

GCBへの開閉極位相制御の適用

森 智仁*
山本 綾*
吉田大輔*

Application of Controlled Switching System to Gas Circuit Breaker

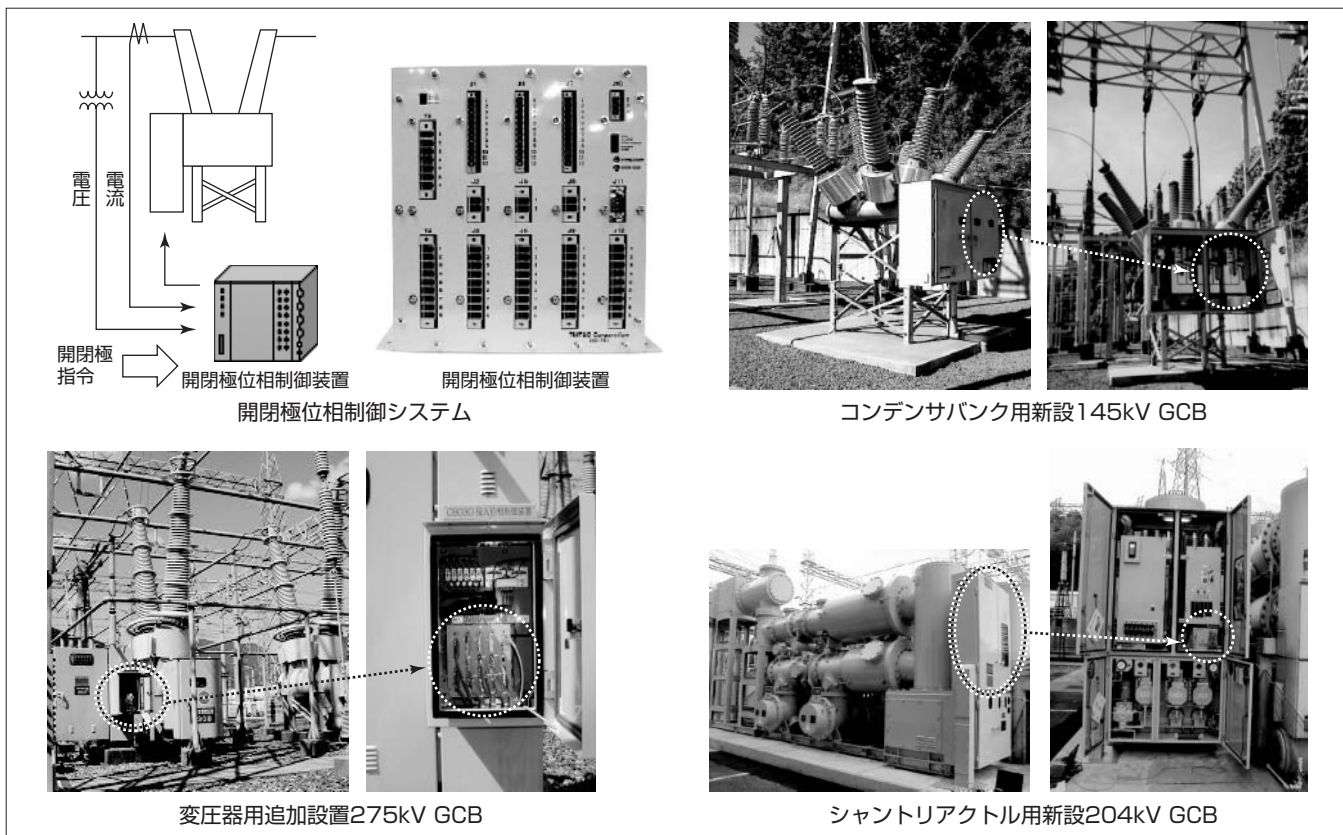
Tomohito Mori, Aya Yamamoto, Daisuke Yoshida

