大 下 陽 一
(株)日立製作所
加 藤 達 郎
三菱電機株式会社
杉 山 修 一
(株)富士電機総合研究所
鈴 木 克 巳
(株)東 芝

1. まえがき

交流送電方式が始まって以来、さまざまな電力用遮断器が開発され、実用化されてきた。高電圧大容量遮断器は、油遮断器が始まりであったが、1931年頃からは欧州を中心に高圧圧縮空気をアークに吹付け、冷却遮断する空気遮断器が開発された。1973年に開始された500kV送電では550kV-50kA 4遮断点と2断路部で構成された空気遮断器が適用された。1950年代からSF₆ガスを媒体にしたガス遮断器(GCB)が開発され、1960年代になると二圧形構造のGCBが全世界に普及し始めた。1969年にイタリアのMagrini社が単圧式(パフファ形)GCBを開発し、日本でも1970年初頭に72kV単圧式GCBが実用化された。その後、1遮断点当たりの遮断容量が1GVA/年の割合で増加し、1993年には550kV-63kA 1遮断点のGCBが世界で初めて製品化された。近年では、この技術を用いて1000kV UHV (Ultra High Voltage) 変電所のプロトタイプが、完成し、長期課電試験が行われている。本解説は、これまでのGCBの技術進歩について紹介する。

2. GCBの小型・低操作力化

現在、高電圧GCBといえばパフファ形を指し、この方式がGCBの主流となっているが、その性能向上の取り組みの歴史は、結果として1遮断点当たりの遮断性能の向上と操作力の低減による小型化の歩みであったと言える。

電力用開閉装置の主流となったガス絶縁開閉装置(GIS)には、特に山岳地帯や都市部で顕著のように変電所立地の制約から絶えず縮小化が求められている。従ってその主要構成機器であるGCBが小型化した場合の貢献度は大きい。小型化による部品点数削減は、信頼性・保守性向上も含めてトータルコストの低減を可能とするほか、軽量化に伴う操作力低減の結果として低騒音・低振動化など環境調和性も向上する。

2.1 遮断点数の削減

実用化初期には、300kVGCBは直列2遮断点、550kVは4遮断点で構成されていた。消弧室の性能向上の結果としてこれが1980年頃に各々1遮断点、2遮断点に半減し、さらに1993年には究極ともいえる550kVGCBの1遮断点化が実現した。

図1は550kVGCBの遮断点数の削減に伴うGCB

部品総点数の変化を示している⁽¹⁾。投入抵抗や極間コンデンサなどパフファ室の周辺に配置される部品や機構系・タンクの部品数の削減も含め、結果として2遮断点GCBの部品数は4遮断点の47%に、さらに1遮断点になった段階で4遮断点の30%にまで部品数が削減されている。1遮断点では消弧室性能の改善により極間コンデンサが廃止され、電気的信頼性の向上にもつながっている。

注: タンクと消弧室の部品数の30%をボルト・ワッシャー類が占める。

図1 遮断点数と部品数の変化(550kVGCBの例)⁽¹⁾

2.2 遮断効率向上技術

1遮断点あたりの遮断容量では、定格電圧550kV、定格遮断電流63kAの機種の製品化により一つの区切りがついたかにも見えるが、小型化、低操作力化への取り組みは活発に続けられており、遮断部の単位容積あたり、単位操作力あたりの遮断容量という遮断効率の点では現在も着実に進展している。

GCBの遮断効率が上がり急速に小型化されたのは、アークエネルギーを制御・有効利用する遮断技術はもちろんのこと、SF₆ガス・注型絶縁物・絶縁ノズル・金属接点材料などの基礎研究、製造技術や各種の評価・解析など多くの技術の積み上げによっている。また後述のように最近では高精度なシミュレーション技術の急速な進歩により従来に増して効率的な開発が出来るようになっている。

ここでは遮断効率を上げ、小型化、低操作力化を図るために適用されている技術の一部を紹介する。

(1) アークエネルギーの有効利用

パフファシリンダ内のSF₆ガスを動作過程で圧縮し高温アークに吹付けて速やかに冷却・消弧するのがパフファ方式であるが、アークの発生熱をシリンダ内にフィードバックして圧力上昇に転換し、消弧性能向上に有効利用する熱パフファ(自己消弧)の原理の積極的な導入が、ここ10年来の顕著な技術動向の一つである。熱パフファは遮断電流の小さい領域では利用エネルギーも低下し遮断性能が低下するので、これを補うために従来の機械的パフファ室と併用したり、熱ガスのフィードバックのタイミングと量を巧みに制御して単一シリンダーで熱パフファと機械的

Latest Technical Trend of High Voltage Gas Circuit Breaker
By Y. Ohshita (Hitachi Ltd.), T. Kato (Mitsubishi Electric Co.), S. Sugiyama (Fuji Electric Corp. R & D Ltd.), K. Suzuki (Toshiba Corp.)

