最近の中電圧スイッチギヤに関する技術動向

解説

正員 里見 昌男 [日新電機(株)第2電力機器事業部]

正員 正木 信男 [(株)東芝府中工場スイッチギヤ部]

正員 宮川 勝 [(株)東芝府中工場スイッチギヤ部]

1. ま え が き

今日のような高度情報化社会においては、電気エネルギーに対する依存度はきわめて高く、電気に要求される品質は際限なく高まっている。このようななかであって電力消費地に最も近い受配電設備である中電圧スイッチギヤ(3.6 kV から 36 kV クラスで一部 72/84 kV を含む場合もある)は絶縁方式において、適用電圧、通電電流との最適化を図りつつ気中絶縁方式、固体絶縁方式、SF₆ガス絶縁方式およびそれらの複合絶縁方式など種々研究実用化されてきた。また小形化、高性能化など、各々の技術課題に対して最適な技術を確立すべく、基礎技術開発、実用化技術開発が進められている。

本稿では、これら中電圧スイッチギヤの技術動向、構成要素の技術的課題、適用遮断器の開発動向およびキュービクル形ガス絶縁開閉装置の適用動向について紹介する。

2. 中電圧スイッチギヤの技術動向

スイッチギヤは 1890 年ごろに開放形が誕生し、すでに 100 年が経過している。この間、中電圧スイッチギヤの形態は時代のニーズに応じて変化してきたが、その流れは小形化と耐環境性向上および省メンテナンスの歴史であり、絶縁技術と機器の複合化技術によるところが大きい。図 1 はこの観点から 3.6~36 kV クラスおよび 72/84 kV クラスの中電圧スイッチギヤの変遷を示したものである。

(1) 3.6~36 kV クラスのスイッチギヤ

3.6~36 kV クラスのスイッチギヤは当初開放形で

あり、遮断器・断路器・計器用変成器などの構成機器を屋外に並べ接続したものであった。このため設置面積が広大なうえ主回路が屋外に暴露しており風雨・塩害・じんあいなどの自然環境の影響が大きいものであった。そこで、小形化と耐環境性、安全性および保守性を向上させるため、金属閉鎖形が登場した。これは主要構成機器単位に金属でできた箱体に構成機器を収納し、列盤構成したものであった。そして、空気と固体絶縁物を組み合わせた複合絶縁技術によりさらに小形化されている⁽¹⁾。また、VCB/GCB がスイッチギヤに収納されるようになると、更なる小形化のため多段積のスイッチギヤが登場した。最近では、保守性の向上や据え付け場所の多用化に対応するため、多段積の前面保守形も製品化されている⁽²⁾。しかし、これらのスイッチギヤは大気中の空気を絶縁媒体としているため大気の状態の影響を受け、主回路を一定期間内で点検、清掃する必要があった。そこで、主回路を固体絶縁物で注型し外層に接地層を設けた固体絶縁形(以下 SIS と呼ぶ)が開発され大幅に小形化することができた。しかし、構成機器を金型にセットして注型するので、回路構成が変化するとそれに対応することが困難となるため、回路構成の自由度に不都合があった。これらの問題を解決するため、主回路を完全密閉化し低圧力 SF₆ガスを封入したキュービクル形ガス絶縁開閉装置(以下 C-GIS と呼ぶ)が製品化され普及してきた⁽³⁾。

(2) 72/84 kV クラスのスイッチギヤ

72/84 kV クラスのスイッチギヤについても、3.6~36 kV クラスのスイッチギヤと同様のことがいえる。スイッチギヤの形態としては、開放形からハウジング形、金属閉鎖形へと変化し小形化してきた。近年では、より一層の小形化、高信頼性化、耐環境性向上、安全性の向上、保守点検の簡素化のニーズに応えるため、主回路を完全密閉し内部に高圧力 SF₆ガスを封入したガス絶縁開閉装置(以下 GIS と呼ぶ)が

Recent Technical Trend of Medium Voltage Switchgear.
By Masao Satomi, Member (Nissin Electric, Co.), Nobuo Masaki,
Member, & Masaru Miyagawa, Member (Toshiba, Co.)

