

XTAP 例題集		番 号	STL-04
例題名	短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバー・モデル（簡略モデル，AC 重畳可）を用いたフラッシュオーバー計算		
分 野	発変電所の雷サージ解析，過電圧解析		
文 献	H. Motoyama, K. Shinjo, Y. Matsumoto, and N. Itamoto, N., “Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku Test Transmission Line caused by winter lightning,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1391-1398, 1998.		
概 要	<p>本例題では，例題 STL-03 で紹介した「短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバー・モデル（詳細モデル，AC 重畳不可）」のリーダー進展開始条件を簡略化し，定常交流電圧重畳を可能としたモデルを紹介する。なお，短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバー・モデルの詳細については例題 STL-03 の解説を参照のこと。</p> <p>例題 STL-03 の詳細モデルでは，電圧の瞬時値を積分して平均電圧値を求め，この値がギャップ長で決まる一定値を超えるかどうかでリーダーの進展開始を判定していた。これは，「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模擬するものである。しかしながら，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，インパルス電圧以前の定常交流電圧により積分値が上昇してしまい，正確な平均電圧の算出ができない場合がある。この問題を解決するため，「アークホーン間の平均電界の絶対値が 500 kV/m を上回れば，リーダーが進展を開始する」という簡略化されたリーダー進展開始条件を採用し，定常交流電圧にインパルス電圧が重畳するケースにおいても解析を可能にしたのが，本例題で紹介する簡略モデルである。</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

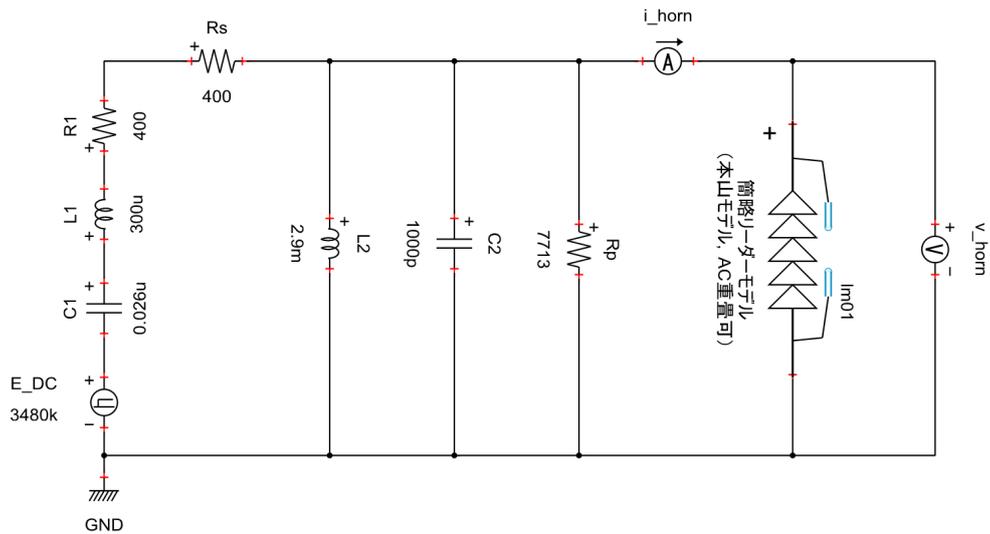


図1 解析回路

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。

【リーダー進展開始条件の計算】

例題 STL-03 の詳細モデルでは、電圧の瞬時値を積分して平均電圧値を求め、この値がギャップ長で決まる一定値を超えるかどうかでリーダーの進展開始を判定していた。しかしながら、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、インパルス電圧以前の定常交流電圧により積分値が上昇してしまい、正確な平均電圧の算出ができない場合がある。

上記の問題を解決するため、本例題の簡略モデルでは、「アークホーン間の平均電界の絶対値が $E_s = 500$ [kV/m] を超えれば、リーダーが進展を開始する」という簡略化されたリーダー進展開始条件を採用する。具体的には、 D [m] をアークホーンの電極間距離として、アークホーン間の電圧 $V(t)$ [kV] が

$$\frac{V(t)}{D} > E_s = 500 \text{ [kV]}$$

を満たせば、リーダーが進展を開始するものとする。

図2は、上記の簡略化されたリーダー進展開始条件を採用した本山の短波尾波用アークホーン・フラッシュオーバ・モデルを XTAP 上に実装したものである（図1の回路図中の「簡略リーダーモデル」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り、例題

