キーワード

放射状系統, 位相制御開閉, 開閉サージ, 直流連系

森 正
鈴 木 克 巳
(株)東芝

1. まえがき

近年の電力需要の増大、電源の遠隔化に対処するために、年々電力系統の大規模化、複雑化が進んでいる。その結果、大容量長距離送電線の建設、変電所引き込み口、構内連絡用に比較的長いケーブルやガス絶縁母線(GIB)が設置されるなど、電力系統を構成する設備形態も多様化しつつある。このような電力系統の増大に伴って系統定数が変化し、それに伴いガス遮断器(以下 GCB)に課せられる責務が過酷化し、GCB 及び周囲の開閉装置の使用条件も大きく変化している。

ここでは、最近の電力系統の変化とそこに使用されている開閉装置の開閉責務の変化について遮断器を主対象としてその傾向を解説する。

2. 開閉責務の解析手法

SF₆ ガスの優れた遮断性能と絶縁性能とを利用したパッファ型 GCB は、近年では高電圧遮断器の大半を占め、電力系統の大容量化に大きく貢献してきた。CIGRE WG13.06 の調査⁽¹⁾によれば、運転状態の変更を必要とする重故障が 0.67 (回/100 遮断器・年)で、信頼性の高さが改めて示されている。

こうした信頼性を確保するためには開閉責務を正確に把握する必要がある。従来は TNA を用いた解析が主流で、現在の規格はそうした解析の結果によるところが大きかった。近年では、汎用過渡解析プログラム EMTP やコンピュータ技術の発達と解析手法の進歩に伴い過渡回復電圧(以下 TRV) 振幅率の高いケースの解析、各種の充電電流遮断回復電圧解析、非接地系でのいろいろな解析、2 回線併架送電線での条件、開極ばらつきの影響などを詳細に解析できるようになった。

さらに最近では、アークの特性を考慮した回路計算を行

って開閉機器及び最適な回路条件を決定する例もある。例えば、近距離線路故障の電流零点付近の熱的な現象をよく表現できるといわれる Mayr の式を EMTP の中に取り込み、遮断の成否を解析する試みがある⁽²⁾。また、4 章でも紹介する 500kV 直流送電線に使用する帰線保護用直流遮断器(以下 MRTB、MRPB とという)の直流アークを Mayr のアークモデルで記述して解析し、MRTB の開発に役立てた例がある⁽³⁾。ただし、現状では複雑なアークモデルを大きな系統の解析において、しかも複数の遮断器に適用しようとするとは莫大な計算時間が必要となる。そのため、解析しようとする現象に応じて、例えば単純な直線抵抗としての模擬や理想スイッチとしての模擬を採用するなどを使い分けが必要である。

3. 大容量交流系統における開閉責務

系統の構成形態のうち図 1(a)に模式図で示すような網状系統は万が一 1 個所で送電不能な系統故障が発生しても、別な経路で電力を供給することができるため信頼性が高く、また系統の安定度にも優れている。そのため、従来から系統の構成は網状系統を基本とし、図 1(b)のように下位系統にのみ放射状の構成が採られるのが標準的であった。しかし近年、日本国内では超高压クラスから 500kV クラスの基幹系統にも放射状の形態が見られるようになってきている。これは、多導体送電線や大容量変圧器の適用によって系統インピーダンスが低下しているうえに、他系統との連系強化によって短絡容量が増大する傾向があるため、275kV 系統において変電所間の連系を切り離して短絡電流を抑制しようとするためである(図 1(c))。

ところが、現在の規格においては遮断器の TRV は、電圧が高い系統の定格については網状系統の解析結果をベースとしている。これに対して、放射状系統の構成をとった場合には網状系統構成の場合と異なる傾向が見られる。⁽⁴⁾

(1)短絡電流の大半が上流側から変圧器を通して供給される構成であり、TRV の波高値や上昇率が高くなる傾向がある。

(2)短絡電流の直流分の減衰時定数は従来規格の標準値

Switching Duties in Modern Power Systems.

By Tadashi Mori & Katsumi Suzuki (Toshiba Corporation).

