GIS 内部に混入した金属異物の異物先端電界係数の提案とフラッシュオーバー電圧の予測

正 員 家 安 明 彦 (日新電機)

正 員 湯 本 雅 恵 (武蔵工大)

Proposal of New Electric-field Coefficient at Sharp Tip of Conducting Particle Mingled in GIS and Prediction of Flashover Voltage

Akihiko Ieyasu, Member (Nissin Electric), Motoshige Yumoto, Member (Musashi Institute of Technology)

In many high voltage gas insulated switchgears (GIS), the effects of conducting particles on breaking phenomena are very serious. Some methods have been proposed for flashover voltage prediction in compressed SF₆ under alternating voltage condition, etc. In these methods, the flashover voltage is predicted by integrating an effective ionization coefficient near the tip of conducting particle. However, some assumptions are used to predict the flashover voltage under these methods.

In the present paper, a new method for flashover voltage prediction is proposed of a conducting particle with a sharp tip mingled in GIS. The tip of the particle often has only little corona stabilizing effect. It is the method for determination of new electric-field coefficient and new criterion proposed by the authors, which are named "Particle Tip Electric-field Coefficient" and "Flashover Criterion" respectively. A conducting particle in GIS is predicted to have no trouble, when the particle tip electric-field coefficient of the conducting particle is less than the flashover criterion previously obtained with an experiment. Flashover voltages of GIS including many kinds of conducting particles are determined by means of the proposed method. It can be seen that the proposed method is useful to predict the flashover voltage of GIS including conducting particles larger than 5 mm length.

キーワード：金属異物，フラッシュオーバー電圧，絶縁破壊，SF₆ガス，電界，ガス絶縁開閉装置 (GIS)

1. ま え が き

受変電設備に用いられるガス絶縁開閉装置 (GIS) の内部においては、遮断部や摺動部などがあることにより、金属異物が発生したり、何らかの原因で金属異物が混入したりして、SF₆ガス中の絶縁強度が大幅に低下しフラッシュオーバーに至ることがある。これを防ぐためには、予測保全技術を用いて金属異物を監視し金属異物が検知されたときには、それがフラッシュオーバーの原因になるかどうかを判定する必要がある。また、設

計時においては、あらかじめ金属異物を想定し金属異物があつたとしてもフラッシュオーバーしないように設計することが要求される。金属異物付着時のフラッシュオーバー電圧を予測する手法として、宅間らにより提案された方法⁽¹⁾が広く用いられている。また、近年においては正極性インパルス印加時においてリーダの進展を考慮した定量的モデルを用いる方法⁽²⁾、AC 印加時においてシューマンの条件式をコロナ放電の臨界体積で除する方法⁽³⁾などが提案されている。これらの方法では金属異物先端付近の電離係数や電子付着係数を求め

実効電離係数が0になるまで電離空間を積分しているが、フラッシュオーバーのメカニズムが十分に解明されただけでこれらの値を利用しているわけではない。従って、これらの値の算出過程においていくつかの仮定が必要になる。例えば、コロナ安定化作用が大きい場合は、とがった金属異物の先端部を異物の半径に等しい半球状にして静電界分布を求め実効電離係数を算出する。ところが、ガス圧が高く金属異物先端のコロナ安定化作用がほとんど期待できない場合においては、とがった金属異物の先端部を半球状に近似することはできず、異物先端で電界の特異性（電界が無限大に近くなる点をもつという性質）を生ずる。また、電界が非常に強いところでは電子の状態が平衡状態であることは期待しにくい、このような過渡的な領域においても熱平衡を仮定した物理量を用いるなどがある。

そこで、本研究においては、高ガス圧力域におけるフラッシュオーバー電圧の最小値を予測するために、金属異物先端の電界の特異性を消失させた新しい特性量として、異物先端電界係数とフラッシュオーバークライテリオンの概念を提案する。これらの概念を用いることにより、高ガス圧力域でACを印加した場合において、金属異物が無いときの巨視的電界の値を利用して、GIS内部の導体に金属異物が付着したときのフラッシュオーバー電圧の値をほぼ正しく安全側に予測できることを示す。

2. 異物先端電界係数とフラッシュオーバークライテリオンの提案

金属異物先端付近において、金属異物からの距離を x とすると、コロナ安定化作用がほとんどない場合の

図1 金属異物先端付近の電界分布
Fig. 1. Electric field near tip of conducting particle.

