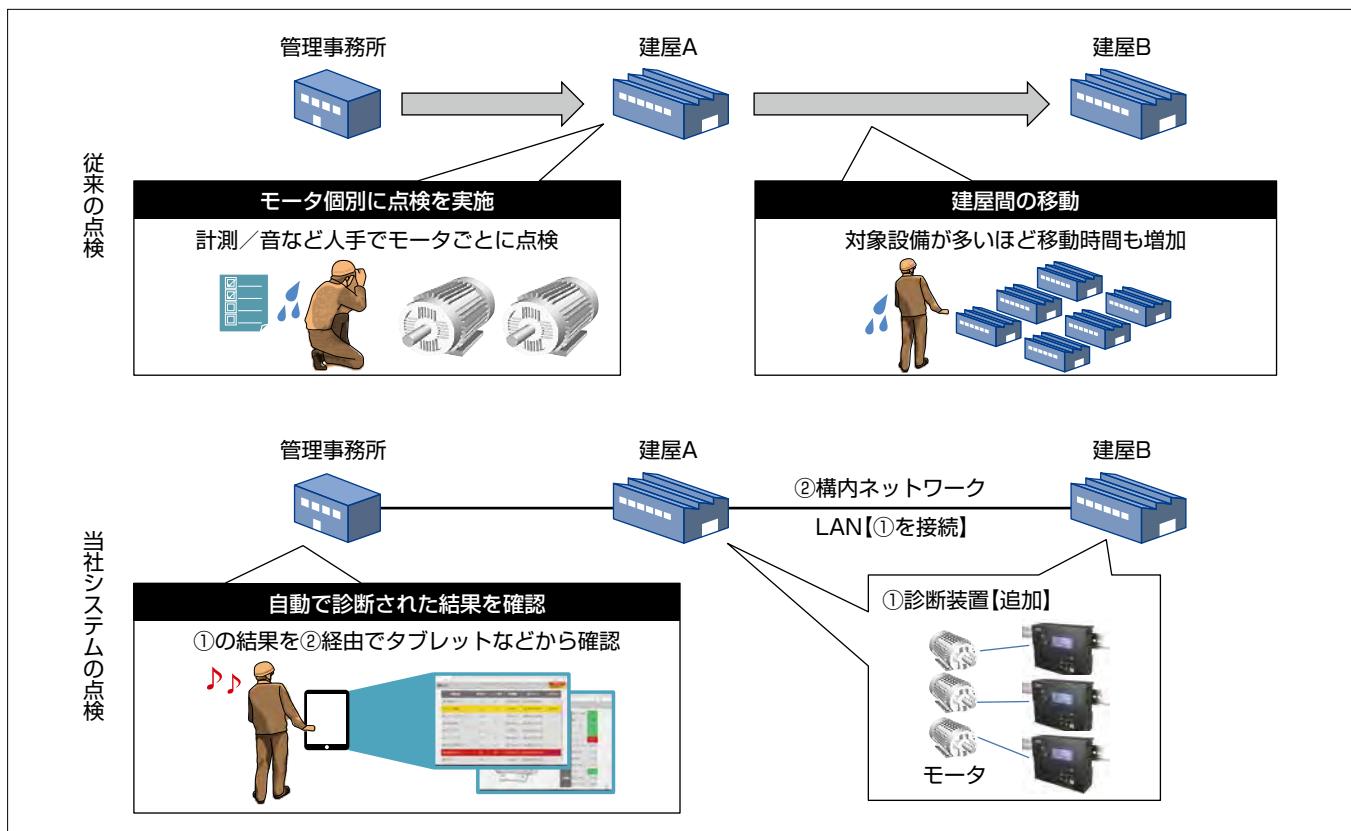
三菱電機は、これらの問題を解決するため、オンラインで自動でモータ設備を診断するシステムを製品化した。この製品は、独自解析アルゴリズムで、モータ設備稼働中の電流／電圧情報からモータの異常発生前に兆候を検出する。

