SF₆ ガス絶縁断路器, 接地開閉器の電流開閉性能

正員 高倉 秀俊 (高岳製作所)

正員 岡原 淳 (高岳製作所)

Switching Capabilities of SF₆ Gas Disconnecting Switch and Earthing Switch

Hidetoshi Takakura, Member, Atsushi Okahara, Member (Takaoka Electric Mfg. Co., Ltd.)

With the development of electric power system, disconnecting switch and earthing switch have been requested switching capabilities of loop current, induction current and small current. Many measurements have been taken especially for large current breaking.

This paper describes switching duties, switching phenomena, switching test results and guidance of breaking unit design for SF₆ gas disconnecting switch and earthing switch.

キーワード：断路器, 接地開閉器, 電流開閉, SF₆.

1. まえがき

断路器はもともと、単に充電された電路の開閉を行う機器であり、接地開閉器も無電圧の主回路の接地が本来の用途であった。しかし、電力系統の発達に伴い断路器、接地開閉器にも種々の電流開閉性能が要求されるようになり、今日ではそれらの責務を満足するため様々な対応策が実施されている。

その一例が図1、図2であり、図1はがい管内にSF₆ガスを封入し、電流開閉性能、耐環境性能を向上させたガス断路器、図2はガス絶縁開閉装置(GIS)に内蔵され、磁界を利用して電流を開閉するGIS用ガス断路器である。

本論文では、絶縁、消弧媒体としてSF₆ガスを用いた、これらのガス絶縁断路器、接地開閉器について解説する。

2. 要求される電流開閉責務⁽¹⁾⁽²⁾

断路器、接地開閉器に要求される一般的な電流開閉責務を表1に示す。数kV、数kAと小形の遮断器なみの性能を必要とする責務もあり、更に系統条件によっては、この表以上の責務が要求される場合もある。以下に主な電流開閉責務について述べる。

図1 がい子形ガス断路器

Fig. 1. Porcelain insulated SF₆ gas disconnecting switch.

図2 GIS用ガス断路器

Fig. 2. SF₆ gas disconnecting switch for GIS.

表 1 断路器、接地開閉器の電流開閉責務
Table 1. Switching duties for disconnecting switch and earthing switch.

機 器	項 目	適 用	開 閉 責 務			備 考
			電 圧	電 流	回 数	
断 路 器	進み小電流開閉	すべての断路器	定格電圧 (72~550 kV)	0.5~1 A	2,000	母線、線路の充電電流を開閉
	遅れ小電流開閉	配変の変圧器回線用 断路器	定格電圧 (72~168 kV)	3 A 以下	2,000	無負荷変圧器の励磁電流を開閉
	複母線ループ電流開閉	複母線の母線側断路器	100~300 V	定格電流 (800~12,000 A)	100~200	母線切換え時のループ電流を開閉
	線路ループ電流開閉	線路ループを構成する 配変の線路用断路器	10 kV 以下	1,000 A 以下	200	線路切換え時のループ電流を開閉
接地開閉器	電磁誘導電流開閉	併架送電線の引込み口の 接地開閉器	1~90 kV	200~1,500 A	100	併架送電線の電磁誘導電流を開閉
	静電誘導電流開閉	併架送電線の引込み口の 接地開閉器	3~30 kV	0.3~24 A	100	併架送電線の静電誘導電流を開閉
	残留電荷放電容量	ケーブル引込み口の接地 開閉器	100~500 kV (波高値)	数百 A (波高値)	100	ケーブルの残留電荷を放電
	短絡投入容量	運転保守上、要求される 接地開閉器	定格電圧 (72~550 kV)	短絡電流 (数+kA)	1	活線状態の電路を接地

〈2・1〉 進み小電流開閉責務 遮断器と断路器との間の母線の充電電流および遮断器極間を通しての充電電流などの開閉責務である。しかし、その静電容量は一般に非常に小さいため、電流値も 1 A 以下と小さく、電流の開閉自体が問題となることはない。ただし、300 kV 以上の GIS 用断路器においては、後述するように再点弧サージによるタンクへの地絡防止を考慮する必要がある。

〈2・2〉 複母線ループ電流開閉責務 複母線変電所で、母線切換えを行う際、ループインピーダンスに対応した電圧降下分を生じ、これを開閉する責務である。電圧はループ経路長によるが、最大 300 V 程度と小さい。しかし、電流は最大、定格電流値まで考慮する必要がある、大電流開閉となる。

