UDC 621.316.573.014:621.315.618:621.3.064

論文

60-B106

ガス断路器の進み小電流遮断過程の解析

正員 小 沢 淳 (日立製作所)

正員 山 極 時 生 (日立製作所)

正員 竹 内 茂 隆 (日立製作所)

正員 細 川 正 男 (日立製作所)

1. ま え が き

ガス絶縁変電所において、開極状態のガス遮断器やガス絶縁母線などで構成されている容量性負荷に流れる進み小電流をガス断路器(以下、断路器と略す)で遮断する際、普通開極速度が遅いため何回もの再点弧を繰り返すことは良く知られている⁽¹⁾。この再点弧時に高周波の過電圧、いわゆる再点弧サージ電圧が発生する。そのサージ電圧は遮断後、負荷側に残る電圧、いわゆる残留電圧と共に断路器自身あるいは他の機器の絶縁を脅かすものとして注目されている^{(2)~(4)}。

当然、再点弧サージ電圧、残留電圧ともなるべく低いことが好ましい。特に、UHV ガス絶縁変電所では保護性能の優れた酸化亜鉛形避雷器を複数台適切に配置することによって、その所要絶縁耐力を大幅に低減しようと計画されており⁽⁵⁾、断路器によって発生する再点弧サージ電圧、残留電圧を把握しておくことは絶縁信頼性を確保するうえで非常に重要な課題である。

最も高い再点弧サージ電圧が発生するのは、負荷側に残った電圧が電源電圧波高値となり、電源側電圧が逆極性の波高値で、再点弧する場合と考えられている⁽²⁾⁽⁶⁾。一方、負荷側の残留電圧が電源電圧波高値となるのは断路器の開極速度が早い場合であり、開極速度が遅く、かつ極間絶縁回復電圧の極性に対する非対称性が大きい場合には、残留電圧は電源電圧波高値の30%以下に低くなると Boggs 氏は報告している⁽⁷⁾。

母線の切換えのためのループ電流遮断責務が課せられる断路器の開極速度は一般に早い方に属する。

本論文では、断路器の進み小電流遮断過程のシミュレーションを計算により行ない、極間絶縁の回復速度、非対称性などと再点弧サージ電圧、残留電圧あるいはアーク時間とどのような関係にあるかを求めた。特に、再点弧サージ電圧に関して新しい知見が得られ、残留電圧、アーク時間との相関関係も見い出された。

2. 計算方法

〈2・1〉 断路器と進み小電流遮断の概要

断路器による進み小電流遮断の等価回路の例を図1に示す。遮断される負荷側は開極状態のガス遮断器、ガス絶縁母線などで、電源側はガス絶縁母線、電源などで構成されているものとする。

図1の断路器の概略構造例は図2のようであり、接地された円筒状压力容器内に可動部分と固定部分が配置され、高気圧 SF₆ ガスで充てんされている。可動子は絶縁操作棒を介して駆動される。これらの可動部分や固定部分の構造、可動子の開極速度、SF₆ ガス圧力などが断路器の進み小電流遮断過程に微妙に影響するものと考えられる。

断路器の開極速度は、数m/s以下であるのが普通であり、ガス遮断器のように早くないので図3に示すよ

図1 断路器の進み小電流遮断等価回路

Fig. 1. Equivalent circuit for the interruption of small charging current with a disconnector.

Analysis of Breaking Process of Small Charging Current with a Gas Disconnecter. By Jun Ozawa, Member, Tokio Yamaguchi, Member, Shigetaka Takeuchi, Member & Masao Hosokawa, Member (Hitachi Ltd.).

小沢 淳: 正員, 日立製作所 日立研究所

山極時生: 正員, 日立製作所 日立研究所

竹内茂隆: 正員, 日立製作所 国分工場

細川正男: 正員, 日立製作所 国分工場

図 2 断路器の概略構造例

Fig. 2. Example of a simplified configuration of a disconnector.

図 3 断路器の進み小電流遮断過程説明図

Fig. 3. Outline of the interruption process of small charging current with a disconnector.

図 4 進み小電流遮断時の実測オシログラム例

Fig. 4. Example of measured oscillogram for the interruption of small charging current with a disconnector.