このシステムによって、自動でモータ故障要因の約68%

に当たる次の異常を事前に検出することが可能になるため、経済的かつ熟練作業者のノウハウに依存しない点検(診断)が可能になり、設備の安定稼働を実現する。

- (1) 機械系異常(異常振動／軸受損傷、回転子バー切れ、ベルト断線)
- (2) 電気系異常(レヤショート)
- (3) 負荷設備異常(負荷トルク異常)

この製品には既存のモータ設備へ簡単に追加可能な簡易設置モータ診断装置と、当社モータコントロールセンタに搭載しているモータ診断機能付きマルチコントローラの2種類の診断装置を用意しており、ユーザーのニーズに合った製品選択を可能にしている。



## 従来の点検と今回開発の診断システムによる点検のイメージ

従来の点検では、敷地内のモータ設備それぞれに対して巡回／点検を実施していたが、①診断装置をモータごとに設置し、②構内ネットワークLANに接続しておくことで、タブレットやパソコンから①の診断結果を②経由でいつでも確認することができる。

## 1. まえがき

主に発電設備や産業プラントなどで使用される低圧三相モータは工場のファン、ポンプ、ベルトコンベアなど様々な設備の動力を担う主要機器であり、生産性の維持・向上のため、安定した連続運転性能に加えて、メンテナンスの効率化・省力化が求められている。また、少子高齢化などによって点検に必要なノウハウを持った熟練作業者が不足している。

当社はこれまでモータ設備を監視するためのモータコントロールセンタ(MCC)を製品化している。これまでの技術を集約して独自アルゴリズムを開発し、稼働中のモータ設備情報から異常発生前の兆候を検知することが可能になった。この技術を応用し、簡単にモータ設備の診断を行うシステムを製品化したことによって、巡回点検時間の削減や熟練作業者のノウハウに依存しない安定的な設備点検(診断)が可能になる。

## 2. モータ診断技術

### 2.1 電流／電圧情報によるモータの診断

工場やプラントなどで最もよく使用されるかご形誘導機がこの診断システムの対象になる。このモータは、①固定子(固定子巻き線と鉄心)②回転子(回転子バーと鉄心)及び③軸受から構成される。モータや、それにつながる負荷やベルトを診断する監視項目として、一般的には振動を計測することが多い。しかし、従来のメンテナンスは、人手が必要で、常時の診断は難しいという問題があった。

そこで、低成本、自動、かつオンラインで設備の診断を行うことに着目し、比較的容易に取得可能な電流／電圧情報の解析から、モータ特有の信号を抽出することで効率的なモータ設備の診断を可能にした。

### 2.2 診断項目

モータ診断システムで診断が可能な項目とその検知方法を表1に示す。診断する項目は主に5種類(①異常振動／

表1. 診断項目と検知方法

故障種別	故障内容	検知方法
機械系異常	①異常振動／軸受損傷	電流の回転周波数成分 軸受固有周波数成分
	②回転子バー切れ	電流の回転子バー切れ成分
	③ベルト断線	電流のベルト断線成分
電気系異常	④レヤショート (固定子巻線ターン間短絡)	逆相電流・電圧
負荷設備異常	⑤負荷トルク異常(過負荷)	トルク推定値

軸受損傷②回転子バー切れ③ベルト断線④レヤショート(固定子巻き線ターン間短絡)⑤負荷トルク異常)である<sup>(1)</sup>。設備が停止するより前に、これらの異常発生やその種類を把握できる。それぞれの故障を検知するための技術について述べる。

