UDC 621.316.57.064.242
621.315.618.9:546.226.166-1

論文

56-B69

SF₆ ガスしゃ断器の二点切りしゃ断特性と その確率的考察

正員 中川 聡子 (横浜国大)

正員 中西 邦雄 (横浜国大)

1. 緒 言

電力系統におけるしゃ断現象を解析する場合、アークモデルと系統の回路モデルとを結び付けてシミュレーションを行なう。しかし実際のしゃ断特性は、アークパラメータや回路条件さえ与えられれば決定されるというものではなく、しゃ断器の動作時における特性のばらつきや、動作中の特性の変動によって変化するものである。そのため、確率的な考察が必要となってくる。

特に、超高压用しゃ断器に広く生いられている多重切りでは、しゃ断性能の検証に、しゃ断部1個だけを用いるユニット試験を実施することが多く、単位しゃ断と、多重切り構造全体としてのしゃ断性能の間の関係を明確にすることが肝要である。

また、全点試験の方がユニット試験よりしゃ断成功率が高いことは実験的に報告されている⁽¹⁾。

本論文では、多重切りの一番簡単な場合に相当する二点切りしゃ断に対してアーク特性のばらつきや変動を仮定し、しゃ断電流に対するしゃ断失敗率を計算し一点切りのそれと比較している。

計算に際しては、Swanson 氏らによって研究されたモデルに若干の修正を加えた熱的アークモデル⁽²⁾を用いている。このモデルは、実際の SF₆ ガスの導電率の温度特性を考慮しているため、SF₆ ガスしゃ断器の特性をよく表現しているものである。

2. 計算回路とアークモデル

近距離線路故障(SLF)計算回路は、しゃ断条件が過酷となるため、電力系統の過渡解析上重要となる。図1(a)、(b)は、SLF 回路条件における一点切りと二

(a) SLF 計算回路(一点切りしゃ断)
(a) Calculated SLF circuit (single break).

(b) SLF 計算回路(二点切りしゃ断)
(b) Calculated SLF circuit (double break).

図1 計算回路

Fig. 1. Calculated circuit

点切りの計算回路で、計算条件および記号説明は表1のようである。本論文で生いられるしゃ断アークの熱的アークモデルは、以下に示すようなものである。二点切りについても、各々のしゃ断点についてこれらのモデルを独立に用いることとする。

(a) アーク温度が 6,000 K 以上の場合 この場合、アークは大電流の領域にあり、(1)式のように表すことができる。この式は適当な変形・置き換えの後に、Cassie モデルとして表すことが可能である。

$$\frac{d\bar{s}}{dt} = -\frac{\bar{s}}{\theta} + \frac{\alpha \bar{\lambda}_s^2 R_s^2 i_b^2}{\bar{\lambda}} \dots \dots \dots (1)$$

但し、 $\bar{s}$: アーク弧心熱流ポテンシャル (w/cm), θ : アーク時定数 (s), α : 熱拡散率 (cm²/s), $\bar{\lambda}$: 弧心導電率 (1/Ω·cm), $\bar{\lambda}_s$: $\bar{\lambda}$ の計算開始初期値 (1/Ω·cm), R_s : 単位長アーク抵抗初期値 (Ω/cm)

(b) アーク温度が 6,000 K 以下の場合 この場合アークは小電流の領域にあるため、Mayr 氏のアークモデルを用い、(2)式のように表わす。

Interruption Characteristics of Double Break Type SF₆ Gas Circuit Breakers and their Statistical Considerations. By Toshiko Nakagawa, Member & Kunio Nakanishi, Member (Faculty of Engineering, Yokohama National University).

中川聡子: 正員, 横浜国立大学工学部

中西邦雄: 正員, 横浜国立大学工学部

表 1 回路定数

Table 1. Values of circuits and arc model parameters.

	記 号	単位および用語説明
線路 (無損失分布定数)	L	1.5×10^{-3} H/km
	C	7.41×10^{-9} F/km
	z_0	$=\sqrt{L/C}=450 \Omega$: サージインピーダンス
	v_0	$=1/\sqrt{LC}=3 \times 10^8$ km/s: 光速
	L_l	km: 線路長
系	E_g	$=1.5 \times \sqrt{2} \times 168/\sqrt{3}=207.8$ kV: 波高値
	f_g	$=1/2\pi\sqrt{L_g C_g}=1.38$ kHz: 電源側再起電圧周波数
	L_g	電源側インダクタンス (H)
	C_g	電源側キャパシタンス (F)
	γ	$=1.4$: 電源側再起電圧振幅率
統	R_g	$=-2\sqrt{L_g/C_g}/\pi \ln(\gamma-1)$: 振幅率調整抵抗 (Ω)
	f_0	$=50$ Hz, $\omega_0=2\pi f_0$: 商用周波数
しゃ断器 (一点一点切り)	i_p, i_1, i_2	: アーク電流 (A)
	e, e_1, e_2	: アーク電圧 (V)
	R, R_1, R_2	: アーク抵抗 (Ω)
	l, l_1, l_2	: アーク実効長 (cm)
	C_p, C_{p1}, C_{p2}	: 並列コンデンサ (F)
	R_p, R_{p1}, R_{p2}	: コンデンサの直列抵抗 (Ω)
	K_1, K_{11}, K_{12}	: アーク時定数のパラメータ (s/A)