電界分布 $E(x)$ は図1のようになり、金属異物先端において電界の特異性（電界が無限大に近くなる点をもつという性質）を生ずる。これは機械工学における亀裂先端の応力の特異性に類似している。また、金属異物先端付近においてコロナ安定化作用がほとんどないことは、亀裂先端付近において塑性域がほとんどないことに対応する。塑性域をほとんど生じない脆性材料では、線形破壊力学で亀裂先端近傍における応力分布を考慮し、亀裂先端の応力の特異性を消失させた特性量として応力拡大係数を定義して亀裂の進展の有無を判定する手法が広く用いられている⁽⁴⁾。そこで、この考え方を参考にして、金属異物先端近傍における電界分布 $E(x)$ において金属異物先端での電界の特異性を消失させた新しい特性量として $K(x)$ を(1)式のように与えることにする。ここで、 $K(x)$ を $x \rightarrow 0$ に外挿した(2)式の特性量 K を異物先端電界係数と定義する。

$$K(x) = E(x) \cdot x^\lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ : 電界の特異性の指数

$$K = \lim_{x \rightarrow 0} K(x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式において、特異性の指数 λ を適切に選んで、金属異物先端近傍の位置 x に対して $K(x)$ を求めると、図2のように金属異物先端のごく近傍を除いてほぼ直線になることが期待できる。この直線を金属異物先端に外挿することにより、異物先端電界係数 K を求める。金属異物先端の異物先端電界係数が、ある値以上になるとフラッシュオーバーする可能性があるとしてこの臨界値を K_B で表す。フラッシュオーバー電圧 V_B は図3のようにガス圧に依存するが、フラッシュオーバー電圧が極小値 V_{Bmin} になるときの K_B をフラッシュオーバークライテリオンと定義し K_{Bmin} とする。すなわち、

図2 異物先端電界係数の概念
Fig. 2. Concept of particle tip electric-field coefficient.

図 3 フラッシュオーバー電圧のガス圧依存性
Fig. 3. Relationship of breakdown voltage and gaseous pressure.

$K \geq K_{\text{Bmin}}$: 高ガス圧力域においてフラッシュオーバーする可能性がある。

$K < K_{\text{Bmin}}$: 高ガス圧力域においてフラッシュオーバーすることはない。

3. 金属異物先端近傍の電界の特異性

以下のモデルでは電界の特異性は生じないが、金属異物先端近傍での λ の値を求めるために、金属異物を図 4 のように回転楕円体として近似する。その場合、金属異物先端の電界分布は (3) 式のような⁽⁵⁾。

$$E(Z) = E_0 \left\{ 1 - \frac{\ln \frac{Z+C}{Z-C} - \frac{2CZ}{Z^2-C^2}}{\ln \frac{L+C}{L-C} - \frac{2C}{L}} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} C = \sqrt{L(L-r_p)} \\ Z = L+x \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E_0 : 金属異物がないときの巨視的電界、 L : 金属異物の長さ、 r_p : 金属異物先端の半径、 x : 金属異物先端からの距離、 Z : 導体表面からの距離

金属異物先端の半径 r_p が十分に小さく、コロナ安定化作用がほとんどない場合の金属異物先端の電界の特異性について検討する。金属異物先端近傍に着目して $E(Z) \gg E_0$ とし、 $Z = L+x$ であることを考慮すると

$$E(x) = \frac{E_0}{\ln \frac{L+C}{L-C} - \frac{2C}{L}} \times \left[\frac{2C(L+x)}{(L+x)^2 - C^2} - \ln \frac{L+x+C}{L+x-C} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $E(x) = Af(x)$ とおくと、

図 4 回転楕円体近似の金属異物
Fig. 4. Conducting particle approximately represented prolate spheroid.

