550kV ショントリアクトル電流遮断時の再発弧と 高周波消弧現象

正員 岡部成光 (東京電力株式会社) 正員 向富政典 (東京電力株式会社)
 正員 腰塚 正 (株式会社 東芝) 正員 新海 健 (株式会社 東芝)
 正員 西脇 進 (株式会社 東芝) 正員 三宅信之 (株式会社 東芝)
 正員 中本哲哉 (株式会社 東芝) 正員 才田敏之 (株式会社 東芝)

Re-ignition Surge and High-Frequency Arc Extinction phenomena at 550kV Shunt Reactor Current Interruption

Shigemitsu Okabe, member (Tokyo Electric Power Co.) Masanori Koto, member (Tokyo Electric Power Co.)
 Tadashi Koshizuka, member (Toshiba co.) Takeshi Shinkai, member (Toshiba co.)
 Susumu Nishiwaki, member (Toshiba co.) Nobuyuki Miyake, member (Toshiba co.)
 Tetsuya Nakamoto, member (Toshiba co.) Toshiyuki Saida, member (Toshiba co.)

At the sub-station connected with transmission lines and cables, shunt reactors are sometimes installed to compensate the capacitive current of the transmission lines and cables. It is known that the re-ignitions occur and high-frequency currents flow during interrupting the shunt reactor currents by switches. When the high-frequency currents are interrupted immediately after the re-ignitions, called as high-frequency arc extinction, it often leads to appearance of repetitive re-ignitions or voltage escalations resulting in generation of dangerous over-voltages.

The authors investigated the occurrence of the high-frequency arc extinctions for a 550kV one-break SF6 gas circuit breaker during interrupting a 550kV shunt reactor current. By computations for a actual 500kV substation, minimum frequency of 290kHz was obtained for the high frequency current. However, it was found by conducting 550kV reactor current interruption tests that the high-frequency arc extinctions did not occur even if the high-frequency was lowered to 26kHz. The high-frequency arc extinction is generally likely to occur at the lower frequency. So that it was concluded that the high-frequency arc extinction would not occur on the 550kV one-break SF6 gas circuit breaker during interrupting the shunt reactor current in the actual substations.

キーワード：ショントリアクトル遮断、再発弧サージ、高周波消弧、550kV 一点切り遮断器

1. まえがき

長距離の送電線、ケーブルが接続される変電所では、その充電電流を補償するため、ショントリアクトルが設置される。ショントリアクトルは開閉器で多頻度で開閉されることが多い。

ショントリアクトルを流れる電流を開閉器で遮断する際に、開閉器が再発弧し、高周波電流が流れることが知られている。この高周波電流を開閉器がただちに遮断（高周波消弧）してしまうと、多重再発弧、電圧エスカレーション等の現象に至り、機器の絶縁に有害な過電圧が発生する場合がある[1][2][3][4][5][6]。開閉器をショントリアクトル遮断に適用する際、ショントリアクトルが設置される

回路および開閉器の特性を十分に調査しておく必要がある。300kV 遮断器によるショントリアクトル電流遮断の際の再発弧と高周波消弧現象については、過去に筆者等の一部が研究結果を報告した[2][3][4]。

本論文は、550kV 一点切りガス遮断器を 550kV ショントリアクトル電流遮断に適用するため、その高周波消弧特性を調査した結果を述べたものである。まず、500kV 変電所の例を模擬して、再発弧サージ計算を行った。実際の変電所での再発弧の際の高周波電流の周波数等について調査した。次に、この調査結果に基づいて、大電力試験場において、リアクトル電流遮断試験を行った。短絡発電機を電源として、電圧 $550/\sqrt{3}$ kV、リアクトル電流 380A の試験回路を構成した。遮断器の高周波消弧特性について、再発

弧高周波電流の周波数を変えて測定した。最後に、実際の変電所における高周波消弧発生の有無を評価した。

2. リアクトル電流遮断時の再発弧現象

シャントリアクトル電流遮断時の再発弧、高周波消弧現象について説明する。図1は等価回路である。

シャントリアクトル電流は一般に小電流であるため、開閉器は、十分に開極していなくても電流零点が来ると、ここで電流を一旦遮断してしまう。しかし、極間距離が十分に開離していない状態で、リアクトル L_L と静電容量 C_L との振動によるkHzオーダーの周波数の電圧が開閉器の負荷側に現れるため、開閉器極間の絶縁が耐えられず、再発弧が発生する場合がある。

