汎用過渡現象解析プログラムにおける フラッシュオーバー特性計算法

正員 関 岡 昇 三 (関西テック)
 正員 山 本 賢 司 (大 阪 大)
 非会員 今 井 真 司 (関 西 電 力)
 正員 鈴 木 誠 (関 西 電 力)
 正員 藤 本 爵 (関 西 電 力)
 正員 木 下 仁 志 (関 西 電 力)

Calculation of Flashover Characteristics in the Electromagnetic Transients Program

Syouzou Sekioka, Member (Kansai Technical Engineering Co., Ltd.), Kenji Yamamoto, Member (Osaka University), Shinji Imai, Non-member, Makoto Suzuki, Member, Takashi Fujimoto, Member, Hitoshi Kinoshita, Member (Kansai Electric Power Co.)

This paper proposes arcing horn flashover models for a multi-phase flashover analysis and a lightning surge analysis by the ATP (EMTP). One is the leader development model which consists of nonlinear resistances. Another is the integration method which is not considered a predischage current, but it is convenient to calculate. The calculated results by the proposed models agree well with experimental results. It is effective to simulate electrical power networks with various parameters (gap lengths, lightning currents, circuit models, and so on).

キーワード：EMTP, ATP, フラッシュオーバー, 積分法, リーダモデル

1. 緒 言

アークホーンのフラッシュオーバー特性を精密に模擬することは、発電所の絶縁設計や送電線の多相事故を解析するうえで、極めて重要である。これらの雷サージ解析には、最近では、汎用過渡現象解析プログラム (EMTP⁽¹⁾, ATP⁽²⁾) が用いられている^{(3)~(5)}。

従来は、フラッシュオーバーを模擬する際に、50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} を判定基準とする方法⁽⁶⁾や $V-t$ 交差法⁽⁹⁾といった波形の相違を忠実に考慮できない手法が用いられていた。最近、新藤らによって提案されたリーダモデル^{(7)~(9)}により、精度良く雷サージ解析を行うことが可能となった。しかし、この手法は、汎用過渡現象解析プログラムにおいて直接使用できないため、実用的とはいえないのが現状である。波形の

相違を考慮できる別の手法として積分法⁽¹⁰⁾がある。積分法は、放電前駆電流やそれによる電圧の変わりを考慮できないが、取扱いが容易であるという利点を有する。しかしながら、数 m の長ギャップでは、精度的に問題があるとされている。

本論文では、ギャップの長さや雷撃電流、回路条件など様々なパラメータに関して厳密な、あるいは概略的な検討を容易に行えるように、リーダモデルを等価な抵抗で模擬する方法、および数 m のギャップの長さにおいて積分法を扱う際の定数選定法について検討した結果を述べる。更に、提案手法による計算結果と実験結果を比較することにより、その有効性を示す。

2. 非線形抵抗リーダモデル

〈2・1〉 リーダモデルの現状と問題点 リーダモ

デルは、時々刻々のホーン間電圧、電流およびリーダ進展長が求まることから、厳密な過電圧解析や多相フラッシュオーバー判定を行うには最も有効な方法である。リーダモデルを EMTP において使用する場合、次のような手法が用いられる。

(1) フラッシュオーバーしないとしたときのホーン間電圧と、アークホーンから鉄塔および電力線を見た背後インピーダンス、およびリーダモデルからなる回路により、ホーン間電圧および電流を求め、更に電流を折線で近似することにより、アークホーンの等価インピーダンスを求める⁽⁸⁾。

(2) 非線形インダクタンスと EMTP のサブプログラム TACS⁽¹¹⁾ で制御されるスイッチからなる非線形アークホーンフラッシュオーバーモデルを用いる⁽¹²⁾。

通常の雷サージ解析には上記の手法で十分であるが、次のような問題点がある。

(i) 両手法とも背後インピーダンスを選定する必要がある。また、モデルの定数選定に際して、背後インピーダンスを一定としており、その値が大きく変化する場合を自動的に考慮できない。

