遮断器内アーク放電のパラメータの簡易復元と変動についての研究

正員 神谷 利雄 (上智大学)

正員 金 東海 (上智大学)

Study on the simple identification and the variation of the parameters of the arc discharge in a circuit breaker

Toshio Kamiya, Member Tung-Hai Chin, Member

(Sophia University)

The aim of this paper is to evaluate the current breaking performance of a circuit breaker through simulation of the dynamic characteristics of its arc discharge, whose parameters were measured beforehand. Here the general arc model is taken as the fundamental. Recently, the time constant of the arc model has been considered to be variable, and there are two theories that describe the behavior of the parameter variation. One theory asserts that the time constant should vary as the function of the steady state arc conductance for the current at that instant, but the other asserts the function of the instantaneous arc conductance. It is necessary to discuss which assertion is true or better. It has been inspected firstly through numerical calculation and also the method for identifying the time constant from the experimental result has been discussed and developed. It is revealed that the results from both theories were of less difference for predicting the performance of an arc discharge through simulation, and they were applied in parallel afterward. In the latter part of the paper, the experimental results of three reported cases have been analyzed through the identification of their arc parameters. It is revealed that the time constant of the arc discharge may be an increasing function or a decreasing function concerning the variation of the arc conductance, depending on the types of the arc discharge. The behavior of arc discharge can be described well in concern with its cooling mechanism. It is verified that both theories can be applied to achieve the aim of the paper, and the behavior of the arc time constant has been revealed for the first time.

キーワード：遮断器, アーク放電モデル, アーク放電パラメータ, パラメータ同定, アーク放電シミュレーション

Keywords: circuit breaker, arc discharge-model, arc discharge parameters, parameter identification, arc discharge simulation

1. まえがき

本論文の研究の目的は遮断器の合成試験あるいは実遮断実験において、遮断器アークのパラメータを測定してその遮断器の試験時点での性能をシミュレーションによって推定しようとするものである。これによって、パラメータの経年変化の測定から遮断器性能の経年的変化を推定できることが可能となれば、保守上の利便性が得られる。あるいは、パラメータの測定から消弧材料の性能の判定または遮断器消弧室設計の評価基準が得られることが可能となろう。そのためにまず、アークのモデルを決める必要がある。アーク放電の動的モデルとしては Mayr の式などがあるが⁽¹⁾、ここでは Kopplin による一般的アーク式(1)を用いる⁽²⁾。本論文関連の文献もこのモデルを中心に論議している。以下、本文においてはこの式を単にアークモデルと称する。

なお、式中にあるアーク放電の熱的時定数 θ (以下時定数と略す) は今日においてもはや定数ではなく、アーク放電の状態、すなわち、アークコンダクタンスの関数として扱われる。

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} (g_s - g) \dots \dots \dots (1)$$

前記目的を達成するためには、第一段階として変数としての時定数とコンダクタンスの関数関係を究明する必要がある。すなわち、アーク放電の測定された電圧電流特性からそのパラメータとしての時定数の関数を導出することである。なお、パラメータ関数の導出をここでは便宜上パラメータの復元と呼ぶこととする。

ところで、アーク時定数 θ を変数とする初期の研究として、A. Hochrainer 氏ら(1972)⁽³⁾は時定数 θ をアーク電流瞬時値 i の関数であると考えた。一方、定常アークのコンダクタンス値 g_s (以下 g の定常値と称す) も同様に i の関数であるので、間接的に θ を g_s の関数とする考え方である。しかしその後の研究、すなわち、E. V. Bonin 氏(1980)⁽⁴⁾を始め、T. Matsumura (1986)⁽⁵⁾、W. Wild (1988)⁽⁶⁾、B. Blez (1988)⁽⁷⁾、L. Van der Sluis (1992)⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾の諸氏らは θ をコンダクタンス現時値 g の関数としている。このことは、後者の数々の研究が前者の研究に対して異を唱えたことになる。

どちらが本当に正しいのか見極めることは本研究にとってきわめて重要であり、あわせて夫々の復元法を探索することが必要である。なお、説明の便宜上、前述両グループの理論、すなわち A. Hochrainer 氏の理論を理論 A(Th.A)と名づけ、その理論にもとづくパラメータ関数の導出方法を復元法 A とし、その他の諸氏の理論を合わせて理論 B(Th.B) および本論文で提案する新しい方法を復元法 B と名づける。今まで発表されている理論 B に関する復元法を「既存の復元法 B」と名づけて区別する。