要 旨

遮断器の開閉動作によって発生する過電圧・過電流は、機器の絶縁耐力、寿命、及び系統電圧の安定性に影響を及ぼすことから、過電圧・過電流を抑制する有効な手段として、系統電圧の特定位相で遮断器を開閉する開閉極位相制御技術が適用されている。

三菱電機は、1998年に電力用コンデンサ及び分路リアクトルといった調相設備用ガス遮断器(Gas Circuit Breaker：GCB)の開閉サージと突入電流の抑制、また、接点の損耗抑制による接点部品の交換周期の延伸化を目的に開閉極位相制御装置の適用を開始した。2005年には無負荷変圧器充

電時の励磁突入電流を抑制することを目的に変圧器用GCBへの位相制御システムを開発して製品に適用し、系統電圧の瞬時電圧低下抑制と保護リレーの誤動作防止による系統安定化を実現した。また、高速再閉路責務を伴う送電線用GCBについては、電源電圧と送電線電圧を取り込み、高精度波形推定によって極間電圧が最小となる未来の時刻を予測して投入制御を行う高速再閉路動作に対応した送電線位相制御投入アルゴリズムを開発して2009年に製品化し、位相制御システムのシリーズ化を実現した。



開閉極位相制御システムと調相設備、無負荷変圧器への開閉極位相制御適用実績

開閉極位相制御システムの調相設備への適用(図の右上下)による突入電流・再発弧過電圧などの有害サージの抑制とアーク接触子の損耗低減、無負荷変圧器への適用(図の左下)による励磁突入電流と系統電圧の瞬時電圧低下の抑制を実運用で確認した。また、送電線用位相制御システムを開発し、高速再閉路時の過電圧抑制効果を確認した。

1. ま え が き

遮断器の開閉動作時に発生する過電圧・過電流を抑制することを目的に、開閉極位相制御システムを開発し、調相設備用、変圧器用、及び送電線用遮断器への適用を実現した。開閉極位相制御システムは、任意時刻に入力される遮断器の開閉極指令に対して遮断器の開閉極動作時間を予測し、系統電圧・電流を参照しながら、開閉サージを抑制できる目標開放・投入位相から予測開閉極動作時間を差し引いたタイミングで遮断器に開閉極信号を出力する。目標開放・投入位相は遮断器の適用用途ごとに異なり、例えばコンデンサバンク等の容量性負荷の場合には電圧の零点、分路リアクトルなどの誘導性負荷の場合には電圧の波高点が理想な投入位相となる。一方、無負荷変圧器の場合には遮断器解放時に生じる変圧器鉄心の残留磁束を考慮する必要があり、また、無負荷送電線の高速再閉路の場合には遮断器開放時の送電線電圧の過渡現象を考慮することが必要である。

本稿では、各用途に応じた位相制御方法と、この方法を適用した遮断器の実系統での投入・遮断結果に基づく妥当性の評価、及びフィールドでの運用結果に基づいた開閉極位相制御システムの良好な運用実績について述べる。

2. 開閉極位相制御技術の適用

2.1 適用実績

当社の開閉極位相制御装置を搭載したGCBの納入台数の推移を図1に示す。年々、開閉極位相制御システムの需要が増加しており、今後も拡大が予想される。

2.2 調相設備への適用

2.2.1 コンデンサバンクへの適用

最も早くから適用され、かつ多いのがコンデンサバンクへの適用である。容量性負荷となるコンデンサバンク投入時の突入電流を抑制するためには、遮断器極間の電圧が零となる位相で遮断器を投入すればよいが、実運用では、遮断器の開極時間ばらつきや遮断器の極間絶縁耐力減少率(RDDS)に基づき遮断器コンタクトが機械的に接触する前の極間絶縁破壊によるプレアーク発生タイミングを考慮して最適な投入位相を決定する必要がある⁽¹⁾。図2にコンデンサバンクの位相制御投入の結果を示す。目標閉極位相 16° に対して閉極時間のばらつきは $\pm 1\text{ms}$ 以内であり、CIGREから報告されている誘導負荷の場合の開閉極位相制御における許容動作ばらつき $\pm 2\text{ms}$ を十分満足している⁽²⁾。