(ii) (1)の手法は、フラッシュオーバーしないときの計算と等価インピーダンス算出の計算が必要である。

(iii) (2)の手法は、アークホーン電流が判定値を超えるか、あるいはホーン間電圧が零になればフラッシュオーバーにいたると判定する⁽¹²⁾ため、多相フラッシュオーバー時には電圧が階段状に低下し電流も減少するので、フラッシュオーバーの判定を誤る可能性がある。

以上の理由から、多相フラッシュオーバーのように背後インピーダンスやホーン間電圧が大きく変化する場合は、回路条件やギャップの長さを変化させたい場合には、従来の手法では極めて繁雑であり実用的とはいえない。そこで、次節に示す ATP において、直接リーダモデルが扱える非線形抵抗リーダモデルを開発した。

〈2・2〉 非線形抵抗リーダモデル リーダモデルは、(1)～(3)式および回路方程式からなる⁽⁸⁾。

$$v = K_1 \frac{V^2}{D - 2x} + K_2 \frac{V_i}{D - 2x} \frac{x}{D} \dots\dots\dots (1)$$

$$i = CvV \dots\dots\dots (2)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v\Delta t \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$l = 2x/D$$

$$C = C_0 + 2l(C_{\max} - C_0) \quad (l < 0.5)$$

$$= C_{\max} \quad (l \geq 0.5)$$

$$C_0 = C_{\max}/D \quad (D > 1)$$

$$= C_{\max} \quad (D \leq 1)$$

V : 印加電圧(V), i : 放電前駆電流(A),
 v : リーダ進展速度(m/s), x : リーダ長(m), D : ギャップの長さ(m), K_1, K_2 , $C_{\max}$: ギャップの長さや電圧波形によらない定数

(2)式より、ギャップ間の等価インピーダンスは、背後系統に関係なく次式で与えられる。

$$Z_{\text{HORN}} = (Cv)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

非線形性を有するインピーダンスは、Compensation Method⁽¹³⁾により模擬できる。(2)式において、電流と電圧との間には位相差はなく、 Z_{HORN} は抵抗として考えてよい。特に ATP では Z_{HORN} を TACS 上で計算し、その抵抗値をアーク抵抗モデル (Type 91)により模擬すればよい。

図1に本論文で提案するモデルを示す。リーダ進展開始時間は、文献(12)と同様にギャップ間電圧が V_{50} 値に達した時刻とする。この時点から Z_{HORN} は、(4)式の値を有する(それ以前は、高抵抗により開放を模擬する)。そして $2x \geq D$ となれば、フラッシュオーバーが発生したと判断し、 Z_{HORN} を微小抵抗として直列に接続したインダクタンスにより、フラッシュオーバー後の状態を模擬する。しかし、途中で $V < 0.45(D - 2x)$ (MV)となれば、フラッシュオーバーしない⁽⁷⁾として、 Z_{HORN} が高抵抗となり、開放とみなす。

〈2・3〉 モデルの検証 まず、図2の回路において、 $V_{\text{back}} = 1 \text{ MV}$, $R_{\text{back}} = 200 \Omega$, $D = 5 \text{ m}$ としたときのリーダモデル(付録1参照)、文献(12)および本モデルによる比較を行った。

図1 提案モデル
Fig. 1. Proposed model.

図2 リーダモデル計算回路
Fig. 2. Calculation circuit of lead development models.

(a) 電圧波形

(b) 電流波形

図3 各リーダモデルの比較
Fig.3. Comparison of various leader development models.

図4 計算回路
Fig.4. Calculation circuit.

これらの計算結果を図3に示す。リーダモデルと本モデルの差はほとんどなく、同一曲線で表している。これより、本モデルの有効性が明らかである。なお、ファイナルジャンプ相において、時間刻み幅 Δt によって計算結果に差が生じるのは、電圧および電流とリーダ進展速度との間に Δt の遅れが生じるためである⁽¹³⁾。

次に、図4に示す回路⁽¹⁴⁾について計算を行った。図5に、新藤らが実施した実験結果(実線)および計算結果⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾(●, ○)と本モデルによる計算結果(▲, △)を示す。本モデルによる計算結果は、新藤らの計算結果および実験結果とよく一致しており、十分な精度を有している。

$D=2\text{ m}$, $V: 384\text{ kV/div}$, $I: 50\text{ A/div}$, $t: 2\text{ }\mu\text{s/div}$
(a)

$D=4\text{ m}$, $V: 696\text{ kV/div}$, $I: 200\text{ A/div}$, $t: 1\text{ }\mu\text{s/div}$
(b)

図5 図4の回路での $V-i$ 特性の計算結果⁽⁸⁾
Fig.5. Calculated $V-i$ characteristics with the circuit in Fig.4.

