

変圧器直結ケーブル系統の雷撃電位上昇の計算

Calculation of Lightning Voltages in the Cable System Directly Connected to Transformer

伊藤 光 威* 山手 信 一 郎*

Mitsui Itô Shin'ichirô Yamate

加藤 勇 次 郎** 沼 尻 文 哉***

Yujirô Katô Fumiya Numajiri

要 旨

架空送電線とケーブルで構成された送電系統に雷撃があるときのケーブル系統に生ずる電圧波形を求める手法を詳述し、計算例として計画中の九州電力株式会社 220 kV 送電系統を取り上げた。計算の結果、逆フラッシュオーバー点の位置によっては変圧器直結端において BIL 値を越える雷電圧発生の可能性があり、さらに、ケーブルに加わる電圧波形の波頭長は 20~40 μ s で、ゆるやかな波形になることがわかった。この手法は架空線長、ケーブル長、鉄塔塔脚抵抗値、避雷器の位置などを任意に選べる応用性の広いものである。

1. 緒 言

架空送電線と直接接続されるケーブル線路は架空線側よりサージ電圧の侵入を受ける。さらに、ケーブル線路と変圧器が直接接続する場合には変圧器近傍に避雷器を設置できない。したがって、サージ電圧の侵入によって変圧器端の電圧上昇が保護レベルを越えないかどうかを正確に確認しておかなければならない。

この電圧値および電圧波形は最近では進行波法を用いたデジタル計算により求められている⁽¹⁾⁽²⁾。本報で述べる計算方法はこの進行波法をさらに発展させたものであり、おもな特長は次のとおりである。

- (1) 逆フラッシュオーバー時の現象を取り扱い、架空地線および鉄塔の進行波の伝播(でんぱ)を考慮している。
- (2) 鉄塔塔脚抵抗は鉄塔ごとに任意に設定できる。
- (3) 進行波の波頭ひずみを考慮している。

上記の項目を実現するための電子計算機プログラムを組み、架空線、変圧器直結ケーブル系統のサージ電圧を計画中の九州電力株式会社 220 kV OF ケーブル系統について計算し、系統設計上の基礎データとした。

2. 計 算 方 式

2.1 基本的考え方

図 1 に示すような系統の i 点での透過波および反射波ならびに i 点の電圧について考える。各点間の線路の特性値は図中に示したとおりとする。

($i-1$) 点から i 点へ侵入してくる波に対する透過係数 p_i は

$$p_i = \frac{2Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} = \frac{2/Z_i}{1/Z_i + 1/Z_{i+1}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

であり、反射係数は $(p_i - 1)$ となる。一方、($i+1$) 点から i 点へ侵入してくる波に対する透過係数 q_i は

$$q_i = \frac{2/Z_{i+1}}{1/Z_i + 1/Z_{i+1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり、反射係数は $(q_i - 1)$ である。

ある点へ左から侵入する波を A 、右から侵入する波を B とする。時刻 t_0 に i 点へ左から侵入してきた波(添字を用いて A_{i0} と表わす)は i 点で反射して左方へ進行する波 $A_{i0} \cdot (p_i - 1)$ と透過して右方へ進行する波 $A_{i0} \cdot p_i$ に分かれる。同様に、時刻 t_0 に i 点へ右か