2.2.2 分路リアクトルへの適用

次に多いのが分路リアクトルへの適用である。分路リアクトルは、一般的にギャップ付鉄心が採用されていることから鉄心の残留磁束は極めて小さく、定常磁束が零になる位相、つまり電源電圧の波高点で遮断器を投入すれば、鉄

心の磁束飽和及びこれに起因する突入電流を抑制することができる。図3は、位相制御投入時の投入電圧・投入位相と投入電流波高値の実測結果である。投入点のばらつきは 1.2ms と十分小さく、これによる投入電流の波高値もほぼ 1PU (=磁束波高値)に抑制されている。一方、開極の場合も再発弧発生時の高周波電流による接点損耗を抑制する効果がある。図4は、遮断動作時のアーク時間の実測値と位相制御装置に設定された目標アーク時間との差分を示したものである。アーク時間誤差は各相とも 0.2ms (3σ 値)以内と目標通りである。現地での4,500回の開路動作でも

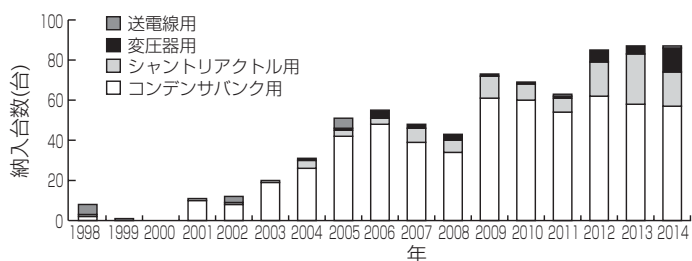


図1. 開閉極位相制御GCB納入実績

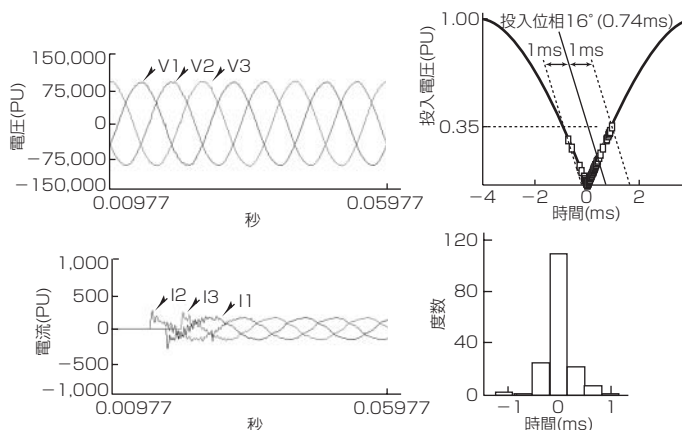


図2. コンデンサバンクへの適用実績

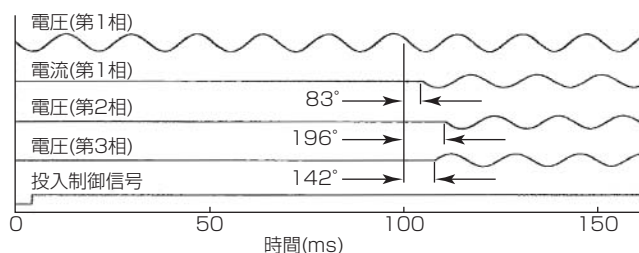


図3. 分路リアクトル位相制御投入結果

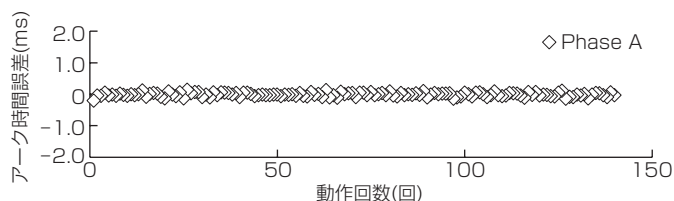


図4. 位相制御遮断時のアーク時間誤差

目標アーク時間からの逸脱による警報出力は発生せず、GCBの消耗による再発弧等も発生せず良好な運転実績を持つ。

さらに、遮断器動作回数2,300回の時点で遮断器の内部点検を実施してアーク接触子の損耗量を調査した結果、交換基準として設定している損耗量の1/4以下であることを確認している⁽³⁾。図5に消耗の抑制によるアーク時間の延伸効果を示す。これを基に、アーク接触子の交換寿命を2,000回から4,000回の約2倍に延伸した。

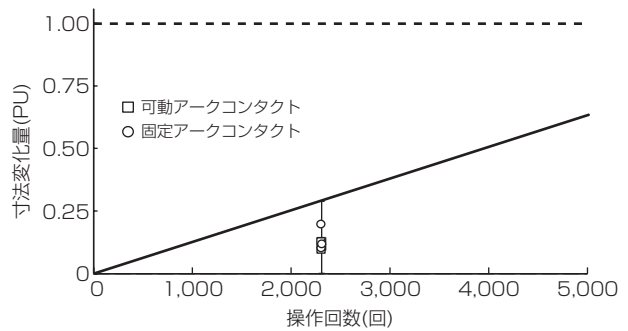


図5. 動作回数とアーク接触子損耗量の関係

2.3 変圧器用途への適用

国内では、系統電圧の瞬時電圧低下抑制や保護リレーの誤動作防止の観点から、無負荷変圧器充電時の励磁突入電流を抑制するための変圧器用途への適用が増加している。

2.3.1 各相操作形遮断器への適用

遮断器開放時の変圧器電圧を積分して残留磁束を算出し、定常状態で電源側電圧によって発生する磁束と残留磁束が一致する時刻で遮断器を投入することで、変圧器鉄心の飽和を抑制し、励磁突入電流の抑制が可能である⁽⁴⁾。投入位相制御を適用しない場合（三相同時投入）の実測波形例を図6に示す。1,245~2,678Aの励磁突入電流が発生し、変圧器高圧側母線電圧の低下は約11%である。