3. 長ギャップにおける積分法

前章で、雷サージ解析を精度良く行う手法として、非線形抵抗リーダモデルを提案した。しかし、この手法は、各時刻におけるギャップ間の等価抵抗やリーダ進展長を求めるため、計算時間がかかる。従って、ギャップの長さや雷撃電流などをパラメータとして大量に計算を行うには難がある。そこで、ギャップなどの $V-t$ 特性を求める方法として、従来からよく用いられている積分法に着目した。

積分法とは、(5)式で与えられるDEが、フラッシュオーバー判定値 B に達したときにフラッシュオーバーが生ずるとする方法である。特に $k=1$ とした場合は、等面積法と呼ばれ Kind によって提案された⁽¹⁵⁾。

$$DE(T) = \int_{T_0}^T \{V(t) - V_0\}^k dt \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $V(t)$: 印加電圧(V), V_0 : 計算開始電圧(V), T : 時間(s), T_0 : V_0 に最初に達する時刻(s), k : 定数

Caldwell らは、(5)式の各定数について検討を行った結果、 $k=1$ として V_0 を V_{50} の 82~92% を採用

すれば、単位長さ当たりの B は $3.8 \sim 5.6 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}/\text{cm}$ の比較的一定な値を有し、 $V-t$ 特性の実験結果と計算結果はよく合うとしている⁽¹⁰⁾。積分法は、(5)式の計算を行うだけであり簡易である。また、汎用過渡現象解析プログラムはもとより、アナログ回路により模擬することも容易であるので、モデル実験などにも適用できる利点がある。しかし、放電前駆電流による印加電圧の変わりを取扱えないので、印加電圧波形や波高値などについて限られた条件でしか使用できず、また長ギャップに適用するには難があるとされている⁽⁷⁾。

本章では、鈴木らが $2 \sim 5 \text{ m}$ の棒-棒ギャップについて実施した $V-t$ 特性の測定結果 (図 6 に黒丸および実線で示す)⁽¹⁶⁾ を用いて、 B および V_0 の値を決定し、長ギャップにも適用可能な定数の一般式を導出する。ただし、計算モデルはなるべく簡単にするのが好ましいと考え、 $k=1$ とした。

$V(t)$ を波高値 V_p 、波頭長 T_f 、波尾長 T_t のランプ波で近似し、フラッシュオーバー時刻を T_B として (5) 式を計算すると、 $T_B > T_f$ において (6) 式が得られる (付録 2 参照)。

$$B = (V_p - V_0) \{ T_B - (T_f + T_0)/2 \} \dots \dots \dots (6)$$

波頭長付近である $T_B \approx 2 \mu\text{s}$ における測定データについては、 $V(t)$ をランプ波で近似した場合の (5) 式の計算結果には誤差が多く含まれる。そこで、測定デー

(a) 実験回路

(b) $V-t$ 特性

図 6 長ギャップの $V-t$ 特性

Fig. 6. $V-t$ characteristics of long air gaps.

図 7 ギャップの長さ $D-V_0$ 特性
Fig. 7. Gap length - V_0 characteristics.

図 8 ギャップの長さ $D-B$ 特性
Fig. 8. Gap length - B characteristics.