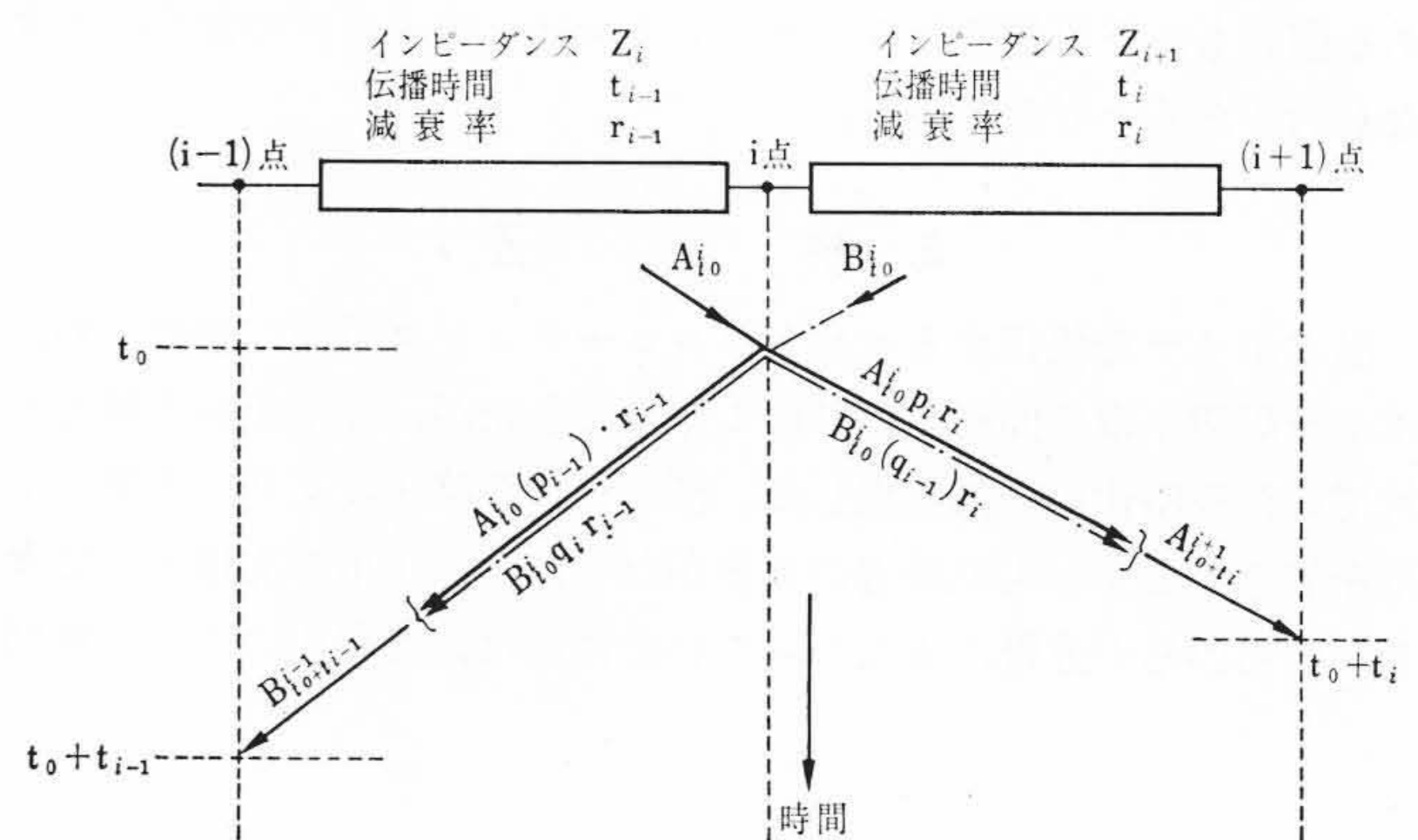


図 1 接続点における反射透過

ら侵入してきた波 B_{i0} により、反射して右方へ進行する波 $B_{i0} \cdot (q_i - 1)$ と透過して左方へ進行する波 $B_{i0} \cdot q_i$ とが生ずる。したがって、 i 点から左方へ進行して行く波はこれらの和であり、 $\{A_{i0} \cdot (p_i - 1) + B_{i0} \cdot q_i\}$ となり、一方、右方へ進行して行く波は $\{A_{i0} \cdot p_i + B_{i0} \cdot (q_i - 1)\}$ となる。これらの波が進行して、($i-1$) 点、($i+1$) 点へ到達するときにはそれぞれ r_{i-1} , r_i 倍に減衰し、さらにその時刻はそれぞれ $t_0 + t_{i-1}$, $t_0 + t_i$ になっている。

したがって、($i-1$) 点には $t_0 + t_{i-1}$ 時刻になって初めて右から波が侵入し、その電圧 $B_{i0}^{i-1} \cdot r_{i-1}$ は

$$B_{i0}^{i-1} \cdot r_{i-1} = \{A_{i0} \cdot (p_i - 1) + B_{i0} \cdot q_i\} \cdot r_{i-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、また、($i+1$) 点には $t_0 + t_i$ 時刻になって初めて左から波が侵入し、その電圧 $A_{i0}^{i+1} \cdot r_i$ は

$$A_{i0}^{i+1} \cdot r_i = \{A_{i0} \cdot p_i + B_{i0} \cdot (q_i - 1)\} \cdot r_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

