

XTAP 例題集		番 号	STL-03
例題名	短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバ・モデル（詳細モデル，AC 重畳不可）を用いたフラッシュオーバ計算		
分 野	発変電所の雷サージ解析，過電圧解析		
文 献	本山，「雷サージ解析のための新フラッシュオーバモデルの開発」，電気学会論文誌 B，115 巻 7 号，pp. 839 – 846, 1995.		
概 要	<p>発変電所の雷サージ解析では，第 1 鉄塔上相のアークホーンがフラッシュオーバすることにより雷サージが発変電所に侵入すると仮定して計算を行う。また，送電線の雷サージ解析では，各アークホーンのフラッシュオーバの有無により地絡事故様相を推定する。このように，アークホーンのフラッシュオーバ現象を正確にモデル化することは，発変電所および送電線の雷サージ解析を精度良く行う上で極めて重要である。</p> <p>従来，アークホーンのフラッシュオーバ・モデルとしては，新藤らが提案したリーダーモデル，もしくはこれを簡略化してインダクタとスイッチで表現したモデルが利用されてきた。しかし，このモデルでは，アークホーンがフラッシュオーバしない条件を仮定して事前に予備計算を行っておく必要があることや，実際にアークホーンに加わる電圧は短波尾波であるにもかかわらずモデル定数が標準波を用いた実験から導出されているといった点で改善が必要であった。そこで，本山は，雷サージ計算と同時にリーダー（放電）の進展を計算することで予備計算を不要とし，また，短波尾波を用いた実験からモデル定数を導出することにより新しいアークホーン・フラッシュオーバのモデルを開発した。</p> <p>本例題では，上記の短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバ・モデル（本山モデル）を用いてフラッシュオーバ計算を行い，実測結果との比較を行う。</p> <p>※ 本例題で紹介するリーダーモデルは，系統電圧印加の状態から雷撃を想定するケースなど，定常交流電圧にインパルス電圧が重畳するケースでは適切に計算が行えない場合がある。定常交流電圧が存在するケースに適用する場合には，例題番号 STL-04 で紹介する簡略モデルを使用すること。</p>		

解析回路・解析条件

図 1 に解析回路を示す。解析回路の左側は、短波尾の電圧波を発生するインパルス・ジェネレータ (IG: Impulse Generator) の等価回路であり、これにより発生した電圧を供試物であるアークホーンに印加する。

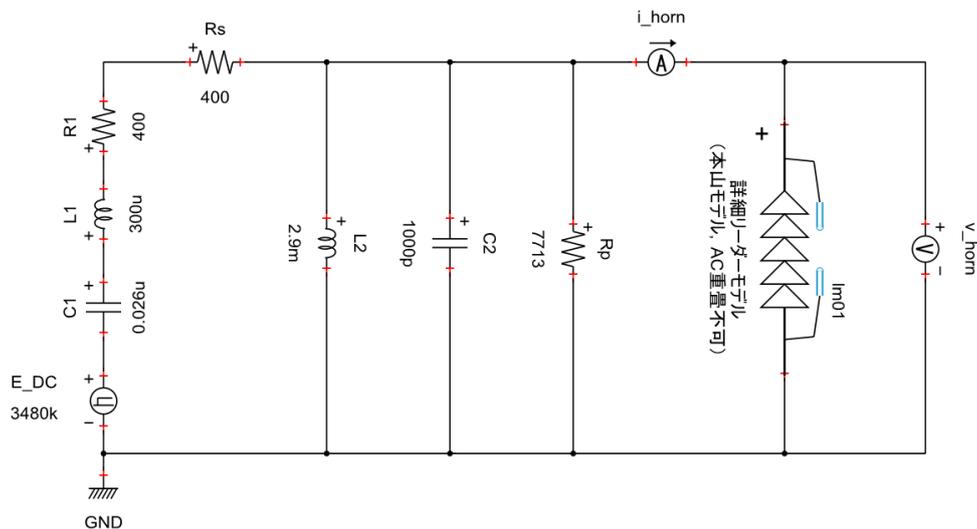


図 1 解析回路

【アークホーン・フラッシュオーバー現象】

ここでは、アークホーンを理想化して棒-棒電極と考え、アークホーン・フラッシュオーバー現象の概略について説明する。棒-棒電極間に高電圧が印加されると、まず、電極間において電子雪崩がストリーマ放電に移行し、さらに電離波が電極間を伝搬する。ただし、ここまでの現象は電流が極めて小さく、強い発光を伴わない。次に、両電極の先端から強い発光を伴うリーダーが発生し、電極間を短絡する方向に進展を開始する。最終的には、電極間の中央付近で両リーダーが結合することにより、両電極は短絡されフラッシュオーバーが完了する。この後、電離ガスを加熱する過程を経て、短絡したリーダーはアーク放電に移行する。