〈2・3〉 線路ループ電流開閉責務 線路用遮断器を省略した配電用変電所で、系統切換えを行う際のループ電流開閉責務である。電流は定格電流の半分までで、1,000 A 以下であるが、ループを構成する線路が送電線のためループ経路長が数十 km にも達する場合があり、これに応じ電圧も最大 10 kV 程度となる。

〈2・4〉 誘導電流開閉責務 併架送電線の引込み口に使用される接地開閉器に要求され、図 3 に示すように併架する他回線の誘導により生じる電磁誘導電流、および静電誘導電流の開閉責務である。

ここで静電誘導電流は、回線間の静電容量が小さいため小電流となり、開閉責務上あまり問題とならない。しかし、電磁誘導電流は表 1 に示すように、最大 90 kV-1,500 A にも達し (550 kV GIS の例) 断路器、

図 3 接地開閉器の誘導電流開閉責務
Fig. 3. Induction current switching duty for earthing switch.

接地開閉器における最も過酷な開閉責務の一つである。

3. 電流開閉時の現象⁽²⁾⁽³⁾

ここでは、GIS 特有の現象が発生する断路器の進み小電流開閉と、接地開閉器にとり最も過酷な責務である電磁誘導電流開閉を取上げ、その現象を述べる。

〈3・1〉 進み小電流開閉時の現象 断路器にて進み小電流を開閉する場合、通常多数回の再点弧を繰返すが、この際大きな急しゅん波サージを発生する。このサージは、一般に電源電圧の 2 倍程度である (図 4)。

気中の断路器においては、この再点弧サージが問題となることはないが、GIS 用断路器においては、充電部と対地 (タンク) との距離が短いこと、および SF₆

図 4 進み小電流遮断時の電圧波形
Fig. 4. Voltage waveform on small capacitive current switching.

ガスの絶縁特性が不平等電界において著しく低下することから、対地絶縁性能上問題となる場合がある。

この現象については種々の報告⁽³⁾があり、これまでの検討より、300 kV 未満では問題とならず、また 300 kV 以上の断路器についても電極構造への配慮などにより対策が可能である。

〈3・2〉 電磁誘導電流開閉時の現象 接地開閉器の電磁誘導電流開閉は、図 3(a) に示したように、相手端の接地点を事故点とみた 1 線地絡遮断と同じである。従って、開閉時の接地開閉器極間に現れる過渡回復電圧波形は三角波となり、その上昇率 ($r_{rr}V$) は、100~200 V/ μ s 程度である。

当然のことながら、この値が開閉性能に大きな影響を与えるので試験を実施する際、留意が必要である。

4. 種々の消弧方式とその特徴⁽⁴⁾⁽⁵⁾

GIS の構成機器の中で、断路器および接地開閉器の台数は最も多くまた、ループ電流開閉用の断路器のように、運用上多数回の動作を要求されるものもある。従って、断路器および接地開閉器の高性能化、高効率化は、直接 GIS 全体の信頼性向上、縮小化に結びつくため、開閉責務に応じた消弧方式を研究することは重要であるといえる。

各消弧方式の分類と特徴を表 2 に示した。

(1) は開離動作だけによるもので、基本方式である。開離速度の違いはあっても (ルーピングを伴う)、アークの引き伸ばしが消弧の要因となっているため、開離距離 (消弧時点までの開離距離) は速度によらず一定となる。

(2) は電流によって発生する磁界の力を利用して、アークを駆動し引き伸ばすもので、原理的には気中の遮断器などにも利用されていたものであるが、SF₆ ガス中で使うことにより、アークのルーピング特性がより顕著となる特徴がある。

(3) はガス流によるアークの冷却によるもので、吹付けが効果的な場合は、優れた消弧特性を示す。ガス流を有効に利用するために、吸込みパフファおよびパフファ方式は高速動作となる。

表 2 消弧方式の分類と特徴
Table 2. Classification and characteristic of interrupting chamber.

