

デジタル制御技術とネットワーク技術を適用した遮断器用同期開閉制御装置

Controlled Switching System for Circuit Breakers Using Digital Control and Network Computing Technologies

齋藤 実 前原 宏之 小坂田 昌幸

■ SAITO Minoru

■ MAEHARA Hiroyuki

■ KOSAKADA Masayuki

近年、電力品質への社会的ニーズや電力流通設備の有効運用に対する要求の高まりを背景に、遮断器の同期開閉制御技術が適用拡大しつつある。

東芝は、275 kV 系統用にわが国初の同期開閉制御装置を1989年に納入して以来の豊富な実績と経験を基に、最新のデジタル制御技術とネットワーク コンピューティング技術を新たに適用した新世代の同期開閉制御装置を開発し、適用を開始した。新世代の制御装置では、開閉制御の高精度化と信頼性の向上、及び操作性と保守性の向上を両立させた。ガス遮断器と組み合わせた検証試験を実施し、遮断制御及び投入制御ともに良好な結果を得た。

Toshiba delivered Japan's first controlled switching system for 275 kV systems in 1989. Since then, we have acquired abundant experience in switching control technologies. We have now developed a new switching controller for the new generation of systems, using the latest digital control and network computing technologies. This controller attains both high accuracy and high reliability in controlled switching, while also offering instant operation and easy maintenance with its user-friendly web browser interface.

The results of both synchronized opening and closing control tests confirmed the good performance of this switching controller.

1 まえがき

近年、電力流通設備の経済性や系統運用における電力品質確保に対する社会的ニーズが高まるなか、遮断器を商用周波数の1サイクル中の適切な位相タイミングで投入、又は開放する同期開閉制御技術は、遮断器開閉動作時に発生する過電圧や過電流による電力流通設備の絶縁や寿命、系統の安定運用に対する悪影響を低減する技術として適用が拡大しつつある。

この同期開閉制御の成否の鍵を握っているのは、遮断器の特性そのものと、遮断器を制御する同期開閉制御装置の性能である。約20年前に開発した東芝の第1世代の制御装置では、0.1 ms 単位の高精度な時刻制御を、主としてアナログ制御技術により実現した。

今般当社では、最新のデジタル制御技術とネットワーク技術を適用した第2世代の同期開閉制御装置を開発し、適用を開始した。ここでは、当社の同期開閉制御技術と新しい制御装置の適用技術、検証試験結果について述べる。

2 東芝の同期開閉制御技術

国際大電力システム会議 (CIGRE) の調査によれば、同期開閉制御技術は1980年代後半から適用され始め、電力自由化が進んだ欧米を中心に開閉サージを抑制できる経済的な手段として普及が広がった。海外では、コンデンサバンクの投入時に発生するインラッシュ電流を抑制する手段として最初に着

目され、主に、特別高圧系統のコンデンサバンク投入に多く用いられてきている。わが国では、コンデンサ回路にはインラッシュ電流抑制用のリアクトルが一般的に使用されているため、この用途での同期開閉制御は広まっていない。

一方、やはり1980年代に、大容量分路リアクトル回路遮断時の再発弧サージ現象が、克服すべき課題として世界的に注目された。この対策として同期開閉制御技術が着目を浴び、わが国でも有効な対応策として適用されている。図1は、275 kV 大容量分路リアクトルの同期遮断用として実用化した、わが国最初の同期開閉制御装置である¹⁾。当社の同期開閉制御装置は、1989年に初号器を納入して以来、数年前まで国