Es: 電源、 L_0 : 電源インダクタンス、SW: 開閉器
Cs: 電源側キャパシタンス、 C_L : 負荷側キャパシタンス
 I_1 : 電源側漂遊インダクタンス、 I_2 : 負荷側漂遊インダクタンス
 L_L : 負荷インダクタンス(シャントリアクトル)

図1 シャントリアクトル電流遮断の等価回路
Fig.1 Equivalent circuit of the shunt reactor current interruption

図2 シャントリアクトル電流遮断時の再発弧と高周波消弧の説明

Fig.2 Explanation of re-ignition and high-frequency arc extinction during interrupting shunt reactor current

再発弧が生じると、図1において、 $C_s \sim I_1 \sim SW \sim I_2 \sim C_L$ のループで高周波電流が流れる。電源からも負荷電流、すなわち負荷のリアクトルへ商用周波電流が流れる。従って、開閉器には負荷電流と高周波電流の重畳した電流が流れ

る。図2はこれらの電流の様子を示している。再発弧後、高周波電流に零点(P1、P2...)が作られる。しかし、高周波電流は減衰し、負荷電流は増大するので、やがて高周波電流の零点は発生しなくなる。これらの過程で、高周波電流重畳による電流零点で開閉器が遮断する場合がある。これを高周波消弧と言っている。SF6ガス遮断器の場合、高周波消弧は、図2のP5に示されているような、高周波電流の波高値が零線に接した時に発生する場合が多い[2]。

高周波消弧が発生すると、再発弧と高周波消弧を繰り返して多重再発弧に至り、また、この時電圧が次第に増大し[1][2]、機器の絶縁を脅かす過電圧となる場合がある。

3. 再発弧サージの計算

3.1 再発弧サージの計算回路

高周波消弧の発生は、高周波電流の周波数に大きく依存する。実際の500kV変電所における、シャントリアクトル電流遮断時の再発弧高周波電流の周波数について、EMTPを用いて計算を行った。

図3は500kV変電所の例を模擬した計算回路である。GIS、ケーブルは分布定数線で模擬した。ケーブルは整合抵抗にて終端した。変圧器は集中定数のキャパシタンスとした。シャントリアクトルは文献[7]の高周波用モデルで、油絶縁用の定数を用いた。

図3 500kV変電所の再発弧サージ計算回路
Fig.3 Calculation circuit for re-ignition surges at a 500kV sub-station

3.2 再発弧時の高周波電流およびサージ過電圧

図3において、遮断器1を操作して、再発弧した時の計算波形を図4に示す。この時、他の遮断器A、B、C、2については、すべて閉状態とし、すなわち、全回線接続状態とした。図4(a)は遮断器のリアクトル側端子電圧、(b)は(a)の再発弧時点の拡大、(c)はリアクトル端子電圧、(d)は同拡大である。(e)は遮断器1を流れる高周波電流であって、その波高値が電流零線と接する付近を示す。

図 4(a)に示すように、リアクトルを流れる商用周波電流を一時遮断した後、遮断器のリアクトル側端子には、リアクトルの振動による電圧が現れている。その周波数は 1.53kHz であった。リアクトル電流の一時遮断後、リアクトル電圧が反転してピーク値となった時点 P、すなわち、遮断器 1 の極間電圧が最大となった時点において、遮断器 1 を再び閉じることで、再発弧を模擬した。

図 4 500kV 変電所の再発弧サージ計算波形例
Fig.4 Example of calculation result of re-ignition surge at 500kV sub-station

図 4 のケースでは、高周波電流は図(e)に示すように、周波数が 450kHz であった。再発弧時の過電圧は、リアクトル端子では、1.81p. u. (1p. u.=449kV) となった。

図 3 において、他の回路構成についても計算を行った。計算結果をまとめて、図 4 の結果と併せて表 1 に示す。いずれのケースにおいても、リアクトル電流の一時遮断後のリアクトル側端子電圧の周波数は約 1.5kHz であった。再発弧時の高周波電流の周波数は回線の接続状態によって変化する。模擬した変電所では、290kHz～450kHz であった。再発弧過電圧は全回線接続の条件が最も大きく、リアクトル端子において、1.81p. u. であった。

