ガス遮断器の開極位相制御によるシャントリアクトル電流遮断に伴う再発弧過電圧の抑制

正員 山形 芳文 (東京電力) 正員 戸田 弘明 (東 芝)
 正員 熊谷 努 (東京電力) 正員 石川 雅之 (東 芝)
 正員 西脇 進 (東 芝) 正員 横田 岳志 (東 芝)

Prevention of Reignition Overvoltages by Phase-Angle-Controlled Switching of Gas-Circuit Breaker at Shunt Reactor Current Interruption

Yoshifumi Yamagata, Member, Tsutomu Kumagai, Member (Tokyo Electric Power Company)
 Susumu Nishiwaki, Member, Hiroaki Toda, Member, Masayuki Ishikawa, Member, Takeshi Yokota, Member (Toshiba Corporation)

Shunt reactors installed at GIS-substations are switched relatively frequently by large capacity gas circuit breakers (GCB's). Surge voltages appear at such switching operations through various mechanisms. Among them, high frequency current interruption and subsequent multiple reignition might cause highest overvoltage and may be harmful to the insulation of the components of the substation.

In this paper, shunt reactor current interrupting tests are conducted in high power laboratory. Existence of critical arcing time above which reignitions never occur is shown through these tests. From this fact, phase-angle-controlled-interruption system is proposed. With this system, arcing time is artificially set so that reignitions should be prevented. Reliability of this system is confirmed through reactor current interrupting test in the laboratory as well. After that, phase-angle-controlled-interruption system is applied to the shunt reactor switching at actual 275 kV substation. Switching performance of this system is measured over three months. Reignition-free interruption is shown to be attained with this system.

キーワード：遅れ小電流遮断，ガス遮断器，シャントリアクトル，再発弧，高周波消弧，開極位相制御

1. ま え が き

都市の過密化に伴い 275 kV 地下ケーブルが都心部へ導入されている。このケーブルの充電電流を補償して系統電圧を安定させる目的で，シャントリアクトルがガス絶縁開閉装置 (GIS) を用いた地下変電所にしばしば併設される。これらのシャントリアクトルは，ガス遮断器 (GCB) によって比較的多頻度で開閉されることが多い。GCB によりシャントリアクトルが遮断すると多様なサージ電圧が発生する⁽¹⁾。近年，GCB の遮断容量は向上の一途をたどっている。この結果，遮断点数が減少して 1 遮断あたりの電圧が上昇

した。このため，リアクトル遮断におけるサージ発生現象が改めて注目を集めるようになった。シャントリアクトル遮断に際して再発弧が起こった際に発生するサージ電圧は，系統条件によっては電力ケーブルやシャントリアクトルなど周辺機器の絶縁を脅かすと共に繰返し印加による絶縁の劣化を生じる可能性がある。また，再発弧による放電エネルギーで遮断器の遮断部が損耗を生じる可能性がある。特に再発弧に伴って流れる高周波電流の遮断と再発弧が繰返し起こる多重再発弧^{(2),(3)}は，前記周辺機器の絶縁劣化を増長するといわれている。

こうした諸現象に対する保護措置としては，再発弧

の発生自体を抑制することが最も効果的である。本論文において著者らは、GCBによるシャントリアクトル遮断に伴う再発弧発生の様相を研究した。この結果に基づき、GCBの開極位相を制御して再発弧の発生しないアーク時間を人為的に設定する開極位相制御方式をリアクトル遮断に適用した。本方式の効果は、短絡試験設備を用いたリアクトル遮断試験および実運用状態の下でのフィールド測定により検証された。

2. リアクトル遮断試験

〈2・1〉 試験方法 まずモデルGCBを用いたリアクトル遮断試験を行い、再発弧特性を調査した。試験は単相直接試験によって行った。試験回路を図1に示す。

試験条件を表1に示す。再発弧の発生は過渡回復電圧(TRV)周波数、すなわち電流遮断後のリアクトル側の振動周波数によって影響を受ける。周波数が高いほど遮断後の遮断器極間に現れる電圧上昇率が高くなるので再発弧が発生しやすい。試験においては、TRV周波数は図1中C₁の値を変えることによって3.00 kHzおよび1.72 kHzの二とおりで行った。大半の実際の変電所において、周波数はこれらの値と同等あるいは低くなるものと思われる。遮断電流値としては国内の275 kV GIS変電所において最も一般的に設置されている150 MVA シャントリアクトルに相

図1 リアクトル電流遮断試験回路
Fig.1. Test circuit for reactor current interrupting test.