45ms より大幅に長くなる可能性がある。

(3)母線側の TRV の遅れ時間は長く、SLF(近距離線路故障)遮断責務は軽減される傾向となる。

一方、長距離・大容量送電を行う必要性から、電源から供給地までの送電を数回線の高電圧線路で行う構成が増えている。国土の広いカナダ、アメリカ合衆国、ロシアやブラジルなど、数百から中には数千 km にわたる長距離系統を 500~1000kV で運用しており、また、日本や韓国でも UHV 系統の計画が進んでいる。これらのような長距離線路は上位系統でありながら放射状系統のような傾向を持ち、加えて長距離線路になるほど線路の静電容量が増大して投入時の過電圧が高くなることがある。さらに、GCB の一点切り化など 500kV 系統用機器の小形化が進んだ結果、500kV の地下変電所の建設も行われている。500kV 地下変電所には長距離の地下ケーブルが接続されるためその静電容量は大きく、これを補償するためのリアクトルも大容量のものとなり、開閉責務も厳しくなっている。

500kV を超える UHV 系統ではこうした放射状系統の傾向がさらに顕在化するとともに、運転電圧が雷インパルス値に近づく。そのため、雷サージよりも開閉サージが送電線及び鉄塔形状の絶縁設計を支配する主要因となる。

過電圧に対する対策として、遮断器を投入する際に抵抗

を先行して挿入したり(抵抗先行投入方式)、避雷器を取り付けて過電圧を抑える方法を探ることが多く⁽⁶⁾、500kV以上の高電圧系統では特にこうした技術の開発及び適用がこれまで以上にキーポイントとなる。また、新たに位相制御開閉という手法も注目されており、5章で紹介する。

4. 大容量直流系統における責務

表2に直流設備の設置例と直流が採用されている主な理由を示す⁽⁶⁾。直流送電は従来異周波数系統間の電力融通を行うための交直変換所や海底ケーブルを用いた送電を行うために用いられてきた。また、交流に比べて送電距離による安定度上の制約がなく、潮流調整が容易であり、また交流系統の短絡容量を増加させることがないため、特に大容量サイリスタバルブの開発が進んだ近年ではこの観点から直流送電を選択した大容量送電を行うケースが増えている。直流送電系統における主回路電流の遮断はサイリスタバルブで行われるが、系統構成上バイパススイッチ(以下BPS)やMRTB、中性線路用遮断器(以下NCB)などの遮断器が必要である。これらの役割は次の通りである(図2参照)。

- (1)BPS：変換器群個別起動時に定格電流をバイパスペア状態のバルブに転流させる機能を担う。構成の簡単な限流転流方式では、バイパスペアバルブの最小点弧電圧以上の高いアーク電圧を発生する必要がある。
- (2)MRTB、NCB：MRTB は帰線架空部で地絡事故が発生したときに投入することにより、地絡アークを消滅させ、再び開放する。NCB は、帰線 2 本から 1 本運用に切り換え及び双極運転から極分離への切り換えに適用される。責務及び構成は MRTB と同様である。

図2 直流送電用遮断器のシステムへの接続例

直流電流はそれ自身零点がないため、何らかの方法で電流零点を発生させて電流を遮断する必要がある。その一つの方法として用いられるのが自励転流方式と呼ばれる方式で、アークの負特性と転流 LC 回路との相互作用で電流を拡大振動させるものである。自励転流方式には、転流させるために高いアーク電圧と負抵抗特性を確保できることが望ましく、空気遮断器が主として適用されてきた。国内最初の 500kV 直流送電となる紀伊水道直流連系プロジェクト

表 2 直流送電の適用分野と採用理由⁽⁶⁾

適用分野	プロジェクト例	採用理由
長距離大電力送電	イタイブ(南米)、ネルソンリバー(北米)、パシフィックインタータイ(北米)	・鉄塔が小形にでき、送電線建設費が交流に比べて安価である。 ・送電安定度の問題がなく、送電容量を大きくとることができる。
海底ケーブル送電	英仏連系(欧州)、北本連系(日本)、ゴットランド(欧州)、フェノスカン(欧州)	・充電電流補償の必要がない。 ・ケーブルの熱容量分を大きくとることができる。
非同期連系	デュルンロール(欧州)、シャトーゲイ(北米)、ハイゲート(北米)、佐久間 FC(日本)、新信濃 FC(日本)	・異周波数連系 ・安定度問題や短絡容量増加など、同期連系が困難な場合の交流系統間連系 ・迅速な潮流制御