表 1 計算結果
Table 1 Calculation results

ケース	操作遮断器	回路構成	リアクトル電流一時遮断後のリアクトル振動周波数 (kHz)	再発弧時のリアクトル端子電圧最大値 (kV) (p. u.)	高周波電流周波数 (kHz)
1	1	全回線接続	1.53	811 1.81	450
2	1	遮断器 A 開	1.55	802 1.79	430
3	2	遮断器 B 開	1.55	760 1.69	450
4	1	遮断器 C 開	1.53	775 1.73	450
5	2	遮断器 A、B 開	1.55	759 1.69	290
6	1	遮断器 A、C 開	1.53	760 1.69	300

4. 遮断器の高周波消弧特性

4.1 試験回路および高周波電流測定方法

550kV 一点切りガス遮断器を用いて、リアクトル電流遮断試験を行った。再発弧の際の高周波消弧特性を測定した。試験回路を図 5 に示す。短絡発電機を電源とし、電圧は $550/\sqrt{3}$ kV とした。2.65H の空心リアクトル L_L を用意して、これに流れる電流 380A を、550kV 一点切りガス遮断器 CB で遮断した。

Gen: 短絡発電機、SB: 保護遮断器、SM: 投入開閉器
Tr: 試験用変圧器、la、lb: 高周波電流調整用リアクトル、
Cs: 電源側コンデンサ、CT: 変流器、PD: 分圧器
CL: 負荷側静電容量、LL: 空心リアクトル
CT1、CT2: 高周波電流測定用変流器、
CB: 550kV 一点切りガス遮断器

図 5 550kV ショントリアクトル電流遮断試験回路
Fig.5 Test circuit of 550kV shunt reactor current interruption

リアクトル電流一時遮断後の遮断器負荷側の電圧振動の周波数は、図5の試験回路において、空心リアクトル L_L と負荷側静電容量 C_L によって決まる。この周波数が高いほど、一般に再発弧は発生しやすい。実際の変電所では、 C_L は主として、遮断器とリアクトルの間の線路及びリアクトル自身の静電容量である。実際の変電所において、 C_L が小さい場合を想定して、試験では、1.8kHz、2.5kHzとした。再発弧の際にリアクトル端子に大きな過電圧が発生するように、 C_S の静電容量の値を C_L の約10倍にした[8]。再発弧の際の高周波電流は C_S -1a-CB-1b- C_L の回路で流れる。1a、1bの値を変化させて、高周波電流の周波数を26~170kHzに変化させた。

遮断器CBに流れる高周波電流を精度よく測定するために、高電圧の遮断器端子に2つの変流器CT1、CT2を設置した。CT1は高周波電流全体の測定用である。CT2は高周波電流零点近傍の小さな信号測定用として、出力にダイオードクリッパを接続した[2]。CT1、CT2の出力信号は高電圧側でE/O変換器を用いて光信号に変換し、光ファイバーでアース電位の測定点まで伝送した。

図6は550kVシャントリアクトル電流遮断試験の状況を示す。

図6 500kV シャントリアクトル遮断試験状況
Fig.6 View of 550kV shunt reactor current interruption test

4.2 高周波消弧特性

図7に測定結果のオシログラム例を示す。遮断器がQ点で開極を始めた後、最初の電流零点Rで一時的に電流を遮断し、その直後に再発弧が発生している。再発弧の発生後、再び商用周波電流が流れて、S点で遮断が完了している。

図8は、図7の再発弧時点R付近の遮断器負荷側端子電圧波形の拡大である。図7の波形を得た測定器とは別の測定器によって得た。電流遮断後、リアクトル L_L と C_L による約2.5kHzの電圧振動が現われている。その後、再発弧が生じ、周波数約120kHzの電圧振動の再発弧サージが発生している。

図7の再発弧時点の高周波電流の波形を図9に示す。図9(a)は、CT1を用いて測定したオシログラムである。図9(b)

は、クリッパを設けたCT2を用いて測定したオシログラムであって、再発弧発生から約90 μ s間は、高周波電流の波高値はクリッパされている。図9(c)は、図9(b)の区間Tの拡大波形である。高周波電流の周波数は120kHzである。