表1 リアクトル電流遮断試験条件
Table 1. Test conditions for reactor current interrupting test.

条件 No.	GCB 条件		回 路 条 件			
	操作圧力	ガス圧力	供与 電圧	遮断 電流	TRV 周波数	TRV 振幅率
1	定格圧力	定格圧力	1.0 E	315 A	3.00 kHz	1.85
2		150 MVA シャントリアクトル相当			1.72 kHz	
3		警報圧力			3.00 kHz	

周波数: 1) $1.0 E = 275 \text{ kV} / \sqrt{3} = 159 \text{ kV}$
50 Hz 2) 150 MVA シャントリアクトル相当
遮断電流 $= (150 \text{ MVA} / \sqrt{3}) / (275 \text{ kV} / \sqrt{3}) = 315 \text{ A}$

当する315 Aとした。また、現地での操作条件を考慮し、操作圧力は定格状態、遮断器ガス圧力は定格圧力および警報圧力にて行った。

〈2・2〉 試験結果 図2には試験にて得られたオシログラムの一例を示す。同図は警報ガス圧力、TRV周波数3.00 kHzの場合の例であり、(a)図は開極後最初の電流零点までのアーク時間が5.0 msの場合であり、再発弧が発生している。一方、(b)図は最初の電流零点までのアーク時間5.3 msの場合であり、再発弧は発生していない。

リアクトル電流のような小電流遮断の場合には、開極後最初のアーク電流零点でいったん電流が遮断されてしまう。しかし、この電流零点までのアーク時間が短いと遮断器の電極間距離が小さく、電極間の絶縁耐力が十分に回復しておらず再発弧が起こりやすい。一方、このアーク時間が長いと電極間距離が十分に開離しているため再発弧は起こりにくい。そこで、開極後最初の電流零点までのアーク時間が変化した場合の再発弧が発生する確率の変化を調査した。この結果を図3に示す。アーク時間が短い範囲では常に再発弧が発生しているが、4~6 msの範囲で再発弧発生確率は急速に減少している。そして、あるアーク時間を超すと再発弧は全く発生しなくなる。それぞれの試験条件にお

図2 リアクトル電流遮断試験結果の例
Fig.2. Typical oscillograms obtained at reactor current interrupting test.

図 3 GCB によるリアクトル電流遮断の際の再発弧発生確率の例

Fig. 3. Examples of re-ignition probabilities at reactor current interruption with GCB.

表 2 再発弧が発生しない最短アーク時間
Table 2. Examples of the minimum arcing time without re-ignition.

条 件 No.	アーク時間 (ms)
1	5.8
2	5.2
3	6.4

ける再発弧が発生しない最短アーク時間を表2に示す。同表に見られるとおり、このGCBにおいてはアーク時間 6.4 ms 以上では再発弧が発生しないことになる。

3. 開極位相制御による再発弧の抑制

〈3・1〉 開極位相制御方式の提案 図3および表2に示す結果から、このモデル遮断器においては開極位相を制御してアーク時間を 6.4 ms 以上とすれば、再発弧の発生を防げることがわかる。これを図4を用いて説明する。同図はこの方式の制御シーケンスの原理を示す。図3で示した再発弧の発生しない最短のアーク時間を図中 T_1 で示す。図中 A 点で示す電流零点で電流を遮断するとき B と C の間で開極すればアーク時間は T_1 を上回り再発弧が起らない。実際には制御リレーや機械部分の動作時間にばらつきが避けられない。ばらつきの幅を T_2 とすると、 T_2 が B と C の間に入るようにその中心値 D 点を目標開極点に設定すればよい。このような条件で動作するよう遮断器の開極時間 T_3 を考慮して E 点で遮断器に遮断指令を与える必要がある。一般に外部から人為的に操作される遮断指令（以下、外部指令と呼ぶ）が与えられる瞬間の電流波形の位相は全くランダムである。この外

図 4 開極位相制御の動作原理

Fig. 4. Operation principle of Phase-angle-controlled-interruption.