うに多数回の再点弧を繰り返しながら進み小電流遮断過程が進行する。再点弧ごとにサージ電圧が発生し、サージ電流が流れる。負荷側の電圧は残留電圧の放電時定数が長いので階段状の波形となる。図 4 は進み小電流遮断時の実測波形例である。

なお、図 1 においてサージ電圧の計算を行なう場合、ガス絶縁母線は分布定数で与える。

〈2・2〉 計算条件 断路器の進み小電流遮断過程の計算に際し、次のような条件を設定した。

(1) 図 3 に示したように、断路器の極間が物理的

に開いて後、進み小電流が最初に零点を迎える時点(電源電圧波高点に当る)で最初の遮断が生じることとした。なお、進み小電流がさい断するような場合についても若干の検討を付け加えている。

(2) 実系統においては、図 1 に示したような電源側の合計キャパシタンスは、負荷側の合計キャパシタンスに比較して十分大きく、電源容量も十分大きい。従って、再点弧前後の断路器電源側の電圧変動が無視できるほど小さいことにした。

(3) 断路器の構造には種々あり、可動子が開かれていく過程での極間絶縁耐力、いわゆる絶縁回復特性は様々である。絶縁回復特性として実測データに即した値を使用すべきであるが、本論文では進み小電流遮断過程の一般的性質を把握しやすくするために、絶縁回復電圧の平均が時間に対して正比例して高くなり、再点弧ごとにばらつくことを考慮して次式で与えた。

$$V_+(t) = a_0(1 - \sigma \cdot x) \cdot (t - T_0) \dots\dots\dots (1)$$

$$V_-(t) = b_0(1 - \sigma \cdot x) \cdot (t - T_0) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $V_+(t)$ 、 $V_-(t)$ ：正極性、負極性の絶縁回復電圧、単位は pu、1.0 pu は電源電圧波高値。 a_0 、 b_0 ：正極性、負極性の絶縁回復の平均速度(以下、絶縁回復速度と略す)、単位は pu/s、 $a_0 > 0$ 、 $b_0 < 0$ 。 σ ：再点弧ごとの絶縁回復電圧のばらつきを示す標準偏差。SF₆ ガス中フラッシュオーバー電圧の標準偏差は 5% 程度であり⁽⁸⁾、本論文では 5% を標準とした。 x ：正規乱数(平均が零、分散が 1 なる変量で発生頻度が正規分布)、再点弧ごとに発生。

t ：時間、単位は s、 T_0 ：断路器の開極時間、単位は s。 $t - T_0 \geq 0$ で、(1)、(2) 式が成立する。

なお、 $\eta = (|a_0 + b_0|) \times 100 / |b_0|$ を極性に対する絶縁回復速度の非対称性を表わす量と定義し、非対称率と呼ぶことにする。

(4) 図 3 に示すように再点弧により数百 kHz から数 MHz 程度の高周波サージ電流が流れ、この電流が減衰し、再点弧アークが消滅すると負荷側に電圧が残留することになる。本論文では、簡単のため再点弧と同時にアークが消滅し、負荷側に再点弧瞬時の電源電圧が残留するものとした。この仮定は高周波サージ電流の期間が数十 μ s と短いので妥当と考えられる。

(5) 再点弧後、負荷側に残る電圧の減衰は実質的に無いものとした。ガス絶縁母線の放電時定数は実例によると 10 時間程度もあり⁽⁹⁾、断路器の再点弧間隔 20 ms 以下での減衰は 10^{-5} pu 以下となり、無視できるほど小さい。

(6) 図3に示したような再点弧時のサージ電圧は次式で与えた⁽⁴⁾。

$$V_s = K(E_s - E_l) + E_l \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 V_s : 再点弧サージ電圧 (以下、サージ電圧と略す)、単位は pu。 E_s : 再点弧時の電源側電圧、単位は pu。 E_l : 再点弧時の負荷側電圧、単位は pu。 K : $E_s=1.0$ pu, $E_l=0$ pu の条件で再点弧した場合のサージ電圧倍数 (以下、過電圧係数と略す)、 $E_s=1.0$ pu, $E_l=-1.0$ pu でのガス絶縁変電所におけるサージ電圧が高くて 2.5 pu という予測⁽²⁾ から $K=1.75$ とした。