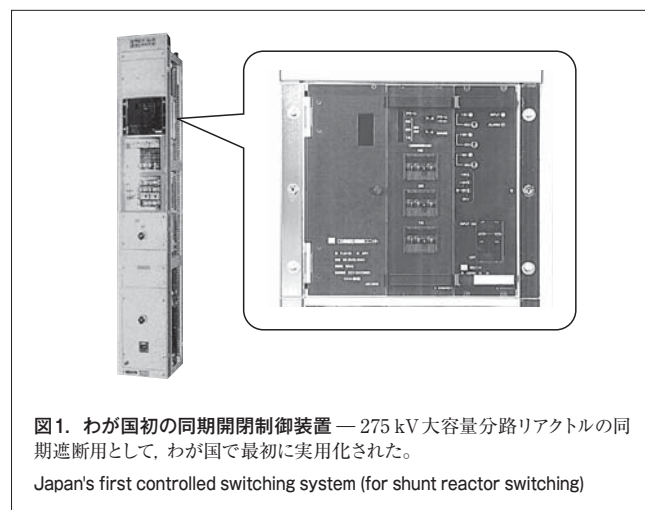


図1. わが国初の同期開閉制御装置 — 275 kV 大容量分路リアクトルの同期遮断用として、わが国で最初に実用化された。

Japan's first controlled switching system (for shunt reactor switching)

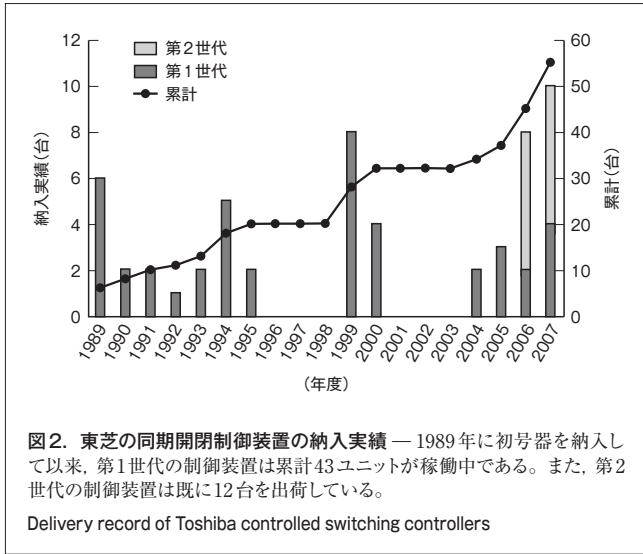


図2. 東芝の同期開閉制御装置の納入実績 — 1989年に初号器を納入して以来、第1世代の制御装置は累計43ユニットが稼働中である。また、第2世代の制御装置は既に12台を出荷している。

Delivery record of Toshiba controlled switching controllers

内の電力系統において独占的に供給してきた。同期開閉制御は、開閉位相タイミングの制御精度に対する要求レベルが厳しく、当時は全デジタル制御による実現が困難であった。このため、制御回路の主要部分にはアナログ制御回路を適用した。当社の同期開閉制御装置の納入実績を図2に示す。

1990年代後半から再び世界的に同期開閉制御技術が注目を浴びるようになり、CIGREなどでの調査や検討活動が活発に行われた。同時に適用用途についてもリアクトル遮断やコンデンサバンク開閉にとどまらず、架空送電線の投入や無負荷変圧器の投入など、より広い用途に対して適用されるようになってきた。

こうした適用用途の拡大や市場の広がり、また、第1世代の制御装置の開発と適用から15年以上が経過し、その間にデジタル制御技術が格段に進歩したことを背景に、今般新たな同期開閉制御装置を開発した。第2世代の制御装置には、最新のデジタル制御技術と近年広がりを見せるネットワークコンピューティング技術を適用して、同期開閉制御の高精度化と信頼性の向上、及び操作性と保守性の向上を両立させた。

3 第2世代の同期開閉制御装置

第2世代の同期開閉制御装置は、マイクロプロセッサによる優れたリアルタイム演算処理性能を活用して、遮断器の開閉動作時間に影響を与える要素(周囲温度、操作油圧、制御電圧、休止時間)に基づく遅延時間制御機能を実装し、高精度なデジタル同期開閉制御を実現している。また、ユーザーインタフェースには遠隔操作にも対応可能なWeb画面を採用し、操作性と保守性の向上を実現している。

