550kV ガス遮断器の開極位相制御に関する検討

正員 香山 治彦 正員 和田 耕太郎 正員 伊藤 弘基
正員 日高 幹雄 正員 杉山 勉 正員 山本 宏 (三菱電機 株式会社)

Investigations on Controlled Closing of 550kV Gas Circuit Breaker

Haruhiko Kohyama, Koutarou Wada, Hiroki Ito, Mikio Hidaka,
Tsutomu Sugiyama, Hiroshi Yamamoto (Mitsubishi Electric Corporation)

Optimal closing target of 550kV gas circuit breaker (GCB) is investigated. In closing operation of GCB, making voltage depends on dielectric and mechanical characteristics of GCB, therefore optimal closing target has to be determined by investigation of these characteristics. Optimal closing target and estimated making voltage are shown as functions of Rate of Decrease of Dielectric Strength (RDDS) and mechanical scattering of closing time of GCB. Closing characteristics of 2 break GCB are investigated considering a change of the dividing voltage of each pole. Synchronous closing of 550kV live tank GCB were tested with the optimum targets for minimum and maximum making voltage prospected by the functions. The EMC tests of the synchronous switching controller were also confirmed by switching test with 550 kV circuit.

キーワード: ガス遮断器 (GCB)、開閉極位相制御、過電圧、突入電流

Keywords: Gas Circuit Breaker (GCB), Control Switching, Over Voltage, Inrush Current

1. まえがき

電力用遮断器の開閉極時には過電圧・突入電流が発生し、機器の絶縁、寿命、系統電圧の安定性に影響を与え、また保護リレーの誤動作を誘発するなど、機器の保全、あるいは電力系統の運用上の問題を引き起こす場合がある。これらの現象を回避するため、従来より投入抵抗方式の採用、避雷器の設置、点検周期の短縮など、種々の対策が講じられてきた。

一方で、これらの過電圧・突入電流の発生は、遮断器を系統電圧あるいは電流の特定位相において開閉することにより回避できることから、遮断器の開閉極位相を制御する方式が90年代後半より実用化され、過電圧・突入電流抑制のための経済的な手段として欧米を中心に急速に適用例が増加しつつある⁽¹⁾⁽²⁾。

開閉極位相制御方式による過電圧・突入電流の抑制効果は、遮断器の開閉極位相のばらつきに大きく依存する。遮断器の開極過程においては、接点の開極動作に伴い極間の絶縁耐力が減少し、これが遮断器極間に印加される電圧を下回った時点で先行放電(ブレイク)が発生し、回路が電氣的に投入される。したがって、遮断器の投入位相は極間絶縁耐力減少率 (RDDS: Rate of Decrease of Dielectric Strength) と機械的な開極時刻に依存し、遮断器開極動作の機械的なばらつき、および極間の放電ばらつきにより、

正規状の分布を持つ。このため、目標開極位相を決定する際には、これらの遮断器固有の特性を十分に把握する必要がある⁽³⁾。

本論文では、2点切 GCB 投入時の現象につき考察を加え、遮断器の極間絶縁特性および動作特性から目標とする開極位相を求める方法を検討する。さらに、550kV 碍子形ガス遮断器を用いて、これらの検討により得られた目標開極位相に基づき実電圧投入試験を実施した結果について報告する。

2. 開極位相制御の概念

開閉極位相制御遮断器のシステム構成を図1に示す。開閉極位相制御装置は、任意の位相で入力される遮断器の開閉極指令に対し、遮断器の開閉極時間を予測し、系統電圧あるいは電流を参照しながら目標とする位相で開閉極されるタイミングで、遮断器に対し開閉極信号を出力する。

遮断器の開閉極時間は遮断器の制御電圧、操作圧力、周囲温度、および動作履歴等の動作条件によって変化するため、位相制御装置はこれらの動作条件を検出し、あらかじめ与えられた、各動作条件下における遮断器開閉極時間に基づき、開閉極信号を出力するまでの同期遅れ時間を調整する必要がある。また、特に開極位相制御の場合には、目標とする位相により開極時の電圧値が異なるため、ブレイク発生から機械的な接点接触までの時間(ブレイク時