### 2.2.1 異常振動／軸受損傷の検出方法

電源の周波数を $f_s$ (Hz)、極対数を $p$ 、また回転磁界の速度と回転子の回転速度の差の割合であるすべりを $s$ とすると、回転子の回転周波数 $f_r$ (Hz)は式(1)で表される。

$$f_r = \frac{1-s}{p} f_s \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

モータと負荷の間に芯のずれ(ミスアラインメント)や、ボルトの緩み、偏心、異常な振動、軸受の損傷があると、その程度の大きさによって、周期的にトルクの大きさや電流の流れやすさが変わる。そのため、電流には電源の周波数成分(50Hz又は60Hz)だけではなく、異常の兆候が側帯波として現れる<sup>(2)</sup>。図1(a)と図1(b)に、正常時と異常時の電流解析結果の例を示す。回転速度に同期した振動に対応して、異常時には式(2)で表される電流の回転周波数成分 $f_m$ (Hz)が増加する。

$$f_m = f_s \pm f_r \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

また、この周波数成分だけではなく、軸受の形状(内輪、外輪、玉など)を考慮した、軸受固有の周波数成分もモータ診断システムで監視する。そのため、不具合を特定し、設備が停止する前に対策を取ることができる。

図2に、軸受の加速劣化試験結果を示す。軸受に異物を混入してモータを運転させ、軸受の劣化を進行させた。このとき、電流の回転周波数成分が時間と共に増加しており、異常を示す兆候として有用であることを確認した。

### 2.2.2 回転子バー切れの検知方法

回転子には、電流が流れる回転子バーがあるが、運転を続けるとバーに損傷や切れが発生することがある。このとき、電流値の増加や過熱、また部品が飛散するおそれがあるため、この現象を早期に検知する必要がある。

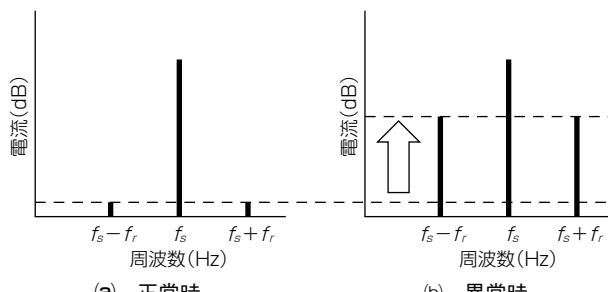


図1. 電流から異常兆候を得る原理

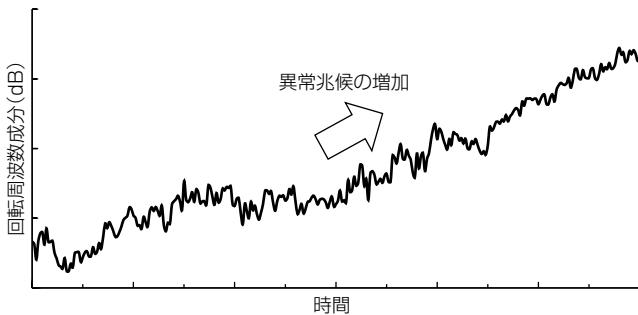


図2. 軸受の加速劣化試験結果

回転子バーに切れがあると、バーや固定子巻き線の電流の流れ方が変化する。電源周波数を $f_s$ (Hz)、すべりを $s$ とすると、式(3)で表されるバー切れ成分 $f_{bar}$ (Hz)が増加する。

$$f_{bar} = (1 \pm 2s)f_s \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

図3に、正常時と、回転子バー切れを1本発生させた異常時について、回転子バー切れ成分を比較した結果を示す。着目している $(1-2s)f_s$ や $(1+2s)f_s$ の周波数成分は、どちらも異常時の方が約10dB大きい。そのため、この側帯波を監視することで、回転子バーの切れを1本から検出できることを確認した。

### 2.2.3 ベルト断線の検出方法

ベルトがある場合、ベルトが回転する周期で電流が変動する。ベルトが回転する周波数 $f_{belt}$ (Hz)は、式(4)で表される。ここで、モータブーリ半径を $D$ (m)、ベルトの長さを $L$ (m)、回転子の回転周波数 $f_r$ (Hz)としている。

$$f_{belt} = \frac{2\pi D}{L} f_r \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