以上の現象をモデル化し、雷撃時のフラッシュオーバーの有無やリーダー進展中に流れる電流を再現しようとするのがアークホーン・フラッシュオーバー・モデルである。以降、本山による短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバー・モデルの概略と XTAP でのモデル化について述べるが、詳細については本例題解説の表紙に示した文献を参照されたい。

【リーダー進展開始条件の計算】

先述したようにリーダー進展開始までの現象は電流が極めて小さいため、雷サージ解析にはほとんど影響を及ぼさない。そこで、本山による短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバ・モデル（以降、本山モデルと略す）では、リーダーが進展開始するまで電流は流れないものとする。本山モデルでは、アークホーン間電圧 V について次式が成立した時刻 T_s をリーダー進展開始時刻とし、その時刻からリーダー進展のシミュレーションを開始する。

$$\text{正極性の場合： } \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V(t) dt > 400D + 50 \text{ [kV]} \quad (1)$$

$$\text{負極性の場合： } \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V(t) dt > 460D + 150 \text{ [kV]} \quad (2)$$

ただし、 D [m] はアークホーン間の電極間距離である。上式の左辺は電極に印加される平均電圧であり、これが右辺に表される D により定まる一定値を超えた時点でリーダーが進展開始すると仮定する。なお、(1), (2) 式では、瞬時の電圧値ではなく積分により算出した平均電圧値を採用することにより、「ストリーマ放電が電極間を短絡してリーダーに転換するためには、ある一定値以上のエネルギーが電極間に供給される必要がある。」という物理的要件を近似的に再現している。