間)の変化も考慮しなければならない⁽⁴⁾。開極位相制御におけるシーケンスおよび制御における各過程の時間変化の模式図を図2に示す。

一般的に、周囲温度、制御電圧、操作圧力が小さくなると遮断器閉極時間が長くなるため、同期遅れ時間を短く設定し、逆に周囲温度、制御電圧、操作圧力が大きくなると遮断器閉極時間が短くなるため、同期遅れ時間を長く設定することにより、閉極指令を受けてから遮断器が閉極するまでの時間を一定に保つよう制御する。今回用いた位相制御装置では、これらの演算は各回動作ごとに閉極指令を受けた後に実施され、また制御の基準として閉極指令入力以前の最近の電圧零点を使用することにより、同期遅れ時間の最短化を図り、0.5 サイクル以下としている。

3. 遮断器の電氣的、機械的特性の測定

本章では、550 kV 棒形 GCB について、目標閉極位相検討の基礎となる RDDS と動作ばらつきを測定した結果について述べる。

Fig.1. Control switching system

図1. 閉極位相制御遮断器のシステム構成

Fig.2. Controlled closing sequence

図2. 閉極位相制御のシーケンス

＜3.1＞RDDS の測定 図3に示す試験回路により、供試遮断器 Bt の両側から 180° 位相の異なる商用周波電圧を印加することにより遮断器極間の電圧を $550/\sqrt{3}$ kV とし、電氣的に通電が開始される位相角(以下、投入位相)を 360° に亘り 15° ずつ変化させ、各位相にて 4 回ずつ投入試験を実施した。RDDS はブレイク発生時の極間電圧と、ブレイク発生から遮断器の接点が機械的に接触する閉極点までの時間の比で表される。この値を電圧零点における系統電圧の変化率 ωV_p (ω : 系統電圧の角周波数、 V_p : 系統電圧波高値) で規格化したものを k_{RDDS} とし、投入電圧位相で整理したものを図4に示す。

Fig.3. Closing test circuit

図3. 投入試験回路

Fig.4. Normalized RDDS at different making instants

図4. 投入位相と k_{RDDS} の関係

ここで、2 点切 GCB の場合は、一般的に部品公差、組立公差の影響により両極の開極位置に若干のばらつきが存在するため、両極の開極時刻が最大で 0.5ms 程度異なる場合がある。図5に 0.5ms の閉極時間差が存在する場合の、遮断器両極の RDDS と極間電圧波形の関係を示す。片極に印加される電圧は、遮断器電極の対地浮遊容量の影響を受け厳密には全電圧の 50% とはならないが、ここでは簡単のため 50% としている。閉極速度、極間の形状が同一のため、両極の RDDS は同じ傾きを持つ 2 本の平行線で表現できる。投入過程においては、まず先行する極の RDDS (図中左側の直線) が、片極の極間電圧と交差する時刻にて先行する極間にて放電が生じ、残る極に全極間電圧が印加される。この時点で、全極間電圧が残る片極の

RDDS(図中右側の直線)を上回っている場合にはこの極でも放電が生じ、遮断器全体の通電が開始される。したがって、電圧値が非常に低い領域を除き、2点切 GCB の投入点は先行する片極の RDDS に支配されると考えられ、上記計算には閉極点として、事前の開閉試験にて両極の閉極時間を測定した上で、先行する片極が接触する位置を用いた。図4の結果より、2極間の RDDS ばらつきに大きく影響を受ける電圧零点近傍では、 k_{RDDS} の値にばらつきがあるが、それ以外の領域(投入位相 $30^\circ \sim 150^\circ$ 、 $210^\circ \sim 330^\circ$)においては、 $k_{RDDS}=0.9$ 、放電ばらつきの 3σ 値は約 $\pm 10\%$ であることが判る。また、印加電圧の極性による効果はほとんど認められなかった。

なお $k_{RDDS} > 1$ であれば、閉極時間ばらつき、放電ばらつきが存在しない場合には、コンデンサ、無負荷送電線等の容量負荷に対する理想投入点である電圧零点での投入が可能となる。