$$\left. \begin{array}{l} A = \frac{E_0}{\ln \frac{L+C}{L-C} - \frac{2C}{L}} \\ f(x) = \frac{2C(L+x)}{(L+x)^2 - C^2} - \ln \frac{L+x+C}{L+x-C} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

金属異物先端半径 r_p は十分に小さいとし、 $C \approx L$ とすると、

$$f(x) \approx \frac{2L(L+x)}{x^2 + 2Lx} - \ln \frac{x+2L}{x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$x \ll L$ とすると、

$$f(x) \approx (L/x) - \ln(2L/x) \quad \dots\dots\dots (7)$$

金属異物先端のごく近傍では、 x は十分小さいから

$$L/x \gg \ln(2L/x) \quad \dots\dots\dots (8)$$

従って、

$$f(x) \approx L/x \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上のことより、金属異物先端半径 r_p が十分に小さく、コロナ安定化作用がほとんどないときには、金属異物先端近傍の電界 $E(x)$ はほぼ x^{-1} に比例し、(1)式における電界の特異性の指数 λ を 1 とすればよい。

4. 金属異物先端半径の検討

ガス圧力が 0.5 MPa 以上でコロナ安定化作用がほとんどない領域においては、金属異物先端の電離空間の大きさは非常に小さいと考えられる。境界要素法や電荷重畳法などの数値計算により金属異物先端の電界分布を求める場合には、電離空間を無視した先端がとがった形状のモデルに置き換えて電界解析を行うことができる。しかし、(3)式を用いる場合には電離空間の大きさに何らかの値の仮定が必要になるので、その大きさの限界を与える目安について検討する。図 5 に

図 5 電離空間の範囲
Fig. 5. Sphere of ionization space.

図 6 電離空間の半径
Fig. 6. Radius of ionization space.

において金属異物先端半径 r_p が 10^{-6} mm における金属異物先端近傍の電界分布を、金属異物を回転楕円体で近似して計算する。電界値が大きいところでは、電離係数 α 、電子付着係数 η はともに求まらないのでその範囲を除外し、電界値が比較的小さくなった位置において α と η を算出する。電子の状態が平衡状態の場合には、実効電離係数 $\alpha_{\text{eff}} (= \alpha - \eta)$ が 0 になる位置、すなわち、 $E(x)/P \approx 115$ ($V_{\text{peak}}/\text{cm} \cdot \text{Torr}$)⁽⁶⁾ になる位置までが、負イオン SF_6^- や電子 e の存在する電離空間と考えられる。そこで、この位置をガス圧力と金属異物の長さを変化させ、Cookson らのフラッシュオーバー電圧の実測値⁽⁷⁾ を利用して計算したものを図 6 に示す。これより、0.5 MPa 以上のガス圧力の高い領域で、平衡状態を仮定して計算した、フラッシュオーバー時の金属異物先端の電離空間の半径は 0.2~0.7 μm 程度である。この値が (3) 式を用いるための r_p の大きさの上限を与える目安 $\tilde{r}_p$ になる。

5. 異物先端電界係数算出時の外挿方法

異物先端電界係数 K の算出時においては、図 2 の $K(x)$ を $x \rightarrow 0$ に外挿するが、この場合に選択する金属異物先端位置から最も近い点までの距離（第一選点

図 7 第一選点までの距離
Fig. 7. Distance to first selective point.

図 8 異物先端電界係数と第一選点までの距離の関係
Fig. 8. Relationship between particle tip electric-field coefficient and distance to first selective point.