本論文は二つの部分に分かれている。数値解析による復元法の検討の部分、ならびに、開発確認された復元法に基づいて実験データからパラメータを復元しアーク特性の検証を行う部分である。前半部分の数値解析による新しい復元法の検討において、夫々の理論に対して報告されている既存の復元法を追跡調査した。その内、理論 A ではその仕事は容易であったが、理論 B に関して今まで発表されている既存の復元法は大変複雑で^{(4)~(10)}、論文一篇をもてして十分に説明できないほどである。たとえば、既存の復元法 B の中で、松村氏の報告は比較的整理されているが⁽⁵⁾、チェビシェフ級数を用いた繰り返しカーブフィッティングの方法が用いられており、これを追跡検証するにも非常に手間がかかった。しかも、うまく収束させるのにテクニックが必要で、収束性の証明もされていない。大量のデータを処理するのにより簡便な方法の開発が必要であった。本研究では、数々の数値的な解析を行い、いろいろの試行錯誤の結果、意外に簡易な方法を開発できた。その結果を踏まえて、両理論の相関や本研究目的達成への対応方針について検討が行われている。後半の部分は、前半部分で開発された復元法を用いて今まで報告されている実験結果二例と著者らが行った実験一例に適用してアーク時定数の関数の形を追求してみた。意外にも、遮断器の形態、言い換えると、遮断アークの冷却方法によって明確に 2 種類の関数系が存在することが明らかとなった。また、アーク特性の検証を通じて本研究の目的達成との関連を検討した。

2. 数値解析によるアーク定数復元法の検討

適切な復元法を見つけるために、定数が既知のアーク放電の電圧電流特性を数値的に作成し、逆にその定数への復元を試みて既存の復元法の検証を行った。不適切な既存の復元法に対しては新規の復元法を開発する。

手順としてまず、実験結果と類似の電圧電流特性となるようアークパラメータの関数関係を仮定する。次に電流ゼロ点を横切って変化するアーク電流を仮定し、アーク放電の動的電圧電流特性を形成させる。最後に、計算されたアーク電圧電流の動特性から逆にアークパラメータの関数関係を同定し、最初に仮定した関数関係との一致いかんを確認することによって復元法の良否を検証する。

< 2.1 > 復元法 A の場合 理論 A に従って時定数を電流の関数として式 (2) のように定義する。式 (2) は実

験値のデータを模擬したものである。一方、コンダクタンスの定常値 g_s も式 (3) のように電流の関数として定義する。アークの電圧電流特性を形成するのに、アーク電流の変動を式 (4) とし、適当な時刻におけるアーク電圧の初期値を仮定して式 (1) ~ (4) を用いて計算を行う。

$$\theta = \theta_0 + C \cdot |i| \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$g_s = \frac{i^2}{(A + B \cdot |i|)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$i = I_0 - D \cdot t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A = 3000 \text{ [W]}, \quad B = 350 \text{ [V]}, \quad C = 0.7 \cdot 10^{-6} \text{ [s/A]}$$

$$D = 0.157 \cdot 10^{-6} \text{ [A/s]}, \quad \theta_0 = 6.5 \cdot 10^{-6} \text{ [s]}$$

その結果、図 1 に示すアーク電圧電流特性が得られた。その際、電圧の初期値を変えても、 θ の三倍程度の時間を経過すれば、その後の演算値にはほとんど影響を与えないことが確認されている。

図 1 演算されたアーク放電の電圧電流波形 (理論 A)
Fig.1 Calculated arc voltage & current waveforms. (Th. A)

次に、図 1 の特性からアークパラメータを逆に復元することを試みる。復元法は A. Hochrainer 氏の方法を改良しながら踏襲した。復元法 A をステップにわけて説明する。