キーワード: 中電圧開閉装置, スwitchギヤ, C-GIS, 中電圧用遮断器

図 1 中電圧スイッチギヤの変遷

開発された。GIS は当初相分離形であったが、さらに小形化するため主回路三相一括形、全三相一括形へと形態を変え、最近では構成機器の複合化、多機能化により機器集積密度を向上させた C-GIS が開発された。

3. 中電圧スイッチギヤ構成要素の技術的課題

中電圧スイッチギヤ構成要素の技術的課題である小形化、耐環境性向上、省メンテナンスおよび最近のインテリジェント化について説明する。

(1) 小形化

中電圧スイッチギヤの小形化を図るために絶縁技術は、気中絶縁方式⁽⁴⁾、複合絶縁方式⁽⁵⁾、固体絶縁方式⁽⁶⁾、高圧力 SF_6 ガス絶縁方式、低圧力 SF_6 ガス絶縁方式⁽⁷⁾、 SF_6 ガス中複合絶縁方式⁽⁸⁾ など種々研究され実用化されてきた。複合絶縁方式にはバリア絶縁や被覆絶縁などがある。バリア絶縁は相間や対地間にフェノールやガラポリなどの絶縁板を挿入することで、約 1.5 倍の耐電圧向上が図れる。被覆絶縁は充電部を絶縁物で被覆するものであり、導体の被覆絶縁にはエポキシ粉体流動浸漬法や熱収縮チューブ法などがある。固体絶縁方式は空気の 10~20 倍の絶縁耐力をもつエポキシ樹脂で主回路充電部を注型したものである。低圧力 SF_6 ガス絶縁方式は空気の約 3 倍の絶縁

図 2 SF_6 ガス中複合絶縁の効果

耐力をもつ SF_6 ガスを利用したものである。 SF_6 ガス中複合絶縁は、 SF_6 ガス単体の破壊電圧をエポキシ絶縁物の値まで向上させるため SF_6 ガスとエポキシ絶縁物を組み合わせた絶縁構造である。図 2 に示すように SF_6 ガス中において半球棒の先端をエポキシ樹脂

図3 主絶縁の破壊ストレスの推移

図4 中電圧スイッチギヤ据付面積の推移

でモールドした場合、約1.5倍の耐電圧向上が図れる。以上の絶縁方式を採用した結果、図3に示すように中電圧スイッチギヤの破壊ストレスは40年間で約5倍に上昇し、その成果として図4に示すように中電圧スイッチギヤの1フィーダあたりの据付面積比率は1970年を100%とすると72/84kVで60%、24kVで35%、7.2kVで50%と大幅に縮小化されている。

(2) 耐環境性向上と省メンテナンス

中電圧スイッチギヤは周囲環境を極力少なくし省メンテナンスを図るため、開放形から金属閉鎖形、固体絶縁形そして完全密閉形へと変化し、表1に示すように汚損に対して対応してきた⁽⁹⁾。絶縁対策としては、絶縁物の沿面距離を長くし、絶縁劣化を防止する過絶縁策や沿面へのシリコン塗布による絶縁強化策がある。外部環境対策としては、直射日光による温度上昇を低減するため、断熱材を使用する方法がある。また、結露を防止するにはスペースヒータや除湿装置により相対湿度を下げる方法がある。更に、温湿度およびじんあいなどを管理し、耐汚損性を向上する方法として、乾燥、除じんした空気をスイッチギヤ内部に送り込むエアリングがある。図5にエアリングによる湿度に対する効果を示す⁽¹⁰⁾。最も効果的な対策としては、SF₆ガスを封入して完全密閉するものであり、外部環境の影響を考慮する必要がなくなる。このほかの

表1 汚損対策

手法	具体策
絶縁対策	過絶縁 シリコン塗布
外部環境対策	断熱材 スペースヒータ 除湿装置 エアリング 完全密閉

図5 エアリングの効果

省メンテナンスの例としては、遮断器や断路器の操作方式を空気操作からばね操作としコンプレッサや配管等をなくしたものがある。最近では操作機構の無潤滑油化も実用化・検討され始めている。