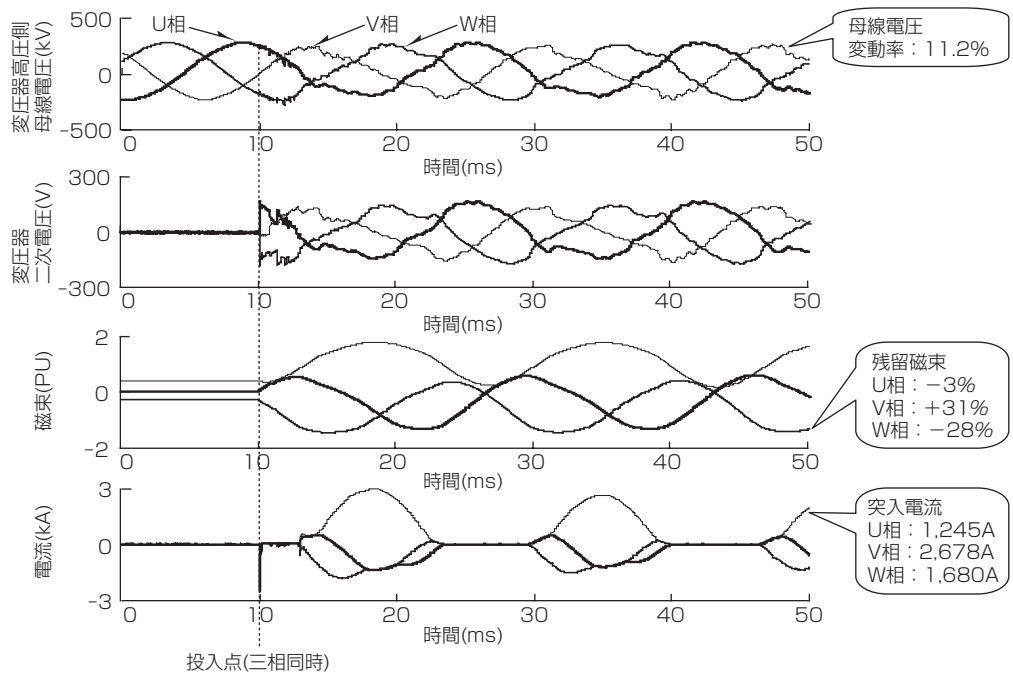


図6. 変圧器位相制御なしの実測結果

これに対して、投入位相制御を適用した場合の実測波形例を図7に示す。残留磁束最大相を第一投入相として、残留磁束と定常磁束が一致する位相(A点)で投入する。次に、第一相投入1.5サイクル後に、残り二相を第一相の電圧零点付近(B点)で投入する。位相制御投入の結果、励磁突入電流は100A以下、母線電圧の変

