真空遮断器の最近の動向

齊 藤 仁^{*1}

Recent Trend of Vacuum Circuit Breakers

Hitoshi SAITO^{*1}Medium Voltage Switchgear Development Department Japan AE Power Systems Corporation,
585 Shimonakamizo Higashimakado Numazu-City, Shizuoka 4100865 Japan

(Received February 3, 2009, Accepted May 9, 2009)

The recent trend in the development and the application of Vacuum Circuit Breakers (VCBs) as an environmental friendly equipment for electric power transmission and distribution is described. Using VCB's for circuit breakers and switchgear and extending the range of application of VCB's lead to reduce the usage of SF₆ gas, whose global warming potential is approximately 23900 times that of CO₂. The rated voltages and interruption currents of VCB's have increased up to 145 kV/40 kA for single break due to the improvement of the electrode materials and structures. Also, SF₆ gas free switchgear up to 84 kV using compressed dry air insulation systems have been developed.

1. はじめに

真空技術の産業応用製品のひとつに真空遮断器 (VCB; Vacuum Circuit Breaker) がある。VCB は電力用遮断器のひとつで、真空中の優れた電流遮断 (アーク消弧) 能力を利用している。電力用遮断器の消弧媒体には、大電流を遮断する能力の他に、高電圧に耐える絶縁性能も兼ね備えていることが望まれる。これらの要素を満たすものとして、真空のほかに、空気、油、六弗化硫黄 (SF₆) ガスを消弧媒体に用いた遮断器があるが、小型化、高電圧化、大容量化、メンテナンスの容易さなどの面から、現在は SF₆ ガス遮断器と真空遮断器が主流になっている。

ここで、電力機器に使われる SF₆ ガスについて説明する。SF₆ ガスは、地球温暖化係数が CO₂ の23900倍と大きく、地球温暖化ガスのひとつに指定されている。SF₆ は安定性が高く、長期間大気中に分解されずに残留することも温暖化係数が大きい要因のひとつである。代替ガスの研究が盛んに行われたが、絶縁性能、消弧性能、沸点、毒性などで SF₆ に優るガスは見出されていない。電力機器では SF₆ ガスをタンク内に封じ込めて使用するため、シール面からの漏れ、製造、点検、試験、廃棄時のガス回収を徹底することで SF₆ ガスの大気中への排出を減らすことが可能である。電気事業連合会では、1998年4月に「電気事業における SF₆ 排出抑制に関する自主行動計画」を策定し、いち早く SF₆ ガス排出の削減に取り組んだ。機器点検時の排出割合を2005年には3%程度まで、機器廃棄時の排出割合を2005年には1%程度まで抑制するという目標をすでに達成している。これには、機器メーカー、電力会社などのユーザー、ガス取り扱い業者などの協力体制のもと、ガス回収機の導入などが進められた成果である。

SF₆ ガスを利用した電力機器にはガス絶縁変圧器 (GIT; Gas Insulated Transformer), ガス遮断器 (GCB; Gas Cir-

cuit Breaker), ガス絶縁開閉装置 (GIS; Gas Insulated Switchgear), などがある。これらの機器は、ガスの管理を強化して使用を続けていくことが基本であるが、温暖化防止の機運により SF₆ ガスを使用しないほうが経済的なメリットが生じる場合もあり、技術的に可能な範囲で脱 SF₆ ガスの動きが進んでいる。

GIT は SF₆ ガスの絶縁性能とともに分子量146に起因する冷却性能の高さ、さらには不燃性という特徴を生かして地下変電所への適用が拡大している。この分野では鉱油と比べ難燃性で、SF₆ ガスより絶縁冷却性能が優れるシリコン液入りの防災・環境対応型変圧器が製品化されている。

GCB は SF₆ ガスの優れたアーク消弧能力を、また、GIS は空気の約3倍に相当する SF₆ ガスの高い絶縁性能を利用したものである。これらの機器については中電圧以下の機器から VCB の適用拡大による脱 SF₆ ガスへの取り組みが行われている。次章では、実際に機器のどの部分に SF₆ ガスや真空が使われているか解説する。