3.1 制御機能

第2世代の同期開閉制御装置の適用対象と期待される効果を表1に示す。従来のリアクトル遮断用途に加えて、架空送電

表1. 同期開閉制御装置の適用対象と効果

Applications of Toshiba controlled switching systems

適用対象	制御動作	効果
架空送電線	投入	投入サージ電圧の抑制
分路リアクトル	遮断	再発弧過電圧サージの防止
	投入	励磁突入電流の抑制
コンデンサバンク	遮断	再点弧の防止
	投入	突入電流の抑制
無負荷変圧器	投入	励磁突入電流の抑制、電圧変動の抑制

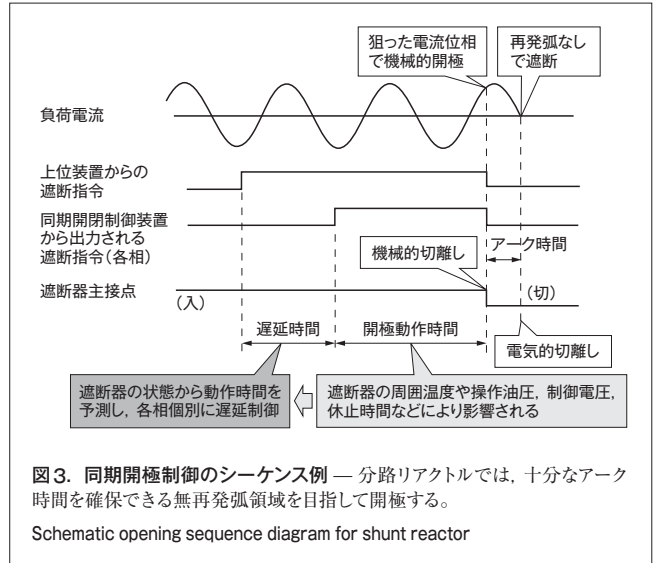


図3. 同期開極制御のシーケンス例 — 分路リアクトルでは、十分なアーク時間を確保できる無再発弧領域を目指して開極する。

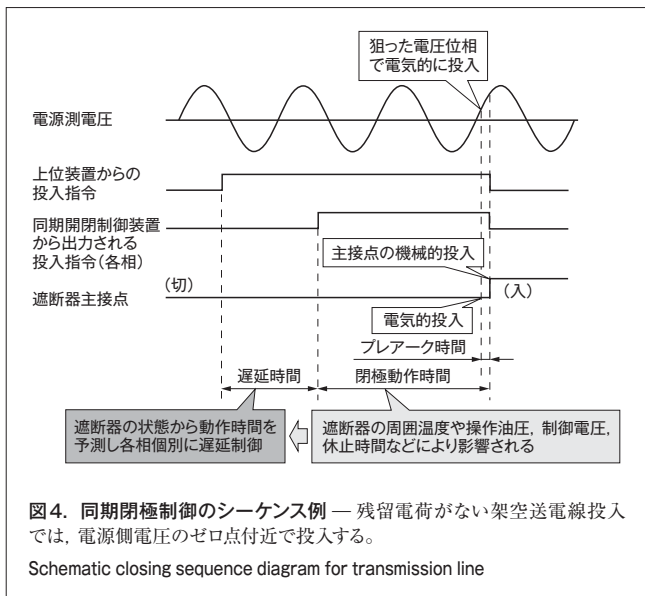
Schematic opening sequence diagram for shunt reactor

線投入、コンデンサバンク開閉、無負荷変圧器投入へも対応できるようにしている。

図3は分路リアクトル遮断における同期開極制御のタイミングシーケンスの例である。電流ゼロ点における遮断器接点の極間距離に応じた極間絶縁耐力が、高周波振動する過渡回復電圧を上回り再発弧が生じない開極時間域が、リアクトル遮断における無再発弧領域である。この時間域が目標とする開極位相となる。

遮断器の遮断指令信号は、上位装置から任意のタイミングで出力される。同期開閉制御装置は遮断器の開極動作時間を予測し、遮断器が負荷電流に対する目標開極位相で機械的に切り離されるように、遮断指令信号を各相個別に遅延制御する。