STEP A1: 図 1 の特性から、 g とその時間微分 $\dot{g}$ の値を演算し、図 2 のように電流の関数として表示する。

STEP A2: 理論 A においては θ も g_s も電流の関数としてがあるので、電流零点前 ($t < 0$) と電流零点以後 ($t > 0$) において任意の電流 i' に対するそれぞれの g と $\dot{g}$ の値を g_1, g_2 および、 $\dot{g}_1, \dot{g}_2$ とすると、式 (5) (6) のようにその電流 i' に対する時定数 θ と g_s を求めることができる。各電流値に対して θ と g_s を求めて図 3 に表示した。なお、最初に仮定された式 (2) (3) との偏差は数値計算の精度をあげていけば、無くすることが可能である。

$$\theta = \theta_1 = \theta_2 = \frac{(g_2 - g_1)}{(\dot{g}_1 - \dot{g}_2)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$g_s = g_{s1} = g_{s2} = \frac{g_1 \cdot \dot{g}_2 - g_2 \cdot \dot{g}_1}{(\dot{g}_2 - \dot{g}_1)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図2 コンダクタンスの電流特性 (理論 A)

Fig. 2 Current dependence of arc conductance g & $\dot{g}$ (Th.A)

図3 復元されたアーク時定数及び
定常コンダクタンス (理論 A)

Fig. 3 Recovered steady state conductance g_s & time constant θ (Th. A)

<2.2> 復元法 B の場合 理論 B において, g_s は同じ i の関数であるが, 時定数 θ は i の関数ではなく g の関数としている。これは物理的に考えてもっともらしい仮定である。何故なら, θ はその瞬間のアーク状態 g に依存すべきで, 将来接近するであろう未確認の状態 g_s に依存するとは考えにくいからである。

ここで理論 B にもとづいて電圧電流特性を形成する。 θ は g の関数として式(7)のように定義する。 g_s は式(3)をそのまま適用する。式(1), (3), (4)と(7)に基づいてアークの電圧電流特性をプロットした。この場合, 電圧電流波形の形成において時定数の数 10 倍以上先の時間まで初期設定値の影響が残るので, 初期値の影響を無くするために電流零点以前時定数の百倍先の時刻よりデータを演算した。その結果, 図4に示す電圧電流特性曲線が得られた。

図4 演算されたアーク放電の電圧電流波形 (理論 B)

Fig.4 Calculated arc voltage & current waveforms. (Theory B)

$$\theta = 0.6 \cdot 10^{-5} + 0.6 \cdot 10^{-3} \cdot g \cdots \cdots (7)$$

次に復元法 B について説明する。前述のように, 既発表の復元法は複雑で適用にテクニックを要し, その収束性についての議論もされていないので, 検証を試みたものの, 本論文で適用するのに躊躇せざるを得ない。いろいろの試行錯誤の結果, 筆者らは新規の復元法を探索し得たので, ここではこの新しい復元法を用いて g_s と θ の関数関係の復元を試みる。新規の復元法 B の手順は次の通りである。

STEP B1: 図4のデータから, コンダクタンス g と $\dot{g}$ を計算し, それを電流の関数として図5に表示する。このプロセスは STEP A1 と同様である。

STEP B2: 図5において θ と g_s の値が容易に求まる特異点を探す。点 P_1 ($i=0$ の点) と点 Q_0 ($\dot{g}=0$ の点) が特異点である。点 P_1 において $i=0$ であるから, もしアーク特性が式(3)のような一価関数であれば, $g_s=0$ となり, g と $\dot{g}$ の値から式(1)により θ の値を計算できる。一方, 点 Q_0 においては $\dot{g}=0$ であるので, そこでの g_s は式(1)により既知値 g に等しい。

STEP B3: ここでは, 特異点と同じ g あるいは i をもつ動作点を探す。これは図5で g 曲線上の特異点 P_1 と Q_0 からそれぞれ水平線あるいは垂直線を引き, 同じ g 曲線の反対側で交点を求め, 点 P_2 と点 Q_1 を定める。点 P_2 では, g の値が点 P_1 のそれと等しいことから, 式(7)のような一価関数を仮定した場合は, θ の値が点 P_1 のそれと同値となる。同じく, 式(3)に基づき点 Q_1 では点 Q_0 の電流値と等しいことから, 点 Q_1 における g_s 値は Q_0 のそれと同値である。なお, 点 P_2 における g_s 値と点 Q_1 における θ 値は STEP B2 と同じ要領で算出される。