高周波消弧は、電流零点での電流の傾き di/dt が小さい時に発生しやすい。 di/dt が最小となるのは、図9(c)のA点に示すように、高周波電流の波高値が零線に接する時である。図9(c)のオシログラムは、このA点においても高周波消弧が発生していないことを示している。A点において高周波消弧しなければ、以降は高周波電流によって電流零点が作られることはないのも、もはや高周波消弧は発生せず、再び商用周波電流が流れつづけることになる。この商用周波電流は、次の商用周波電流零点において遮断される。

図7 遮断試験結果オシログラム例
Fig.7 Example of oscillograms obtained at test

図8 図7における再発弧時点の遮断器負荷側端子電圧波形拡大
Fig.8 Enlarged waveform of the load side terminal voltage at re-ignition

(a) CT1 のオシログラム

(b) CT2(クリップ付き)のオシログラム

(c) (b)の区間Tの拡大波形

図9 高周波電流の測定波形：120kHz

Fig.9 High-frequency current waveform obtained by measurement : 120kHz

図10 高周波消弧特性の測定結果のまとめ

Fig.10 Test results of high-frequency arc extinction

高周波電流の周波数を変えて行った、高周波消弧についての試験結果をまとめて図10に示す。図10の縦軸の i_0 は、高周波電流波高値が零線と接した瞬間の高周波電流振幅を示したものである。 i_0 の値は、再発弧の発生時点によって異なり、従って、試験ごとに異なる。 i_0 が小さいほど高周波消弧は発生しやすい[3]。図10は、高周波電流の周波数170、120、59、26kHzいずれにおいても、高周波消弧は発生しなかったことを示している。各周波数において、高周波電流波高値が零線に接した場合、即ち $di/dt \approx 0$ でも、高周波消弧は発生しなかった。

4.3 フィールドでの高周波消弧発生有無の評価

高周波電流の周波数が低いほど高周波消弧は発生しやすくなると考えられる[4]。3章の実際の変電所を模擬した再発弧サージ計算結果では、290kHzが最も低い周波数であった。しかし、今回の試験では、図10に示すように、26kHzまで高周波電流の周波数を下げても高周波消弧は発生しなかった。この試験結果から、550kV一点切り遮断器は実際の変電所では高周波消弧せず、多重再発弧による高いサージ電圧の発生等はないものと考えられる。

4.4 高周波消弧の発生におけるガスの吹き付けの影響

550kV一点切り遮断器では、前述のように、高周波電流の周波数を26kHzまで下げても、高周波消弧は発生しなかった。一方、文献[2]では、300kV遮断器において、図11に示すように、高周波電流周波数52kHzにて、高周波消弧を観測したことを報告している。

図11 高周波消弧の発生を示す高周波電流オシログラム例[2]

Fig.11 Example waveform of high frequency current showing high-frequency arc extinction[2]

SF6ガス遮断器はパフアシリンダ内でガスを圧縮し、アークに吹き付けることで消弧する。シェントリアクトル電流遮断時に再発弧が生じるのは、開極初期の極間距離が短い時間領域である。図12は、用いた550kV一点切り遮断器の消弧室の、開極初期におけるガスの吹き付けの様子を示している。図12において、吹き出し穴が短絡大電流の遮断性能の向上を目的として、パフアシリンダ部に位

置している[9]。しかし、リアクトル電流は小電流であって、従って、ガス流1とこの吹き出し穴からガス流2が接触子間に点弧したアークに向かって発生しようとする。しかし、これらのガス流は、開極初期において、固定接触子とノズルにはばまれてほとんど発生しない。

これに対して、文献[2]におけるガス遮断器では、図12における吹き出し穴が、ピストンの右側に位置して、外部に連通していた。このため、ガス流2が存在せず、しかし、ガス流1は吹き出し穴に向かって形成される。このため、開極初期におけるアークへの吹き付けガス流は、今回の550kV一点切りガス遮断器のほうが弱いと思われる。これが上記の高周波消弧特性の差の主な原因と思われる。高周波消弧の発生に対する過渡回復電圧の影響については、小さいことが文献[4]に述べられている。

図12 550kV一点切り遮断器の開極初期のガス流の様子
Fig.12 Gas flow of 550kV one-break GCB at initial stage of opening