このとき電流には、ベルトが回転する周波数だけ電源周波数からずれた式(5)で表される側帯波が、特徴として現れる。ここで、 $k$ は正の整数を表す。

$$f_c = f_s \pm k \cdot f_{belt} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ベルトが断線した場合は、理論上電流へのベルト成分

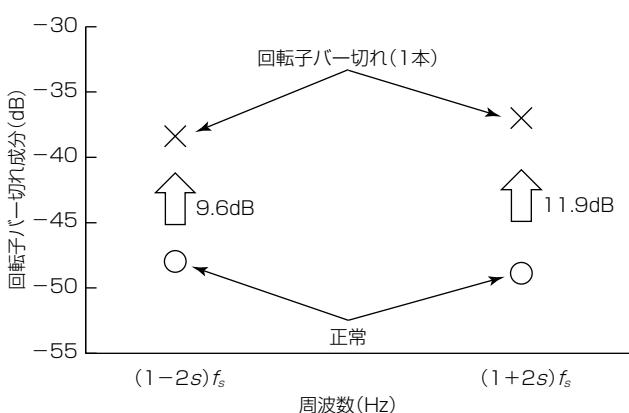


図3. 回転子バー切れ試験結果

の影響がなくなる。このように、電流を解析することで、モータだけでなく設備全体の状態を監視できる。

### 2.2.4 レヤショートの検出方法

固定子の巻き線には、フレームに通電しないように絶縁処理が施されているが、熱や傷が原因で短絡や地絡が発生することがある。同じ相の中で数ターンの短絡(レヤショート)があると、その短絡部でループする電流 $i_f$ が流れる(図4)。しかし、ループする異常な電流があっても、三相の電流が増加しなければ、リレーでは保護できない。ループする電流は、モータの過熱や更なる短絡を引き起こすため、早期に検知する必要がある。

そこで、U、V、W相に流れる電流のわずかなアンバランスとして、逆相成分を解析する<sup>(3)</sup>。また、レヤショートがなくとも、逆相電圧によっても逆相電流は発生するので、その影響を補正したレヤショート評価値を用いている。図5に、巻き線の短絡数を調整し、そのときの逆相電流を解析した結果を示す。巻き線を1ターン短絡させたときの変化は微小だが、6ターンの短絡からはレヤショート評価値が大きく増加している。このように、逆相成分を解析することでレヤショートが検知できることを確認した。