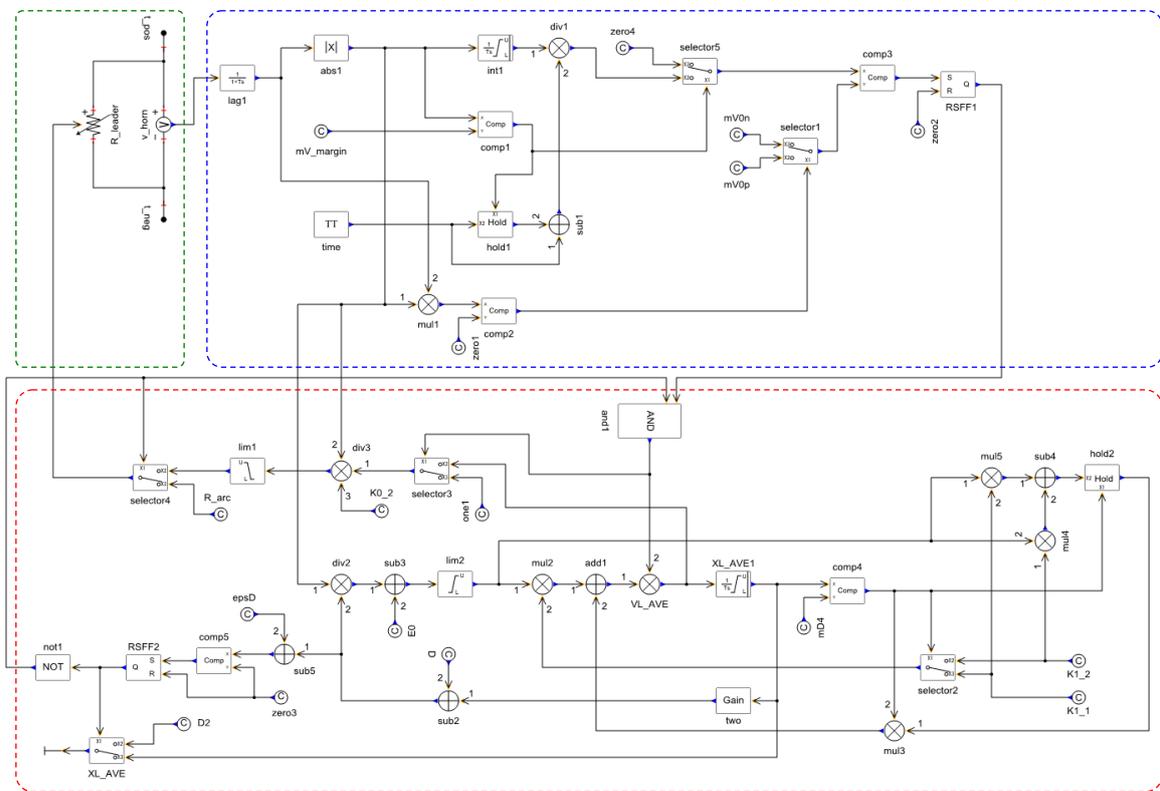


図2 本山モデル（詳細モデル）の実装

図2は、本山モデルをXTAP上に実装したものである（図1の回路図中の「詳細リーダーモデル」を右クリックし、「部品化図編集」を選択することにより本モデルを参照できる）。図中、青の点線で囲んだ部分が、リーダー進展開始条件の計算を行っている部分である。実装においては、解析の初期にアークホーン間に電圧が加わらない時間が存在する場合であっても正しく積分が行われるよう、一定以上の電圧に達してから積分を開始するようにしている。

なお、上記の手法では、系統電圧印加の状態から雷撃を想定するケースなど、定常電圧が印加されている状態にインパルス電圧が重畳するケースでは適切に計算できないことがある。定常電圧が存在するケースに適用する場合には、例題番号STL-04のモデルを使用すること。

【リーダー進展過程の計算】

リーダー進展開始条件が成立すると、リーダー進展過程のシミュレーションを開始する。このシミュレーションでは、まずリーダーの進展速度 v_{LAVE} [m/s] を次式により計算する。

$$v_{LAVE} = K_1 \left(\frac{V}{D - 2X_{LAVE}} - E_0 \right) \quad (3)$$

ただし、 K_1 [m²/V/s] は速度比例係数、 X_{LAVE} [m] はリーダー長、 E_0 [V/m] は最低リーダー進展電界である。リーダー長 X_{LAVE} は、リーダー進展速度 v_{LAVE} の積分であるから、次式で計算できる。

$$X_{LAVE} = \int v_{LAVE} dt \quad (4)$$

このとき、アークホーン間に流れる電流 I_L は、速度 v_{LAVE} で進展するリーダーに供給された単位時間あたりの電荷であるから、次式により計算することができる。

$$I_L = 2K_0 v_{LAVE} \quad (5)$$

ただし、 K_0 [C/m] は電荷比例係数である。

なお、(3) 式の E_0 および (5) 式の K_0 は定数であり、次の値を用いる。

$$E_0 = 750 \times 10^3 \text{ [V/m]}, \quad K_0 = 410 \times 10^{-6} \text{ [C/m]}$$

(3) 式の K_1 は、リーダー長により変化する値であり

$$0 < X_{LAVE} < D/4 \text{ のとき} \quad K_1 = 2.5 \text{ [m}^2\text{/V/s]}$$

$$D/4 < X_{LAVE} < D/2 \text{ のとき} \quad K_1 = 0.42 \text{ [m}^2\text{/V/s]}$$

とする。ただし、(3) 式は、リーダー進展速度の電界に対する傾きが K_1 であることを便宜的に示した式であって、リーダーが伸びてその長さが $D/4$ を超えた場合に $K_1 = 0.42$ をそのまま (3) 式に代入しても正しいリーダー進展速度は得られない。リーダー長が $D/4$ を超えた時点でのリーダー進展速度の値を保持しておき、そこから傾き $K_1 = 0.42$ でリーダー進展速度が増加していくという形で (3) 式の計算を行う必要がある。