部指令が与えられた後、電流位相を確認して図4中 E 点に相当する位相で遮断指令（以下、内部指令と呼ぶ）を遮断器へ与える。このような原理に基づく遮断方式を開極位相制御方式と呼ぶ。

〈3・2〉 リアクトル遮断試験 上述の方法により再発弧の発生が防止できることを確認するため、開極位相制御を用いたリアクトル遮断試験を短絡試験設備を用いて行った。まず、実際の変電所においてシャントリアクトル遮断に適用する 300 kV GCB について図3同様に再発弧発生確率を求め、再発弧が発生しない最短のアーク時間を求めた。GCB のアーク時間がこの値以上となるように開極位相制御を行った。図5にシャントリアクトル遮断試験回路を示す。試験は単相直接試験にて実施した。位相制御装置には手動操作による外部指令が与えられる。位相制御装置は、短絡発電機と直結して運転され全く同期した出力を発生する小容量のパイロット発電機の出力電流をモニタし、図4 E 点に相当する瞬間に内部指令を遮断器に与える。この指令は位相制御装置内部のタイマにて電気角 120° ずつずらして各相へ与えられる。単相試験であるため、試験相は遮断第一相と想定し、他相については内部指令のみを確認した。パイロット発電機の出力は実際の系統では CT の出力信号に相当する。

表3には試験条件を示す。現地で起こり得る可能性を考慮し、操作圧力は定格状態、遮断器ガス圧力は警報圧力とした。給与電圧・遮断電流は表1に示す値と同じ 150 MVA 定格相当としたが、TRV 周波数は後述するフィールド試験を実施した実際の変電所における値に合せて 2.1 kHz とした。また、アーク時間は 10 ms に設定した。表1に示す再発弧が起らない最短アーク時間（6.4 ms）までの時間裕度を最大とする条件である。また、万一操作特性のばらつきないしは変化により開極時間が短くなり、アーク時間が長くなったとしても再発弧は電極間距離が短く、絶縁破壊

図 5 開極位相制御を用いたリアクトル電流遮断試験回路

Fig. 5. Test circuit for reactor current interrupting test with phase-angle control.

表 3 開極位相制御を用いた短絡試験場におけるシャントリアクトル電流遮断試験条件

Table 3. Test conditions for reactor current interrupting test with phase-angle control.

GCB 条件	操作 圧 力	定格圧力
	ガ ス 圧 力	警 報 圧 力
回路 条件	給 与 電 圧	1.0 E
	試 験 電 流	315 A
	TRV 周波数	2.1 kHz
試験回数	TRV 振幅率	1.85
		59 回

$$1.0 E = 275 \text{ kV} / \sqrt{3} = 159 \text{ kV}$$

電圧が低い範囲で起こるため機器にとって有害な高い再発弧サージ電圧は発生しない。すなわち、アーク時間 10 ms という条件はサージ過電圧抑制という目的に対しては安全率を最大に見込んだ条件といえる。

図 6 には代表的オシログラム例を示す。図中 E にて外部指令が開極位相制御装置へ与えられ、F にて内部指令が遮断器へ与えられる。この結果、G にて遮断器が開極し、10 ms 後の A にて再発弧なしに遮断に成功している。外部指令が与えられる電流位相を種々に変化させて 59 回の遮断試験を実施した結果を図 7 に示す。同図に示すとおりアーク時間のばらつきはほとんどなく、安定した遮断を行うことができた。

4. フィールド試験

以上により開極位相制御の信頼性が短絡試験により検証されたので、これを実際の変電所におけるシャントリアクトル遮断回路に適用し、運用状態の下でその効果を確認した。

〈4・1〉 試験および測定方法 試験は 275 kV GIS 変電所にて行った。変電所の系統構成を図 8 に示す。

図 6 開極位相制御を用いたリアクトル遮断試験のオシログラム例

Fig. 6. Typical oscillogram obtained at reactor current interrupting test with phase-angle control.