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\theta} - \frac{e^2}{\theta N} \dots \dots \dots (2)$$

但し, N : アーク損 (w/cm)

ところで消弧能力を判断するため, アーク時定数で評価することが多く, しゃ断を論じるときには不可欠の物理量である。本論文では時定数 θ を (3) 式のように表す。

$$\theta = D_1/\sqrt{P} \times I_e = K_1 I_e \text{ (s)} \dots \dots \dots (3)$$

但し, I_e : しゃ断電流実効値, K_1 : 時定数を定める係数 $K_1 = D_1/\sqrt{P}$, D_1 : 定数, P : ガス圧 (atm)

実際には K_1 は, エネルギー平衡式およびアーク境界層理論から求められる複雑な関数⁽²⁾であるため, 本論文ではガス圧 P も含めた形で, K_1 をアーク時定数のパラメータとして扱う。

このように, アーク時定数 θ を決定する K_1 は, ノズル内圧力 P をも含んだ形のパラメータであるから, 乱流などによるアーク特性の変動を代表しているものとみなされる。ところで, 系統の回路定数が決定されると, アーク時定数を定める各パラメータに対してはしゃ断しうる最大の電流を求めることができる。しゃ断動作中 K_1 に変動がなく, しかも各しゃ断点の K_1

図 2 線路長-しゃ断電流特性

Fig. 2. Limit of breaking current vs line length.

の値にばらつきが存在しない場合のしゃ断特性を図2に示す。この図は, アークコンダクタンスから算出されるアーク温度によって, (1), (2) 式の使い分けを行ない, デジタルシミュレーションしたものである。なお, シミュレーションに際しては, ルンゲクッタ法を用いている。図は横軸に線路長, 縦軸にしゃ断しうる最大の電流 (限界しゃ断電流) をとっており, K_1 の値, アーク長 l , 並列コンデンサ (1しゃ断点あたり 5nF) の有無を, パラメータにして描いたものである。曲線は SLF 特有の, 最小値をもつ凹形である。

ところで図2ではアーク特性の変化を考えていないから, しゃ断点の各特性が等しければ, アーク長 20cm の一点切りしゃ断とアーク長 10cm の二点切りしゃ断では, 限界しゃ断電流は等しくなる。しかし, ここに計算された曲線は, 同一のアーク特性を用いているにもかかわらず曲線 a_1, a_2, a_3 のように異なってくる。これらの曲線は一点切りしゃ断に換算すれば, 並列コンデンサが各々 0, 2.5, 5nF に対応するものである。このように並列コンデンサ C_p, C_{p1}, C_{p2} の値が大きいほどしゃ断電流が大きくとれることがわかり, その様子を2種類の K_1 に対して図3に示す。図はアーク長 10cm, $K_1=0.25 \times 10^{-10}$, および $K_1=0.375 \times 10^{-10}$ なる一点切り限界しゃ断電流と並列コンデンサ C_p の関係を示している。ここで並列コンデンサの影

図 3 並列コンデンサ-しゃ断限界電流特性

Fig. 3. Limit of breaking current vs parallel capacitance.

響により、かなりしゃ断の能力が向上していることがわかる。このような基本特性をふまえた上で、以下の章から、アーク特性のばらつきおよび変動に対し、確率的な考え方をとり入れる。

3. アーク特性の確率的扱いと計算結果

〈3.1〉 アーク特性のばらつきに対する扱い しゃ断点アークには、しゃ断の試行ごとに個々に特性のばらつきが存在するため、同一の回路条件のもとでも、そのしゃ断する最大の電流値は予期される値と必ずしも一致しない。例えば、図2において、90% SLF, $K_{11}=K_{12}=10^{-10}$ 、並列コンデンサ付き二点切り $l_1=l_2=10\text{cm}$ の特性上の点(A点)を考える。この機器のしゃ断する最大の電流は 40.5 kA である。ところが、 K_{11}, K_{12} がある分散 σ をもって動作する場合、決められた値の電流をしゃ断するか否かは予期できなくなる。そこで特性のばらつきに対するしゃ断失敗率を計算するために、あらかじめ、種々のアーク時定数に対してしゃ断限界電流を求めたものを図4に示す。