5. 結論

550kV一点切りガス遮断器をシャントリアクトル電流遮断に適用するため、再発弧の際の高周波消弧特性についての検討を行った。本論文をまとめると次のようになる。

- 1) 500kV変電所を模擬して、リアクトル電流遮断時の再発弧サージ計算を行った。再発弧時の際の高周波電流周波数は、290kHz以上であった。
- 2) リアクトル電流遮断試験を行って、550kV一点切りガス遮断器の高周波消弧特性を測定した。試験において、高周波電流周波数を26kHzにまで下げても、高周波消弧は発生しなかった。
- 3) 高周波消弧は、高周波電流の周波数が低いほど発生しやすい。上記1)、2)から、550kV一点切りガス遮断器を実際の変電所において、シャントリアクトル電流遮断に適用しても、高周波消弧は発生しないものと考えられる。従って、多重再発弧による高いサージ電圧の発生はないものと考えられる。

(平成11年3月5日受付、同11年7月15日再受付)

文献

- [1] 電気学会技術報告(II部)第388号
「大容量遮断器の特殊遮断条件」

- [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. on Power Delivery Vol.2, No.4 pp.1124-1130 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" IEEE Trans. on Power Delivery Vol.5, No.2, pp.947-954 1990
- [4] E. Zaima, S. Okabe, S. Nishiwaki, M. Ishikawa, K. Suzuki, H. Toda "Application of Dynamic Arc Equations to High-Frequency Arc Extinctions in SF6 Gas Circuit Breakers" IEEE Trans. on Power Delivery Vol.8, No.3, pp.1199-1205, 1993
- [5] 山形、熊谷、西脇、戸田、石川、横田
「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」
電気学会 論文誌B、112巻2号、pp.161-167
平成4年
- [6] D.F. Peelo, E.M. Ruoss "A New IEEE Application Guide for Shunt Reactor Switching"
IEEE PES Summer Meeting 95SM607-2 PWRD 1995
- [7] 岡部、向當、寺西、石川、小林、才田
「ガス絶縁シャントリアクトルの高周波サージ解析用電気モデル」
電気学会 電力・エネルギー論文誌、117巻5号、pp.700-705 平成9年
- [8] IEC1233 Technical Report "High-voltage alternating current circuit-breakers Inductive load switching" 1994
- [9] S. Yanabu, H. Mizoguchi, H. Ikeda, K. Suzuki, M. Toyoda "Development of Novel hybrid Puffer Interrupting Chamber for SF6 Gas Circuit Breaker utilizing Self-Pressure-Rise Phenomena by Arc"
IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.355-361, 1989

岡部 成光

(正員)1958年9月18日生。1986年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。1992年ミュンヘン工科大学客員研究員。現在、電力技術研究所・絶縁解析グループ。主として、変電機器の絶縁協調および診断技術の研究に従事。工学博士。IEEE会員。1993年電気学会論文賞受賞。

向當 政典

(正員) 1965年3月1日生。1989年3月金沢大学大学院修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。電力技術研究所勤務時に、変電機器の絶縁協調および診断技術の研究に従事。現在、山梨支店工務部発変電グループ。

才田 敏之

(正員) 1967年1月12日生。1991年3月名古屋大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。同社電力変電技術部において、主として変電プラントのシステムエンジニアリングに従事。

腰塚 正

(正員) 1965年6月29日生。1992年3月東京電機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。現在、電力・産業システム技術開発センター。開閉保護装置の研究開発に従事。IEEE 会員。

新海 健

(正員) 1969年3月4日生。1993年3月早稲田大学理工学研究科修士課程修了。同年4月、(株)東芝入社。以来、ガス遮断器の開発及び遮断現象の研究に従事。

西脇 進

(正員) 1947年1月3日生。1969年3月横浜国立大学工学部卒業。同年4月(株)東芝入社。サージ現象、避雷器、開閉保護装置などの研究開発に従事。工学博士。昭和58年、平成5年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

三宅 信之

(正員) 1947年6月10日生。1968年3月久留米工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月、(株)東芝入社。主として遮断器の合成試験法の開発、送変電機器の開発に従事。1998年電気学会論文賞受賞。

中本 哲哉

(正員) 1957年2月4日生。1981年3月京都大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。以来、ガス遮断器の開発・設計に従事。平成5年電気学会論文賞受賞。