2. 遮断器・ガス絶縁開閉装置の構成

Fig. 1(a)は GCB を模式的に表したものである。高ガス圧の SF₆ ガスが充填された圧力タンク内に高電圧の電流端子が貫通端子 (プッシング) を通して導入され、中央に接点が配置される。ここで接点を開くと、接点間にアークが発生するが、SF₆ ガスの吹き付けにより消弧され電流が遮断される。ここでは、タンクと高電圧部の絶縁も SF₆ ガスで保たれる。

一方、Fig. 1(b)は VCB を模式的に表したもので、タンク内に接点を囲む真空容器があり、封じ切りで10⁻³~10⁻⁶ Pa 程度の高真空に保たれる。以降、この接点を持つ真空容器部を VCB と区別して Vacuum Interrupter (VI) と呼ぶ。ここで接点を開くと接点間に真空アークが発生するが、真空の拡散作用などにより強力に消弧され、電流が遮断される。ここでは、タンクと高電圧部の絶縁は SF₆ ガスなどの絶縁ガスで保たれているが、絶縁ガスには消弧能力が必要ないので、空気などの代替絶縁ガスに置き換えることが可能であ

^{*1} (株)日本 AE パワーシステムズ
〒410-0865 静岡県沼津市東門間字下中溝585

Fig. 1 Configurations of GCB, VCB and GIS.

定格電圧 (kV)	3.6	7.2, 12	24, 36	72, 84	120~168	204~1100
遮断	VCB					GCB
絶縁	気中絶縁			SF6ガス絶縁		
	乾燥空気、固体絶縁					

Fig. 2 Rated voltage ranges in application of GCB and VCB for circuit breakers and insulation systems.

る。ここに、脱 SF_6 ガス機器を実現できる可能性がある。

上記は単体の遮断器について述べたが、 SF_6 ガスの使用量が多いのは、遮断器に加えて、断路器 (DS)、接地開閉器 (ES) などを一括してタンク内に収めた複合機器である GIS である。GIS にも遮断部に GCB を適用したもの (Fig. 1(c)) と VCB を適用したもの (Fig. 1(d)) がある。DS や ES は遮断器が電流を切った後で、主に回路の切り替えに使われるため、大きな電流を遮断する責務はない。そのため接点の開く速度は遅く、また、 SF_6 ガスや真空中でなくとも開閉が可能である。すなわち GIS においても遮断部に VCB を適用していれば、脱 SF_6 ガス機器を実現できる可能性がある。

Fig. 2 に遮断器、開閉装置について、電圧階級でみた GCB と VCB の適用範囲、および絶縁方式の適用範囲を示す。

遮断器について見ると、高電圧では GCB が主流である。GCB は、熱パフファ方式と呼ばれる SF_6 ガスの吹きつけにより強力にアークを消弧することができ、遮断電流 63 kA、定格電圧 1100 kV のものまで開発されている。一方、VCB は電極を開閉する操作力が小さくコンパクトな遮断器を作ることができること、また多数回の遮断が可能なことなどの特徴から主に 84 kV 以下の遮断器に適用されている。それ以上の電圧では、極間の絶縁性能を確保するのが難しく高電圧化が一つの課題であった。近年、電極材料や、適用技術が進んだこともあり高電圧 VCB の適用が増えつつある。

一方、絶縁方式について見ると、特に 120 kV 以上の高電圧では SF_6 ガスが中心である。84 kV 以下の開閉器につい

てみると、遮断部に VCB、絶縁に SF_6 ガスを利用して縮小化したキュービクル形開閉装置 (C-GIS) が主流であったが、これらの機器をベースに SF_6 ガス絶縁の代わりに乾燥空気絶縁や固体絶縁を適用し、完全に SF_6 ガスを使用しない機器の開発が進んでいる。

脱 SF_6 ガス化が先行している中電圧クラスの機器は、1 台当たりの SF_6 ガス使用量は少ないものの設置台数が多いため、全体の SF_6 ガス使用量削減に少なからず貢献できる。また、 SF_6 ガスの回収や廃棄・リサイクル処理の作業が不要になるためトータルライフサイクルコストの低減にも寄与することになる。