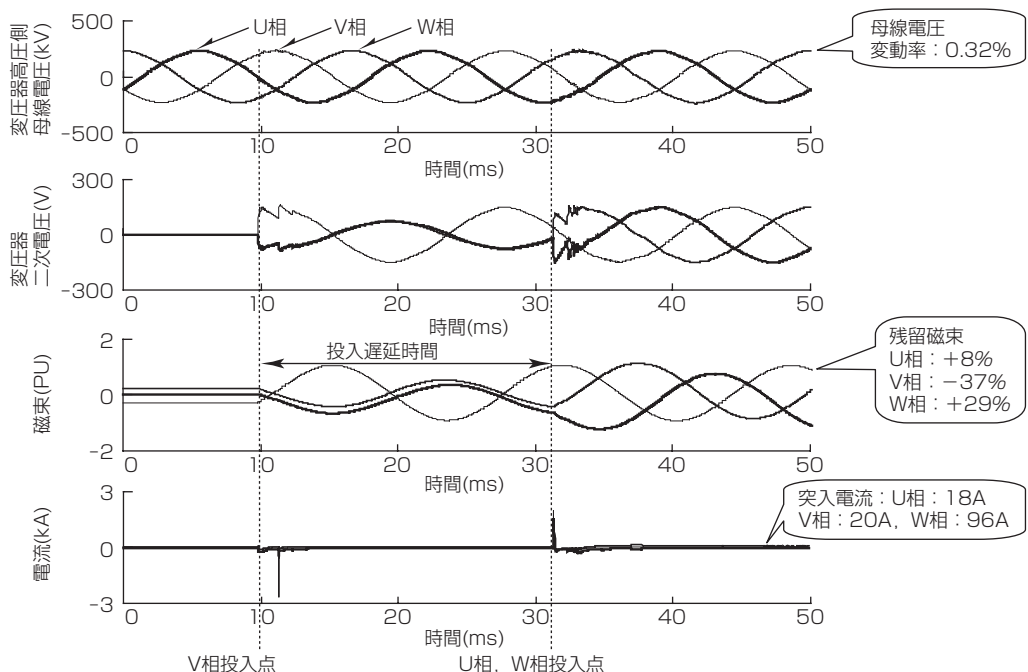


図7. 変圧器位相制御投入の実測結果

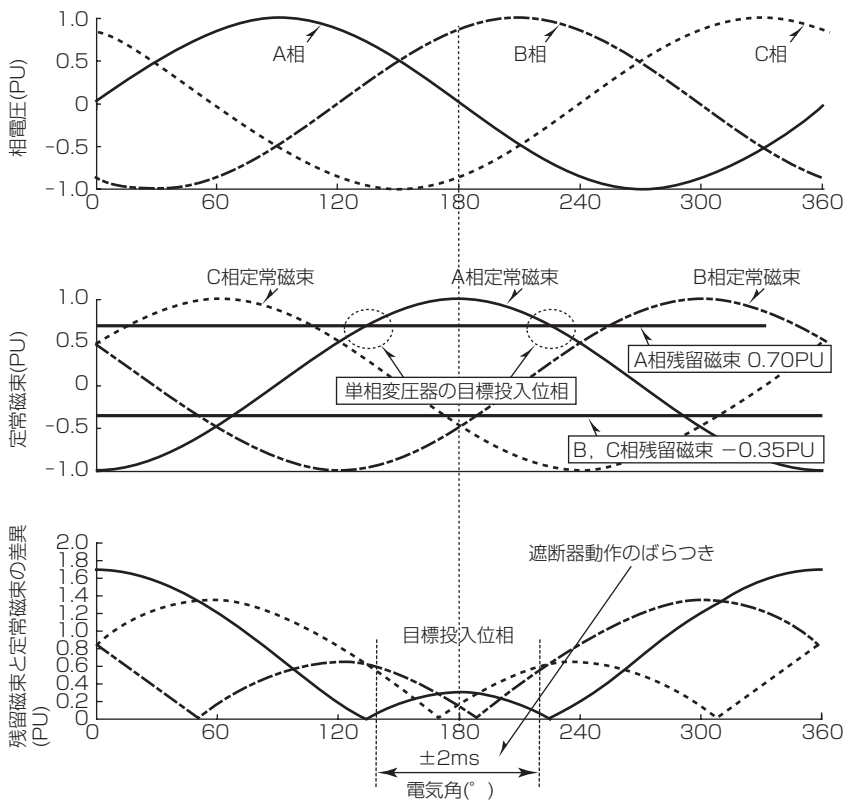


図 8. 三相一括操作時の目標位相

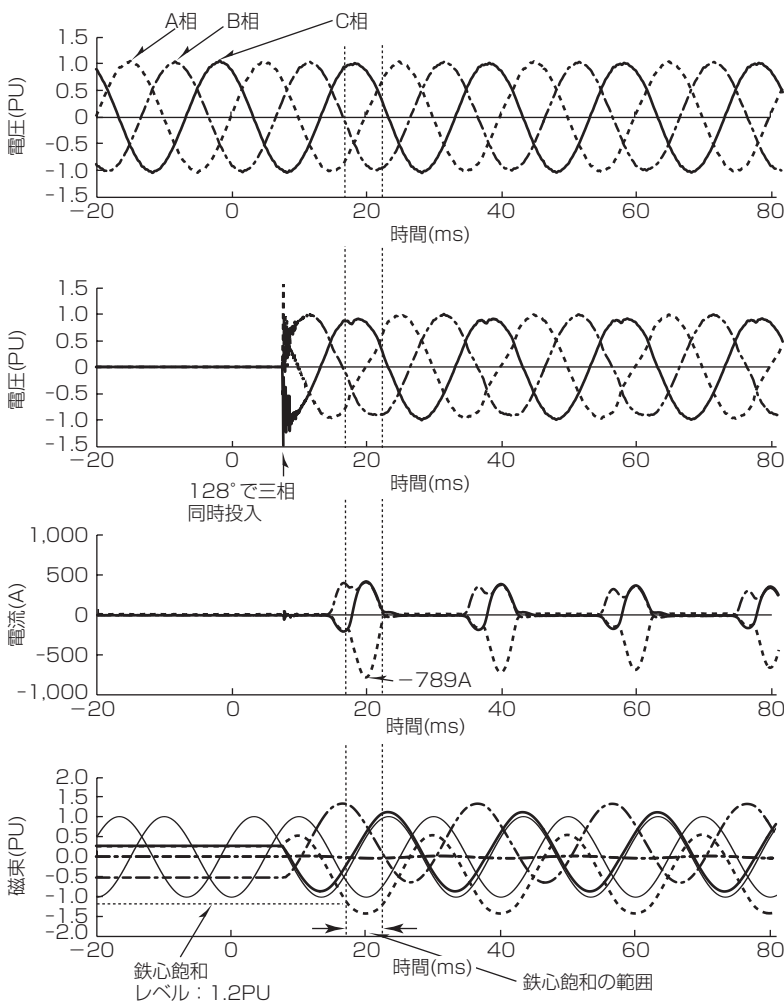


図 9. 三相一括操作形遮断器の位相制御投入結果

動率は0.32%に抑制されている。

2.3.2 三相一括操作形遮断器への適用

通常開閉極位相制御は、各相の電圧位相に対して制御を行うため各相操作形遮断器に適用されるものであるが、変圧器位相制御では三相一括操作形遮断器に適用しても励磁突入電流を十分抑制することが可能である⁽⁵⁾。

三相一括操作時の目標位相 φ_{Opt} は、式(1)で述べられる各相の変圧器鉄心内の残留磁束 Φ_{iRes} と電源電圧から推測される定格磁束 Φ_{iPro} との磁束差の絶対値の総和 F_{ABC} が最小となる位相である。