遮断器の開閉動作時間は、遮断器の周囲温度、操作油圧、制御電圧、休止時間などの動作条件により変化する。高い時刻精度と動作安定性が要求される同期開閉制御では、これらの条件に基づく開閉動作時間の変動量の補正機能が重要となる。従来の同期開閉制御装置では、制御電圧の変動に対する補正だけを実施していたが、第2世代の同期開閉制御装置では高い演算能力を生かして、CIGREで推奨されている⁽²⁾これらすべての変動量に対する補正、すなわち周囲温度、操作油圧、制御電圧、休止時間に対応した開閉動作時間を予測し、



この予測時間に対応した遅延時間をリアルタイムで演算して、高精度な同期開閉制御を実現している。

図4は架空送電線投入における同期閉極制御のタイミングシーケンスの例である。送電線切離し後、残留電荷がない場合は、電源側電圧のゼロ点付近が目標投入位相となる。遮断制御と同様に、同期開閉制御装置はリアルタイムで遮断器の閉極動作時間を予測する。目標投入位相に応じたプレアーク時間（電氣的に投入されてから遮断器接点が機械的に接触するまでの時間）を考慮しながら、遮断器が電源側電圧に対する目標投入位相で電氣的に投入されるように、遮断器の投入指令信号を各相個別に遅延制御する。

3.2 ハードウェア

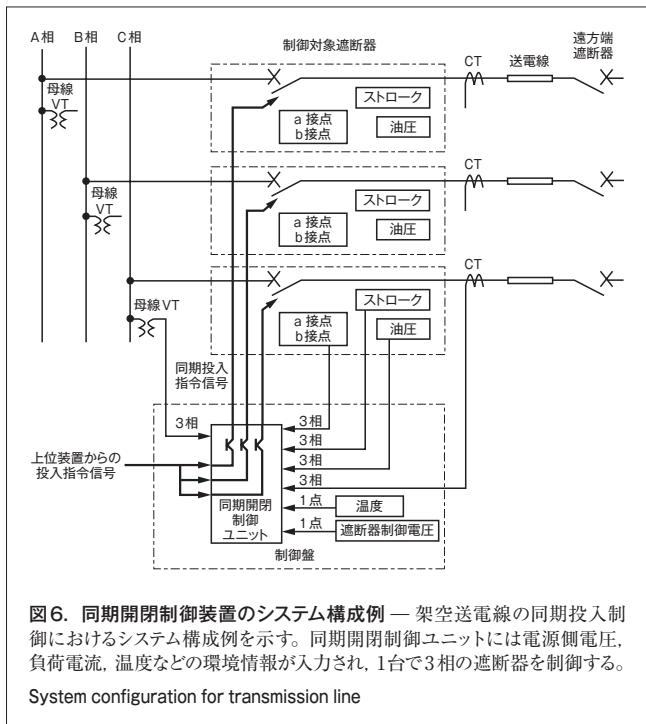
第2世代の同期開閉制御ユニットの外観を図5に、主な仕様を表2にそれぞれ示す。また、同期開閉制御装置のシステム構成例として、架空送電線の同期投入制御におけるシステム構成を図6に示す。以下に、制御ユニットのハードウェアの詳細について述べる。



表2. 第2世代の同期開閉制御ユニットの主な仕様
Specifications of second-generation switching controller

項目	仕様
準拠規格	電力用規格 B-402, IEC 60255, JEC-2350-2005 (JEC-0103-2005)
系統周波数	50 Hz 又は 60 Hz
外形寸法	275 (幅)×266 (高さ)×267 (奥行き) mm
制御電源電圧	DC 110/125 V 又は DC 220 V
動作温度範囲	-20~+60 °C (95 %RH以下)
インタフェース	イーサネットポート, LCD

DC : 直流



3.2.1 外観 同期開閉制御ユニットの外形寸法は、275 (幅) × 266 (高さ) × 267 (奥行き) mmである。パネル前面には、小型LCD (液晶ディスプレイ)、各種表示LED (発光ダイオード)、操作キー、イーサネットポート、電源スイッチを備えている。入出力信号用の電線類は、裏面の端子台に接続される。