計算を進めていき、リーダー長が次式の条件を満たすとアークホーン間はリーダーにより短絡されフラッシュオーバが完了する。その後、リーダーはアーク放電に移行する。

$$X_{LAVE} \geq \frac{D}{2} \quad (6)$$

また、アークホーン間電圧 V が低下して次式の条件が成立すると (3) 式の括弧の中が負となり、リーダーは進展を停止するものとする。

$$V < (D - 2X_{LAVE})E_0 \quad (7)$$

図 2 の本山モデルの実装において、以上のリーダー進展過程の計算を行っているのが赤の点線で囲んだ部分である。

【シミュレーションのための等価抵抗】

本実装では、(1) 式もしくは (2) 式のリーダー進展開始条件が成立するまでの時間については電流が流れないと仮定して、アークホーンの等価的な抵抗値を非常に大きな値 **R_init** に設定する。次に、リーダーが進展を開始すると、(3) ~ (5) 式を用いてアークホーン間電圧 V からリーダー電流 I_L を計算し、その等価的な抵抗値を

$$R_{eq} = \frac{V}{I_L} \quad (6)$$

に設定する。(6) 式が成立し、アークホーン間がリーダーにより短絡されると、アークホーンの等価的な抵抗値をアーク抵抗に相当する小さな値 **R_arc** に設定する。

図 2 の本山モデルにおいて、上記の等価抵抗に相当するのが、緑の点線で囲んだ部分である。

【パラメータの設定】

図 1 のリーダーモデルをダブルクリックすると種々のパラメータを設定できるようになっているが、ユーザが解析の度に設定すべきパラメータは、アークホーンの電極間距離 **D** とアーク抵抗 **R_arc** である。その他、設定可能なパラメータとそのデフォルト値を以下に示しておく（ほとんどの場合、これらのパラメータの値を変更する必要は無い）。

リーダー定数

電荷比例係数 K_0 [C/m]

$$K_0 = 410e-6$$

速度比例係数 K_1 [m²/V/s] ($0 < X_{LAVE} < D/4$)

$$K_{1_1} = 2.5$$

速度比例係数 K_1 [m²/V/s] ($D/4 < X_{LAVE} < D/2$)

$$K_{1_2} = 0.42$$

最低リーダー進展電界 E_0 [V/m]

$$E_0 = 750e3$$

リーダー進展開始時間計算のための電圧不感帯 [V]

$$V_{margin} = 10e3$$

リーダー橋絡判定の裕度

$$\mathbf{eps} = 0.05$$

リーダー進展前の等価抵抗値 [Ω]

$$\mathbf{R_init} = 1e6$$

内部処理用一次遅れフィルタの時定数 [s]

$$\mathbf{tau} = 10e-9$$

【解析条件】

解析条件は次の通りとした。

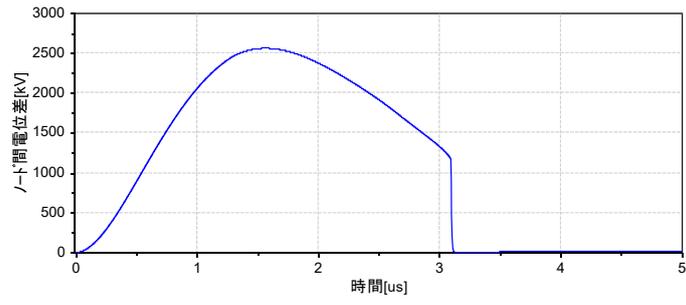
- ・ 計算時間刻み 1 ns
- ・ 計算開始時間 0 μ s
- ・ 計算終了時間 5 μ s
- ・ 表示開始時間 0 μ s
- ・ 表示終了時間 5 μ s

解析結果

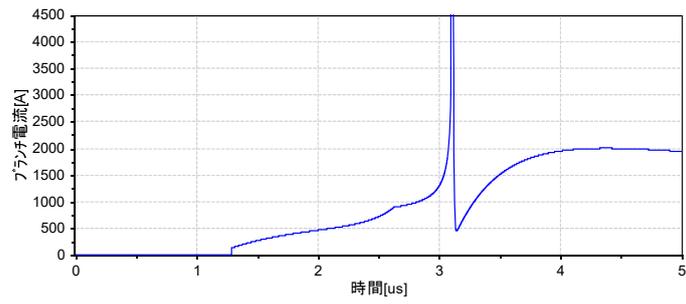
アークホーンの電極間距離 D を 3 m, アーク抵抗 R_{arc} を 5 Ω に設定し (その他のパラメータについてはデフォルト値とした), 図 1 の解析回路で計算を行った結果を図 3 に示す。アークホーン間電圧, リーダー電流に加えて, リーダー長, リーダー進展速度を示した (リーダー長, リーダー進展速度についてはそれぞれ **XLAVE**, **VLAVE** という変数名で出力される)。計算結果は図 4 に示す実測結果 (本例題解説の表紙に示した文献より転載) と良く一致する。