タのうち、 $T_f < T_B < 20 \mu s$ を対象とした。

V_0 および B は、(6)式を用いたときの B の標準偏差が最小となるように決定した。それらを記号(●、▲)で図7、図8に示す。また同図に、1m前後のギャップ長についてCaldwellらが実験より求めた最適値⁽¹⁰⁾を記号(○、△)で示す。

図7、図8より、いずれの特性もギャップの長さ D に関して直線性を有していることがわかる。鈴木らの実験における印加電圧波形(2.5/53 μs)および標準波(1.5/50 μs)⁽¹⁷⁾における V_{50} の90%を、それぞれ図7に示す(正極性：実線、負極性：破線)。これより鈴木らの実験には2.5/53 μs における特性がよく一致し、またCaldwellらの実験には1.5/50 μs における特性がよく一致している。ここで、Caldwellらが V_0 決定の際に、1.3/53 μs の印加電圧波形における実験結果を用いていることを考慮すれば、 V_0 は、波頭長が T_f で波尾長の十分長い波形における V_{50} の90%を採用すればよいと考えられる。他方、図8の B - D 特性は、次式で近似される。

$$\left. \begin{aligned} B &= 0.65D - 0.04 : \text{正極性} \\ B &= 0.61D - 0.15 : \text{負極性} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

(7)式の定数項は十分小さいので、単位長さ当たりはほぼ一定となり、Caldwellらの主張と一致する。

図6の実験回路で、上記の定数による積分法を用いて V - t 特性を計算した結果を破線で示す。これより計算結果と実験結果は良好に一致しており、上記の定数が妥当であることがわかる。

以上、積分法は、数十cmから数mのギャップの長さに適用できることを明らかにした。積分法を使用するにあたって(5)式の各定数は、 $k=1$ として、計算開始電圧 V_0 を波頭長が T_f の印加電圧波形における V_{50} の90%とし、 B については、(7)式により求めればよい。一般に V_{50} は波頭長により変化するが、これについては相原らが、 T_f 、 D 、 V_{50} の間の関係について検討を行っている⁽¹⁸⁾。

4. 雷サージ解析への適用

<4・1> 短波尾波における実験結果との比較

鉄塔の塔頂雷撃時にホーン間に発生する電圧波形は、大地からの反射波により短波尾波となり、標準波と異なる。そこで、ギャップの長さ3mの V - t 特性について、青島らによる実験⁽¹⁹⁾と第2、第3章で提案した非線形抵抗リーダモデルおよび積分法による計算結果との比較を行った。ただし、計算回路は図9である。

図9 短波尾波発生回路
Fig. 9. Circuit for short-tail wave.

図10 短波尾波における実験結果および計算結果の比較
Fig. 10. Comparison between experimental results and calculated results for short-tail wave.

短波尾波(1.2/3.6 μs)における V - t 特性の実験結果(実線)、非線形抵抗リーダモデル(破線)および積分法(一点鎖線)による計算結果を図10に示す。ただし、図中の記号(*)は、積分法においてフラッシュオーバー判定基準値にいたる前に、波尾部で $V(t) < V_0$ となり、フラッシュオーバーしないと判定することを表す。

負極性については、計算結果と実験結果との間に差異が見られるが、その差は数%程度であり、実用上十分な精度を有しているといえる。従って、短波尾波においても両手法は有効な手法である。

<4・2> 2本の棒-棒ギャップのフラッシュオーバー特性
並列に接続された棒-棒ギャップのフラッシュオーバー

特性を把握することは、送電線における多相フラッシュオーバー現象を解析するうえで重要である。そこで、新藤らが3m前後の棒-棒ギャップについて実施した実験⁽⁹⁾⁽²⁰⁾に本モデルを適用し、その有効性を確かめた。

図11に計算に使用した実験回路を示す⁽²⁰⁾。また、図12に実測結果および新藤らによる計算結果を実線

図 11 並列棒-棒ギャップフラッシュオーバー特性計算回路

Fig.11. Calculation circuit of flashover characteristics of parallel rod-rod gaps.

図 12 図 11 の回路での $V-i$ 特性の計算結果⁽²⁰⁾

Fig.12. Calculated $V-i$ characteristics with the circuit in Fig. 11.