ここで K_M とは、二しゃ断点共に同一特性 ($K_{11}=K_{12}=K_M, l_1=l_2$) をもつアークを仮定した場合の、限界しゃ断電流- K_1 特性で、見方を変えれば倍のアーク長 ($l=2l_1=2l_2$) をもつ一しゃ断点のしゃ断電流- K_1 特性ともいうことができる。また、 K_0 とは、一しゃ断点の K_1 を無限大、すなわちアーク時定数が無限大 (消弧能力のないしゃ断点) の場合、残りの一しゃ断点での限界しゃ断電流- K_1 特性を表している。つまり、 K_{11} が無限大のときに $K_{12}=K_0$ であるか、 K_{12} が無限大のときに $K_{11}=K_0$ である場合の特性である。次に、この図4から各しゃ断電流ごとの K_M, K_0 の値を用い、二しゃ断点の相互の能力の分担の対称性、および上述の K_{11}, K_{12} を満足する単調関数による表現として、(4)式のような双曲線特性で近似すると図5

Fig. 4. K_1 vs breaking current.

図 5 二点切りしゃ断限界特性

Fig. 5. Breaking current characteristics for double break.

の特性を得る。

$$(K_{11}-K_0)(K_{12}-K_0)=(K_M-K_0)^2 \dots (4)$$

アーク特性のばらつきを時定数を決定するパラメータ K_1 に代表させ、平均値 $\bar{K}_1$ 、分散 σ の正規分布と仮定すれば、各しゃ断電流値に対するしゃ断失敗率は次のように計算される⁽³⁾。

(a) 一点切りの失敗率 図4の特性から(5)式のような積分を、各しゃ断電流値について計算する失敗率50%になる電流値 $\bar{I}$ について $I_a < \bar{I} < I_b$ なる二点おりのしゃ断電流 I_a, I_b 値に対する失敗率 p 概念の念図を図6に示す。一点切りの失敗率を求めるためには、図4中の K_M の曲線上の個々の点だけが関連

図 9 時間に対するアーク時定数の変動例
Fig. 9. Example of deviations of arc time constant.

デジタルシミュレーション時の数ステップごとに、ランダムな変動が加わるようにプログラミングされている。〈3・1〉節で述べたアーク特性のばらつきに対する考え方は、本節で述べたアーク動作中の特性の変動に対する扱いの特別な場合としてとらえることができる。すなわち、アーク動作中、ある周期でランダムに加わる変動が、期間中永続的に加わると考えればよいわけであり、図 9 (c) のような変動の扱いをすればよい。このような考えから、〈3・1〉節で説明したアーク特性のばらつきに対する計算結果と、〈3・2〉節のアーク特性の変動に対する失敗率のしゃ断電流との計算結果をまとめて図 10 に示す。図 10 (a) は、一点切りしゃ断 (アーク長 $l=20\text{cm}$, $K_1=0.25\times 10^{-10}$, $C_p=2.5\text{ nF}$, $R_p=0\Omega$) の失敗率の値を示したもので、〈3・1〉節での計算値は図中「全ステップ同一変動」に対応している。また、時間の変動を与えたときの失敗率は、図中の 1 ステップごとの変動と 30 ステップごとの変動の曲線で表されている、これらは信頼性 95% の区間推定を行なって求められたものである。(b) 図は、二

図 10 シャ断電流 - 失敗率特性 (アーク特性変動に対する計算)

Fig. 10. Breaking current vs failure rate (calculation for deviation of arc characteristics).

点切りしゃ断 (アーク長 $l_1=l_2=10\text{cm}$, $K_1=0.25\times 10^{-10}$, $C_{p1}=C_{p2}=5\text{ nF}$, $R_{p1}=R_{p2}=0\Omega$) の失敗率を (a) 図の場合と同様に描いたものである。この場合、各しゃ断部の変動は独立に与えている。(a), (b) 図により、一点切りしゃ断と二点切りしゃ断の比較を表 2 に示す。この表での 1 ステップあたりの時間幅は、ほぼ $0.05\mu\text{s}$ である。この結果から、二点切りは一点

表 2 一点切りと二点切りの失敗率の比較

Table 2. Failure rates of single break and double break.