までの距離と呼ぶことにする) δx に関して制約条件が必要になる。図 7 において先端より δx とその近傍の点、仮に $5\delta x$ を選定し、それらの二点における $K(x)$ の値を用いて異物先端電界係数 K を (10) 式で計算する。

$$K = K_{x=5\delta x} - \frac{5}{4}(K_{x=5\delta x} - K_{x=\delta x}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$\tilde{r}_p$ が 10^{-3} mm および 10^{-4} mm の場合について、金属異物の長さ l をパラメータとし、第一選点までの距離 δx を変えて異物先端電界係数 K を計算した結果を図 8 に示す。これらの結果により、第 1 選定までの距離 δx については (11) 式のような制約条件を与えればよいことがわかる。

$$\delta x > 10 \tilde{r}_p \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、図 8 より $5\delta x$ 点のかわりに $3\delta x$ 点や $8\delta x$ 点などを選んでも図 2 の直線 $K(x)$ は同一になり得られる K 値も同一である。

6. フラッシュオーバークライテリオン の算出

図9のような平行平板電極に、図10のような径が太くて先端がとがった針形状の金属異物が付着したものにAC電圧を印加したCooksonらの実験データ⁽⁷⁾を用いて、金属異物のフラッシュオーバークライテリオン K_{Bmin} を算出する。AC印加時におけるフラッシュオーバー電圧 V_B の実測値より、これを金属異物がないとしたときの巨視的電界 E_{OB} に換算し、フラッシュオーバーの臨界値 K_B を(12)式にて計算する。

$$\left. \begin{aligned} K_B(x) &= E_B(x)x^{\lambda} \\ K_B &= \lim_{x \rightarrow 0} K_B(x) \\ E_B(x) &= \\ E_{OB} \left\{ 1 - \frac{\ln \frac{L+x+C}{L+x-C} - \frac{2C(L+x)}{(L+x)^2 - C^2}}{\ln \frac{L+C}{L-C} - \frac{2C}{L}} \right\} \\ C &= \sqrt{L(L - \tilde{r}_p)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$\tilde{r}_p$ が 10^{-3} mm と 10^{-4} mm、電界の特異性の指数 λ が1の場合において、ガス圧を変化させて、フラッシュオーバーの臨界値 K_B を計算したものを図11に示す。それぞれの長さの金属異物において、ガス圧を変化させて K_B の極小値を求めると、その値は金属異物の

図9 金属異物が付着した平行平板電極
Fig.9. Parallel plane electrode with conducting particle.

図10 針形状の金属異物
Fig.10. Conducting particle using steel needle.

長さにはほぼ無関係な一定値が得られる。この値をフラッシュオーバークライテリオン K_{Bmin} として用いることにする。 $\tilde{r}_p$ が 10^{-3} mm において K_{Bmin} は $2.6(\text{kV}_{\text{peak}}/\text{mm} \cdot \text{mm})$ 、同様の方法で $\tilde{r}_p$ が 10^{-4} mm において K_{Bmin} は $2.3(\text{kV}_{\text{peak}}/\text{mm} \cdot \text{mm})$ になる。

7. フラッシュオーバー電圧の予測への適用

図12のような相分離GISの導体に金属異物が付着した場合や、容器内に金属異物が浮遊している場合について、高ガス圧力域でコロナ安定化作用がほとんどない状態における金属異物付着時のフラッシュオーバー電圧を、提案手法を用いて予測することを試みる。導体に金属異物が付着していないときの巨視的電界 E_0 は、(13)式より求まる。

図11 フラッシュオーバークライテリオン K_{Bmin}
Fig.11. Flashover criterion K_{Bmin} .

$$E_0 = \frac{V_0}{r \ln(R/r)} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 r ：導体の半径、 R ：容器の半径、 V_0 ：印加電圧

AC 印加時において、供試器の寸法、金属異物の材質や直径などが異なるいろいろな場合について(1)式

図 12 相分離 GIS
Fig. 12. Single phase GIS.