(3) インテリジェント化

スイッチギヤの保守業務の省力化や設備診断能力の向上を図るため予測保全システムが実用化されている⁽¹¹⁾。このシステムは最近のAI(Artificial Intelligence)技術、伝送技術、センサ技術、システム技術の発展によりオンラインによるスイッチギヤの絶縁、通電、開閉などの状態を監視し故障にいたる前兆現象を検出し、その原因推定、位置標定およびガイダンスを出すなどの機能をもっている。絶縁機能としては部分放電、結露、ガス圧力などを監視している。部分放電は、絶縁物に電圧、熱、機械、環境などの複合ストレスが加わった場合の劣化程度を診断する重要なパラメータであり、種々のセンサが開発されている。

4. 中電圧スイッチギヤ用遮断器の開発動向

中電圧スイッチギヤの主要構成機器である遮断器は、スイッチギヤの絶縁媒体、機器構成と深くかわりつつ、小形・軽量化、長寿命化、不燃化、駆動力の低減化、メンテナンスの省力化などの技術課題に対応しつつ変遷してきた。具体的にはOCB(油遮断器)/MBB(磁気遮断器)の時代を経て、VCB(真空遮断器)/GCB(ガス遮断器)の時代になったといえる。VCBおよびGCBの消弧方式と遮断容量との関係を図6に示す。オイルレスで大気以外の絶縁媒体を利用

図 6 VCB/GCB の消弧方式と遮断容量

図 7 縦磁界方式の電極構造

した VCB, GCB の発達により、中電圧 C-GIS の開発が加速されてきたといえる。

(1) VCB の開発動向⁽¹²⁾

小形・軽量、長寿命、メンテナンスの省力化など多くの長所をもつ VCB は、中電圧スイッチギヤ用遮断器の主流となっているが、更に高性能化実現のために大容量化、低サージ化、高電圧化の研究が進められている。

VCB は、真空中の拡散消弧特性を利用した遮断器で、その負荷によっては開閉サージ保護装置を必要とする場合があった。これに対応するため従来からビスマス (Bi) やアンチモン (Sb) などの高蒸気圧材を多量に添加した接点材料を使用した低サージ形 VCB が適用されているが、遮断電流は 25 kA 程度が限界であった。

これを克服し、大電流・低サージ化を実現するために、

- (a) 電極構造の改良 (縦磁界の強化)
- (b) 接触子材料の組成の改良 (Ag-WC 材の適用)
- (c) 開閉速度の向上 (特に初開離速度)

などの研究開発により 7.2 kV、40 kA 低サージ形 VCB の実用が可能となってきた。図 7 に縦磁界方式の電極構造を示す。

(2) GCB の開発動向

高電圧、大容量遮断に優れた消弧能力を発揮する GCB は、中電圧スイッチギヤ用遮断器としても SF₆ ガス絶縁などその特長をいかして標準的に適用されているが、更なる小形・軽量化、駆動力の低減化を実現するため、消弧方式において機械的パuffa を用いない消弧室の開発・実用化が進められている。

その一つとして、従来から磁気駆動によるアーク回転形消弧方式が採用されてきた。この方式は、遮断電流による電磁力により、アークを回転駆動し相対的に

図 8 磁気駆動消弧原理

ガスをアークに吹き付け消弧する方式である。その消弧原理を図 8 に示す⁽¹³⁾。

現在、新消弧方式として研究、実用化が進められているものとして、磁気駆動併用熱パuffa 形消弧方式がある⁽¹⁴⁾。この方式は、遮断時のアークエネルギーにより昇圧されたガスをアークに吹き付け消弧する方式と、前述の磁気駆動消弧方式を併用したもので、24/36 kV 25 kA の実用化が完了し、72/84 kV クラスの実用化開発中である。図 9 に磁気駆動併用熱パuffa 形消弧室の構造例を示す。