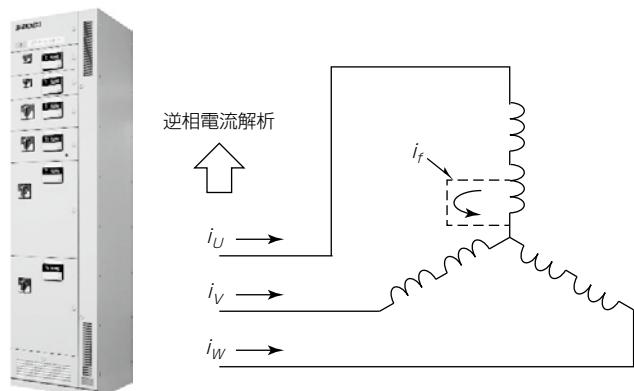


図4. レヤショート時の回路図と検出方法

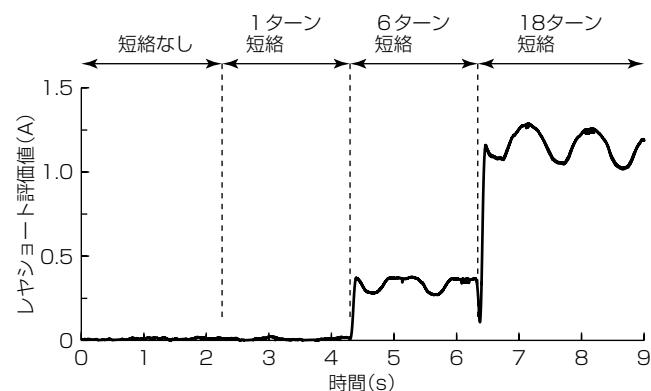


図5. 固定子巻き線レヤショート試験結果

### 2.2.5 負荷トルク異常の検出方法

配管・フィルタのつまりなど、モータにつながる負荷に異常があると、通常時と比べてモータのトルクが変化する。トルクは、電流と電圧データだけから計算して推定するため、特殊なセンサを追加することなく設備を監視することが可能になる。モータが output するトルク  $T(N \cdot m)$  は、極対数を  $p$ 、二相に換算した固定子上の電流を  $i_a, i_\beta$ 、固定子の巻き線を通過する磁束を  $\Phi_a, \Phi_\beta$  とすると式(6)で表される。

正常時のトルク値を学習して、トルクが増加又は減少したことを検出するためのしきい値を設備ごとに設定できる。

### 3. システム構成

敷地内での複数のモータ設備の診断を自動的に行い、結果を一括管理するためのシステムであり、診断装置(図6の(1)-1と(1)-2)、ゲートウェイ(図6の(2))、監視ディスプレイ(図6の(3))の3種類の機器で構成する。

### 3.1 診斷裝置

設備の状況に応じて柔軟に対応できるように、2種類の製品ラインアップを設けている。

### 3. 1. 1 簡易設置診斷裝置“DiaPro Motor”

既存モータ設備に対して、診断機能だけを追加する場合は、図6の(1)-1に示す簡易設置診断装置DiaPro Motor(以下“DP”という。)を設置することでモータ診断が可能になる。DPは電流信号だけで稼働中のモータのレヤショート異常と機械系異常の予兆検出が可能になる。

DPは既存設備へ簡単に追加可能な点を特長にしている。具体的には、計測電流の取得方法にクランプ式を採用し、配線変更などを不要にしている。また、取付け方法もDINレールやねじ止めが可能なため、様々な場所に取り付けることができる。図7にDPの外形寸法を示す。

### 3.1.2 診断機能付きマルチコントローラ“EMC”

MCCを新設／更新する場合は、当社MCCの導入によってモータ診断が可能になる。また、既に当社MCCを導入している場合は、ユニットの交換によってモータ診断が可能になる。

当社MCCは、図6の(1)-2に示す計測・保護・モータ診断機能を持ったマルチコントローラEMCが取り付けられている。

EMCは計測・保護機能が備わっている点と、電流／電圧情報を使用することでDPでは検出できない負荷トルク異常の予兆も稼働中に検出することが可能な点が特長になっている。また、当社MCCは1面当たり最大40ユニット