なお、計算結果におけるサージ電圧は1回の進み小電流遮断過程において発生する多数のサージ電圧の内の最大値を抽出している。

(7) 断路器の開極位相 (間極時間から電気角に変換) が電源電圧の1サイクルにわたり平等に分布するようにし、計算の試行回数 N は100回を標準とした。

(8) 電源電圧の周波数は 50 Hz とした。

〈2.3〉 遮断過程の計算 断路器の進み小電流遮断過程の計算は図3に示した再点弧ごとの電圧、時間を求めることになる。即ち、次式を解くことになる。

$$V(t) - \{\sin(\omega t + \varphi) - V_{n-1}\} \leq \varepsilon \dots \dots (4)$$

$$V_n = V(t) \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $V(t)$: 絶縁回復電圧、(1)式の V_+ (t) または (2) 式の $V_-(t)$ 。 V_{n-1} : 再点弧 $n-1$ 回目の負荷側電圧。 V_n : 再点弧 n 回目の負荷側電圧。 n : 再点弧順番。 ω : $2\pi f$, f は電源電圧周波数。 φ : 電源電圧の位相。

(4), (5) 式は数値解で求めることにした。 $\varepsilon=10^{-5}$ pu であり、実用的に十分小さいものと考えられる。

図5に計算のフローチャートを示す。それぞれの計算は〈2.2〉節および(4), (5)式に従って行なった。

3. 遮断過程と諸因子との関係

〈3.1〉 開極位相および試行回数との関係 図6に断路器の開極位相とサージ電圧の関係例を示す。サージ電圧および図示しないが、残留電圧、アーク時間は開極位相により複雑に変化している。ここで、アーク時間は開極開始から最終再点弧までの時間である。結局、極間絶縁の回復速度、非対称性などの諸因子とサージ電圧、残留電圧などの関係を求める場合、電源電圧の1サイクルを等分割し、開極位相を変える必要がある。

等分割する数、即ち試行回数は多い方が良いが、いくらにすれば十分であるか調べておけば便利であろう。

図7に試行回数とサージ電圧との関係を示す。サージ電圧の平均値だけでなく、最大値も重要であり、統計的な評価を行なうには少なくとも100回程度の試行回数が必要であることが明らかである。

〈3.2〉 絶縁回復速度との関係

(1) サージ電圧 図8に絶縁回復速度とサージ電圧との関係、図9に計算波形例を示す。

図5 計算のフローチャート

Fig. 5. Flow chart of calculation.

図6 開極位相とサージ電圧との関係

Fig. 6. Relation between opening phase angle and restriking overvoltage.

図 7 開極試行回数とサージ電圧との関係
Fig. 7. Relation between opening trial number and restriking overvoltage.

図 8 絶縁回復速度とサージ電圧との関係
Fig. 8. Relation between insulation recovery voltage speed and restriking overvoltage.

絶縁回復速度が対称な場合、サージ電圧の平均値は絶縁回復速度が早くなるとやや低下しているが、その最大値はほとんど差がない。一方、絶縁回復速度が20%非対称な場合、サージ電圧の平均値は絶縁回復速度によりほとんど差がないが、その最大値は2 pu/sから20 pu/sに早くなると2.05 puから2.42 puに約18%高くなっている。

サージ電圧の最大値2.42 puはサージ電圧の極限值2.5 pu [(3)式において、 $K=1.75$, $E_s=1.0$ pu, $E_t=-1.0$ puを代入した場合の V_s]の約97%に達している。図10にサージ電圧の累積頻度分布例を正規確率紙で示す。電圧の高い領域で極限值2.5 puに近づくような極限分布を示す傾向がある。

図8から分るように、サージ電圧のばらつきは絶縁回復速度が早くなるに従い大きくなっている。この関係は、表1のサージ電圧の標準偏差からも明らかである。

(a) 絶縁回復電圧特性

(b) 電圧波形

図 9 計算波形例

Fig. 9. Example of calculation wave form.

図 10 サージ電圧の累積頻度分布例

Fig. 10. Example of cumulative frequency distribution of restriking overvoltage.

図9(b)の波形例に見られるように、サージ電圧の最大は最終の再点弧で発生するとは限らない。

サージ電圧を低くするという観点では、絶縁回復速度が非対称な場合、絶縁回復速度を遅くする方が幾分有利であり、対称な場合、絶縁回復速度に対する有意差が見られない。

表 1 サージ電圧、残留電圧、アークの時間の標準偏差

Table 1. Standard deviation of restriking overvoltage, trapped charge voltage and arc duration time $\sigma=5\%$, $N=100$.