点 P と点 Q の立場を入れ換えながら STEP B3 を繰り返せば図6と7に示す θ と g_s の復元プロット点が得られる。これらの点と同図に示す式(3)あるいは式(7)の曲線とを比較すれば, 数値の復元がほぼ達成されていることがわかる。なお, 図5の点 Q_0 では $\theta=0/0$ で不定となり, その点の θ を求めることはできない。また, 参考のために, 時間

軸上における各種アークパラメータの変化の様子と各数値計算点との関係を図8に示す。電流ゼロ点前後の電圧、電流とコンダクタンス値から、時定数 θ と定常コンダクタンス値 g_s が復元されていく様子が分る。

図5 コンダクタンスの電流特性 (理論B)

Fig. 5 Current dependence of arc conductance g & $\dot{g}$. (Th. B)

図6 復元された時定数対コンダクタンス特性

Fig. 6 Conductance dependence of recovered time constant.

図7 復元された定常コンダクタンス対電流特性

Fig. 7 Current dependence of recovered steady state conductance.

図8 パラメータの時間的変化 (理論B)

Fig. 8 Time dependence of arc parameters. (Th. B)

<2.3> 数値解析における復元法の考察

前述において、理論Aに基づく電圧電流特性には復元法Aを、理論Bによるものには復元法Bを適用し、それぞれに復元できることを確認した。当然と言えば、当然の結果である。現実のアークデータでは、どちらの理論が適正かは結論が得られていない。したがって、理論の正当性を先に結論付けなければならないことになるが、しかし、両者の復元法によって復元されたパラメータ間に大きな差異がなく、それらを適用したシミュレーションによってアークの振舞を十分説明することができれば、本論文で急いで結論付けを行う必要はないと考えられる。ここで、一つのデータに対して相異なる復元法で求めたパラメータにどの程度のずれがあるのかを検証してみた。

理論Aに基づく図1の電圧電流特性を復元法AおよびBでそれぞれ復元したパラメータの比較を図9,10に示した。図9の定常コンダクタンス値はほぼ一致している。図10は g と g_s とを共通の横軸として復元法AとBによる数値を比較している。これは両者が横軸を同一単位とするばかりでなく、両理論による時定数のずれがどのように現れるかを同図で確認できるためである。図8を見ると、一つの実験における g 曲線は常に時定数程度のずれで g_s 曲線の後を追いかけている。このことは表現を変えて説明すると次のようになる。ある時刻で g_s 曲線上の一点を取り、その点から横方向に水平線を引き g 曲線との交点をとると、その点と前の g_s 曲線上の点との時間間隔が時定数の目安になる。その時定数の数値は理論Aに基けば、前の g_s 曲線上の点に対する数値になるし、理論Bでは後の g 曲線上の点に対する数値になる。したがって、同じデータに対して両理論に基づいてパラメータを復元した際に、時定数の曲線において上下方向のずれが起らないが、横方向のずれが起こる。しかも、理論Aの g_s に関する時定数曲線は常に左側に位置する。

以上のことから次の結論が得られた。本研究の目的のよ

うに、パラメータ値の変化とその値によってアークの遮断性能を評価しようとする場合には、理論の妥当性についての追求は重要ではなく、どちらの理論を適用しても目的は達成できる。幸い、両復元法のプロセスは共に簡易であるので、以下において、両者を平行して実施し、実験結果への本研究の手法の検証を行うと共に、本節の結論の確認を行う。

なお、厳密に考えると、時変のパラメータを持つアークモデルがそもそも問題があろう。定係数を持つ2階あるいは3階の偏微分方程式でモデルを作るべきかも知れない。しかし、古いながらも式(1)は現存する唯一の有効なモデルであり、モデルの探求が本論文の主題ではないので、問題への深入りを避ける。

図9 異なった復元法に基づく定常コンダクタンス対電流特性の比較 復元法 A:太線 復元法 B:細線

Fig. 9 Comparison of the conductance-current characteristics depended on both different restorative methods (Th.A: heavy line, Th. B: thin line)

図10 異なった復元法に基づく時定数対コンダクタンス特性の比較 復元法 A:太線 復元法 B:細線

Fig. 10 Comparison of the time constant-conductance characteristics depended on both different restorative methods (Th. A: heavy line, Th. B: thin line)