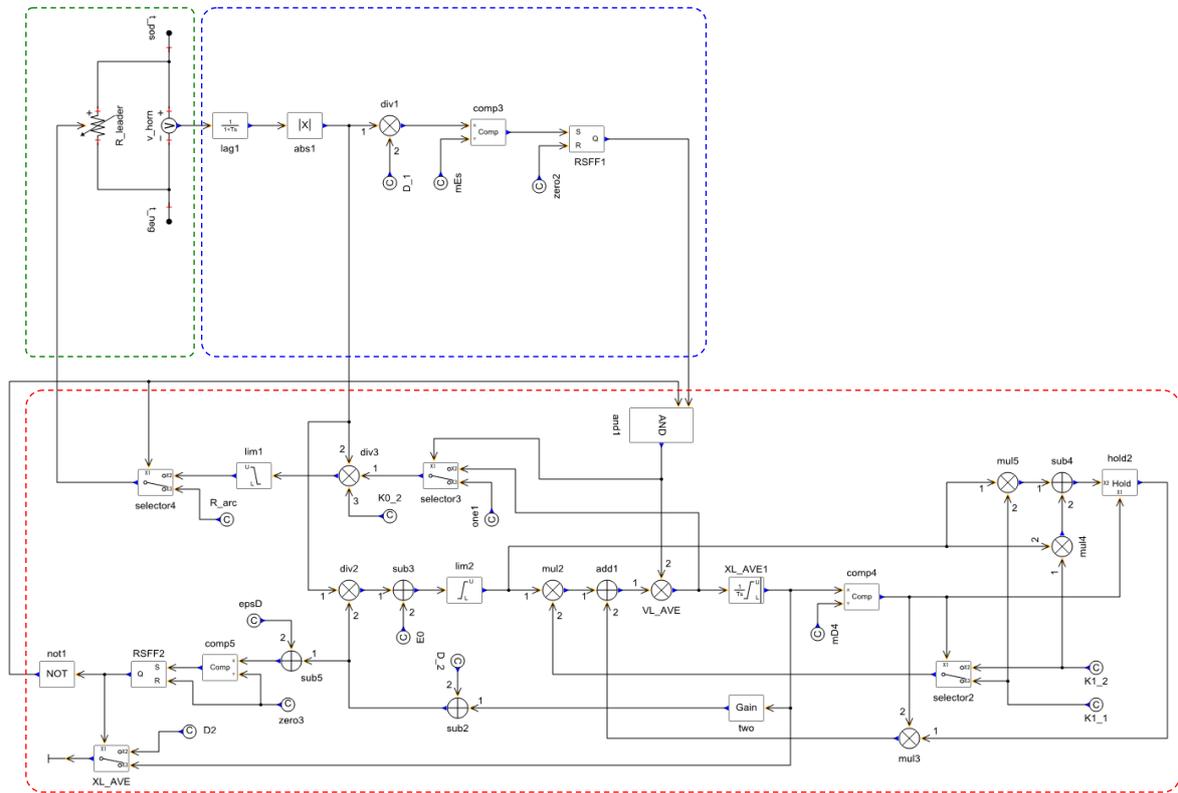


図2 本山モデル（簡略モデル）の実装

STL-03 の詳細モデルの対応する部分と比べると、大幅に簡単なものとなっている。

【リーダー進展過程の計算】

リーダー進展過程の計算手順については、例題 STL-03 の詳細モデルと全く同じであるが、速度比例係数 K_1 [$\text{m}^2/\text{V/s}$] の設定が少し異なっている。アークホーンの電極間距離 D が 1 m 以上の場合には、例題 STL-03 の詳細モデルと全く同じ値とするが、 D が 1 m より小さい場合には

$$0 < X_{LAVE} < D/4 \text{ のとき } K_1 = 1.0 \text{ [m}^2/\text{V/s]}$$

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

とする。上記の点以外に例題 STL-03 の詳細モデルと差異は無い。なお、図 2 の赤の点線で囲んだ部分でリーダー進展過程の計算を行っている。

【シミュレーションのための等価抵抗】

等価抵抗を計算する部分については、例題 STL-03 の詳細モデルと全く同じである。図 2 の緑の点線で囲んだ部分で等価抵抗の計算を行っている。

【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

リーダー進展開始電界 E_s [V/m]

$$E_s = 500e3$$

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] ($0 < X_{LAVE} < D/4, D < 1$ m)

$$K1_1a = 1.0$$

速度比例係数 K_1 [m²/V/s] ($0 < X_{LAVE} < D/4, D \geq 1$ m)

$$K1_1b = 2.5$$

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

$$K1_2 = 0.42$$

最低リーダー進展電界 E_0 [V/m]

$$E_0 = 750e3$$

リーダー橋絡判定の裕度

$$eps = 0.05$$

リーダー進展前の等価抵抗値 [Ω]