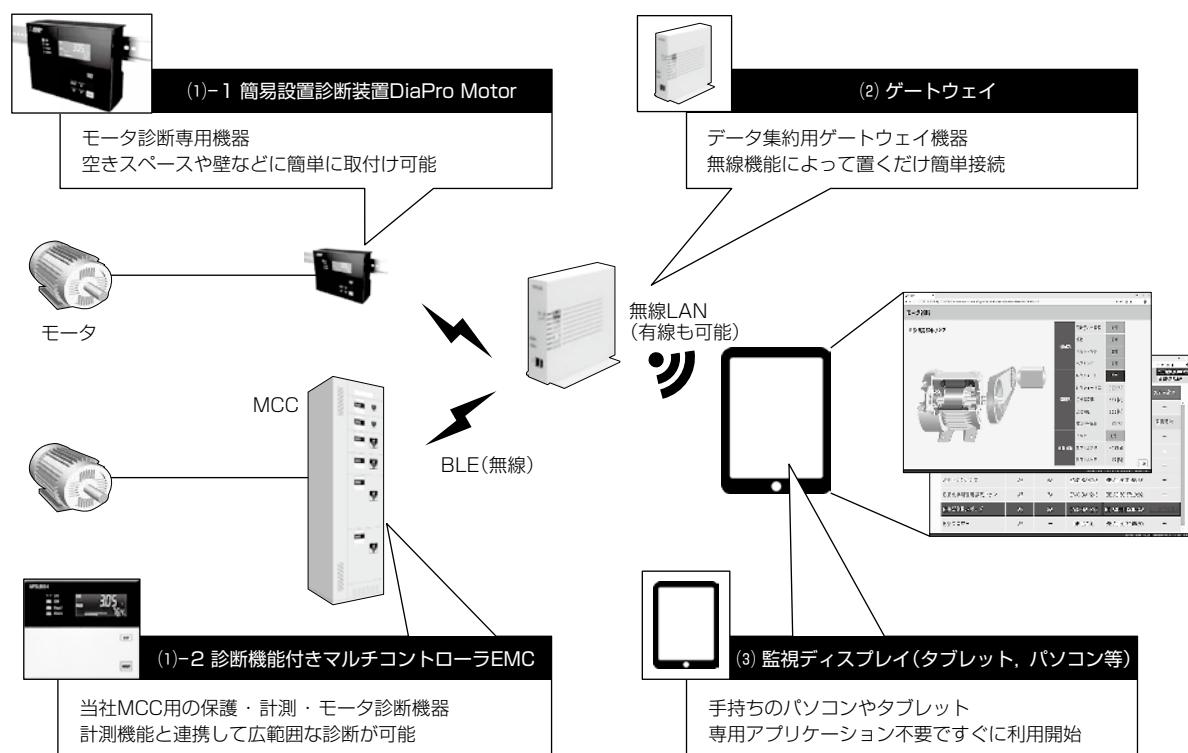


圖 6-1 BLE 構成

ト収納可能になり、省スペース化へ貢献する。表2にDPとEMCでの比較を示す。

### 3.2 ゲートウェイ

診断装置によって、モータ設備の自動診断が可能だが、図6の(2)に示すゲートウェイを設置することで点在す

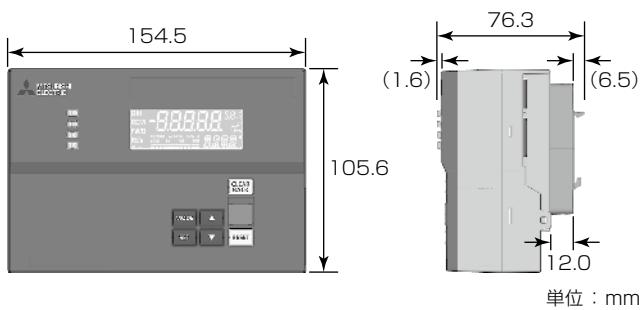


図7. DPの外形寸法

表2. DPとEMC比較表

機能項目		DP	EMC
計測機能		×	○
保護機能		×	○
診断機能	負荷トルク異常検出	×	○
	レヤショート検出	○	○
	機械系異常検出	○	○
取付け場所		盤内空きスペース や壁付け	当社MCC盤面

るモータ診断情報を最大40台分集約できる。ゲートウェイと診断装置間はBLE通信(無線), ゲートウェイとタブレット(パソコン等)間は無線LAN通信が可能なため, 配線レスで設置後, 即座に情報を収集できる。また, ゲートウェイはルータ機能も搭載しているため, 構内ネットワークLANに接続することで現場やオフィスなどでいつでも診断結果を確認できるようになる。また, セキュリティ対策として, 簡易的なファイアウォール機能も搭載されており, 不要な通信や接続をブロックすることも可能である。さらに現場設置を想定し, 電源AC100~240V, DC24V対応に加えて動作温度-20~55℃, 防塵(ぼうじん)防水IP53対応モデルもラインアップしている。