Fig.5. Pre-strike characteristics of 2 break GCB

図5. 2点切遮断器のプレアーク特性

＜3.2＞動作ばらつきの測定 供試遮断器を定格制御電圧、定格操作圧力で50回操作し、閉極時間を測定した。測定結果から、閉極時間のばらつきは 3σ 値で 0.9ms であった。なお、開閉時間は制御電圧、周囲温度等の動作条件により変化するが⁽⁶⁾、これらの変化を補正することにより、 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 、 $70\text{V} \sim 140\text{V}$ の範囲で本遮断器の閉極時間ばらつきが $\pm 1.0\text{ms}$ 以内であることを確認している。

4. 目標閉極位相の検討

遮断器の閉極位相制御において、目標となる閉極位相は投入すべき負荷の種類、接地状態、相順により異なる⁽¹⁾。ここでは、前章で述べた遮断器の特性に基づき、最大極間電圧での投入を目標とする場合、および最小極間電圧を目標とする場合の最適目標点の設定について検討する。

＜4.1＞投入電圧を最大とする目標閉極点の検討 最大電圧での投入を目標とする場合の、遮断器極間耐電圧特性、投入電圧の関係を図6に示す。正弦波は極間電圧、A点は遮断器接点の機械的接触点(閉極点)、B点はプレアーク発生点である。A、B点を通過する負の傾きを持った直線は遮断器極間耐電圧特性を示し、この直線の傾きが RDDS を表す。上記直線の左右に描いた破線は、それぞれ遮断器の閉極時間および極間放電ばらつきを考慮した遮断器極間耐電圧特性の限界線($\pm 3\sigma$)を示す。プレアークは上記2

本の限界線が、極間電圧を示す曲線と交差する2点CとDの間で発生すると考えられる。投入電圧の下限値が最も高くなるのは、C、D点の電圧値が同じとなる場合であるため、この条件を満たすようにA点を目標閉極位相として設定すればよい。ただし、 k_{RDDS} が小さい場合、および閉極時間のばらつきが大きい場合には、ばらつきを考慮した RDDS の右側限界線と極間電圧の接点(G点)が下限値となるため、投入電圧分布を極間電圧最大点以前に広げ必要がある。このような場合には、投入電圧の下限値はばらつきを考慮した RDDS の左側限界線と極間電圧の交点(F点)により決定される。

Fig.6. Optimal closing targets for maximum making voltage

図6. 投入電圧を最大とする目標投入位相

以上のような考えに基づき、 k_{RDDS} の値を変化させた場合の遮断器閉極時間のばらつきと投入電圧を最大とする目標閉極位相の関係を求めた結果を、図7に示す。閉極時間ばらつきが小さく、また k_{RDDS} が小さくなるに従い、目標閉極位相の電気角が大きくなる。

また、遮断器閉極時間のばらつきを変化させた場合の k_{RDDS} と最小投入電圧の関係を図8に示す。動作ばらつきが大きく、また k_{RDDS} が小さくなるに従い、最小投入電圧が低下する傾向にある。ただし、動作ばらつきが 1.2ms 以上の場合には、 $k_{RDDS}=0.4$ 付近で最小投入電圧が最も低くなるが、これは k_{RDDS} が小さい場合には図6において RDDS の両限界線が図の上下方向に近接するため投入電圧幅が小さくなり、見かけ上遮断器閉極時間のばらつきが小さくなることを表す。

Fig.7. Closing target for maximum making voltage as functions of RDDS and a mechanical scatter

図7. 目標閉極位相と k_{RDDS} 、動作ばらつきの関係

Fig.8. Dependence of minimum making voltage on RDDS and a mechanical scatter

図 8. 最小投入電圧と k_{RDDs} 、動作ばらつきの関係

今回供試した 550kV 碍子形 GCB は、 $k_{RDDs}=0.9$ 、閉極時間ばらつきの $3\sigma=0.9\text{ms}$ であるので、目標閉極位相は 149° 、最小投入電圧は 0.88PU と推定できる。

<4.2>投入電圧を最小とする目標閉極点の検討 最小電圧での投入を目標とする場合には、 k_{RDDs} の値により目標閉極点の設定方法が異なる。遮断器極間耐電圧特性、極間電圧、および投入電圧位相の関係を図 9 に示す。それぞれの曲線は図 5 と同じ意味を持ち、H、L 点は閉極点、I、M 点はブレイク発生点、J、K、N、O 点はブレイクが発生する領域の両端を示す。まず、 $k_{RDDs} > 1$ の場合には、図より明らかなように遮断器は電圧零点を含む任意の位相で投入が可能であるため、J、K 点の電圧が等しくなるように目標閉極点 H 点を設定する。これに対し $k_{RDDs} < 1$ の場合には、ばらつきを考慮した RDDS の限界線が電圧零点以前の極間電圧波形に接する場合が、最小の投入電圧となる。