以降の章では、近年の動向のうち、VCB の高電圧化と脱 SF_6 絶縁方式について述べる。

3. 真空遮断器の高電圧・大容量化

VCB は 1960 年代から普及が始まったが、当初から高電圧化の試みがなされ、70 年代には 84 kV 1 点切り、168 kV 2 点切りの製品化が行われた¹⁾。これらの遮断器は画期的なものであったが、電極としてはスパイラル電極であり、VI も複雑なシールド構造をもった大型のものであった。その後、1980 年代の Cu-Cr 系電極材の登場、遮断能力に優れた縦磁界電極構造の採用、90 年代後半の 72/84 kV セラミック VI の開発などの進展があった。そして、21 世紀に入り 145 kV 1 点切 VCB (Fig. 3, Fig. 4) の試作を経て 120 kV/31.5 kA 1 点切り、168 kV/40 kA 2 点切りの VCB が開発された²⁾。以下、これらの開発を支えた技術について概説する。

(1) 高電圧化

耐電圧性能の向上には電極材料に高 Cr 含有量の Cu-Cr 合金を採用することにより通電性能と耐電圧性能の向上を両立させることが出来た。また、真空中の絶縁破壊特性として放電を繰り返すことで電極表面の酸化物や微小な突起などの弱点が除去されて破壊電圧が上昇していく、コンディショニング効果があることが知られている。この特性を有効に活用し、かつ電界解析による形状の最適化を組み合わせることで従来以上の耐電圧性能の向上を達成した。

(2) 大容量化

遮断容量（遮断電流×電圧）の増加は縦磁界電極の発展によりもたらされた。従来のスパイラル電極に比べて電極面の局所的な溶融が少なく、高電圧・大容量領域の適用に有利である。電流の通電経路をコイル状にし、遮断しようとする電流自身が電極間に磁界を発生させることでアークを安定化させている。そのため、その構造を最適化するため磁界解析・磁界測定と並行してアーク観測を行っている（Fig. 5）。

Fig. 3 145 kV/40 kA single break VCB.

Fig. 4 VI for 145 kV VCB.

Fig. 5 Vacuum arc observation by high-speed VTR during interrupting 40 kA using axial magnetic field type electrode system.

4. 脱 SF₆ ガス絶縁方式

(1) 乾燥空気絶縁

VCB は遮断に SF₆ ガスを使わないため、絶縁に乾燥空気を用いれば完全に SF₆ ガスフリーの遮断器となる。一般に乾燥空気は SF₆ ガスと同じガス圧力の場合、1/3 程度の絶縁性能しかない。そのため、従来機種と同じ機器の寸法とするためには、ガス圧力を上げる方法がとられる。それでも絶縁性能が不足する場合には導体表面に被覆やコーティングをするなどして、固体の高い絶縁性能を組み合わせた複合絶縁技術が用いられる。

(2) 高耐圧力 VI

高ガス圧力中に VI を配置した場合、従来の内圧方式（Fig. 6(a)）では真空との差圧により過大な応力が VI 及びベローズに加わる。特に、ベローズでは圧力差による座屈の防止が課題となる。一方ベローズの外側から圧力の加わる外圧方式（Fig. 6(b)）は座屈しにくいのが特徴であり、高耐圧力化に適している。検証試験では差圧 6 気圧での連続動作試験を行い、1 万回の開閉操作を保証する寿命を確保している。この高耐圧力 VI を適用した 72/84 kV SF₆ ガスレスタンク形 VCB が開発されている（Fig. 7, Fig. 8）²⁾。さらにこの技術の適用を拡大し、72 kV 乾燥空気絶縁 GIS の遮断部としても利用されている³⁾。もうひとつの方法として、2 重圧力方式がある（Fig. 6(c)）。VI ベローズ内部を一つのガス区分とし、プッシング先端で大気と通気させることによりこの区分を大気圧としている。これにより、タンク内の他のガス区分を 0.5 MPa 程度の高圧力としながらも、ベローズ部分では VI 内外の圧力差が 0.1 MPa とすることができる。2 重圧方式は、VI 自閉力の低減による低操作力化、一般的な低圧力方式ベローズの採用などのメリットがあり、72/84 kV タンク形 VCB が開発されている⁴⁾。

(3) 低気圧乾燥空気絶縁

キュービクル形開閉装置では低ガス圧で導体も不平等電界の形状をもつため GIS 等と比較して絶縁設計の考え方が異

Fig. 6 Cross section views of high-pressure VI's.