絶縁回復速度		標準偏差		
a_0 (pu/s)	b_0 (pu/s)	サージ電圧 (%)	残留電圧 (%)	アーク時間 (%)
2.0	- 2.0	9.9	80.5	18.9
2.4	- 2.0	6.4	56.5	6.9
4.0	- 4.0	10.5	62.6	18.6
4.8	- 4.0	7.3	63.8	8.7
10.0	-10.0	12.2	72.5	21.3
12.0	-10.0	10.1	42.5	13.2
20.0	-20.0	17.7	60.0	22.8
24.0	-20.0	19.6	55.3	24.3

なお、図 8 に 500 kV 級断路器の進み小電流遮断試験で得られたデータを併記した。このデータは図 4 のような実測波形から再点弧時の電源側電圧、負荷側電圧を読みとり、 $K=1.75$ とおき、(3) 式により算出した値である。試行回数は 20 回、非対称率は約 10% である。実測の平均値は計算のそれより 0.2 pu 程度大きい。この差は試験に供した断路器の絶縁回復特性が全ての領域で時間の正比例関数でないこと、試験における開極位相の片寄り、試行回数の不足などによるものと考えられる。最大値は実測、計算の両方で大体同じである。以上の結果、本論文のような計算によりサージ電圧をある程度の精度で予測できると考えられる。

(2) 残留電圧 図 11 に絶縁回復速度と残留電圧との関係を示す。絶縁回復速度が対称な場合 2 pu/s から 20 pu/s に早くなると残留電圧の平均値は 0.3 pu から 0.45 pu に高くなり、その最大値は極限値 1.0 pu

図 11 絶縁回復速度と残留電圧との関係

Fig. 11. Relation between insulation recovery voltage speed and trapped charge voltage.

に近い。一方、20% 非対称な場合、絶縁回復速度が早くなると残留電圧の平均値、最大値とも高くなる傾向を示しており、20 pu/s では対称な場合とほぼ同じ値になっている。即ち、この傾向は Boggs 氏が報告した結果⁷⁾と同じである。

残留電圧の最小値は、いずれの条件でも 0.01 pu 以下である。また、残留電圧のばらつきは表 1 の標準偏差にも示すように非常に大きい。

なお、図示していないが絶縁回復速度が非対称で、かつそのばらつきが無い場合、残留電圧の極性は片側だけになる。 $|a_0| > |b_0|$ であれば負極性になる。

図 11 に 500 kV 級断路器の試験で得られたデータを併記した。実測の平均値、最小値は計算のそれらよりも約 0.1, 0.15 pu 高い。この差は前述のような理由によるものと考えられる。実測の最大値は約 1.0 pu に達し、計算値とほぼ等しい。この結果によっても本論文の計算がある程度の精度で使えると考えられる。

(3) アーク時間 図 12 に絶縁回復速度とアーク時間の関係を示す。当然予想されることであるが、絶縁回復速度が早くなるに従い、アーク時間は短くなり、両者の積がおおむね一定になる傾向がある。絶縁回復速度 a_0 とアーク時間の積は 1.2~1.6 pu の範囲内にある。即ち、ほぼ同じ極間長で再点弧アークが消滅することを意味している。アーク時間の平均値は絶縁回復速度が対称な場合よりも非対称な場合において短く、そのばらつきは表 1 の標準偏差でも明らかのように、絶縁回復速度が早くなるに従い大きくなっている。

アーク時間の最大値と最小値を図 13 を参照して導出してみる。最大値は残留電圧が高くなるケースであり、片極性の絶縁回復電圧が 2.0 pu を越える時間である。一方、最小値は残留電圧が低くなるケースであ

図 12 絶縁回復速度とアーク時間の関係

Fig. 12. Relation between insulation recovery voltage speed and arc duration time.

図 13 アーク時間の最大値と最小値を求める概念図

Fig. 13. Concept to obtain maximum and minimum arc duration times.

り、両極性の絶縁回復電圧の和が 2.0 pu を越える時間である。これらは次式で与えられる。

$$t_{\max} = 2/a_0 - 1/(2 \cdot f) \quad (6)$$

$$t_{\min} = t_0 - \theta/(360 \cdot f) \quad (7)$$

ここで、

$$t_0 = \{2 - a_0/(2 \cdot f)\} / (a_0 - b_0)$$

$$\theta = 90^\circ - \sin^{-1}(1 + b_0 \cdot t_0)$$

$t_{\max}, t_{\min}$: アーク時間の最大値, 最小値

(6), (7) 式は絶縁回復電圧にばらつきが無い条件で導出しているが、図 12 に示すようにばらつきを示す標準偏差が SF₆ ガス中フラッシュ過電圧のそれにほぼ等しい 5% でのアーク時間と大体合っている。従って、(6), (7) 式によってアーク時間の目安が得られる。