(3) インテリジェント形遮断器の開発動向⁽¹⁵⁾

遮断器本来の機能に加えて、回路の異常検出や判別、指令機能を付加し、一つのシステムとして捉えた遮断器や予防保全およびメンテナンスフリー化の観点から多くの監視機能や伝送機能をもった遮断器の開発、実用化が進められている。

具体的には、過電流継電器、検出用変流器との組み合わせによる保護機能の一体化と異常温度上昇監視機能、引外しコイルの断線監視機能および VCB における真空中低下監視機能などの自己診断機能を一体化し

図9 磁気駆動併用熱パフファ形消弧室の構造

たインテリジェント形遮断器の実用化である。

5. C-GISの動向

C-GISは、構成機器を角形容器に一括収納することにより大幅な小形化が実現され、かつ高信頼性、安全性の向上、保守点検の簡素化および環境調和により急速に普及してきた。当初は72/84 kV用として開発されたが、図10に示すように7.2~204 kVまで適用範囲が広がってきている。また、C-GISの1980年から約10年間の製作実績は遮断器台数で約3,000台に達し、年率20%を越える伸びを示している。この適用範囲の拡大には二つの側面が考えられる。一つは、受配電設備において環境調和に優れたC-GISが徐々に増大する状況である。この動きは電力需要の増大および高密度化の結果、受変電設備が都市地域に導入されたことと電力会社の配変用設備としての地位が確立されつつあるためである。もう一つの側面は、従来気中絶縁形スイッチギヤが使用されている3.6~36 kVクラスにおいて1960年代に稼働を始めた受電設備のリニューアル時に、コンパクトでかつ省メンテナンス性に優れたC-GISの導入が広がっているためである⁽¹⁶⁾。図11に7.2 kV C-GISの外観を示す。

C-GISは外部環境の影響をなくし、信頼性を向上させるため主回路を密閉している。このためC-GISに収納する遮断器は封じり形の遮断器が必要であり、VCBとGCBが最適である。また、工場の品質を保持するため現地でのガス処理を極力少なくする必要がある。この問題の解決のために、主回路の外部接続はスリップオン接続技術で連結する方法が有効である。さらに密閉化され主回路が露出していないため主回路診断用端子が必要となる。絶縁耐力試験や変圧器温度試験は先に述べたスリップオン接続技術や接地端子に絶縁耐力をもたせ現地ガス処理無しで対応することが求められている。しかし、電気協同研究第39巻第6号「ガス絶縁開閉装置の標準化」で推奨のケーブル直流耐電圧試験においては、ケーブルとC-GISを

図10 GISとC-GISの適用電圧の推移

図11 7.2 kV C-GIS外観

切り離す必要があり、C-GISの内部導体を取り外すなど、現地ガス処理が伴っていた。最近この問題を解決するため、スリップオン接続技術と界面絶縁技術を応用しケーブルヘッドに断路機能と試験端子を設けることにより、現地ガス処理なしでかつC-GISの主回路に直流を印加せずケーブルの直流耐電圧試験が行えるものが実用化されている⁽¹⁷⁾。図12にC-GISへの直流課電機能付T形ケーブルヘッドの適用例を示す。

最近のC-GISの動向としては、一次スイッチギヤ、変圧器および二次スイッチギヤを含めた設備全体をガス化・集合化した総合ガス絶縁受配電設備が実用化されている。今後は、より一層の小形化、予防保全と運転支援システムによる省力化、無人化、工事の簡素化などを図ることで環境と人により優しいC-GISへの発展が求められている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

6. あとがき

本稿は、中電圧スイッチギヤの最近の技術動向を中心に絶縁媒体とその特徴などを紹介した。7.2 kVクラスのスイッチギヤは、気中絶縁閉鎖形が使用量的には主流であるが、高信頼度、省メンテナンスを指向したガス絶縁形(C-GIS)および固体絶縁形(SIS)も徐々にその運転実績を増やそうとしている。また