3. 実験的検証

次に、各種の実験データに本論文の復元法を適用して、アークパラメータを計算し、アークパラメータの関数関係を検証する。既発表論文で報告された二つの実験データ及び筆者らが採取した実験データについて、復元法AとBによってそれぞれアークパラメータを求めて見た。

<3.1> 実験的検証# I 図11はMatsumura氏のデータ(文献5)を再プロットしたものである。このデータは定格145kV, 50kA, SF₆パuffa型遮断器において合成試験法を用いて採取されたデータである。実験条件は次の通りである。電流零点近辺の電流変化率が21A/μsで、零点以後の電圧上昇率が1.38kV/μsである。データはサンプリングタイム0.5μsのデジタルオシロスコープで採取され、丸印(電圧)、三角印(電流)はデータ点を示す。両者の方法を用いて復元したパラメータは図12と図13に示す。Matsumura氏は理論Bの提唱者であるので、同図に氏の独自の方法で復元したパラメータ値も×印で示されている。その結果は本復元法Bによる復元値とほとんど差はなく、本復元法は非常に簡単な復元法であるにもかかわらず、満足すべき結果といえる。

なお、図12, 13で復元法Aによる数値が共に短い曲線になっている。これは復元法Aがゼロ点前後における同じ電流値の測定点に対して数値を計算する。したがって、測定点が図11のようにゼロ点後に偏っていると、ゼロ点以前のわずかな範囲に対応する数値しか求まらない。

図11 文献(5)のアーク電圧電流波形

Fig. 11 Experimental waveforms of arc voltage & current from Ref. 5.

<3.2> 実験的検証# II 図14はKlaus Moeller⁽¹¹⁾氏の実験値が示されている。氏らは内径40mm, 長さ120mmのSF₆パuffa型遮断器の模擬実験装置を作り、上流圧9バール, 下流圧1バールのノズルの中で実験を行った。実験回路図は合成試験法を用い、1.8kAの台形電流と逆電圧印

図 12 定常コンダクタンスの電流特性(# I)。復元法 A:太線, 復元法 B:細線, ×印:Matsumura 氏結果

Fig. 12 Current dependence of steady state conductance (#1), Th. A: heavy line, Th. B: thin line (# I), ×: depending on Matsumura's method

図 13 復元されたアーク時定数特性 (# I)

Fig. 13 Conductance dependence of recovered time constant. Th.A: heavy line, Th. B: thin line (# I)

加装置で構成されていた。電流の減少率は $10\text{A}/\mu\text{s}$ – $30\text{A}/\mu\text{s}$, 逆電圧の上昇率は $0.1\text{ kV}/\mu\text{s}$ – $5\text{ kV}/\mu\text{s}$ まで変えられる。図 14 は $16.4\text{A}/\mu\text{s}$ と $1.5\text{ kV}/\mu\text{s}$ の場合のデータで, 多数回の実験データを統計的に処理した電圧, 電流波形である。このデータを本復元法 A と B で処理して得られたアークパラメータは図 15 と 16 に示されている。

<3.3> 実験的検証# III 筆者等が行った細隙アーク放電実験のデータを図 17 に示す。電流零点近傍の実験波形である⁽¹²⁾。実験では気中型遮断器の消弧板(アセタルコポリマ)を $2[\text{mm}]$ 間隔で並立させた狭い空間において電極を $45[\text{mm}]$ 開極した状態で, 電極間に点じられた小電流アークに, L-C 放電による正弦波の大電流を重畳し, 自然振動させた。実験を繰り返し行い, 初期の 23 回程度は遮断特性

図 14 パッファ型遮断器の電圧電流波形 (文献 11)

Fig. 14 Experimental waveforms of arc voltage & current. (from Ref.11)

図 15 定常アークコンダクタンスの電流特性 (# II) 復元法 A:太線 復元法 B:細線

Fig. 15 Current dependence of steady state conductance (# II), Th. A: heavy line, Th. B: thin line

図 16 アーク時定数のコンダクタンス特性 (# II) 復元法 A:太線 復元法 B:細線

Fig. 16 Conductance dependence of recovered time constant. Th. A: heavy line, Th. B: thin line (# II)