バフファを兼用させるなど、複合方式としている場合が多い⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。圧力上昇は遮断動作を妨げる反力となるので、操作装置の駆動力との相互作用を含めた動作特性解析による最適設計が行われている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図2に熱バフファ併用形の消弧室の例を示す⁽³⁾。

図2 熱バフファ併用消弧室の例⁽³⁾

(2) 操作装置の小型化

消弧室の小型化は小さな操作装置の適用を可能とするが、操作装置そのものも小型化・高効率化が活発に進められている。GCBに使用される操作装置の主な方式は空気、ばね、油圧であり、各々の特徴を生かした適用がされている。このうち、ばね方式は漏気、漏油によるエネルギー減少がなく長期安定性に優れるが、大出力化が難しい一面を有している。これはエネルギー保持用に一般に用いられるコイルばねの質量が流体に比べて大きく、ばね自身の運動に大きなエネルギーを消費しエネルギー蓄勢効率が低くなるためである。図3は、ばねにトーションバーを適用してエネルギー蓄性効率を改善したばね操作機構の例である⁽⁷⁾。ばね自身の運動に必要なエネルギーは、コイルばねでは蓄勢エネルギーの1/4程度であるがトーションバー採用によりほとんど無視出来るレベルになっている。

このほか、油圧操作装置における油圧回路のブロック化や、消弧室と操作装置を連結する駆動リンク系の最適設計による可動部の軽量化など様々な開発により操作装置やGCB全体の小型・低操作力化が進んでいる。

図3 トーションバー式ばね操作機構の例⁽⁷⁾

3. 解析技術

近年のハード面における計算能力、およびソフト面における解析技術の格段の進歩により、従来は不可能とされていた現象までも解析可能となっている。これにより、GCBの大幅な小型化や開発期間の短縮が可能となった。もちろん、これらは解析結果検証のための実験手法の開発や測定精度の向上なども相俟って得られた成果ではあるが、ここでは、紙面の都合から最新の解析結果、特にGCB特

有の電流遮断解析と動作解析の紹介に止めさせて頂く。

3.1 電流遮断解析

図4にGCBが電流を遮断する過程をシミュレーションした例を紹介する⁽⁸⁾。この図に示すように、GCBの動作に伴い高温（中心温度数万K）のアークが発生し、アークにより加熱されたSF₆ガスが排気されていく様子が分かる。このような解析を駆使することにより、電流遮断時の状態（課電領域の耐電圧や電極間の導電性）を求めることができ、従来、大掛かりな設備により行っていた電流遮断性能の検証が、解析により推定可能となりつつある。図5にはその例として短絡電流試験結果と解析結果との比較（耐電圧回復特性）⁽⁹⁾を示すが、両者はよく一致しており、解析により性能推定が可能であることを示している。

図4 GCBの電流遮断過程のシミュレーション⁽⁸⁾

図5 遮断試験結果と解析結果との比較⁽⁹⁾

また、短絡電流遮断時には数100kJのエネルギーが数10msの短時間に発生し、アークにさらされる電極や絶縁ノズルが溶発することから、周囲のガスの特性はSF₆ガスのそれとは異なっている可能性がある。そこで、主要な電極材料である銅や絶縁ノズルの材料として用いられているPTFE（ポリテトラフルオロエチレン）の溶発、混入を考慮した、より精度の高い解析が試みられている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

3.2 動作解析

これまでの解析では上記のように、主に遮断動作が主体であったが、特に操作機構にとっては遮断動作よりも投入動作の方が過酷となる場合もある。そこで、GCBの投入・

遮断動作および機構部の構造解析を含めた総合的な動作解析手法も開発されている⁽¹²⁾。ここでは、遮断部の解析、操作機構部の解析および構造解析について別々な解析コードを使用し相互に連成して解析している。一例として、操作機構部の解析モデルおよび投入特性の解析結果を図6および図7に示す。図7より、実測結果と解析結果はよく一致しており、GCBのすべての動作の解析が可能になりつつあることが示されている。