電圧波 A_{i0} , B_{i0} が侵入する前の i 点の電圧を V_{i0} とすれば A_{i0} および B_{i0} が侵入した直後には次のような電圧に変化する。

$$V_i = V_{i0} + A_{i0} \cdot p_i + B_{i0} \cdot q_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、すべての進行波は階段波の重畳したものとして近似する。計算機プログラムでは A_{i0} , B_{i0} などは添字付変数を使用すれば容易に表現することができる。避雷器がある場合には(5)式で計算した電圧値で放電するかどうかを判定し、放電するならば電圧を避雷器の電圧電流特性に従って変化させるとともに、その後に侵入する波に対して透過反射係数を変化させる。架空送電線逆フラッシュオーバーの場合にも同様に(5)式により計算した架空地線と本線間の電圧の差がフラッシュオーバー電圧以上であるかどうかを判定し、フラッシュオーバーするならばそれに伴う電圧変化と反射透過係数の計算を行な

* 九州電力株式会社

** 日立電線株式会社日高工場

*** 日立電線株式会社研究所 工学博士

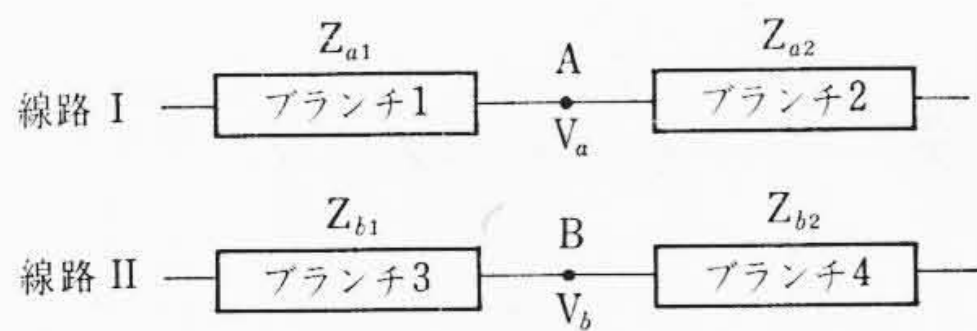


図2 逆フラッシュオーバー時の現象の説明図

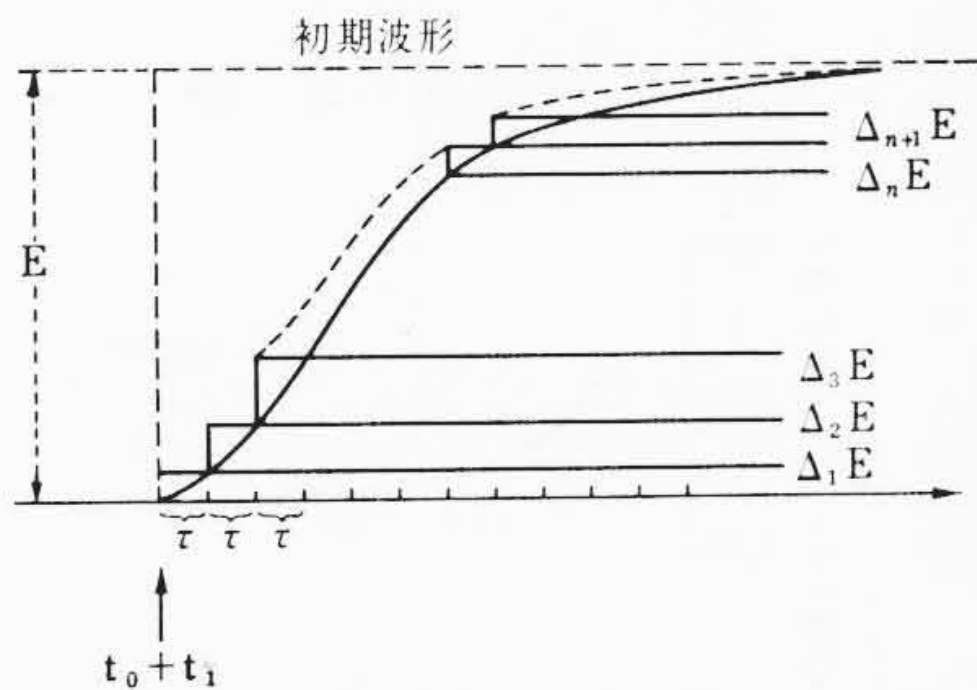


図3 波頭ひずみの入れ方

う。進行波の波頭ひずみも、ひずみ曲線がわかっておれば容易にプログラムに入れることができる。以上のような考慮を払いながら(3)～(5)式の計算をすべての点と時間について行なえば任意の点での任意の時間までの電圧波形を求めることができる。

2.2 逆フラッシュオーバー現象の取り扱い方

径間またはがいし連において、架空地線または鉄塔から本線に逆フラッシュオーバーが起こったときの取り扱い方について述べる。図2において線路IおよびIIに波が侵入し点A、Bを通過するとき、A点の対地電位 V_a とB点の対地電位 V_b との差が径間またはがいし連のフラッシュオーバー電圧以下であれば線路Iおよび線路IIは全く別個な線路として取り扱われる。ただし、この電位差には両線路間の誘導を考慮して結合率を乗じておくものとする。