3.2.2 設置環境 同期開閉制御ユニットは、JEC-2350-2005 (電気規格調査会規格2350-2005) 及びJEC-0103-2005 に準拠した耐電圧性能、電力用規格B-402とIEC 60255 (国際電気標準会議規格60255) に準拠した電磁的な耐サージ性能、及び-20~+60 °Cの温度変化などに対する耐環境性能を確保しており、屋外の制御盤に設置できる。

3.2.3 入出力信号 1台の同期開閉制御ユニットで、1台の遮断器の開極制御と閉極制御ができる。したがって、制御ユニットには、遮断指令信号と投入指令信号がそれぞれ3相入出力される。また、遅延制御で参照する電源側電圧 (計器用変圧器 (VT) 信号) と負荷電流 (変流器 (CT) 信号)、及

び開閉動作時間の補正量を算出するために参照する周囲温度（温度センサ）や、操作油圧（油圧センサ）、制御電圧などのアナログ量が入力される。更に、遮断器動作時間を計測するために、遮断器のストローク信号（ストロークセンサ）も入力可能である。これらのセンサ類は遮断器操作機構部又は制御盤に設置される。

3.2.4 演算部 演算部には64ビットRISC (Reduced Instruction Set Computer) CPUチップを採用し、高速サンプリングしたアナログ入力量を参照して、遮断器の予測開閉動作時間と遅延時間をリアルタイムで演算処理する。

3.2.5 指令信号出力部 同期遮断指令信号と同期投入指令信号の出力部は、二重化した高耐压及び高速動作のFET (Field Effect Transistor) をFPGA (Field Programmable Gate Array) のハードウェアカウンタでデジタル制御し、高精度と高信頼性を両立している。

3.2.6 常時監視機能 同期開閉制御ユニットには、デジタル形系統保護リレーと同等の常時監視機能を実装した。加えて、FETの故障監視機能、適用するセンサの故障検出機能、同期開閉制御の成否判定機能、再発弧検出機能などを実装し、信頼性の向上を図っている。また、故障検出時には、正面パネルの故障警報LEDを点灯するとともに、故障警報接点を出力する。

3.2.7 液晶画面表示 パネル前面の小型LCDには、同期開閉制御による最新の遮断器動作履歴情報や故障情報などの表示が可能であり、保守員の現場作業の利便性を図っている。

3.3 Web画面ユーザーインターフェース

第2世代の同期開閉制御ユニットはWebサーバ機能を実装しており、Web画面を使用したユーザーインターフェースを提供している。制御ユニットにパソコン (PC) をLAN接続することで、ユーザーはPCのWeb画面上から以下の機能を実行できる。

- (1) 遮断器動作履歴の表示 同期開閉制御による遮断器動作履歴情報を表示できる。動作履歴情報として、遮断器動作時刻、遮断器の予測動作時間、計測動作時間、周囲温度、操作油圧、制御電圧などを表示できる。また、これらのデータをPCに保存することができる。遮断器動作履歴情報の表示画面例を図7に示す。
- (2) 遮断器動作波形の表示 同期開閉制御による遮断器動作時の電源側電圧、負荷電流、ストロークなどの波形を表示できる。また、これらの動作波形データをPCに保存することができる。遮断器動作波形情報の表示画面例を図8に示す。
- (3) 故障履歴の表示 常時監視機能による故障検出結果を表示できる。また、これらの故障検出結果をPCに保存することができる。
- (4) 設定値の表示 同期開閉制御ユニットの設定値を