がよいので、半サイクルで必ず消弧した。回数が進み、遮断特性が落ちてくると図 17 のような波形となる。図は 125 回目の実験波形で電極近傍の消弧板は片面で 1.4[mm]程度消耗していた状態の実験波形である。なお、実験用の L は 25[mH]、C は 216[μ F]、充電電圧 5900[V]、最大電流は 500[A]、電流半周期は 7.5[ms]である。図 18 と 19 はその復元されたパラメータである。

図 17 模擬気中遮断器の電圧電流波形 (文献 12)

Fig. 17 Arc voltage & current waveforms of circuit breaker model. (Ref. 12)

図 18 定常コンダクタンスの電流特性 (Ⅲ)

復元法 A:太線 復元法 B:細線

Fig. 18 Current dependence of steady state conductance (Ⅲ), Th. A: heavy line, Th. B: thin line

<3.4>実験データでのパラメータ変動についての考察

三種類の実験アークについて、得られたパラメータを検討考察する。三つの実験で得られたパラメータは復元法のちがいでずれが生じている。このずれは前章の結論で述べたように横方向のずれであるとすれば、納得できる結果が得られている。

実験検証ⅠとⅡは同じくパフファ型遮断器における実験データである。検証Ⅱは統計処理されたデータとはいえ、両者のパラメータ変動の傾向は同一で、数量的にも近い値をとっている。

図 19 復元されたアーク時定数特性 (Ⅲ)

Fig. 19 Conductance dependence of identified time constant.

Th. A: heavy line, Th. B: thin line (Ⅲ)

しかし、実験検証Ⅲとは明らかに違っている。すなわち、検証ⅠとⅡにおいて、 θ は g (理論 B) あるいは g_s (理論 A) に対して増加関数である。これに反して検証Ⅲでは、 θ は g (あるいは g_s) に関して減少関数となっていることである。遮断器の構造によって、時定数 θ はコンダクタンスの増加関数あるいは減少関数となり得ることがここで始めて明らかになった。その物理的原因を考察してみた。

検証ⅠとⅡはパフファ型遮断器における SF_6 ガス流中のアークである。アーク柱は半径方向に強制冷却されるが、電流の大きさによってアーク柱の半径が伸縮可能である。言い換えれば、「二次元可動器壁安定化アーク」ということとなろう。電流零点の通過で電流値が小さくなれば、アーク径が収縮し、冷却効果が顕著になり、コンダクタンスすなわちアーク柱熱容量が減少していくとともに θ も小さくなる。一方、電流が増えれば、アーク柱の温度が上昇し、コンダクタンスは増加してアーク柱熱容量もふえるが、アーク柱にコアが形成されると、相対的に熱伝導率が悪くなる⁽¹³⁾。その結果、電流の増加とともに θ は増大する。

これに対して、検証Ⅲのアークは消弧板からなる固定壁による一次元冷却タイプの気中アークである。言い換えれば、「一次元固定器壁安定化アーク」と言うことができる。X 方向が固定器壁とすれば、Y 方向にアーク径の伸縮が可能である。電流値の増減に伴い、Y 方向へのアークの膨張収縮はパフファ型よりも大きくなる。電流零点の通過で電流値が小さくなればアーク径が収縮し、消弧板からアークは離れるので、消弧板による冷却効果が減退し、コンダクタンスの減少とは反対に時定数が増大していく。一方、電流が大きくなればアーク柱は膨張し、消弧板との接触がふえ、冷却効果が顕著となって時定数が減少する。ある程度アーク柱が太くなると、X 方向の厚みが一定に保持されながら Y 方向へのアーク柱の拡大が顕著になり、コンダクタンスは引き続き増大するが、単位体積あたりのアーク柱熱容量はそれほど増えないので、時定数は減少しながらはば一定値に落ちつく。

以上のことから、パラメータの復元によりアーク特性の把握が可能となり、パラメータの関数関係も明確となった。同じ装置において多様な条件での実験を行うことによって、その装置の評価を定性的あるいは定量的に行うことが可能との初期的裏付けが得られた。