以上、解析の代表例を示したが、各社・各機関とも同様な解析手法を開発している。今後、製品の小型化やコストダウン、開発期間の短縮に解析の果たす役割はますます重要になっており、より速く手軽にしかも精度の良い解析が求められている。

図6 操作機構部のモデル⁽¹²⁾

図7 投入動作試験結果と解析結果との比較⁽¹²⁾

4. 遮断器の特殊な遮断責務

本章ではガス遮断器に関する最近の話題として、“特定用途遮断器の技術と適用状況”調査専門委員会での調査の中からいくつかのトピックスを取り上げて紹介する。詳細は近日中に技術報告⁽¹³⁾が発行される予定になっているので参照頂きたい。

4. 1 位相制御開閉

コンデンサバンク等の開閉時に発生する突入電流、サージなどを抑制する一手段として位相制御開閉がある。近年、CIGRE WG 13.07 でも調査が進められるなど、特に海外で関心が高まっている。位相制御開閉では、コンデン

サバンク、シャントリアクトルのほか無負荷送電線などを対象とする突入電流、サージの抑制が主目的と考えられているが、進み小電流遮断時の再点弧防止などの信頼性向上も視野に入れて検討が進められている。位相制御を実現するには、遮断器開閉極時の極間耐電圧の上昇率および減少率が所要値を満たしていることが必要であるが、動作ばらつきの評価および補償が位相制御開閉の特性を決める鍵となる。

なお、日本では高調波抑制のため、コンデンサバンクと直列にリアクトルが挿入されることが多く、突入電流・サージが問題にされることが少ないため、海外に比較して位相制御開閉に対する関心は低いようである。

4. 2 零点推移への対応

発電機近傍の故障では故障電流に含まれる直流成分より交流成分の減衰が速く、零点推移現象が発生することは古くから知られている。零点推移に対し、おさまるのを待って遮断器を開放する等の運用面に対応されるのが普通であり、UHV系統用のHSGS⁽¹⁴⁾でガスの有効吹付け時間を長くしたものがあるほかには零点推移遮断器というもの一般的にはない。前述の発電機近傍での短絡故障の他に、

現在指摘されている零点推移発生メカニズムを整理すると、主なものに下記のようなものがある。

- ・ 進相運転されている送電線で、短絡電流のような遅れ電流が重畳すると、交流分が相殺されるため短絡位相によっては零点推移が生じることがある。
- ・ ケーブルのような比較的大きい進み無効電力を補償するため分路リアクトルを接続すると、投入直後に零点推移が発生する。継続時間が長く数秒におよぶ場合がある。
- ・ フィルタ回路などコンデンサを負荷とする変圧器の励磁突入電流に零点推移が生じる。

他にも数種の報告例があり、技術報告⁽¹³⁾に説明されているので参照頂きたい。

4. 3 発電機主回路用遮断器

発電機停止中に所内電源を得るための起動変圧器を省略できる(図8)ことから主変圧器の発電機側に発電機主回路用遮断器を適用されることが多くなってきている。このような遮断器では、定格電流・定格遮断電流が大きく、また一般的に遮断電流の大きな責務ほど回復電圧も過酷となるのが通常の高電圧遮断器と異なる点である。したがって、JEC-2300 で規定される汎用の遮断器と比較して特殊な仕様が要求されることになる。現状ではこれに対応する国内規格はなく、ANSI 規格(C37.013)が準用されている。また発電器の特性により前述零点推移現象が起こるといわれているのも特徴である。電流遮断時には遮断アーク抵抗により直流分が減衰し、零点が回復するといわれている。零点推移に関する文献は多数報告されているが、試験法以外は解析で、実際に現象を観測したものは公表されていないようである。

4. 4 その他

他にも多頻度開閉、低温用など、JEC の規定にない、もしくは規定から外れているものに対する新たな規格、適用ガイド等の必要性はないかという観点からも調査した。特にそのようなニーズは求められていないことが分かった。