および破線で示し、非線形抵抗リーダモデルおよび積分法による計算結果を点線および一点鎖線で表す。

図12より、階段波のフラッシュオーバー現象においても非線形抵抗リーダモデルは、新藤らの計算結果とよく一致しており、その有効性が明らかである。しかしながら、積分法については、Gap1がフラッシュオーバーした瞬間にGap2の端子間電圧が $V(t) < V_0$ となり、フラッシュオーバーしないと判定する。これは、積分法がリーダ進展の影響を考慮していないためであり、 V_0 をDEの関数として表す必要がある⁽¹⁰⁾。

本提案モデルによれば、ギャップが数本ある場合でも同様のデータカード（添字およびギャップの長さや電圧の極性の違いによる定数の変更のみ）で模擬できるため、送電鉄塔における多相フラッシュオーバー現象のように数本のギャップの放電進展様相を同時に考慮する必要があるような解析にも適用できる。

〈4・3〉 時変性を有する塔脚接地インピーダンスが変電所過電圧に与える影響

前節までに、提案手法によりアークホーンにおけるフラッシュオーバー特性を精度良く求めることができることを示した。特に非線形抵抗リーダモデルは、放電進展時からフラッシュオーバー後にいたるアークホーンのインピーダンスの変化を模擬できるため、鉄塔雷撃時の逆フラッシュオーバーにより変電所に侵入する雷サージの解析が可能である。

図13に示すUHV系統の送電線および簡易模擬変電所からなる回路⁽²¹⁾において、雷撃鉄塔の塔脚接地インピーダンスが、図14に示すような過渡特性をもつ回路⁽⁹⁾で表せる場合、塔脚接地インピーダンスの相違が、変電所における過電圧に与える影響を検討した。なお、計算に用いたモデルは、送電線については二相回路モデル⁽²¹⁾を用いた。またフラッシュオーバーモデルは、非線形抵抗リーダモデルと平坦性については、表1に示す2折線近似のリーダモデル⁽⁵⁾を用いた。なお塔脚接地インピーダンスの時定数は、折線近似リーダモデルでのフラッシュオーバー時間と一致するように選んだ。

図 13 雷サージ解析モデル

Fig.13. Model circuit for lightning surge analysis.

図 14 塔脚接地インピーダンスモデル
Fig. 14. Models of tower footing impedance.

表 1 折線近似リーダモデル定数
Table 1. Constants in leader development model by the use of linear approximation.

時 刻	インダクタンス
0~0.42 μs	∞
0.42~0.94 μs	2.051 μH
0.94~1.07 μs	14.03 μH
1.07 μs ~ ∞	5.000 μH

図 15 に (a)リーダ進展長, (b)ホーン間電圧, (c)塔頂・塔脚電位, (d)図 13 中の Node A における電位の計算結果を示す (折線近似リーダモデル: 実線, 平坦性: 点線, 誘導性: 一点鎖線, 容量性: 破線)。

図 15 より, 折線近似リーダモデルおよび非線形抵抗リーダモデルによる計算結果は, ホーン間電圧波形を除いて有意差は見られない。従って, 非線形抵抗リーダモデルは, 実システムの雷サージ解析に, 通常用いられている^{(3)~(5)}折線近似リーダモデルに対しても十分な精度を有しており, モデルの有用性が明らかである。なお, ホーン間電圧において両者が若干異なるのは, 折線近似リーダモデルの折線の数が少ないことによるものと考えられる。次に, 塔脚接地インピーダンスモデルの影響について見ると, 計算結果より, 平坦性と容量性の差異はごくわずかである。しかし, それらと誘導性との間には明らかな相違がある。Node A での電位の最大値は, 平坦性で 4.08 MV, 容量性で 3.91 MV であり, その差は 4% である。しかし, 誘導性では 5.08 MV となっており, 平坦性と誘導性では 25% もの差異がある。これは, 誘導性の場合過渡的な塔脚接地インピーダンスが高いため, アーム電位が高くなることと, それによりホーン間電圧が大きくなりフラッシュオーバー時間が早くなるためである。よって, 厳密な雷サージ解析を行う際には, 塔脚接地インピーダンスについても, より実際に近い特性を考慮する必要がある。

(a) リーダ進展長

(b) ホーン間電圧

(c) 塔頂・塔脚電位

(d) Node A における電位

図 15 図 13 の回路での計算結果
Fig. 15. Calculated results with the circuit in Fig. 13.