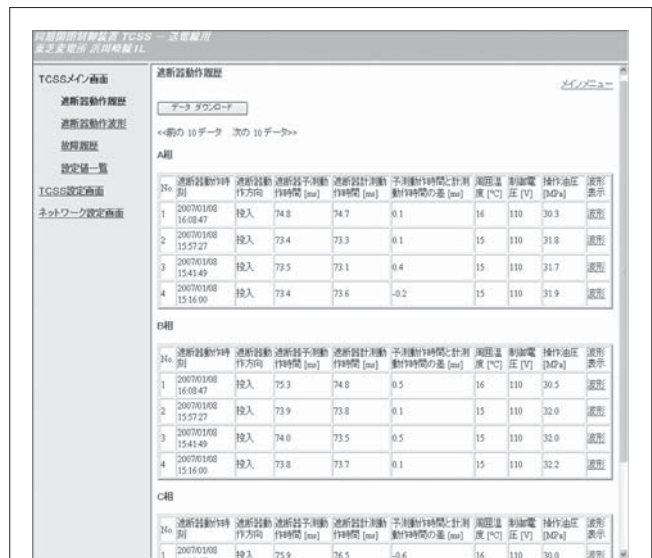


図7. 遮断器動作履歴情報のWeb画面例 — 遮断器動作時刻、遮断器の予測動作時間、計測動作時間、周囲温度、操作油圧、制御電圧などを市販のブラウザ画面に表示できる。

Example of screen display showing circuit breaker operation records

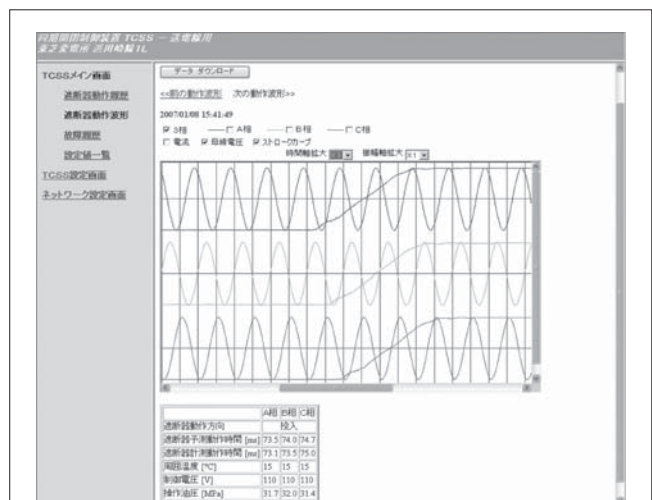


図8. 遮断器動作波形情報のWeb画面例 — 電源側電圧波形、負荷電流波形、遮断器のストローク波形などを市販のブラウザ画面に表示できる。

Example of screen display showing circuit breaker operation waveforms

表示し、また、設定値をPCに保存することができる。

- (5) 設定機能 同期開閉制御ユニットの各種整定値の設定及びネットワークの設定をWeb画面から実行できる。

4 検証試験結果

第2世代の同期開閉制御ユニットの単体試験及びガス遮断器との組合せ試験を行った。以下に試験結果を述べる。

4.1 同期開閉制御ユニット単体試験

同期開閉制御ユニット単体の性能を確認するために、遮断

器模擬回路を用いて試験を実施した。模擬遮断器の遮断器動作時間のばらつきは $\pm 1 \mu\text{s}$ 以下であり、制御ユニット単体の性能検証を実施するうえで十分な精度であることをあらかじめ確認した。目標開閉極位相角を電気角 $0 \sim 330^\circ$ の範囲で 30° ごとに設定し、ランダムなタイミングで開閉指令信号を制御ユニットに入力して、各目標開閉極位相角に対する模擬遮断器の制御誤差を検証した。同期開極制御、同期閉極制御ともに $\pm 10 \mu\text{s}$ 以下の誤差で制御可能なことを確認できた。

更に、ゼロ点検出の基準となる電圧信号、又は電流信号の周波数(50 Hz又は60 Hz)を $\pm 5\%$ 変化させた場合においても、同期開極制御、同期閉極制御ともに $\pm 20 \mu\text{s}$ 以下の誤差で制御可能なことを確認できた。