次に, アークホーンの電極間距離 D を 1 m, 2 m, 3 m と変化させ, それぞれについて正極性の場合と負極性の場合の $V-t$ 曲線を計算した結果を図 5 に示す。計算結果は, 以下の文献に示された実測結果と良く一致している。

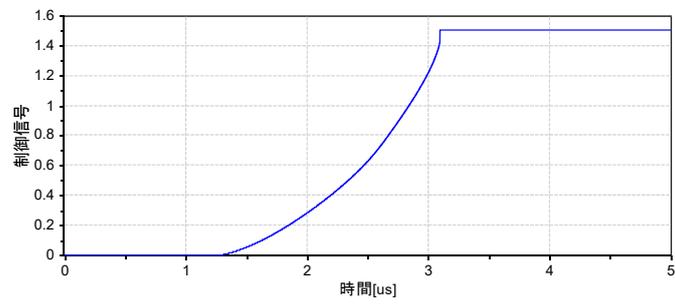
青島, 三宅, 「短波尾雷インパルス電圧による気中ギャップのフラッシュオーバー特性」, 電力中央研究所 研究報告 T87041, 昭和 63 年 4 月.



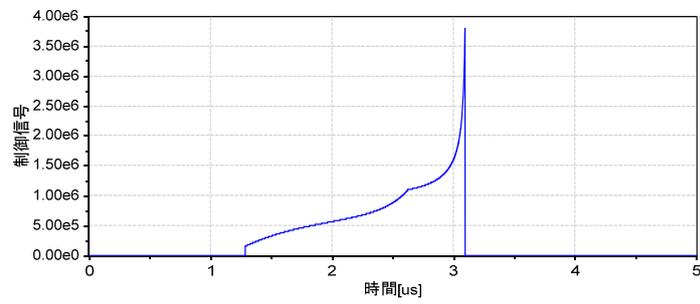
(a) アークホーン間電圧



(b) リーダー電流

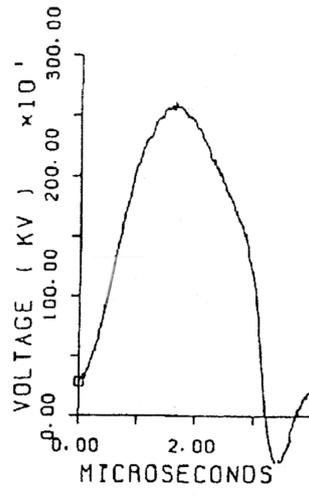


(c) リーダー長

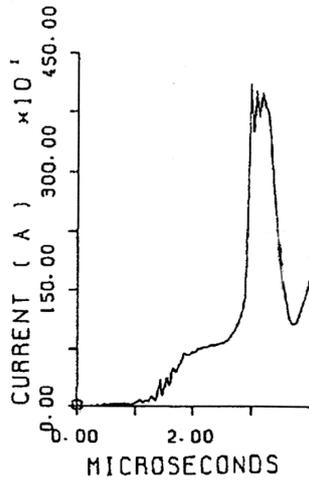


(d) リーダー進展速度

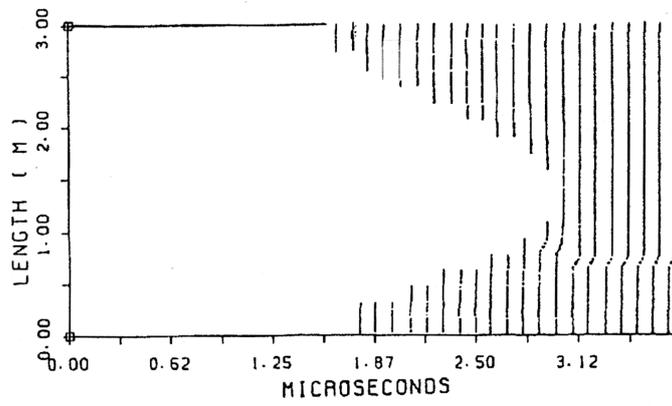
図3 解析結果