Fig. 7 72/84 kV-31.5 kA dry air insulated VCB.

Fig. 8 Internal structure of 72/84 kV dry air insulated VCB.

なる。大気圧から2気圧程度の領域ではギャップ長や電極の形状によって大気圧の SF_6 ガスと2気圧の空気の絶縁破壊電圧が同程度になる場合がある。この特性を利用し定格電圧24 kVのキュービクル形乾燥空気絶縁開閉装置が開発されている (Fig. 9)⁵⁾。0.1 MPa程度の乾燥空気を絶縁ガスとして用いているため、VIは高耐圧仕様ではなく通常設計のVIが利用でき、低コスト化を実現している。さらに被覆やバリアを適用することで高耐電圧化を図り、低ガス圧の乾

Fig. 9 Internal structure of 24 kV dry air insulated Switchgear.

Fig. 10 Typical structures of conventional gas insulated VCB and solid insulated VCB.

燥空気⁶⁾で72 kV までの C-GIS が開発されている⁶⁾。

(4) 固体絶縁

遮断部は VI を用い周囲をエポキシなどの固体でモールドし、さらにモールドの周囲に接地層を形成する固体絶縁方式も脱 SF₆ 機器として有望である。Fig. 10 に一般的なガス絶縁方式と固体絶縁方式の配置を比較し、電界解析によりもつめた等電位線図を重ねて表示した。固体絶縁方式は、固体の高い絶縁性能により接地面までの絶縁距離を小さくすることができ、機器の縮小化という意味では理想的な絶縁方式である。一方、技術的なハードルは高く、いくつかの課題がある。例えば、モールドの樹脂と金属やセラミックとの線膨張率の違いから、繰り返しの温度変化があると界面や応力集中部でクラックが入ることが予想される。そこで、あらかじめ応力計算などにより応力が集中しない構造になるように検討する必要がある。また VI と接地面が近づくため、VI 内部やモールド内部の電界が高くなる傾向にあり、VI の場合は遮断性能の低下、モールド内部は長期的な絶縁劣化に注意が必要である。また、VI の可動電極などの可動部はモールドで固めることはできないので、高電圧化に対してネックになる。以上の様な課題があるものの、定格電圧36 kV までの固体絶縁 C-GIS が開発されている⁷⁾。

5. あとがき

VCB は消弧媒体として SF₆ ガスを使わない高電圧・大容量遮断器としての期待が高まっている。今後、より高電圧・大容量化へと進むためには、GCB と比較した場合のコスト面や、真空中での冷却効率の悪さによる通電容量などの課題を解決する必要がある。また、環境低負荷形の機器としての VCB は、SF₆ 代替ガスとして乾燥空気を絶縁に用いたものが主流になり、72 kV 以下ではその適用がさらに拡大していくものと思われる。

〔文 献〕

- 1) T. Takashima, T. Kikuta, R. Nakanishi and A. Hirakawa: Meiden Review, No. 2, (1979) 9.
- 2) Y. Matsui, K. Nagatake, M. Takeshita, K. Katsumata, A. Sano, H. Ichikawa, H. Saitoh and M. Sakaki: *Proc. 22nd. Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Matsue, Japan, 2006, **1** (2006) 253.
- 3) T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and F. Endo: IEEE Transactions on Power Delivery, **22** (2007) 1869.
- 4) H. Saito, K. Nagatake, H. Komatsu, Y. Takeshita, Y. Matsui, K. Katsumata and M. Sakaki: IEEJ Trans. PE, **129** (2009) 353.
- 5) N. Tamaki, K. Naito and T. Chou: AE Power Systems Review, **1** (2008) 38.
- 6) T. Yoshida, H. Koga, T. Harada, S. Miki, M. Arioka, S. Sato, S. Yoshida, N. Inoue, A. Maruyama and T. Takeuchi: IEEJ Trans. PE, **128** (2008) 1439.
- 7) S. Fujii, O. Sakaguchi and J. Sato: Toshiba Review, **59** (2004) 56.