また、同期開閉制御ユニットが遮断器の周囲温度、操作油圧、制御電圧、休止時間、遮断器の開閉動作時間などを所定の精度で計測できることを確認した。

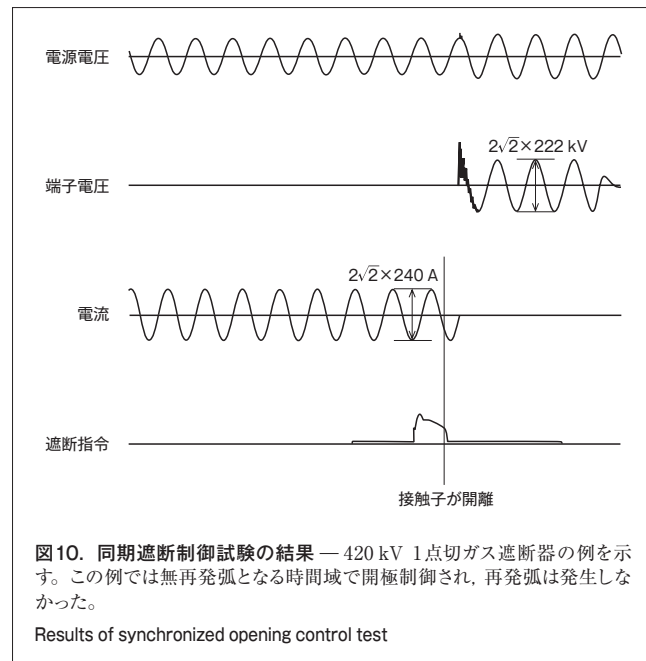
4.2 遮断器と同期開閉制御ユニットの組合せ試験

代表的な遮断器として油圧操作の420 kV 1点切ガス遮断器を用い、遮断器と同期開閉制御ユニットの組合せによる同期開閉制御試験を実施した。試験の実施状況を図9に示す。



4.2.1 同期遮断制御試験 分路リアクトル遮断を想定した同期遮断制御試験を $400/\sqrt{3}$ kV単相直接試験によって実施した。

電流ゼロ点までの目標アーク時間に対応する目標開極位相を設定して、遮断試験を実施した。遮断試験結果の一例を図10に示す。遮断器の開極動作時間のばらつきを考慮して

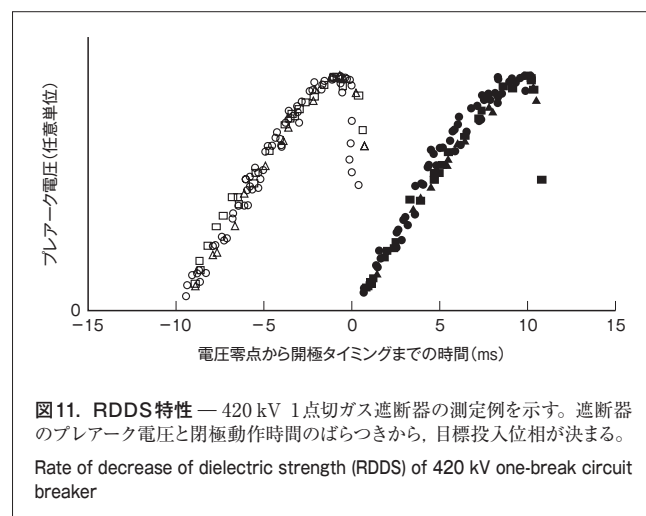


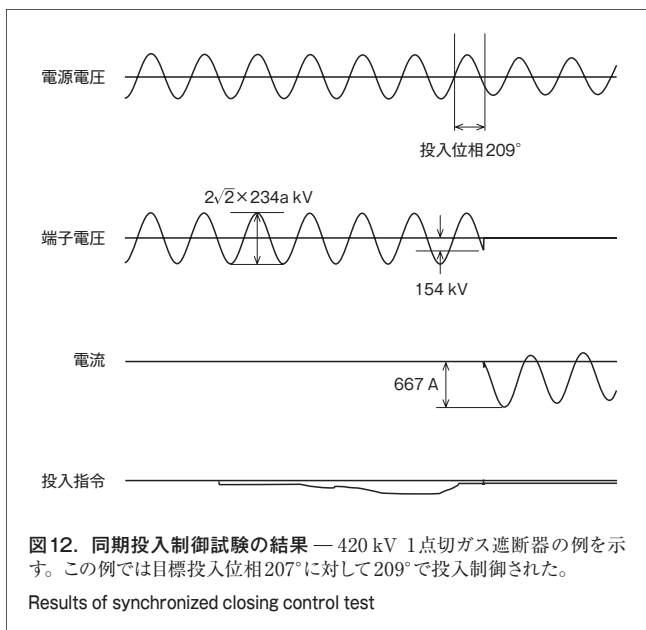
も、各遮断試験における開極位相のばらつきは十分に小さく、再発弧が発生しないことを確認した。