(単位: %)

しゃ断電流	30 kA			35 kA		
	1 ステップ 0.05 μ s	30 ステップ 1.5 μ s	全ステップ ∞	1 ステップ 0.06 μ s	30 ステップ 1.7 μ s	全ステップ ∞
一点切り	≈ 0	0.1	0.2	0.01	14	20
二点切り	≈ 0	≈ 0	0.01	≈ 0	1	5

切りに比べ、一つのしゃ断点が失敗しても残りのしゃ断点でしゃ断する場合も生じてくることなどから、信頼性が高くなるといえる。また、変動の周期が短いほど、変動のない場合の特性（図 10 で、しゃ断電流が 40.5 kA の所でしゃ断失敗率が横軸に対して垂直に立上がる特性）に近づくため、細かいアーク特性の変動は、しゃ断能力にあまり影響しないといえる。

〈3.3〉 対地容量を考慮したしゃ断失敗率 二点切りしゃ断の場合、しゃ断点と大地との静電容量を考慮した場合、しゃ断の失敗率にいかなる影響が生じてくるかを検討すべきである。図 11(a) は、しゃ断点間の対地容量を 1 nF とした場合の回路である。線路のサージインピーダンス 450 Ω 、遅れ時間 0.5 μ s とした場合、SLF 再起電圧のような高周波成分に対して、(b) 図程度の回路解析を行えばよい。このようなアンバランスのコンデンサを介して、同一規格のしゃ断点に、時間的な時定数の変動を加えた場合の特性を図 12 に示す。図では、30 ステップごとの変動を加えた場合の $C_{p1}=C_{p2}=5$ nF の特性と、 $C_{p1}=6$ nF, $C_{p2}=5$ nF の特性を比較している。このことから対地容量を考慮した場合の方が電圧分担がよくないにもかかわらずしゃ断の信頼性は高く、これは並列容量の増加に起因するもので、図 3 から推測できる結果である。図 10 および図 12 の結果から、一点切りで対地容量を考慮しない場合が、一番しゃ断の信頼性が低いといえる。従ってユニット試験によりしゃ断特性を検証しておけば、実際のしゃ断特性の最低限の性能は把握できることがわかる。

〈3.4〉 アーク電圧電流特性とその検討 次に、〈3.1〉 節および 〈3.2〉 節で計算された、アークの電圧波形と電流波形を図 13 以後に示す。並列コンデンサ $C_{p1}=C_{p2}=7$ nF では、極間電圧 e_1 が零線を切る振動波形となっている。このような波形は、文献 (4) でも報告されている。この現象は、図に示されたように並列コンデンサの値が大きくなると起こらない場合もあ

(a) 対地容量を考慮した回路

(b) 近似計算回路

図 11 対地容量を考慮した計算回路

Fig. 11. Circuit for calculation considering earth capacitance.

図 12 対地容量を考慮した場合のしゃ断電流 - しゃ断失敗率

Fig. 12. Breaking current vs failure rate considering earth capacitance.

りこの現象を定性的に説明すると以下ようになる。

いま、第 2 しゃ断点の方が第 1 しゃ断点に比べ、しゃ断能力が高いと仮定する ($K_{11} > K_{12}$, すなわち $\theta_1 > \theta_2$)。電流直零以前では両しゃ断点とも、アーク電流に差はないが、第 2 しゃ断点の方が K_{12} の影響でアーク電圧が大きいため、第 1 しゃ断点の方が先に電流零値に到達する。わずかに遅れて⁽⁵⁾ 第 2 しゃ断点が電流零値に到達するが、第 2 しゃ断点の K_{12} が小さいため、RRRV は大きくなる。この間に第 1 しゃ断点が再発弧して短絡状態になると、再起電圧は第 2 しゃ断点にかかる、第 2 しゃ断点は消弧力が十分大きいので、ア

図 13 ニしゃ断点にばらつきのある場合の特性と並列コンデンサの影響

Fig. 13. Calculation of arc current and voltage with a parallel capacitance (2 breaking points with deviation of arc characteristics).