二線路では分波により実際は線間波を生ずるが、ここでは線間波は対地波の波頭をひずませる要因の一つとしてのみ取り扱った。A点、B点の電位差がフラッシュオーバー電圧を越えるとA点およびB点は同一電位(アーク電圧降下は無視する)になるので、反射透過係数の変化はもちろんのことフラッシュオーバーに伴う電圧変化が生ずる。このときの計算は次のようにして行なわれる。

まず、各ブランチを進行してきた波によりA点、B点(線路Iと線路IIは別個として計算する)は新たな電位 V_a, V_b になったものとする。電位差 $|V_a - V_b|$ がフラッシュオーバー電圧以上であれば、A点、B点は短絡されたことになり、次の式で計算される新たな電位 V_0 になる。

$$V_0 = \frac{V_a(1/Z_{a1} + 1/Z_{a2}) + V_b(1/Z_{b1} + 1/Z_{b2})}{1/Z_{a1} + 1/Z_{a2} + 1/Z_{b1} + 1/Z_{b2}} \quad \dots\dots (6)$$

したがって、A点およびB点に起こる電圧変化 $\Delta V_a, \Delta V_b$ は

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_a &= V_0 - V_a \\ \Delta V_b &= V_0 - V_b \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (7)$$

である。そこで、先に線路IとIIを別個であるとして計算した反射透過波に ΔV_a (線路Iにおいて)あるいは ΔV_b (線路IIにおいて)を加算して送り出してやればよい。フラッシュオーバーした後に進行してくる波に対してはA点、B点が短絡しているものとして計算すればよい。鉄塔および雷道インピーダンスを考慮に入れた場合も図2の線路IまたはIIがさらにいくつかのブランチから成っているだけであり、考え方は全く同様である。

2.3 波頭ひずみの入れ方

波頭ひずみは架空送電線では導体抵抗、大地の表皮効果、コロナなどにより起こり、ケーブルでは導体の抵抗のほか誘電体損が加わり複雑な現象となる。これらに関しては多くの研究者により理論