を用いて異物先端電界係数 K の値を計算し、それが第 6 章で求めたフラッシュオーバークライテリオン K_{bmin} に等しくなったときにフラッシュオーバーする可能性があるとしてフラッシュオーバー電圧を予測する。それらの予測値と文献(7)～(10)より引用した実測値を合わせて表 1 に示す。これらの実測結果においてフラッシュオーバーはすべて正極性で生じている。金属異物の長さが短い場合には電極が近くにあるために異物先端近傍の電界分布は、異物先端のみの条件では決まらない。すなわち、(7)式が成立しないのでフラッシュオーバー電圧の予測値と実測値が合っていないが金属異物の長さが 5 mm 以上においては、ケース 5 のフリーパーティクルの場合を除いてほぼ 20% 以内の誤差範囲で安全側の値が予測されている。ケース 5 においてフラッシュオーバー電圧の予測値が実測値よりかなり低く得られているが、これは導体径が小さく管路と導体間の距離が大きいので、フリーな金属異物が導体表面にまで浮上していないことによると考えられる。また、 $\bar{r}_p$ の仮定によるフラッシュオーバー電圧の予測値の差異は、フラッシュ

表 1 フラッシュオーバー電圧の予測結果
Table 1. Estimation of breakdown voltage.

ケース	印加電圧 波形	ガス 圧 (MPa)	供試器の寸法		金 属 異 物 の 条 件				フラッシュオーバー 電圧の予測値 kV _{rms}				フラッシュオーバー 電圧の実測値 kV _{rms}	フラッシュオーバー電圧の 実測値の引用文献
			容器の 直径 (mm)	導体の 直径 (mm)	材質	直径 (mm)	状 態	長さ (mm)	$\bar{r}_p$ (mm)					
									10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶			
1	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	254	76.2	ステン レス鋼	1.5875	導体に付着	3.175	211	232	222	217	(7)	
								6.35	115	124	116	123		
2	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	254	76.2	銅	0.432	導体に付着	3.175	211	232	222	167		
								6.35	115	124	116	125		
								12.7	62	66	60	83		
3	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	250	150	銅	0.4	自由	3.2	176	192	184	141		(8)
								6.4	96	103	97	94		
								12.7	52	55	51	52		
4	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	250	150	銅	0.1	自由	3.2	176	192	184	142		
								6.4	96	103	97	78		
								12.7	52	55	51	69		
5	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	250	75	銅	0.4	自由	3.2	206	228	218	320		
								6.4	113	121	114	223		
								12.7	61	65	59	139		
6	AC	フラッシュオーバー電圧が 極小になるガス圧	150	50	—	0.45	導体に付着	5.0	117	108	117	140	(9)	
7	AC	0.6	190	70	アルミ ニウム	0.45	導体に付着	6.4	87	93	88	114	(10)	
8	AC	0.6	190	70	アルミ ニウム	0.45	導体から 0.1mm 離れた位置	6.4	87	93	88	110		

オーバクライテリオン K_{Bmin} を求めるときとフラッシュオーバー電圧を予測するときとで $1\mu\text{m}$ 以下の同じ $\bar{r}_p$ の値を用いておけば金属異物そのものの先端半径には無関係に 10% 以内であることがわかる。 $\bar{r}_p$ が $0.001\mu\text{m}$ においても予測値にほとんど差異は生じていない。従って、特に電離領域の内部を考慮しなくても予測値にあまり影響を生じないと判断できる。

以上のことより、 0.5MPa 以上の高ガス圧力域で AC を印加した場合において、金属異物の長さが 5mm 以上であれば提案手法を用いてほぼ妥当で安全側のフラッシュオーバー電圧の最小値を予測できることが示された。また、本手法を実際の問題に適用する場合には、 $\bar{r}_p$ は $1\mu\text{m}$ 以下の任意の値を用いておけばよいことがわかった。ほかの印加電圧波形についても、フラッシュオーバクライテリオン K_{Bmin} を求める実験をそれぞれの電圧波形について行っておけば、同様の方法で提案手法を適用できると考えられる。

8. む す び

0.5MPa 以上の高ガス圧力域における金属異物付着時のフラッシュオーバー電圧の最小値を予測するために、金属異物先端近傍における電界分布を考慮し、金属異物先端の電界の特異性を消失させた新しい特性量として異物先端電界係数とフラッシュオーバクライテリオンの概念を提案し、金属異物がないときの巨視的電界の値を利用して GIS 内部の導体に金属異物が付着したときのフラッシュオーバー電圧の値を予測する手法を提案した。以下に、その要点をまとめる。