$$F_{ABC} = \sum_{i=Phase A, B, C} abs(\Phi_{iRes}(\varphi_{Opt}) - \Phi_{iPro}(\varphi_{Opt})) \dots \dots \dots (1)$$

図8に三相一括操作時の目標位相を鉄心磁束と F_{ABC} と併せて示す。 F_{ABC} が極小となる160~246°が目標投入位相である。

これらの目標投入位相に基づいて、実際の変圧器で位相制御投入を行った際の電流・電圧・鉄心磁束の実測波形を図9に示す。各相の残留磁束がそれぞれ+0.26PU, -0.53PU, +0.27PUの条件での目標位相128°で三相同時投入し、鉄心磁束が飽和領域に入っているもののインラッシュ電流789Aに抑制されている。また、この位相制御投入を複数回実施して得られた励磁突入電流と鉄心磁束の実測結果を位相制御なしの場合と比較したものを図10に示す。位相制御適用による励磁突入電流は最大で約1,000Aであり、位相制御なしでの励磁突入電流(最大約4,000A)に対して約1/4と、各相操作形ほどではないものの十分な抑制効果が得られていることが確認できる。

2.4 無負荷送電線用途への適用

遮断器両端の電圧波形から未来の極間電圧波形を予測することで、リアクトル補償された送電線の高速再閉路責務を伴う遮断器へも投入サージ抑制目的として適用することができる。図11に送電線位相制御の計測・制御の構成を示す。

リアクトル補償された無負荷送電線を開路した場合、送電線電圧は複数の周波数成分が重畳された振動波形となるため、遮断器開路から再閉路までの限られた時

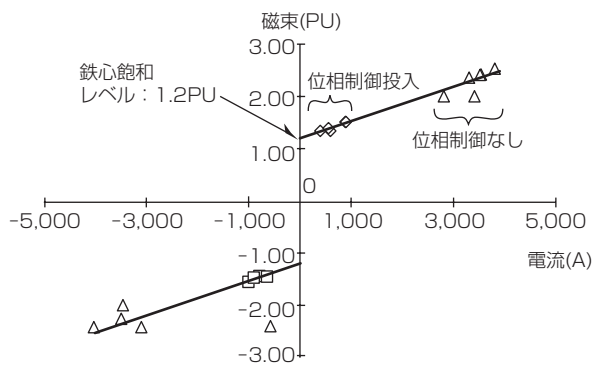


図10. 励磁突入電流と鉄心磁束の関係(実測結果)