$$R_init = 1e6$$

内部処理用一次遅れフィルタの時定数 [s]

$$tau = 10e-9$$

【解析条件】

解析条件は次の通りとした。

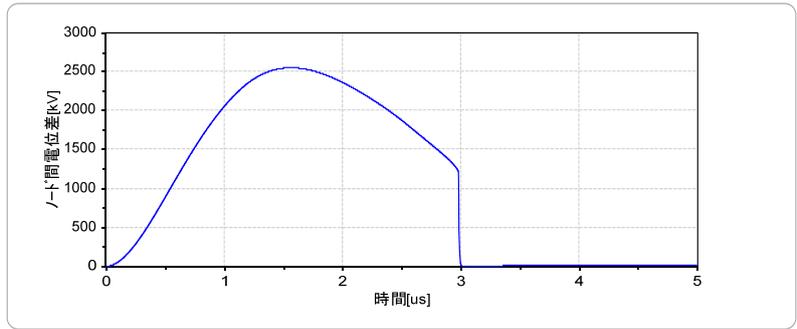
- ・ 計算時間刻み 1 ns
- ・ 計算開始時間 0 μ s
- ・ 計算終了時間 5 μ s
- ・ 表示開始時間 0 μ s
- ・ 表示終了時間 5 μ s

解析結果

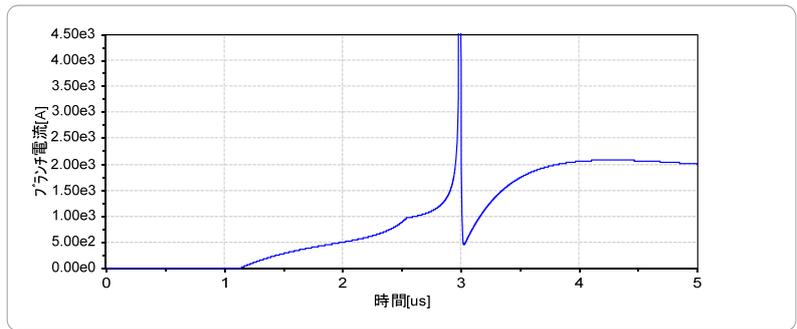
アークホーンの電極間距離 D を 3 m, アーク抵抗 R_{arc} を 5Ω に設定し (その他のパラメータについてはデフォルト値とした), 図 1 の解析回路で計算を行った結果を図 3 に示す。アークホーン間電圧, リーダー電流に加えて, リーダー長, リーダー進展速度を示した (リーダー長, リーダー進展速度についてはそれぞれ **XLAVE**, **VLAVE** という変数名で出力される)。計算結果は, 例題 STL-03 の解説に掲載した詳細モデルによる計算結果および実測結果と実用上問題の無い範囲で一致している。

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 4 に示す。本例題の簡略モデルでは, 正極性の場合と負極性の場合の区別が無いので, 両者で同じ結果が得られる。計算結果は, 詳細モデルによる計算結果および以下の文献に示された実測結果と, やはり実用上問題の無い範囲で一致する。

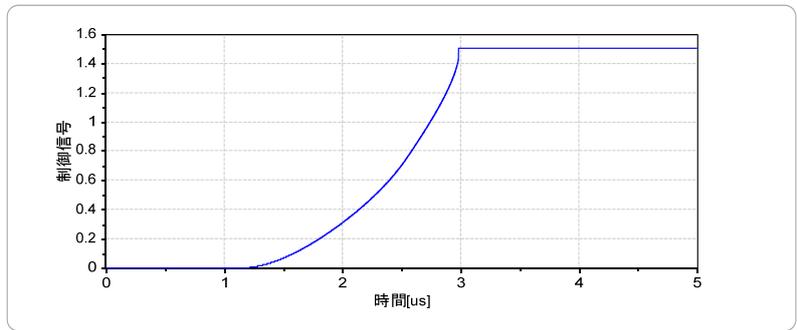
青島, 三宅, 「短波尾雷インパルス電圧による気中ギャップのフラッシュオーバー特性」, 電力中央研究所 研究報告 T87041, 昭和 63 年 4 月.