定格制御電圧110 Vに対して100~120 Vの範囲で変化させ、また、定格油圧31.5 MPaに対して30~34 MPaの範囲で変化させて、同様に同期遮断制御試験を実施した。この場合も、開極位相のばらつきは十分に小さく、再発弧が発生しないことを確認した。

4.2.2 同期投入制御試験 送電線投入を想定した同期投入制御試験を $400/\sqrt{3}$ kV単相直接試験によって実施した。

事前の測定で得られた420 kV 1点切ガス遮断器の極間絶縁耐力減少率(RDDS)の測定結果を図11に示す⁽³⁾。RDDSと遮断器の閉極動作時間のばらつきから、目標投入位相を 207° として投入試験を実施した。約60回の同期投入制御試験の結果、目標投入位相に対する投入位相のばらつきは、遮





断器本体側の変動ばらつきと合わせて±1 ms以下の範囲であり、十分に安定した位相で投入制御できることを確認した。投入試験結果の一例を図12に示す。この例では、投入位相は209°であった。

定格制御電圧110 Vに対して100～120 Vの範囲で変化させ、また、定格油圧31.5 MPaに対して30～34 MPaの範囲で変化させて、同様に同期投入制御試験を実施した。この場合も、投入位相ばらつきは±1 ms以下であり、十分に安定した位相で投入制御できることを確認した。



5 適用

第2世代の同期開閉制御装置の初号器は、アラブ首長国連邦アブダビ向けに出荷済みであり、420 kVガス遮断器の架空送電線投入制御用として適用される予定である。GIS(ガス絶縁開閉装置)制御盤に設置した同期開閉制御ユニットを図13に示す。

6 あとがき

これまでの豊富な実績と経験を基に、最新のデジタル制御技術とネットワーク コンピューティング技術を適用した新しい同期開閉制御装置を開発した。油圧操作の実際のガス遮断器と組み合わせた検証試験を実施し、遮断制御、投入制御ともに良好な結果を得た。第2世代の同期開閉制御装置は、既に12台を出荷している。

同期開閉制御技術は、遮断器及び周辺の電力設備のストレス低減による寿命延長や、投入抵抗の省略などの経済的な利点に加えて、電力品質の確保、運用自由度の拡大などの利点をもたらす装置として、今後ますます普及が進むと考えられる。ここで述べた同期開閉制御装置も、電力系統設備の有効運用に大きく寄与できるものとする。

文 献

- (1) 熊谷 努, ほか. "分路リアクトル用遮断器開極位相制御装置の開発". 平成2年電気学会全国大会講演論文集, 講演番号1296. 東京, 1990-03, 電気学会.
- (2) CIGRE WG13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers; Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers. Part 1: ELECTRA No.183, 1999, p.43-73; Part 2 ELECTRA No.185, 1999, p.37-57.
- (3) Hamada, H., et al. "RDDS (Rate of Decrease of Dielectric Strength) Measurement for Gas Circuit Breaker". IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. Yokohama, 2002-10, IEEE/PES. Vol. 3, p.1755-1759.



齋藤 実 SAITO Minoru

電力システム社 浜川崎工場 開閉装置部主務。
高電圧開閉装置の監視・制御システムの開発・設計に従事。
電気学会会員。
Hamakawasaki Operations



前原 宏之 MAEHARA Hiroyuki

電力システム社 府中事業所 電力システム制御部主務。
ネットワーク応用機器の開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex



小坂田 昌幸 KOSAKADA Masayuki

電力システム社 電力流通事業部 電力変電技術部参事。
高電圧開閉装置, 変圧器, 避雷器, 変電所システムなどの開発・エンジニアリング業務に従事。IEEE, 電気学会会員。
Transmission & Distribution Systems Div.