図 12 C-GIS への直流課電機能付 T 形ケーブルヘッドの適用例

24/36 kV クラスでは、ガス絶縁形がその主流を占めつつある。さらに 72/84 kV クラスでもガス絶縁スイッチギヤの適用が拡大している。

このように、中電圧スイッチギヤはガス絶縁化の方向に発展を続けているが、今後の動向としては C-GIS を中心としたスイッチギヤのインテリジェント化および変圧器も含めたインテグレート化（複合化）が進んでいくものと考えられる。さらに、適用技術の評価、とりまとめの観点から中電圧スイッチギヤの標準化および規格化が望まれ、今後の課題となっている。

(平成 5 年 10 月 20 日受付)

文 献

- (1) 松沢, 他: 「中圧スイッチギヤの歴史と将来」電気計算, 1986 年 1 月号 (昭 61)
- (2) 谷水, 他: 「真空遮断器 8 段階スイッチギヤの開発」平成 2 年電気学会全国大会, No. 1264
- (3) 増田, 他: 「7.2 kV ガス絶縁スイッチギヤ」日新電機技報, 35, 4 (平 2-10)
- (4) JEC 172 衝撃電圧電流測定法 1968
- (5) 清水, 他: 「閉鎖制御装置の技術動向」富士時報, 55, 3 (昭 57)
- (6) 片山, 他: 「閉鎖配電盤の固体絶縁化」図説電気, 15, 8 (昭 48)
- (7) 大島, 他: 「混合ガス絶縁の現状と将来」昭 60 電気・情報関連学会連合大会 No. 8-5
- (8) 吉田, 他: 「SF₆ ガス中複合絶縁における耐電圧向上の検討」電学論 B, 110, 4, 348 (平 2-4)
- (9) 馬場, 他: 「閉鎖配電盤の環境劣化試験」電気学会電力技術研究会資料 No. PE-90-5 (平 2)
- (10) 田中, 他: 「66/77 kV 級全天候形キュービクル」三菱電機技報, 45, 7 (昭 46)
- (11) 渡部, 他: 「受変電設備に関する異常診断システムの最近の動向」電気学会産業電力電気応用研究会資料 IEA-93-14 (平 5)
- (12) 本間, 他: 「真空遮断器の大電流・低サージ化」, 電気学会開閉保護研究会資料, SP-92-13 (平 4)
- (13) 岡村, 他: 「3.6/7.2 kV~12/15 kV SF₆ ガス遮断器 “ランナーク” と収納キュービクル」日新電機技報, 29, 3 (昭 59)
- (14) 金万, 他: 「24/36 kV 級コイル駆動による熱パuffa 形消弧室の遮断特性」, 電学論 B, 113, 4, 361 (平 5-4)
- (15) 小林, 他: 「インテリジェント真空遮断器の開発」, 電気学会開閉保護研究会資料, SP-92-16 (平 4)
- (16) 「キュービクル形ガス絶縁開閉装置の技術動向」, 電気学会技術報告, II 部, No. 442 (平 4)
- (17) 瀬間, 他: 「66/77 kV CV ケーブル用 DC 断路機能付 T 形終端接続部の開発」平成 5 年電気学会 電力・エネルギー部門大会 No. 465
- (18) 片山, 他: 「7.2 kV ガス絶縁開閉装置」平成 4 年電気学会 四国支部連大 No. 3-7
- (19) 鈴木, 他: 「新形配電用変電所」高岳レビュー 134, 3 (昭 62-10)

里 見 昌 男 (正員)

昭和 22 年 9 月 11 日生。45 年 3 月千葉工業大学電気工学科卒業。同年 4 月日新電機㈱入社。主として、ガス絶縁開閉装置の開発設計に従事。

正 木 信 男 (正員)

昭和 23 年 5 月 9 日生。46 年 3 月神奈川大学電気工学科卒業。同年 4 月㈱東芝入社。主として、中圧スイッチギヤの開発設計に従事。

宮 川 勝 (正員)

昭和 35 年 12 月 16 日生。58 年 3 月明治大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月㈱東芝入社。主として、中圧スイッチギヤの開発設計に従事。