トでは遮断器の保守等の観点から SF₆ GCB が適用される。2 章で触れたような解析技術等によって L や C の値を決定するなどして、バッファ形 GCB で定格 3500A の直流電流を遮断可能であることが確認されている。

直流連系や周波数変換を行うために設置される交直変換用フィルタや変換器用変圧器を開閉する場合には、交流側に過渡的な過電圧が発生する。この過電圧に耐えるため実際の運用電圧よりも 1~2 ランク上の電圧クラスの遮断器が必要がある。

5. 位相制御開閉の動向

GCB の開閉に伴って発生するサージ電圧は、GCB 自身で必要となる遮断後の耐電圧性能を決定付ける。また、系統全体の絶縁設計を左右する要因となるケースが特に電圧の高い階級では多くなる。そこで、高い開閉サージが発生しないタイミングで遮断器を動作するように制御する位相制御開閉という方式が注目されている。

例えば、図 3 のような回路でリアクトル電流を遮断することを考える。遮断器がリアクトルの電流を遮断する際に、交流電流の零点に到達する前に電流が遮断されてしまう電流遮断現象が発生することがある。電流遮断が起こると図 4 のように遮断器の負荷側に系統電圧を超える裁断サージ電圧が発生する。このときの波高値 v_1 は初期値の v_0 を超え、場合によっては電源電圧値をも上回る。接触子間には裁断サージ電圧と電源側の電圧との差である高い TRV が印加される。さらに、このとき遮断器の接触子間距離が十分でないと再発弧することがある。再発弧時には裁断サージ電圧よりもさらに高い再発弧サージ電圧を生じる可能性がある。そこで、裁断サージ電圧でも再発弧が発生しない程度まで接触子が十分離れたタイミングで電流遮断を行うように、遮断器の開極動作を制御するシステムが既に国内で運用されている。1989 年以来、154kV 用 GCB で 2 台、275kV 用で 18 台が既に運用中で、今後 500kV 地下変電所用にも適用が計画されている。

近年になって海外でも位相制御開閉への関心が高まっており、CIGRE ではワーキンググループにおいて調査、討論が進められている⁽⁸⁾。ここで現在検討されているのは、

図 3 リアクトル遮断の簡易回路⁽⁷⁾

図 4 分路リアクトル遮断の際の電圧・電流の過渡変化⁽⁷⁾

上に紹介した分路リアクトルの他、変圧器、コンデンサ、長距離線路の投入及び開路時のサージ電圧に対する対策としての位相制御開閉である。実際の運用のためには、遮断動作開始時間、動作速度のばらつきや接触子投入時の先行放電現象を考慮する必要があるなど、さまざまな要因を考慮する必要がある。カナダでは、送電線投入時のサージ電圧抑制策として、従来の抵抗先行投入方式(3 章参照)の代替技術として位相制御開閉の試用が行われており、さらにコンデンサバンク開閉への適用などが計画されている。

システム採用については、位相制御開閉をするためのシステムによるコストアップと、位相制御開閉を行うことによる系統絶縁の軽減や遮断器責務軽減によるコストダウン

とのバランスが大きなポイントとなる。また、位相制御開閉の信頼性に対する考え方、例えば万が一相制御に失敗した場合をどの程度考慮するかといった問題についても今後議論が進められるべき点であろう。このほか位相制御開閉については、大電流遮断にも適用し、できるだけ遮断アーク時間を短く抑えることによって寿命及び点検周期を長くできる可能性も指摘でき、今後さまざまな面からの検討、研究が期待される。

6. 将来の電力系統

今後、電力系統は現在計画されている 1000kV 交流送電系統の採用、500kV 直流送電系統の採用を初めとした高電圧、大容量化が進むと予測され、ますます系統が変貌し、開閉責務も変化していくであろう。ここで限流器と超電導機器を例として将来の電力系統における新しい電力機器の開発に際して留意すべき点に触れる。

短絡電流を抑制する限流器の方式については、現在様々な検討されており、アークの駆動を利用した構成、半導体を組み合わせた構成、超電導体を利用した構成のものなどがある。現在これらの方式について主に限流効果を確かめることを主眼として開発、研究がなされている。しかし、開閉責務の観点からは、動作時の過電圧や限流中の電流を遮断する際の過電圧も重要な要素である。例えば、超電導限流器が超電導状態から抵抗を持つ状態に移した瞬間に発生するサージ電圧を解析し、さらに抵抗が増加する速度によってサージ電圧が変化することを指摘した研究⁽⁹⁾や、限流リアクトルを適用した場合に該当系統の遮断器に発生するサージ電圧を解析した例がある⁽¹⁰⁾。