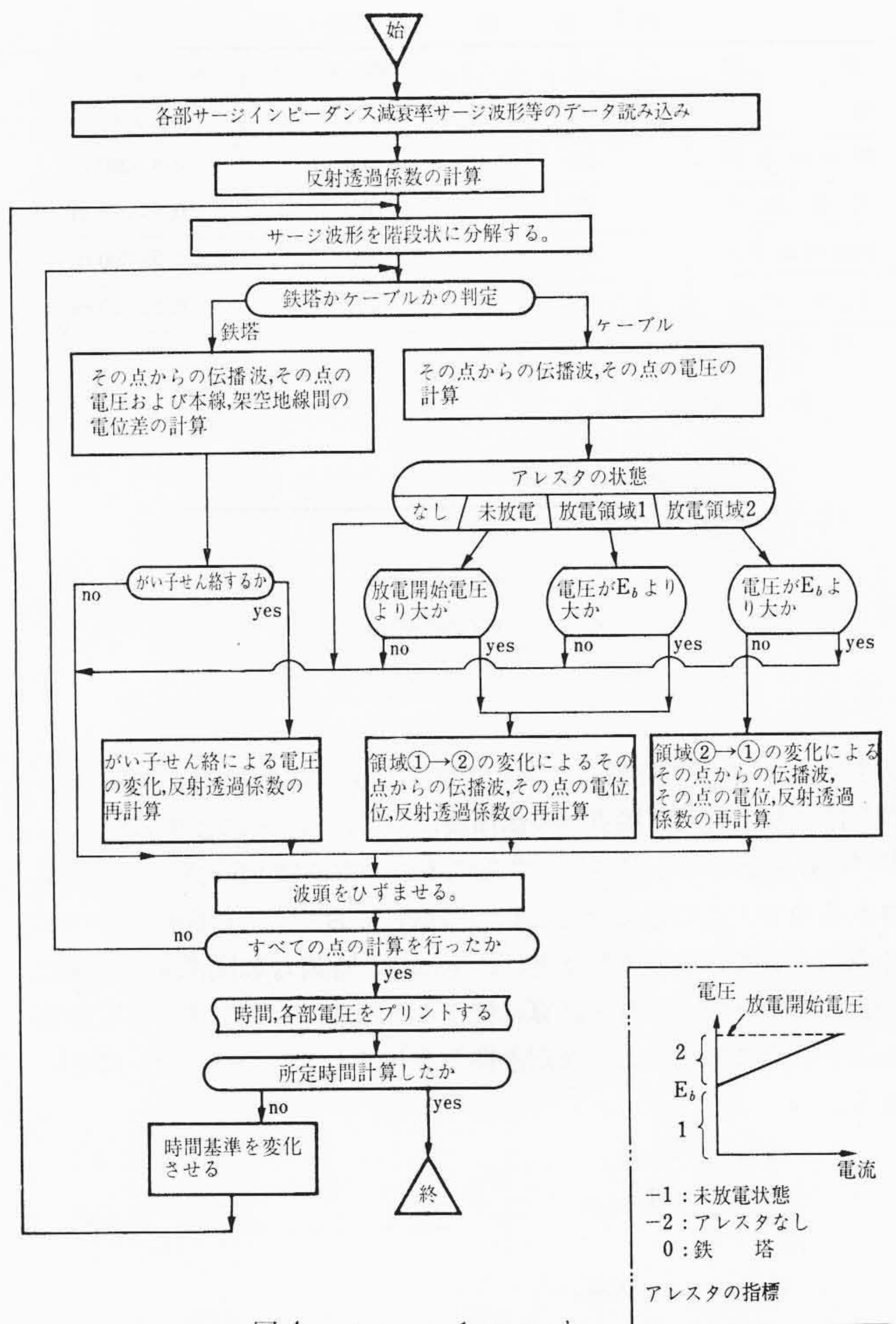


図4 フローチャート

的にも実験的にも研究されている⁽³⁾。波頭ひずみは線路条件によるほかに進行波の電圧の大きさによっても変化するので、理論的な式あるいは曲線に表わすことは非常にむずかしいが、それが与えられれば進行波計算で考慮に入れることは容易である。波頭ひずみを考慮に入れないで、ただ減衰のみで処理するとまちがった情報を与えてしまう場合がある。たとえば、ごく短時間のしかも電圧値の大きなパルスが伝播してゆくとき、ひずみを考慮すればこのパルスは早く消滅してしまうが、減衰のみであればいつまでも伝播することになり、そのパルス電圧によって避雷器の放電あるいはがいし連のフラッシュオーバーが起こってしまうのである。

ある点から時刻 t_0 に、図3に示す破線のような階段状波形の電圧が送り出されたとする。この電圧は t_1 時間後に隣接点 i 点に到達する。到達した電圧は実線の曲線のようなひずみを受けている。そこで計算上ひずみ波形が図に示されるように階段状電圧で表示されるものであると考え、それらの割合を $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ とすれば i 点に時刻 t に到達する電圧 A_i は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} A_{i, t_0+t_1} &= \Delta_1 \cdot E \\ A_{i, t_0+t_1+\tau} &= \Delta_2 \cdot E \\ A_{i, t_0+t_1+n\tau} &= \Delta_{n+1} \cdot E \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (8)$$