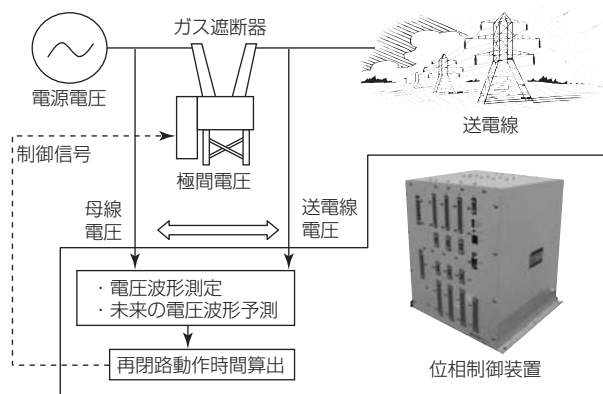


図11. 送電線位相制御システム

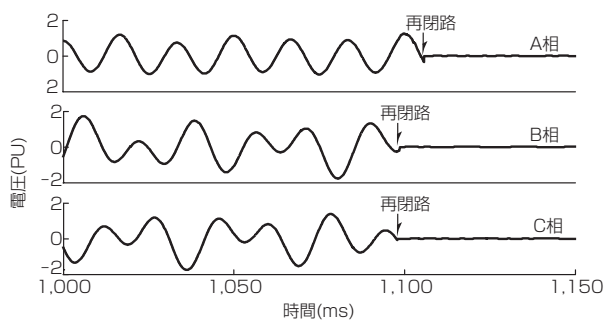


図12. 送電線位相制御投入の解析波形例

間で測定された極間送電線電圧波形を特異値分解の一手法であるMatrix Pencil法を用いて分析し、未来の極間電圧を推定することによって、極間電圧が小さくなる時刻を予測して位相制御投入している⁶⁾。

モデル送電線で、一線地絡事故が発生した場合の高速再閉路の系統解析結果の一例を図12に示す。目標点である極間電圧の零点付近で投入されている。閉極時間ばらつきをランダムに発生させた各100回の反復試行を行い、投入過電圧の累積度数分布を得た結果を図13に示す。確率

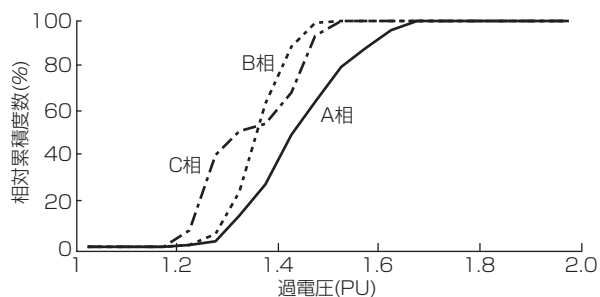


図13. 投入過電圧の累積度分布

98%での過電圧値は、健全相であるB相及びC相でそれぞれ1.48PU、1.53PU、事故相であるA相は1.68PUであり、500kV系統の標準的な開閉サージ耐電圧値である約2.3PUに対して十分低い。

3. む す び

GCBの開閉動作時に発生する過電圧・過電流を抑制することを目的に開閉極位相制御適用した調相設備用、変圧器用、及び送電線用GCBの運用実績について述べた。今後も位相制御技術の適用によって系統安定化、機器寿命の延伸化に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 香山治彦, ほか: ガス遮断器の開閉極位相制御による開閉サージの抑制, 電気学会論文誌B, **124**, No.2, 267~273 (2004)
- (2) CIGRE WG A3.07: Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers - Guide for Application, Part1: Electra, No.183, Part2: Electra, No.185, (1999)
- (3) 森 智仁, ほか: ガス遮断器の位相制御開閉による接点損耗の低減, H20年電気学会電力・エネルギー部門大会, 317 (2008)
- (4) 鳶田広幸, ほか: 残留磁束を考慮した変圧器位相制御投入に関する基礎検討, 電気学会論文誌B, **123**, No.6, 765~771 (2003)
- (5) 鳶田広幸, ほか: 三相一括操作形遮断器を用いた変圧器位相制御投入における最適閉極位相, H21年電気学会全国大会, 6-201 (2009)
- (6) 小林翔一, ほか: 送電線電圧を考慮した各相操作形ガス遮断器による位相制御投入, H27年電気学会電力・エネルギー部門大会, 6-281 (2015)