図 7 開極位相制御を用いたリアクトル電流遮断試験結果

Fig. 7. Results of reactor current interrupting test with phase-angle control.

この変電所では同図を一つのユニットとして 2 ユニット設置されている。シャントリアクトルは図中に示す操作遮断器にて開閉した。この変電所にて開極位相制御を適用しない場合および適用した場合の双方に測定を行い、その効果を確認した。

〈4・2〉 開極位相制御を適用しない場合 まず、開極位相制御を適用しない場合について測定した。測定は一方のユニット (No. 2 ユニット) について行った。この場合は図 8 中の操作遮断器のシャントリアクトル側端子電圧を測定した。電圧の測定は GIS の絶縁スペーサがもつ静電容量を分圧器として利用する方法⁽²⁾を用いた。信号はすべて光変換したうえで光ファイバケーブルにより伝搬させ、再度電気信号に変換して観測した。この方式を採用した結果、電磁誘導による雑音を最小限に抑えることができた。計 11 回の遮断

図 8 測定回路の単線結線図

Fig. 8. Single line diagram of substation under measurement.

図 9 シャントリアクトル電流遮断における GCB 負荷側端子電圧波形の例

Fig. 9. Example of reactor-side-terminal voltage waveforms at reactor current interruption.

動作を行い、それぞれにつき三相同時に測定を行った。

図 9 には測定の結果得られた遮断器シャントリアクトル側端子電圧波形の一例を示す。同図においては、赤相および白相にて再発弧が発生している。赤相においては 4 回の多重再発弧が発生し、図示してはいないが 1/2 サイクル後の電流零点にて電流が遮断されている。また白相では再発弧は単一のものであり、やはり 1/2 サイクル後に電流が遮断されている。

表 4 には測定結果の概要を示す。全 11 回の遮断動作中三相合計 16 回の再発弧が発生し、そのうち 3 回では多重再発弧となった。

なお、三相同時に遮断動作を行った場合少なくとも一相では再発弧が発生するが、三相すべてに再発弧が発生することはなかった。

〈4・3〉 開極位相制御を適用した場合 次に、同じ変電所にて開極位相制御を用いた場合のフィールド測定を No. 1 および No. 2 ユニット双方につき行った。この場合の測定は再発弧の有無を判定することのみを目的とし、遮断器電流を実際の運用状態の下で 3

表 4 275 kV GIS 変電所におけるシャントリアクトル遮断フィールド測定結果の概要
Table 4. Summary of field measurement of shunt reactor interruption at 275 kV GIS substation.

TRV 周波数		2.1 kHz
再発弧回数	黒相	4 回
	赤相	5 回
	白相	7 回
多重再発弧回数	黒相	1 回 (2 重再発弧)
	赤相	1 回 (4 重再発弧)
	白相	1 回 (3 重再発弧)

遮断回数：11 回

箇月にわたって観測した。測定は CT の二次側回路に更に測定用の CT を挿入して遮断器電流を観測し、再発弧の有無を確認した。測定用 CT の出力をペンレコーダで記録することにより、全測定期間を通じて無人測定を行うことができた。得られた電流波形の例を図 10 に示す。開極位相制御による内部遮断指令は黒相→赤相→白相の順に遮断器へ与えられる。〈4・2〉節で述べたとおり三相すべてに再発弧が発生することはないから、いずれかの相で再発弧が発生すればその相の電流遮断は 1/2 サイクル延びるため、遮断の相順が内部遮断指令を与えられる相順とは異なったものとなる。このことから再発弧の発生が判定できる。なお、再発弧後高周波電流遮断⁽²⁾によって電流が遮断された場合は、電流遮断点が 1/2 サイクル延びることはないので遮断相順に変化はない。しかし、再発弧に伴う高周波電流成分が遮断器電流波形に現れるために、再発弧の識別は可能である。以上により、図 10 に示す例では再発弧が発生していないことが判定できる。