ーク抵抗 R_2 は、第2しゃ断点の並列コンデンサ C_{p2} に対し開放の形となり、このため直列に入ることになるコンデンサ C_{p2} のために、電源周波数成分 (SLF) の再起周波数成分に対しては、ほぼ直流とみなせる成分) はカットされ、第1しゃ断点には交流成分のみ観測される。そのうち、第1しゃ断点は次第にアーク抵抗 R_1 が上昇し、消弧力が増してくると、両しゃ断点でしゃ断成功となる。

図 14(a), (b), (c) は一点切りしゃ断特性である。回路条件は同一でも、同じ平均値と分散をもつ変動がランダムに加わるために、(a), (b), (c) 図の波形がそれぞれ異なっている。(a) 図は長い微小電流期間の後にしゃ断が成功した場合であり、(b) 図は残留電流のない単なるしゃ断成功の波形であり、(c) 図はしゃ断不成功の場合である。各図には時間ごとの時定数が記入されている。これらのアーク変動は 50 ステップごと (約 $2.5\mu s$ ごと) に与えられている。

次に、図 15(a), (b), 図 16(a), (b) は、二点切りしゃ断時のアーク電圧電流特性である。図 15(a), (b) は、しゃ断電流 43.5kA の波形で、(a) 図はアーク特性変動のない場合、(b) 図は(a) 図と同じ条件において、1 ステップごとに両しゃ断点に分散 $\sigma = 0.05 \times 10^{-10}$ のランダムな変動が独立に加わる場合のしゃ断失敗波形である。図 16(a) は、しゃ断電流 39kA でしゃ断成功の場合であり、(b) 図は同一回路条件で時定数に変動のある場合の特性である。これらのことから時定数の細かい周期の変動は、アークの電流電圧特性にはほとんど影響を与えないといえる。

(a) しゃ断成功例(一点切り)

(b) しゃ断成功例(一点切り)

(c) しゃ断失敗例(一点切り)

図 14 アーク時定数に変動のある場合のアーク電流 - 電圧特性

Fig. 14. Arc current and arc voltage (case of arc time constant with deviation).

〈3・5〉 電流零値のアーク時定数としゃ断特性

〈3・2〉 節で、周期的にアーク時定数を変動させた場合の特性を示したが、特に電流零点におけるアーク時定数としゃ断の関係を図 17 にまとめた。31 個のデータ中、しゃ断境界時定数より電流零値の時定数が大きいもの 13 個中、12 個がしゃ断失敗しており、時定数の小さいもの 18 個中、18 個がしゃ断成功していることがわかる。特に変動周期の長いもの (しゃ断境界時

(a) 時定数に変動のない場合

(b) 時定数に変動のある場合

図 15 二点切りしゃ断失敗電流 - 電圧

Fig. 15. Characteristics of arc current and arc voltage for double break (fail case).

(a) 時定数に変動のない場合

(b) 時定数に変動のある場合

図 16 二点切りしゃ断成功電流 - 電圧

Fig. 16. Characteristics of arc current and voltage for double break. (successful case).

図 17 電流零値のアーク時定数としゃ断の成否

Fig. 17. Current-zero arc time constant and breaking capability.

定数の数倍程度)においては、かなりはっきりと電流零値のアーク時定数でしゃ断の成否が決まることがわかる。このようなことから電流零値近傍での特性値を適切に選んだマイヤモデルによる解析は、しゃ断の成否だけを判断する場合には十分であることがわかる。

4. 結 言

本論文は、SF₆ ガスしゃ断器のしゃ断特性についてディジタルシミュレーションを行なった。特に一点切りしゃ断と二点切りしゃ断について等しい条件に置いた場合の信頼性について確率的な計算を行ない、二点切りの方が一点切りしゃ断よりもしゃ断の成功率が高いという結果が得られた。従来、多重切りしゃ断は一点切りに比べ、誘電破壊の場合特性のばらつきを考えると、全体にしゃ断能力の低下を招くと考えられてきたが、熱破壊を考えれば、各しゃ断点が互いに助けあって、必ずしも低下しないことがわかった。二点切りしゃ断は、多重切りの一番簡単な形であることから、この結果を多重切り一般に拡張して考えることができると考えられる。またしゃ断点に並列なコンデンサ C_p の大きさによって、しゃ断能力が向上することも示された。
(昭和 55 年 11 月 21 日受付)

文 献

- (1) E. Schwalb, et al.: "Investigation of unit testing and full pol testing of a single pressure type double nozzle SF₆ C.B. under SLF condition", *CIGRE*, 13-8 (1978)
- (2) 山形・中西: 「熱的アークモデルによるしゃ断特性の解析」, 電学論 B, **100**, 577 (昭 55-10)
- (3) J.G. Steel, et al.: "Statistic of circuit breaker performance", *Proc. IEE*, **117**, 7, 1337 (1970)
- (4) A. Kobayashi, S. Yanabu, et al.: "Measurement of voltage distribution phenomena in SF₆ single pressure circuit breaker", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-97**, 4, 1304 (1978)
- (5) B. Calvino, et al.: "Some aspects of the stresses supported by H.V. circuit breakers clearing a short circuits", *CIGRE*, 13-8 (1974-8)