図8 発電所内回路の例

5. あとがき

550kV-63kA 1点切GCB完成後、消弧室の小型軽量化による駆動力低減のための開発が進められている。特に、国内の変電需要が冷え込んでいる中、国内各社は海外市場に参入するために厳しいコストダウン競争にさらされており、解析技術、アークエネルギー利用技術など独自の技術を駆使して開発に取り組んでいる。また、特殊遮断では位相制御開閉技術の開発、実用化が進められており、変電所のデジタル化と相俟って今後活発になるものと予想される。また、本解説には取り上げなかったが、環境に関して地球温暖化防止京都会議(COP3)でSF₆ガスが、温暖化ガスとして取り上げられ、各国とも機器から漏らさない等の削減計画を推進中である。SF₆ガスの削減のための代替ガスの研究も進められており、今後何らかの研究成果が待たれるところである。

(平成13年4月4日受付)

文 献

- (1) 吉積: CIGRE Session 2000, Gr13, No. 492 (2000)
- (2) 柳父, 他: 「最近の超高压ガス遮断器に関する技術動向」, 電学論B, vol. 113, No. 4 (1993)
- (3) 杉山, 他: 「熱パuffersを利用した遮断器の中小電流領域における遮断特性」, 電学開閉保護研究, SP-93-2 (2000)
- (4) 天野, 他: 「新型72/84kV C-GISの開発」平成12年電学全大6-206 (2000)
- (5) 恩地, 他: 「機構解析プログラムと圧力解析プログラムを練成した3相一括型GCBの動作特性の解析」平成12年電学全大6-242 (2000)
- (6) 竹淵, 他: 「ガス遮断器の遮断動作特性解析」平成12年電学全大1589 (1999)
- (7) 吉積, 他: 「操作装置の技術動向」, 1990年連大, S. 5-3
- (8) Yoshihiko Matsui, Masayuki Sakaki, et al., 'Analytical Techniques for Predict Breaking Performance of Gas Circuit Breakers', 電気学会開閉保護・高電圧合同研究会資料 SP-99-47/HV-99-47 (1999)
- (9) Toshiyuki Onchi, Shuichi Sugiyama, et al., 'An Estimation of Breaking Performance of GCBs Using a Gas Flow Analysis', Int'l Con. on Gas Discharge and

their applications (2000)

- (10) 大澤 直樹, 吉岡 芳夫 「ノズルアブレーションを考慮した単一分子モデルによるガス遮断器の吹付け圧力の解析」, 電気学会論文誌B, vol. 121-B, No. 1 (2001)
- (11) 森 正, 岩本 勝治 他 「アブレーションを考慮したGCB消弧室内ガス流解析手法の開発」, 電気学会開閉保護・高電圧合同研究会資料 SP-99-86/HV-99-135 (1999)
- (12) Yoshinobu Taniguchi, Hitoshi Mizoguchi, et al., 'Development of spring operation mechanism for new 72/84kV GCB' 電気学会論文誌B, vol. 120-B, No. 1 (2000)
- (13) 特定用途遮断器の技術と適用状況調査専門委員会編: 「特定用途遮断器の技術と適用状況」, 電気学会技術報告(発行準備中)
- (14) 田中他: 「1000kV GIS用高速接地開閉器の性能検証」, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 617 (1994)

大下 陽一

(正員) 1951年3月6日生。1975年3月広島大学大学院工学研究科電気工学修士課程終了。同年4月(株)日立製作所入社。主としてガス遮断器、開閉器の遮断技術開発に従事し、現在にいたる。

加藤 達郎

(正員) 1952年6月18日生。1975年3月大阪市立大学工学部機械工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。主としてガス絶縁開閉装置、ガス遮断器の開発検証、品質管理業務に従事。現在、同社 系統変電・交通システム事業所 開閉機器製造部勤務。

杉山 修一

(正員) 1956年1月22日生。1979年3月東京工業大学工学部電気・電子工学科卒業。同年4月富士電機(株)入社。1980年4月(株)富士電機総合研究所出向。主としてアーク現象の研究、ガス遮断器の開発に従事し、現在にいたる。

鈴木 克巳

(正員) 1951年6月27日生。1978年3月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。重電技術研究所において、ガス絶縁開閉装置の開発、アーク現象の研究に従事。現在、電力・産業システム技術開発センター送変電機器開発部長および高電圧・大電力試験所所長。1993年電気学会進歩賞、1999年論文賞。工博。IEEE 会員。