全測定結果の概要を表 5 に示す。この変電所における 2 ユニット合計で 126 回の遮断を行っているが、再発弧の発生は皆無であった。この結果、開極位相制御は実フィールドにおいても安定した動作を継続して行い、再発弧自体の抑制に効果を発揮し得ることが実証された。

5. 再発弧の発生に関する検討

本章では、再発弧の発生を支配する要因について検討する。図 3 に示すとおり、再発弧発生確率はあるアーク時間を境界として急速に減少する。また図 11 には、前述のパuffa 形モデル遮断器によって開極位相制御を用いないで実施したリアクトル遮断試験の際の再発弧発生電圧を遮断器可動部ストローク長に対してプロットした結果を示す。同図に見られるとおり、再発弧発生電圧はストローク 0.6 pu 付近から急速に上昇している。各部の電界強度がこれらの特性のように

図 10 開極位相制御を用いたシャントリアクトル電流遮断の際の遮断器電流波形の例
Fig.10. Example of circuit breaker current waveforms at reactor current interruption.

表 5 実フィールドにおける開極位相制御の運用実績

Table 5. Performance of phase-angle-controlled interruption in the actual field.

測定期間：平成元年 7 月 7 日～10 月 15 日

ユニット	測定件数	再発弧発生回数
No. 1	63 回	0 回
No. 2	63 回	0 回

不連続に変化することは考えにくいから、この特性は電界強度以外の要因によるものと推定される。ここでは固定アーク接触子先端のガス流速に着目し、これと再発弧との関係を検討した。

検討はガス流速を計算機解析することによって行った。解析に用いたのは変形 FLIC 法と呼ばれる差分法の一つを利用した回転対称三次元圧縮性流体解析プログラムである^{(4)~(6)}。このプログラムは、回転対称形状を対称軸を含む平面で切断した断面でガス空間をメッシュにより近似し、各計算ステップごとに隣接するメッシュ間で質量、運動量、エネルギーの保存則を逐次解析する。このプログラムは可動部分の運動、パッファ室内におけるガスの圧縮、アークエネルギーの注入など GCB 特有の現象を模擬する機能を備えている。

同図は四とおりのアーク時間で電流を遮断した場合に、それぞれのアーク時間に対応する TRV のピーク瞬時における固定アーク接触子先端のガス流速を解析した結果である。流速はストローク 0.6 pu に対応する位置から急速に増大している。

これは固定アーク接触子先端がノズルのスロート部を抜けることによって固定アーク接触子方向のガス流路が瞬間的に開放され、ガスの流出が始まるためである。図 12 に示すガス流速の変化は図 11 に示す再発弧発生電圧の変化と非常によく似た特性となっている。このことから、再発弧の発生は固定アーク接触子へ向かうガス流の開始と緊密な関係にあるものと推定される。これは、固定アーク接触子先端に滞留するアーク

図 11 リアクトル電流遮断試験の際の再発弧発生電圧

Fig.11. Re-ignition voltage at reactor current interruption test as a function of travel distance of movable part.

図 12 固定アーク接触子先端のガス流速解析結果

Fig.12. Analyzed velocities of gas flow at the top of the fixed arcing contact.