4. 終わりに

アーク放電のパラメータ同定について理論的及び実験的検証を行った。本論文において次の諸項目の重要な成果が得られた。

- 1) 理論Bに対応するパラメータ復元法を新たに考案し開発した。現存の方法と比較して遥かに簡単な手続きで同様な結果が得られた。
- 2) 数値的な解析および実験的な検証によって、理論Aまたは理論Bに基づく復元法によって得られたパラメータの数値にある程度の差異が起こる。その差異は現象的に説明できる範囲のものである。本研究を行う前に抱いていた理論の適正性の追求がまず必要であるとの考えは、本研究の結果を見て、必ずしも重要ではないことがわかった。どちらの理論に基づいて求めたパラメータも遮断アークの特性あるいは機能の評価基準として活用できるとの結論に到達した。
- 3) 実験データの三例について、関数としての時定数を復元した結果、一次変数（アーク電流あるいはアークコンダクタンス）に関して増加関数または減少関数となる二種類のアーク放電の存在が明らかとなった。時定数変化の傾向とそれらアークの冷却機構との関連を考察した結果、夫々に納得できる説明が得られた。

(平成12年12月21日受付, 平成13年4月17日再受付)

参考文献

- (1) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編「放電ハンドブック」(改訂版)1974
- (2) Horst Kopplin "Beitrag zum dynamischen Verhalten des Lichtbogens in Olarmen Hochspannungs-Leistungsschaltern", ETZ, Bd. 80, Heft 23, Dezember, pp. 805-811 (1959)
- (3) A. Hochrainer and A. Grutz, "Study of arcs in breakers with the help of a cybernetic model", CIGRE publ. 13-10 part A, pp. 1-14 (1972)
- (4) E. V. Bonin and H. G. Thiel, "Quenching Processes of Axially Inhomogeneous Arcs in SF₆ circuit Breakers", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-8, No. 4, December, pp. 344-351 (1980)
- (5) T. Matsumura, W. T. Oppenlander, C. A. Schmidt-Harms and A. D. Stokes, "Prediction of Circuit Breaker Performance Based On a refined Cybernetic model", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-14, No. 4, August, pp. 435-443 (1986)
- (6) W. Widl, P. Kirchesh, W. Egli, "Use of Integral Arc models in Circuit Breaker Testing and Development", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October, pp. 1685-1691 (1988)
- (7) B. Bleg and C. Guilloux, "Post-Arc current in High Voltage SF₆ Circuit-Breakers With Breaking at up to 63 KA", IEEE Transaction on power Delivery, vol. 4, No. 2, April, pp. 1056-1062 (1989)
- (8) L. van der Sluig, "Comparison of Test Circuits for High Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations with ARC models", IEEE Transaction on power Delivery, vol. 7, No. 4, October, pp. 2037-2045 (1992)
- (9) L. van der Sluis and W. R. Rutgers, "The comparison of Test Circuits with Arc model", IEEE Transaction on power Delivery, Vol. 10, No. 1, January, pp. 280-285 (1995)
- (10) L. van der Sluis and W. R. Rutgers and C. G. A. Koreman, "A Physical Arc model for the Simulation of Current Zero behavior of High-Voltage Circuit Breakers", IEEE Transaction on power Delivery, Vol. 7, No. 2, April, pp. 1016-1022 (1992)
- (11) Klaus Moeller, Rainer Schmit, and Bernhard Sporckmann, "Theoretical and Experimental Investigation of SF₆ Blast-Switching Arc", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. ps-8, No. 4, December, pp. 352-356 (1980)
- (12) 金, 神谷 有機物消弧材料の評価試験についての一研究 電気学会論文誌 106 巻B分冊3号 pp.201-208 (1986)
- (13) Gerhard Frind, "Ueber das Abklingen von Lichtbogen. I", Zeitschrift fur angewandte Physik, X II. Band, Heft 5, pp. 231-237 (1960)

神谷 利雄

(正員) 昭和13年10月10日生まれ。38年3月東京電機大学工学部電子工学科第二部卒業。同年4月上智大学理工学部電気電子工学科助手となり、現在に至る。主としてアーク放電現象および遮断機に関する研究に従事。

金 東海

(正員) 昭和9年7月19日生まれ。38年3月東京大学大学院数物系研究科電気工学専門課程博士課程終了、工学博士。同年4月上智大学理工学部講師、39年同助教授、50年教授。主としてパワーエレクトロニクス技術、交流電動機制御、アーク放電現象の研究に従事。IEEE Fellow