消弧因子	方式	原理	特徴	設計上のポイント
アーク引き伸ばし方式	(I) 開離動作	並 切	可動電極を駆動することにより、アークを引き伸ばす	構造が最も簡単である
		早 切	基本的には、並切りであるが、アーク電極だけが後から高速で開離する構造となっている	アーク電極、駆動部の簡素化
	(II) 電流による磁界	磁 界	開離の際、電極内に設置したコイルに電流を流すことにより磁界を発生し、アークを駆動する	・発生磁界の有効利用 (磁界の向き、大きさとアークの関係)
		グリッド	アークを半周囲のように配置したグリッド板(磁性体)によりアークを横に駆動する	・グリッド板の形状、枚数 ・固定側電極の寸法
(III) ガス吹付け方式	自力消弧	固定電極のシールド内のガス圧をアークによって高め、可動電極がノズルから抜出した瞬間にアークに吹付ける	アークによる固定電極内の圧力上昇によって消弧するため、大電流の遮断に適している	・ノズルの材質および形状 ・固定電極側の接点とシールド出口の距離および開離速度を変えることによりガスの吹付け力をコントロールする
	吸込みパフファ	可動電極の開離と共に、吸込み室の圧力を低下させ圧力差を生じさせることにより、ガス流を発生し、アークを冷却する	小電流であれば吸込み室を大きくしなくても消弧が可能となり、操作エネルギーもパフファ式に比べかなり小さい	・吸込みのタイミング ・吸込み室、吸込み口の寸法
	パフファ	可動電極の開離と同時にパフファ室のガスを圧縮しアークに吹付ける	消弧能力は最も高いが、操作エネルギーは大きい	・ノズルの材質および形状 ・パフファ室容積と操作エネルギーの関係

図 5 各消弧方式と遮断容量
Fig. 5. Breaking capacity of various interrupting chambers.

図 5 は各消弧室の特徴をもとに、各々の消弧室がどのような遮断責務に対して有効であるかを示したものである。ただし、本図はあくまでも目安であり、設計により性能は変わる。

実用化されているものの中には、各々の特徴を生かし組合せて使用されるものもある。

5. 電流開閉試験⁽⁶⁾

各消弧方式について各種の試験が行われているが、ここではその一例を紹介する。

なお、試験回路の条件が消弧性能に大きく影響するため、回路を実使用状態にできるだけ近づけることが望ましい。

〈5・1〉 進み小電流開閉試験 図 6 は、断路器の進み小電流開閉試験状況である。等価回路を図 7 に示す。

(1) 過電圧倍数の計算 進み小電流開閉については、第 3 章で記したように、開閉の際、多数回の再点弧を繰返し、大きな急しゅん波サージを発生する。このサージは、供試器の電極形状開離速度にもよる

図 6 試験状況 (断路器進み小電流開閉試験)

Fig. 6. Testing view (small capacitive current switching test for disconnecting switch).

図 7 等価回路

Fig. 7. Equivalence circuit.

が、一般に試験回路の定数によって決まるため、実使用条件を考慮して電源側、負荷側のキャパシタンス比を設定することが重要である。

過電圧倍数は、以下の式により算出され、図 8 とする。

$$E_s = E_l = E_m \text{ (電源電圧波高値)}$$

$$C_u = C_l + C_2$$

$$n = C_s / C_u$$

$$m = C_1 / C_u$$

とおくと、

$$V_{\max} / E_m = 4 \frac{n}{(n+1+m)(1+m)} - \frac{1-m}{1+m}$$

(2) 試験条件の設定 図 6 の 72 kV GIS 用断路器の試験では、過電圧倍数が 2.8 倍となるように回路定数を設定している。

$$(C_s = 0.81 \mu\text{F}, C_l = 0.05 \mu\text{F},$$

$$C_1 = C_2 = 500 \text{ pF})$$

実系統における過電圧倍数は第 3 章でも述べたように一般に 2 倍程度であり、電流開閉試験だけの確認であれば、2.8 倍とする必要はない。

この試験で 2.8 倍を設定したのは、断路器サージが伝搬し GIS の他の箇所 (母線開放端など) でより高いサージが発生する場合を想定し、このサージに対す

図 8 過電圧倍数計算結果

Fig. 8. Calculation results of over voltage amplitude factor.

図 9 開離速度と開離距離の関係 (300 V・2,000 A)

Fig. 9. Relation between opening speed and opening distance.