図 12 に併記したように、500 kV 級断路器の試験で得られた実測値は計算値と比較的合っている。従って、本論文の計算により、アーク時間もある程度の精度で予測できるようである。

〈3・3〉 絶縁回復速度の非対称性との関係

(1) サージ電圧 図 14 に絶縁回復速度の非対称率とサージ電圧との関係を示す。サージ電圧の平均値は非対称率により余り変らない。一方、最大値は絶縁回復速度によって傾向が異なり、2 pu/s では非対称率が 0% から 40% になると約 13% 低下し、20 pu/s ではほとんど差がない。

従って、サージ電圧の最大値をなるべく低減しようとするために非対称性を大きくする手段は絶縁回復速度が 2 pu/s 程度に遅い場合においてのみ有効である。

(2) 残留電圧 図 15 に絶縁回復速度の非対称率と残留電圧との関係を示す。この関係は図 14 のサージ電圧での関係に類似している。絶縁回復速度が 20 pu/s の場合、残留電圧は非対称率により余り変らない。2 pu/s の場合、非対称率が 10% 以上になると残留電圧の平均値、最大値は対称における値の約 50%, 60% に低下している。この傾向は Boggs 氏の報

図 14 絶縁回復電圧の非対称率とサージ電圧との関係

Fig. 14. Relation between polarity asymmetric factor of insulation recovery voltage and restriking overvoltage.

図 15 絶縁回復電圧の非対称率とアーク時間との関係

Fig. 15. Relation between polarity asymmetric factor of insulation recovery voltage and trapped charge voltage.

告⁷⁾と同じ傾向を示している。

〈3・4〉 絶縁回復電圧のばらつきとの関係

(1) サージ電圧 図 16 に絶縁回復電圧の標準偏差とサージ電圧との関係を示す。サージ電圧の平均値は標準偏差が 5% から 30% に大きくなるとやや低下しており、その最大値は絶縁回復速度が 2 pu/s の場合、約 11% 高くなり、20 pu/s の場合、約 9% 低下している。サージ電圧の最大値は標準偏差が大きくなると絶縁回復速度に依存せず、ある値に近づく傾向を示している。

再点弧アークによる残留イオン、可動子や固定子の表面状態変化あるいは気流などにより絶縁回復電圧のばらつきが大きくなれば、絶縁回復速度を遅くしてサ

図 16 絶縁回復電圧の標準偏差とサージ電圧との関係

Fig. 16. Relation between standard deviation of insulation recovery voltage and restriking overvoltage.

図 17 絶縁回復電圧の標準偏差と残留電圧との関係

Fig. 17. Relation between standard deviation of insulation recovery voltage and trapped charge voltage.

表 2 進み小電流さい断有無が遮断特性に及ぼす影響

Table 2. Effect of charging current chopping on the interruption characteristics.

		零点遮断	同時遮断
サージ電圧 (pu)	最大値	2.42	2.44
	平均値	1.69	1.71
	最小値	0.98	0.99
残留電圧 (pu)	最大値	0.98	0.98
	平均値	0.45	0.46
	最小値	0.006	0.008
アーク時間 (ms)	最大値	91.3	92.0
	平均値	59.0	60.1
	最小値	34.9	35.1

試行回数: 100

絶縁回復特性: $a_0 = 24 \text{ pu/s}$, $b_0 = -20 \text{ pu/s}$, $\sigma = 5\%$, $\eta = 20\%$

零点遮断: 開極後最初の進み小電流零点で遮断開始

同時遮断: 開極と同時に遮断開始

ージ電圧を低減しようとする効果が薄れてくると予測される。

(2) 残留電圧 図 17 に絶縁回復電圧の標準偏差と残留電圧との関係を示す。絶縁回復速度が 20 pu/s の場合、残留電圧は標準偏差により余り変らないが、 2 pu/s の場合、特に残留電圧の最大値は標準偏差が大きくなると高くなり、標準偏差 30% で 0.8 pu 近くにも達するので注意を要する。

〈3・5〉 進み小電流さい断による影響 表 2 に断路器開極と同時に進み小電流がさい断する場合と、前述のように、零点で遮断する場合の結果を比較して示す。多少の差はあるが、結果的に両者は良く合っている。個々の条件に対する結果は異なるが、100 回の試行回数の結果を統計的に評価すると両者は接近してくる。