(a) アークホーン間電圧

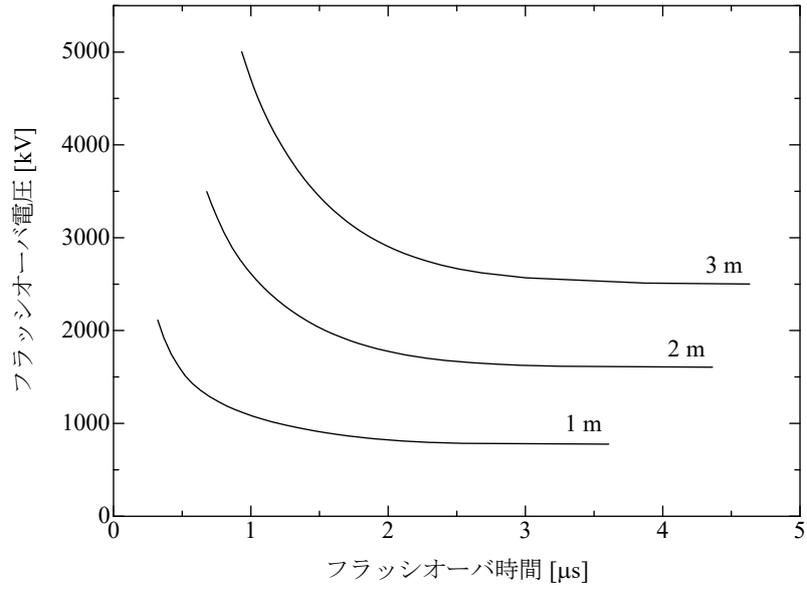


(b) リーダー電流

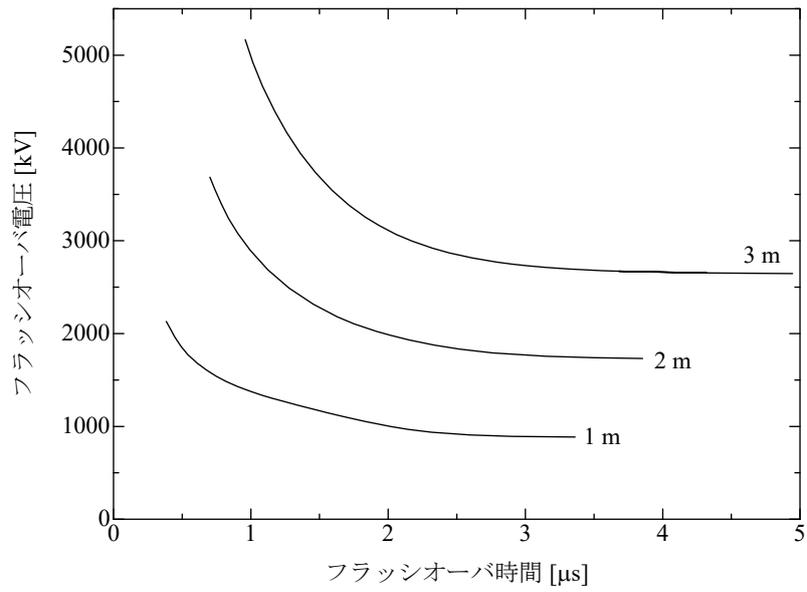


(c) リーダー長

図4 実測結果



(a) 正極性



(b) 負極性

図5 $V-t$ 曲線計算結果

更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2022/07/08	2.1	例題番号を SLS-02 から STL-03 に変更しました。
2014/11/19	2.0	XTAP Version 2.00 用に修正
2012/07/19	1.2	XTAP Version 1.20 用に修正
2011/12/06	1.1	例題票の説明について SLS-03 との整合性をとった。
2011/11/11	1.1	モデルのアイコンに交流重畳不可であることを明記。
2011/11/04	1.0	初版作成（XTAP Version 1.11 用）