により高温化したガスが流れにより冷却されることによるものと思われる。

6. む す び

ガス遮断器の開極位相制御によってシャントリアクトル電流遮断に伴う再発弧の発生を抑止し、従って再

発弧サージを抑制することができた。要点を列挙すると次のようになる。

(1) ガス遮断器によるシャントリアクトル電流遮断の際の再発弧の発生の様相を調査し、再発弧は遮断器開極後最初の電流零点までのアーク時間がある限界値以下の場合にのみ発生することを示した。この結果、アーク時間がこの限界値を超えるように設定すれば再発弧の発生を防止することができ、従って再発弧が原因のサージ電圧を抑制することができることを示した。

(2) ガス遮断器の開極位相を制御して、シャントリアクトル電流遮断時に再発弧が発生しないアーク時間を人為的に与える開極位相制御方式を開発した。この方式を用いて、短絡試験所においてリアクトル電流遮断試験を行い、再発弧の発生を抑止できることを示した。

(3) 275 kV GIS 変電所におけるシャントリアクトル電流遮断に開極位相制御方式を適用し、再発弧の有無を3箇月にわたって監視した。この結果、再発弧が発生しないことを確認した。

(4) ガス遮断器消弧室内部のガス流を計算機解析して、これを再発弧特性と比較することにより再発弧の発生は電界強度のみならず、固定アーク接触子先端のガス流速と密接に関係をもつ可能性を示し、これによって再発弧の発生とアーク時間との関係を説明した。

(平成3年4月10日受付)

文 献

- (1) CIGRE Working Group 13.02: "Interruption of Small Inductive Currents Chapter 1 & 2", *ELECTRA*, No. 72, p. 73 (1980)
- (2) H. Kawada, K. Goto, M. Hanamura, S. Yanabu, S. Nishiwaki, T. Ueda & Y. Murayama: "Switching Surge of Shunt Reactor Caused by SF₆ Circuit Breaker Operation", *IEEE Trans. Power Delivery*, **PWRD-2**, 1124 (Oct. 1987)
- (3) E. Zaima, S. Okabe, S. Nishiwaki, M. Ishikawa, T. Nakamoto, Y. Murayama & Y. Kawaguchi: "Reignition Surges at Reactor Current Interruption in Cable System GIS", *ibid.*, **PWRD-5**, 947 (Feb. 1990)
- (4) 池田・岡本・石川・柳父: 「バツファ式ガス遮断器消弧室の絶縁的遮断性能の解析」, 電学論B, **108**, p. 125 (昭63-3)
- (5) K. Suzuki, H. Ikeda, H. Mizoguchi, Y. Ozaki & S. Yanabu: "Investigation of Interruption Performance of Newly Developed 300 kV 3-Phase-in-One-Tank-Type GCB and Its Application to a Reduced Size GIS" *IEEE Trans. Power Delivery*, **PWRD-4**, 362 (1989)
- (6) M. Okamoto, M. Ishikawa, K. Suzuki & H. Ikeda: "Computer Simulation of Phenomena Associated with Hot Gas in Puffer-Type Gas Circuit Breaker" *ibid.*, **PWRD-6**, 833 (1991)

山形 芳文 (正員)

昭和28年11月3日生。53年横浜国立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程卒業。同年4月東京電力(株)入社。以来、変電所の建設および変電機器の開発・保守業務に従事し、現在に至る。

熊谷 努 (正員)

昭和36年2月21日生。60年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月東京電力(株)入社。主として、開閉機器の開発に従事、現在に至る。

西脇 進 (正員)

昭和22年1月3日生。44年3月横浜国立大学工学部卒業。同年4月(株)東芝入社。避雷器、開閉保護装置、サージ現象などの研究開発に従事。工学博士。58年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

戸田 弘明 (正員)

昭和22年10月4日生。48年同志社大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。主として、ガス遮断器の開発・設計に従事。

石川 雅之 (正員)

昭和28年8月27日生。56年3月慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月(株)東芝入社。SF₆ガス遮断器の遮断現象および機器の開発に従事し、現在に至る。工学博士。IEEE 会員。

横田 岳志 (正員)

昭和33年2月15日生。57年横浜国立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。以来、送変電機器のシステムエンジニアリング、開発業務に従事し、現在に至る。