さらに将来の電力需要の増加に対応するために、発電機、変圧器、ケーブルなどの超電導機器の開発も進められている。これら超電導機器が系統に適用されると、開閉責務にも変化が起こる。例えば、超電導ケーブルを含む電力系統の近距離線路故障の事故条件では、事故電流の位相が現在よりも抵抗位相に近づくこと、及び限流インピーダンスの分担により線路側残留電圧が大幅に抑制される。このため過渡回復電圧が大幅に低減されるという報告例⁽¹¹⁾がある。

しかし、一般にはこれら新機器を適用したときに発生するサージ電圧などについての検討は極めて少ないのが現状である。今後は、開閉した際に生じるサージ電圧や事故電流を考慮し、機器本来の機能と併せて、開閉責務及びシステム全体にとって最も最適となる新機器開発を推進することが期待される。

7. むすび

遮断責務の変化に対応した開閉装置の必要性から、規格を改訂する作業が進められている。JECの改訂案については既に電気学会誌にてその内容が報告され⁽¹²⁾、IECでも3年後の完成を目処に改訂作業が進められている。しか

し、規格改訂作業中及び終了した後も刻々と電力系統は変化しつづけるとともに、規格で網羅できないケースも存在する。そのため、常に電力系統の開閉責務を検討、調査することは重要である。電気学会開閉保護技術委員会では、96年4月から99年3月の期間で「最近の電力系統における開閉責務調査専門委員会」を設置して調査を進めてきた。本稿では当該委員会での調査結果の中から、近年変化の著しい電力系統の開閉責務について概要を述べた。今後も継続した調査、検討が望まれる。

(平成11年1月8日受付)

文 献

- (1) A.L.Janssen et al: "CIGRE WG 13.06 Studies on The Reliability of Single Pressure SF₆-Gas High-Voltage Circuit-Breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp.274-282, January 1996
- (2) 萩森、他: 「最近の電力系統開閉現象解析手法」、電気学会開閉保護研究会資料、SP-98-7(1998)
- (3) 竹治、他: 「MRTB/NCB用SF₆ガスアークによる自励発振直流遮断」、平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会、No.579(1995)
- (4) 萩森、他: 「超高压放射状系統の故障遮断条件」、電気学会論文誌電力・エネルギー部門誌、113巻4号(1993)
- (5) J.K.Bladow et al: "Switching surge control for the 500kV California-Oregon transmission project", CIGRE, 13-304(1990)
- (6) H.Ito et al: "Instability of DC in SF₆ Circuit Breaker", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.4(1997)
- (7) 「大容量遮断器の特殊遮断条件」、電気学会技術報告(Ⅱ部)第388号(1991)
- (8) CIGRE WG13.07: "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers", Cigre13-98(SC)05IWD(1998)
- (9) 岩田、他: 「超電導限流器の開閉動向とシステムの適用」、電気学会東海支部専門講習会テキスト(1998)
- (10) 青島、他: 「500kV 限流装置の設置に伴う遮断器の責務」、電気学会開閉保護研究会資料、SP-98-8(1998)
- (11) 鬼頭、他: 「極低温事故電流限流装置の過渡回復電圧抑制効果」、電気学会論文誌電力・エネルギー部門誌、104巻8号(1984)
- (12) 中西、他: 電気学会規格調査会だより「交流遮断器[改訂](JEC-2300-1998)」、電気学会誌、118巻11号(1998)

森 正 (正員)1966年6月14日生。91年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。主にガス遮断器消弧室の開発、アーク現象の研究に従事。最近の電力系統における開閉責務調査専門委員会幹事補佐。IEEE 会員。

鈴木 克巳 (正員)1951年6月27日生。78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終了。同年4月(株)東芝入社、主にガス絶縁開閉装置の開発、アーク現象の研究に従事。最近の電力系統における開閉責務調査専門委員会幹事。93年電気学会進歩賞。98年電気学会論文賞。工学博士。IEEE 会員。