(1) フラッシュオーバーの臨界値 K_B は、平行平板電極に金属異物を付着させ、それぞれの長さの金属異物において、 0.5MPa 以上でガス圧を変化させてその最小値を求めると、その値は金属異物の長さにほぼ無関係な一定値が得られる。この最小値を金属異物の長さに共通のフラッシュオーバクライテリオン K_{Bmin} にできる。

(2) 0.5MPa 以上のガス圧力域において金属異物先端の電離空間の大きさの目安は、半径で $0.2\sim 0.7\mu\text{m}$ 程度である。 $\bar{r}_p$ については、フラッシュオーバクライテリオン K_{Bmin} を求めるときとフラッシュオーバー電圧を予測するときに $1\mu\text{m}$ 以下の同じ値を用いれば、フラッシュオーバー電圧の予測値にあまり影響を及ぼさない。

(3) 高ガス圧力域で AC を印加した場合において、平行平板電極に径が太くて先端がとがった針形状の金属異物が付着したときの実測データよりフラッシュオーバクライテリオン K_{Bmin} を求めておけば、長さが

5mm 以上のいろいろな金属異物に対して、金属異物がないときの巨視的電界の値を利用して、GIS 内部の導体に金属異物が付着したときのフラッシュオーバー電圧の最小値 V_{Bmin} をほぼ正しくかつ安全側に予測できる。
(平成 4 年 8 月 20 日受付)

文 献

- (1) T. Takuma, T. Watanabe & T. Kawamoto: "Second Limiting Field Strength in SF_6 Gas Discharge-Quantitative Estimation of Effect of Electrode Surface Roughness on Breakdown", Proc. International Symposium on Gaseous Dielectrics, 190 (1978)
- (2) N. Wiegart, L. Niemeyer, F. Pinnekamp, et. al: "Inhomogeneous Field Breakdown in GIS-The Prediction of Breakdown Probabilities and Voltages", *IEEE Trans. Power Delivery*, 3, No. 3, 923 (1988)
- (3) 松本・青柳・大久保・小林・柳父: 「GIS に混入した金属異物の挙動解析と絶縁破壊の理論的検討(交流電圧)」, 電学論 B, 108, 173 (昭 63-4)
- (4) 小林・荒居・中村・小出・梶山・家安: 「アルミナ粒子分散エポキシ樹脂の破壊力学的特性の評価」, 機械学論 A, 54 No. 499, 461 (昭 63-3)
- (5) F. Endo, T. Yamagiwa, T. Ishikawa & M. Hosokawa: "Particle-initiated Breakdown Characteristics and Reliability Improvement in SF_6 Gas Insulation", *IEEE Trans. Power Delivery*, PWRD-1, No. 1, 58 (1986)
- (6) 堺: 放電現象演習 (昭 60) 朝倉書店
- (7) A. H. Cookson, O. Farish & G. M. L. Sommerman: "Effect of Conducting Particles on AC Corona and Breakdown in Compressed SF_6 ", IEEE/PES Summer Meeting, Portland, No. 71-TP-508-PWR (1971)
- (8) A. H. Cookson & O. Farish: "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF_6 ", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-92, 871 (1973)
- (9) 遠藤・山極・石川: 「金属パーティクル存在時の SF_6 ガス絶縁耐力」, 昭 60 電気学会全大, No. 1253
- (10) M. M. Morcos, K. D. srivastaba & H. Anis: "An Approach to Breakdown Probability Calculations for Particle Contaminated GITL Systems", Conf. Record of 1984 Inter. Sympo. on Electrical Insulation, Montreal, 159 (1984)

家安明彦 (正員)

昭和 27 年 11 月 9 日生。53 年 3 月京都大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年 4 月日新電機(株)入社。現在、同社第 2 電力機器事業本部開発部課長。

湯本雅恵 (正員)

昭和 25 年 1 月 17 日生。53 年 3 月武蔵工業大学大学院後期博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手、60 年 4 月同助教授となり、現在に至る。工学博士。主として、沿面の光物性と放電現象に関する研究、低気圧中の放電に関する研究に従事。IEEE 会員。