5. 結 言

長ギャップのフラッシュオーバー特性を汎用過渡現象解析プログラムにおいて模擬する方法として, 非線形抵抗リーダモデルと積分法について述べた。リーダモデ

ルは、従来直接に汎用過渡現象解析プログラムでは模擬できなかったが、これを非線形抵抗として表すことにより模擬が可能になることを示した。また、積分法については、計算式の定数を選定する方法について述べ、それらが数十 cm から数 m の広い範囲で適用できることを示した。

これらの手法は、実験結果ともよく一致し、汎用過渡現象解析プログラムにおいて実行可能であることから、汎用性が高い特長を有する。

上記の 2 手法のうち、厳密な雷サージ解析を行う際には、非線形抵抗リーダモデルは計算所要時間は大となるが、時々刻々と変化するギャップ間のインピーダンスを模擬できるので有効な手法である。また、統計的な解析などの多数回の計算を必要とする場合には、積分法は、放電前駆電流の影響を考慮できないため厳密さには欠けるが、模擬が容易であり計算所要時間も小であることから、有効な手法である。

終りに、汎用過渡現象解析プログラムおよびリーダモデルに関して貴重な御意見をいただいた同志社大学雨谷昭弘教授ならびに長岡直人助教授に謝意を表します。

(平成 4 年 6 月 26 日受付, 同 4 年 12 月 10 日再受付)

文 献

- (1) W. S. Meyer: EMTP Rule Book (1982)
- (2) K. U. Leuven EMTP Center: ATP User's Rule Book (1987)
- (3) 「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, 44, No. 3 (昭 63)
- (4) 「電力系統における雷サージ解析の新技术」, 電気学会技報 (II 部), No. 244 (昭 62)
- (5) 「発変電所の雷サージ解析における各種パラメータとその影響」, 同上, No. 301 (平成)
- (6) 安生, 菰田: 「送電鉄塔の多線雷フラッシュオーバー解析法」, 電学論 B, 97, 77 (昭 52-2)
- (7) T. Shindo & T. Suzuki: "A New Calculation Method of Breakdown Voltage-time Characteristics of Long Air Gaps", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-104, 1556 (1985)
- (8) T. Shindo, Y. Aoshima, I. Kishizima & T. Harada: "A Study of Predischarge Current Characteristics of Long Air Gaps", *ibid.*, PAS-104, 3262 (1985)
- (9) T. Shindo, I. Kishizima & T. Suzuki: "Flashover Characteristics of Air Gaps under Partly Chopped Waves", *IEEE Trans. PWRD*, PWRD-3, 1887 (1988)
- (10) R. D. Caldwell & M. Darveniza: "Experimental and Analytical Studies of the Effect of Nonstandard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-92, 1420 (1973)
- (11) L. Dube & H. W. Dommel: "Simulation of Control Systems in an Electromagnetic Transients Program with TACS", *IEEE PES PICA Conference Record*, Vol. 10, 266 (1977)
- (12) 長岡: 「非線形インダクタンスを用いたフラッシュオーバーモデル」, 電学論 B, 111, 529 (平 3-5)
- (13) H. W. Dommel: "Nonlinear and Time-varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-90, 2561 (1971)
- (14) 青島・新藤・岸嶋・原田: 「気中ギャップのフラッシュオーバー電流に関する一検討」, 電中研報告, No. 184025 (昭 60)
- (15) D. Kind: "Die Aufbaufläche bei Stoßspannungsbeanspruchung Technischer Elektrodenanordnungen in Luft", *ETZ-A*, 79, 65 (1958)
- (16) T. Suzuki & K. Miyake: "Experimental Study of Breakdown Voltage-time Characteristics of Large Air Gaps with Lightning Impulses", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-96, 227 (1977)
- (17) T. Udo: "Switching Surge and Impulse Sparkover Characteristics of Large Gap Spacings and Long Insulator Strings", *ibid.*, PAS-84, 304 (1965)
- (18) Y. Aihara, T. Harada, Y. Aoshima & Y. Ito: "Impulse Flashover Characteristics of Long Air Gaps and Atmospheric Correction", *ibid.*, PAS-97, 342 (1978)
- (19) 青島・三宅: 「短波尾波による気中ギャップのフラッシュオーバー特性」, 電中研報告, No. T 87041 (平成)
- (20) 新藤・岸嶋: 「放電のシミュレーション (その 3)」, 同上, No. T 86018 (昭 61)
- (21) 長岡・雨谷: 「2 相回路モデルによる雷サージ解析」, 電学論 B, 106, 403 (昭 61-5)