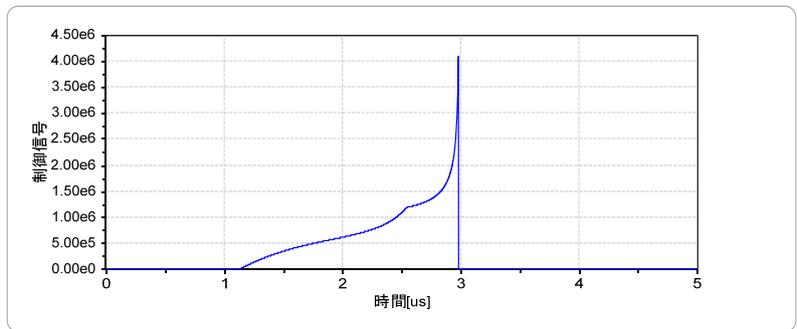
(a) アークホーン間電圧



(b) リーダー電流

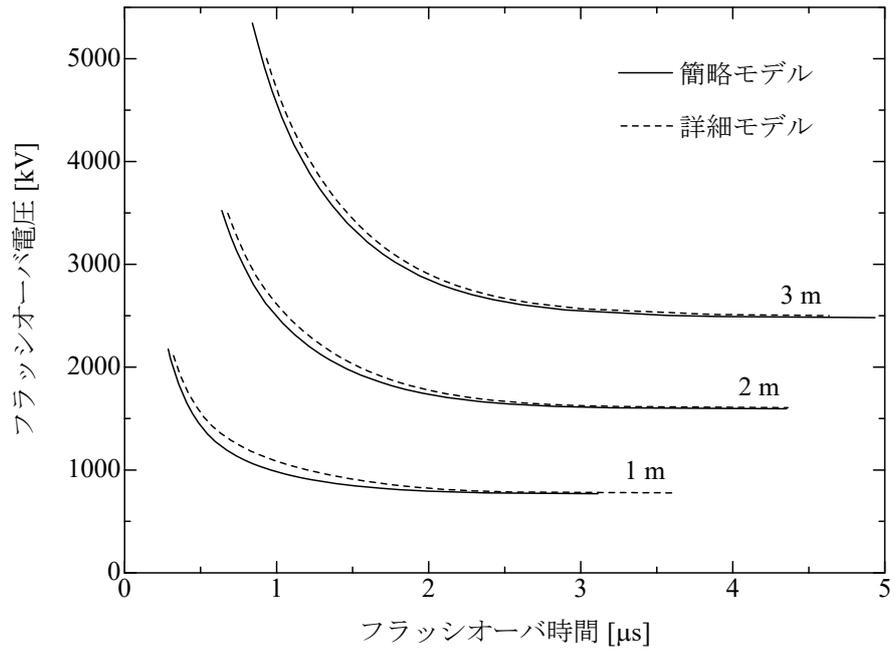


(c) リーダー長

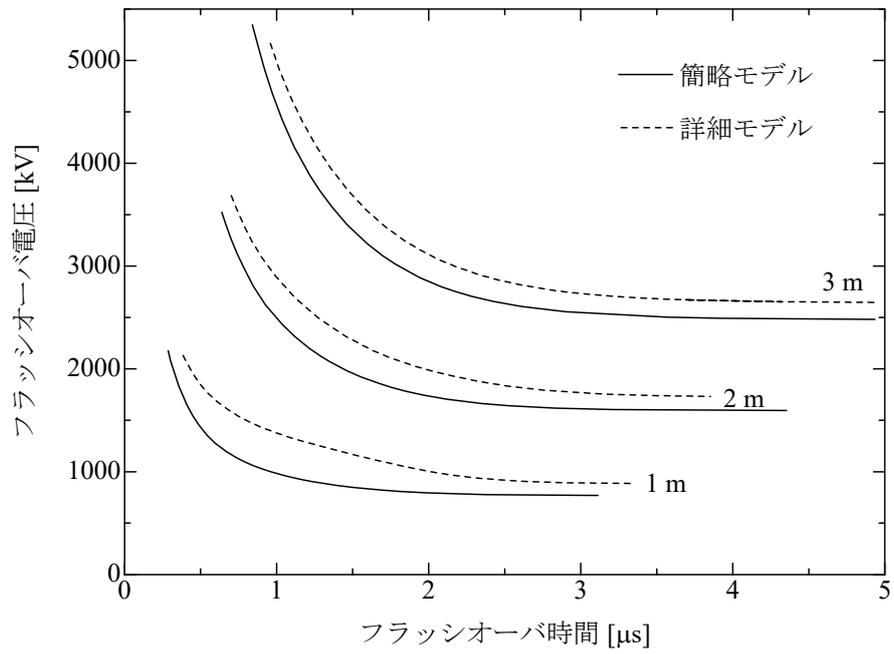


(d) リーダー進展速度

図3 解析結果



(a) 正極性



(b) 負極性

図4 $V-t$ 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-03 から STL-04 に変更しました。
2014/11/19	2.0	XTAP Version 2.00 用に修正
2012/07/19	1.1	XTAP Version 1.20 用に修正
2011/12/06	1.0	初版作成 (XTAP Version 1.11 用)