4. アーク時間、残留電圧、サージ電圧の相互関係

(1) アーク時間と残留電圧との関係 図 18 に残留電圧が大幅に変化するケースでのアーク時間との関係例を示す。ここで、試行回数は 25 である。ばらつきが大きい、アーク時間が長くなると残留電圧は高くなる傾向がある。この相関係数は 0.933 であり、一次相関に近い。この結果は、〈3・2〉節(3)で述べたアーク時間の導出過程からも理解できる。

(2) 残留電圧とサージ電圧との関係 図 19 に示すように、残留電圧が高くなるに従いサージ電圧は高くなる傾向を示している。この相関係数は 0.846 である。

以上のように、アーク時間、残留電圧、サージ電圧の 3 者の間に比較的強い相関関係がある。従って、図

図 18 アーク時間と残留電圧との関係

Fig. 18. Relation between arc duration time and trapped charge voltage.

図 19 残留電圧とサージ電圧との関係

Fig. 19. Relation between trapped charge voltage and restriking overvoltage.

18, 19 の関係を計算により求めておけば、アーク時間あるいは残留電圧の測定からサージ電圧をある程度の精度で算定することが可能であろう。

5. む す び

本論文はガス断路器の進み小電流遮断過程を計算によりシミュレートし、極間絶縁の回復速度、極性に対する非対称性などの諸因子と再点弧サージ電圧、残留電圧およびアーク時間との関係を明らかにした。その結果、次のような結論が得られた。

(1) 遮断過程で最も重要な再点弧サージ電圧は、断路器の開極位相ばかりでなく、極間絶縁の回復速度、非対称性およびばらつきによって変化する。その最大値は絶縁回復速度が遅くなり、かつ非対称性が大きくなるとやや低下するが、このような条件でも絶縁回復電圧のばらつきが大きくなると高くなる傾向を示した。

絶縁回復速度が早い、あるいは対称な場合、その

最大値は極限値の 90~97% に達した。

(2) 極間絶縁の回復電圧に関する条件が同一で、開極位相だけが変わる場合、再点弧サージ電圧、残留電圧、アーク時間の間には互いに大きくなる相関関係がみられた。

(3) アーク時間の最大値、最小値を概算する(6)(7)式を導いた。

(4) 再点弧サージ電圧、残留電圧およびアーク時間の統計的な値を把握するには電源電圧の 1 サイクル間を平等に、少なくとも 100 分割し、断路器の開極位相として与えて解析することが好ましい。

終わりに、本研究に当り御指導、御鞭撻いただいた(株)日立製作所国分工場 中野副工場長、日立研究所第 2 部部長 吉岡博士に感謝の意を表する次第である。

(昭和 59 年 3 月 6 日受付、同 59 年 11 月 26 日再受付)

文 献

- (1) G. Ecklin, et al.: "Overvoltage in GIS Caused by the Operation of Isolators", *Surges in High Voltage Networks*. Prentice Hall Press N. Y. 115 (1980)
- (2) S. Narimatsu, et al.: "Interrupting Performance of Capacitive Current by Disconnecting Switch for Gas Insulated Switchgear", *IEEE PES*, Paper 81 WM 144-5 (1981)
- (3) S. Nishiwaki, et al.: "Ground Fault by Restriking Surge of SF₆ Gas-Insulated Disconnecting Switch and Its Synthetic Tests", *ibid.*, Paper 82 WM 187-3 (1982)
- (4) O. Bosotti, et al.: "Phenomena Associated with Switching Capacitive Currents by Disconnectors in Metal Enclosed SF₆ Insulated Switchgear", *CIGRE* 13-08 (1982)
- (5) 有働, 他: 「雷, 開閉サージと絶縁協調」電学誌, 102, 11, 987 (昭 57-11)
- (6) N. Itoh, et al.: "Switching Equipments for Disconnecting Switch and Earthing Switch of GIS", *IEEE PES*, Paper 81 WM 143-7 (1981)
- (7) S. A. Boggs, et al.: "Disconnect Switch Induced Transients and Trapped Charge in Gas-Insulated Substations", *IEEE PES*, Paper 82 WM 003-2 (1982)
- (8) 毛受, 他: 「球-球および円軸円筒電極配置における高気圧 SF₆ ガスの絶縁特性」電学論 B, 93, 11, 41 (昭 47-11)
- (9) 山極, 他: 「ガス絶縁断路器の充電電流シミュレーション試験法の考察」昭 58 電気学会全大 No 1176