### 3.3 監視ディスプレイ

診断結果を表示するための監視ディスプレイとして図6の(3)のように汎用的なタブレットやパソコン等を使用できる。また、専用アプリケーションを不要としており、ブラウザ経由でゲートウェイのURL(Uniform Resource Locator)にアクセスすることで簡単に診断結果を確認できる。診断はDPやEMC内で実施しており、データ集計と表示画面作成はゲートウェイで実行しているため、タブレット(パソコン等)への負担は少なく、比較的低スペックの端末でもストレスなく設備状況を把握することが可能になっている。次に図8に示す監視画面について述べる。

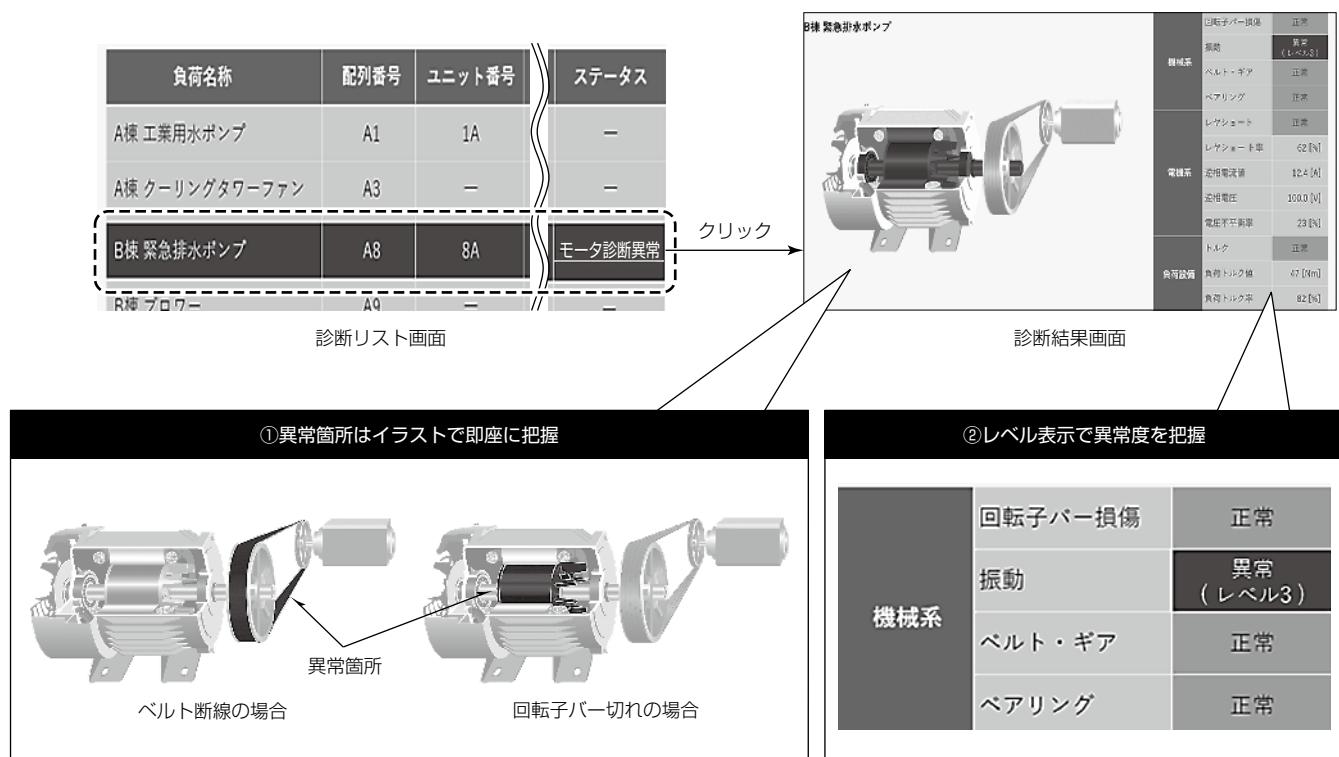


図8. 監視画面

表3. 振動異常レベルの目安

レベル	目安
1	通常運転とは異なる差異(異常)を検知
2	異常の兆候が進展
3	異常が更に進展しており、故障の可能性が高い

### 3.3.1 診断リスト画面

モータ設備内の状況を一覧表示しており、異常発生時は、リストの背景色を変更してユーザーに通知する。異常の種別は2種類あり、診断結果の異常(赤背景)項目又は通信が途絶えている(黄色背景)項目を通知する。診断結果の詳細を確認するためには、該当項目をクリックすることで、診断結果画面へ遷移する。