2.4 時間基準の変更

ある点 i へ時刻 t_0 に侵入してくる波を A_{i, t_0} と表わすことはすでに述べたとおりであるが、この電圧が隣接点へ行き再び i 点へ戻ってくる場合には、その往復時間を t_1 とすれば A_{i, t_0+t_1} と表わすことになる。さらに、もう1回往復すれば A_{i, t_0+2t_1} となり、これを希望の時間まで追跡することになる。しかし、プログラムでこのような時間に関する添字の使い方をすれば記憶容量が不足することは明らか

表1 線 路 の 特 性

線 路	サージインピーダンス	伝 播 速 度	減 衰 率
鉄 塔	100 Ω	210 m/μs	0.9 倍
架 空 線 本 線	400	300	0.97/300 m
架 空 地 線	350	300	0.85/300 m
開閉所内ブス	350	300	0.97/300 m
ケ ー ブ ル	22 *1	159 *1	0.99/300 m

*1 ケーブル導体 44.2φ
アルミ被平均径 87.5φ
比誘電率 3.6 } として計算

表2 波 頭 ひ ず み 時 定 数

線 路	時 定 数 α
架 空 線 本 線	0.2 μs/300 m 伝 播 後
架 空 地 線	0.2 μs/300 m 伝 播 後
ケ ー ブ ル	0.5 μs/350 m 伝 播 後

である。ところが時刻 t_0 においてある点 i に侵入してくる波 $A^{i_{t_0}}$, $B^{i_{t_0}}$ により生じた隣接点への伝播波は(3), (4)式により $A^{i+1_{t_0+t_1}}$, $B^{i-1_{t_0+t_1}}$ として予定され, さらに i 点の電位は(5)式により計算されるので, この電位を答として印刷しておく。この操作をすべての点について行なってしまうと, もはや, 時刻 t_0 に関する情報は過去のものとなり二度と計算に使うことはなく, 消し去ってもかまわない。そこで次のような置き換えをしてもさしつかえないことになる。

$$\left. \begin{aligned} A^{i_{t_0}} &\leftarrow A^{i_{t_0+\tau}} \\ A^{i_{t_0+\tau}} &\leftarrow A^{i_{t_0+2\tau}} \\ &\vdots \\ A^{i_{t_0+ti-\tau}} &\leftarrow A^{i_{t_0+ti}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで, τ は計算の単位時間である。最後の $A^{i_{t_0+ti}}$ を0にセットしておけば再び(3)式の計算に使用することができる。すなわち, 計算機記憶容量は (t_0+t_i) 分だけ用意しておけばよい。プログラムでは添字はすべて整数で表わされるので, $t_0=1, \tau=1$ として表現している。なお, 避雷器特性の入れ方, 集中定数の入れ方などについては付録で述べる。

2.5 プログラムのフローチャート

フローチャートを示すと図4になる。その概要は次のとおりである。

- (1) ある時刻において, すべての点からの伝播波とそれらの点の電位の計算を行ない, しかるのち, 時間軸を変化させ所定の時間まで同様の計算を繰り返す。
- (2) 上記二つの大きな繰り返しループ内で共通に使用される数値や不変の特性値はあらかじめループ外で計算しておく。たとえば, 反射透過係数や波頭ひずみ計算の一部などである。
- (3) 鉄塔部分とケーブル部分とを別の計算ルートとした。これは鉄塔部分は架空線本線のほかに架空地線, 鉄塔, 塔脚抵抗, 雷道インピーダンスなどが関係するのに対し, ケーブル部は本線のみしかないのである。どちらにも共通に適用できる計算式を使用すればプログラムは簡単になるが計算時間が長くなる。

3. 計 算 例

九州電力株式会社の220 kV OF ケーブル系統を例に取り上げ, 図5に示すような線路として計算する。No.1~No.5の鉄塔に雷撃がある場合を想定した。鉄塔はNo.7まで考え, その左側は鉄塔のない架空線の本線, 地線がじゅうぶん長く存在するものとした。