以上のような考えに基づいて求めた、 k_{RDDs} の値を変化させた場合の投入電圧を最小とする目標閉極位相と遮断器閉極時間のばらつきの関係を図 10 に示す。 k_{RDDs} が小さく、あるいは閉極時間のばらつきが大きくなるに従い、目標閉極位相が電圧零点から遅れる傾向があることが解る。また、 k_{RDDs} と最小投入電圧の関係を図 11 に示す。

次に、遮断器閉極時間のばらつきを変化させた場合の、 k_{RDDs} と最大投入電圧の関係を図 12 に示す。最大投入電圧を小さくするためには、 k_{RDDs} を大きくする、あるいは閉極時間ばらつきを小さくする必要があることが解る。 k_{RDDs} および閉極時間ばらつきは各遮断器に固有の数値であるため、例えば有効接地系コンデンサバンクの投入などのように、波高値の 1/2 以下の電圧での投入を要求される負荷に対しては、図 12 により適用の可否を判断できる。

今回供試した 550kV 碍子形 GCB は、 $k_{RDDs}=0.9$ 、閉極時間ばらつきの $3\sigma=0.9\text{ms}$ であるので、目標閉極位相は 25° 、最大投入電圧は 0.4PU と推定できる。

<4.3>予測される投入位相の分布 本 GCB を用いての実電圧投入における投入位相の分布を調べるため、遮断

器極間の放電ばらつき、および閉極時間ばらつきを正規分布と仮定し、投入位相の確率分布を求めた。図 10 から求まる目標閉極位相にて投入動作を行った場合に予測される投入位相の確率分布を図 13 に示す。分布の最大点は、RDDS 分布の中心線と極間電圧の交点とほぼ同じであり、確率が 95%以上となる領域の幅は 1.0ms となる。

Fig.9. Optimal closing targets for minimum making voltage

図 9. 投入電圧を最小とする目標投入位相

Fig.10. Closing target for minimum making voltage as functions of RDDS and a mechanical scatter

図 10. 目標閉極位相と k_{RDDs} 、動作ばらつきの関係

Fig.11. Dependence of the minimum making voltage on the normalized RDDS

図 11. 最小投入電圧と k_{RDDs} の関係

Fig.12. Dependence of maximum making voltage on RDDS and a mechanical scatter

図 12. 最大投入電圧と k_{RDDS} 、動作ばらつき関係

Fig.13. Distribution of making instant (Target closing point: 25° after voltage zero)

図 13. 投入位相の分布(目標閉極位相 25°)

Fig.14. Distribution of making instants (Target closing point: 15° after voltage zero)

図 14. 投入位相の分布(目標閉極位相 15°)

参考のために、目標閉極位相を図 12 の値から 10° 以前に設定した場合の投入位相の確率分布を図 14 に示す。分布は電圧零点以前に移動し、電圧零点以降の最大投入電圧の減少割合に対し、電圧零点以前での最大投入電圧増加の割合が非常に大きくなっていることがわかる。これは RDDS が負の傾きを有するため起こる現象である。

5. 検証試験結果

前章での検討結果の妥当性を評価するため、550kV63kA2 点切碍子形 GCB を用いて、投入試験を実施した。本遮断器は IEC60056-amend3 および ANSI に基

づき設計、検証が行われており、主に海外市場に対し 200 台以上の納入実績を有する。遮断器の特性値から、図 8、12 により投入電圧を最小化するための目標位相は約 25°、最大化するための目標位相は約 149° と算出できる。試験は図 3 に示した試験回路を用いて実施し、開閉極位相制御装置により、予め入力された動作特性をもとに開閉試験時と投入試験時との動作条件の相違による閉極時間の相違を補償し、上記各目標位相にて閉極するよう遮断器を制御した。開閉極位相制御装置は、遮断器に近接して設置された制御箱内に収納されており、本投入試験により、遮断器投入時に発生する高周波サージに対する耐サージ性も検証が可能である。投入試験の状況を図 15 に示す。