付 録

1. 図 2 の回路とリーダモデルを組合せた場合の電圧・電流特性計算式

図 2 の回路方程式は、(付 1) 式で表される。

$$V_{\text{back}} = V + R_{\text{back}} i \quad \text{.....(付 1)}$$

(付 1) 式と本文 (2) 式から (付 2) 式が得られる。

$$V = V_{\text{back}} / (1 + CR_{\text{back}} v) \quad \text{.....(付 2)}$$

この V を (2) 式に適用して i が求まる。次にこの V , i を (1) 式に代入して v が求まり、更に (3) 式より x が決定される。リーダ進展開始時間 T_1 は (付 3) 式により与えられる⁽⁷⁾。

$$T_1 = A / (V_p / D - B) \quad \text{.....(付 3)}$$

ただし、 V_p : 印加電圧波高値, A, B : 電圧の極性で定まる定数

2. (6) 式の導出

波高値 V_p , 波頭長 T_f , 波尾長 T_t のランプ波は、(付 4) 式で表される。

$$\begin{aligned} V(t) &= V_p \cdot t / T_f \quad (t \leq T_f) \\ &= V_p \left\{ 1 - \frac{t - T_f}{2(T_t - T_f)} \right\} \quad (T_f < t) \\ &\quad \text{.....(付 4)} \end{aligned}$$

(付 4) 式を (5) 式に代入すると、フラッシュオーバー時刻 $T_B (> T_f)$ においては、(付 5) 式が得られる。

$$\begin{aligned} B &= (V_p - V_0) (T_f - T_0) / 2 + (T_B - T_f) \\ &\quad \times \left[V_p \left\{ 1 - \frac{T_B - T_f}{4(T_t - T_f)} \right\} - V_0 \right] \\ &\quad \text{.....(付 5)} \end{aligned}$$

$T_t \gg T_f$ および $4T_t \gg T_B$ より、(付 5) 式は (6) 式で近似できる。

関 岡 昇 三 (正員)

昭和38年12月30日生。61年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。62年7月(株)関西テック入社。主として、電力系統における雷サージ解析に関する研究に従事。

鈴 木 誠 (正員)

昭和32年12月22日生。53年3月豊田工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。同社総合技術研究所にて高電圧、雷害対策関係の研究に従事。現在、神戸支店に勤務。

山 本 賢 司 (正員)

昭和17年7月24日生。43年3月大阪工業大学電子工学科卒業。同年4月大阪大学工学部電気工学教室勤務。工学博士。主として、送配電線路の耐雷設計に関する研究に従事。

藤 本 爵 (正員)

昭和18年2月10日生。40年3月大阪工業大学電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在、同社総合技術研究所発電設備(水力発電)研究室主幹。主として、水力発電設備の研究、開発および雷害対策関係の研究に従事。

今 井 真 司 (非会員)

昭和33年5月9日生。54年3月舞鶴工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。同社総合技術研究所にて高電圧、雷害対策関係の研究に従事。現在、京都支店に勤務。

木 下 仁 志 (正員)

大正10年8月9日生。昭和18年9月大阪大学工学部電気工学科卒業。22年4月関西配電(株)(現、関西電力)入社。42年11月同社総合技術研究所副所長。49年11月大阪大学工学部教授。60年4月大阪工業大学教授。現在、関西電力(株)顧問。工学博士。