### 3.3.2 診断結果画面

診断結果画面ではイラストとリストでモータ個別の診断結果を表示する。イラストでは、モータの異常箇所を塗りつぶしていることで視覚的に異常箇所を把握できる。リストでは、各異常項目に対して異常有無を一覧表示している。異常の兆候にはらつきが多い機械系の振動異常については異常レベルを数値化することで、ユーザーは異常度合いを把握できる。これによって、モータ設備の事故発生前にメンテナンスや交換が可能になり、事故を未然に防止する。振動異常のレベルは表3の目安を設けている。

また、異常検出感度は低・中・高と診断装置ごとに設定できるため、モータ設備の重要度に合わせて検出時期を調整することも可能になっている。

## 4. 導入効果

このシステムを採用した場合の導入効果を試算する。このシステムはモータ設備の点検効率化と事故による被害を抑えることが可能になる。

### 4.1 点検時間の削減効果

点検するモータ台数を10台、毎週5日間を1年間(52週)点検する場合を想定する。従来の点検では、点検時間を2分/台、移動時間を3分/台と仮定し、このシステムによる点検では毎日プラウザから結果を確認する時間を1分/台としたときの効果を表4に述べる。

このシステム導入によって、80%以上の削減効果を見込むことができる。また、システムが自動でモータ設備を診断することで一定の精度で異常を検出することが可能になる。

表4. 点検時間の削減効果

項目	従来の点検	自動診断 (今回開発システム)
点検時間	20分	0分
結果確認時間		10分
巡視時間	30分	0分
年間合計時間	216時間	43時間

80%以上の削減

表5. 事故被害の抑制効果

項目	故障原因比率	DP	EMC
軸受不良 (機械系異常)	32.5%	○	○
絶縁劣化 (レヤショート)	20.5%	○	○
過負荷 (負荷トルク異常)	15.1%	×	○
単相運転	12.1%	×	△
断線	6.9%	×	△
冠水	7.1%	×	△(注1)
外的衝撃	5.7%	×	△(注1)
故障原因カバー率	53.0%		68.1%

○：異常兆候検出可能 △：故障時に保護可能 ×：防止不可

(注1) 故障のケースによっては検出できない可能性あり

## 4.2 事故被害の抑制効果

一般社団法人 日本電機工業会の報告資料<sup>(4)</sup>から引用した電動機の故障原因比率に対して、事故被害の抑制効果を表5に示す。

このシステムを導入することで、DPは約53.0%の故障原因をカバーすることが可能であり、EMCは約68.1%をカバーすることが可能である。また、EMCは故障時の保護を含めると故障のケースによって検出できない可能性もあるが、全ての故障項目を防止することが可能になる。

## 5. むすび

モータ設備に対する当社独自の診断技術とそれを応用した製品について述べた。今後は、更に効率的かつ安定的なモータ設備の稼働ができるよう機能拡充などを進めていく。

## 参考文献

- 金丸 誠, ほか: 電気信号情報を活用したモータ設備の異常検知技術, 三菱電機技報, 93, No.6, 339~342 (2019)
- 金丸 誠, ほか: 固定子電流パワースペクトルの特徴周波数監視による電動機軸受の異常検出技術, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 137, No.10, 799~805 (2017)
- 金丸 誠, ほか: 逆相電流電圧解析による電動機固定子巻線短絡検出の高精度化, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 137, No.1, 17~23 (2017)
- 一般社団法人 日本電機工業会: 誘導電動機の更新推奨時期について, 電力・産業システム 9209 (2000)