る GIS の絶縁性能をも併せて検証するためである。

なお、実試験では地絡などの絶縁破壊もなく 500 回を開閉し、このときの過電圧倍数は 2.7 倍となり、計算値とよく一致した。

〈5・2〉 母線ループ電流開閉試験

(1) 開離速度と開離距離の関係 図 9 は、母線ループ電流開閉責務 (300 V・2,000 A) に対する、開離速度と開離距離 (消弧時点までの開離距離) の関係を示したものである。

(i) 並切形は開離速度によらず開離距離はほぼ一定となる。これは消弧のためにアークが一定長さ以上となることが必要であることを示している。

(ii) 磁界、グリッドは、並切りに比べ開離距離は 1/2 となり、磁界の効果によりアークが駆動されていることがわかる。

(iii) 自力消弧形は速度が 1.0 m/s 以下では並切りより開離距離は短い、2.0 m/s でほぼ等しくなる。これは、開離速度が速くなるに伴い固定電極内で

図 10 ガス圧力と開離距離の関係
(300 V-2,000 A)

Fig. 10. Relation between gas pressure and opening distance.

図 11 開離速度と開離距離の関係
(1,500 V-200 A)

Fig. 11. Relation between opening speed and opening distance.

のアーク時間が短くなったため、固定電極の内圧の上昇が十分得られなかったものと考えられる。

(2) ガス圧力と開離距離の関係 図 10 は、母線ループ電流開閉責務 (300 V-2,000 A) に対するガス圧力と開離距離の関係を示したものである。

並切り、自力消弧と共に、ガス圧力の上昇に伴い開離距離は短くなる傾向があるが、これはガス圧力の上昇による絶縁回復特性の向上と、アークの冷却の効果が増大するためと考えられる。

一方、磁界およびグリッドは、ガス圧力の違いによる開離距離の変化はほとんどない。これは磁界によるアーク引き伸ばしの効果の方が圧力上昇による効果より大きいためと考えられる。

〈5・3〉 電磁誘導電流開閉試験 図 11 は、電磁誘導電流開閉責務 (1,500 V-200 A) に対する開離速度と開離距離の関係を示したものである。特に、吸込みパツファ形の開離距離が短いことがわかる。これは、並切り形の消弧能力が低いこと。また、磁界形、自力形は電流によって消弧能力を得ているため、200 A 程度

の小電流では効果があまり出ないこと。それに対し吸込み形は、強制的に吸込み室内の内部と外部に圧力差を与えているため消弧能力が高いことによると考えられる。

6. あとがき

ガス絶縁断路器、接地開閉器の電流開閉について、その課題と開発動向を解説してきた。これまで、遮断器と比べ断路器、接地開閉器の電流開閉については、標準化、規格化が遅れていた感があるが、GIS の適用拡大に伴い、最近急速にそのとりまとめが進んできている。今後は、これまでの研究開発の成果を生かした規格化に伴い、断路器、接地開閉器の一層の高信頼度化、高性能化が進んでいくものと考えられる。

最後に本稿の執筆に関し、御支援、御協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

(平成元年 11 月 27 日受付, 同 2 年 6 月 4 日再受付)

文 献

- 電気学会:「ガス絶縁開閉装置試験法」, 電気学会技術報告 (II 部), 第 216 号 (昭 61)
- 作田・鬼頭・高倉:「ガス絶縁開閉装置の性能と検証」, SPD83-10 (昭 58)
- 藤波・宅間:「ガス絶縁断路器の開閉時サージと絶縁特性」, 開閉保護装置研究会, SPD84-17 (昭 59)
- 宮地:「SF₆ アークとその周辺部の高温状態」, 昭 45 電気学会全大 744
- 鈴木・溝口・西脇・下川原・川島・柳父:「SF₆ ガスモデル断路器のループ電流遮断」, SPD81-16 (昭 56)
- 岡原・林・高倉・梶浦:「SF₆ ガス断路器の消弧性能」, 昭 61 電気学会全大 1256

高 倉 秀 俊 (正員)

昭和 31 年 11 月 22 日生。54 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年 4 月 (株) 高岳製作所入社。現在 開発部機器開発課に所属し、主としてガス絶縁開閉装置の開発に従事。

岡 原 淳 (正員)

昭和 35 年 8 月 26 日生。58 年 3 月岐阜大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月 (株) 高岳製作所入社。現在 開発部機器開発課に所属し、主としてガス絶縁開閉装置の開発に従事。