<5.1>投入試験結果 各目標位相につき、それぞれ 10 回ずつ投入動作を実施した時の投入位相とプレアーク電圧の関係をそれぞれ図 16、17 に示す。目標位相を 25° とした場合の最小投入電圧は 0.11PU、最大投入電圧は 0.15PU、目標位相を 149° とした場合の最小投入電圧は 0.98PU であった。

次に、目標閉極位相を 15° とした場合の投入試験結果を図 18 に示す。投入位相の分布は電圧零点以前の方に移動し、最大投入電圧が非常に高くなっていることが判る。

各試験における動作ばらつきは、事前の開閉試験時に比べ小さく、従って投入位相のばらつきも小さい結果となったが、投入点の分布状況は図 13、14 と同様の傾向を示しており、本検討の妥当性を示していると考ええる。

Fig.15. Closing test of 550kV live tank GCB and synchronous switching controller

図 15. 550kV 碍子形 GCB の投入試験状況

<5.2>位相制御特性の耐サージ性 これらの試験を通して開閉極位相制御装置は良好に位相制御動作を実施しており、550kV の電圧投入時に発生するサージが存在する環境においても、位相制御装置本体および動作行程、温度、空気圧等のセンサ類が、絶縁破壊あるいは誤動作することなく制御可能であることを確認した。

Fig.16. Result of closing test (Target point : 149°)
(Maximum making voltage)

図 16. 投入試験結果(目標閉極点:149°)

Fig.17. Result of closing test (Target point : 25°)
(Minimum making voltage)

図 17. 投入試験結果(目標閉極点:25°)

Fig.18. Result of closing test (Target point : 15°)

図 18. 投入試験結果(目標閉極点:15°)

6. むすび

ガス遮断器の閉極位相制御を実施するにあたり、遮断器の極間絶縁耐力減少率および機械的動作ばらつきを考慮し、最小電圧または最大電圧での投入を目的とする場合に

目標とする位相の設定方法について検討した。また、検討により得られた目標位相にて 550kV 碍子形 GCB の実電圧投入試験を実施し、投入電圧の試験結果と計算値の比較を行い、本検討の妥当性を確認した。さらに、本 GCB に閉極位相制御を適用することにより、投入電圧を 0.4PU 以下に制御することが可能であること、および開閉極位相制御装置が 550kV の電圧投入時においても、十分な耐サージ性を有することを確認した。

(平成 12 年 11 月 1 日受付, 平成 13 年 1 月 17 日再受付)

文献

- (1) CIGRE Working Group 13.07 "Controlled Switching of HVDC Circuit Breakers", ELECTRA No.183, P43~57, April 1999
- (2) A.H.KHAN et al. "SYNCHRONOUS CLOSING APPLICATIONS IN UTILITY TRANSMISSION SYSTEM", CIGRE 13-306, 1996
- (3) 和田耕太郎 他、「開閉極位相制御遮断器の目標閉極点に関する検討」、平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会、NO.604
- (4) 蔦田 広幸 他、「開閉極位相制御 GCB における制御アルゴリズムの検討」、平成 12 年電気学会全国大会、No.6-238
- (5) 和田耕太郎、他、「145kV 開閉極位相制御遮断器の開発」、平成 12 年電気学会全国大会、No.6-237

香山 治彦

(正員) 1991 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士過程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。

和田 耕太郎

(正員) 1998 年 3 月東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻修士過程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。

伊藤 弘基

(正員) 1984 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻修士過程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社後。現在、三菱電機(株)系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。工学博士。IEEE、CIGRE13.07「Controlled Switching」会員。

日高 幹雄

(正員) 1981年3月大阪大学大学院機械工学専攻修士過程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部にて高電圧遮断器の開発設計に従事。

杉山 勉

(正員) 1979年3月名古屋大学大学院機械工学専攻修士過程修了。同年4月三菱電機(株)入社後、高電圧遮断器の開発設計に従事。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部遮断器設計課長。

山本 宏

(正員) 1974年3月大阪大学機械工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社後、ガス絶縁開閉装置(GIS)の開発設計に従事。現在、同社系統変電・交通システム事業所、開閉機器製造部長。