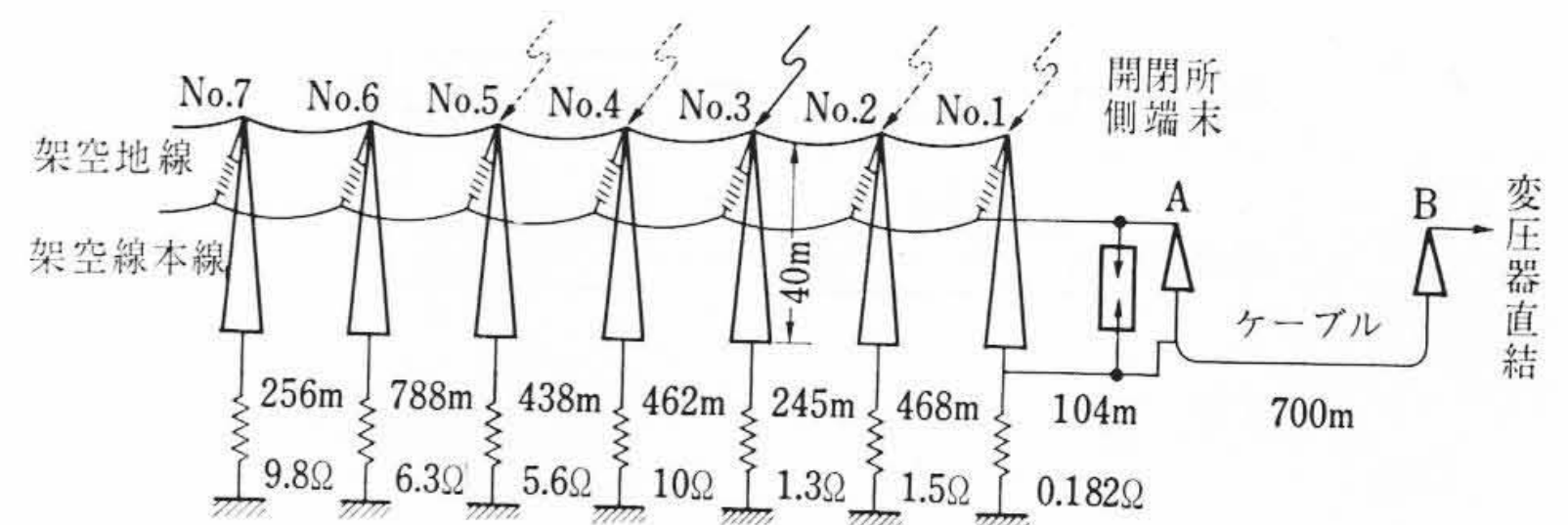


図5 送 電 系 統

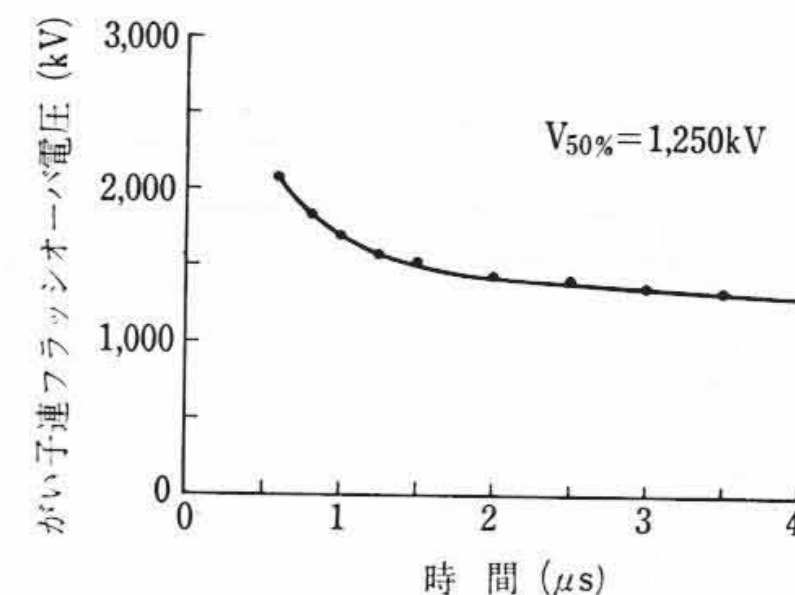


図6 がい子連フラッシュオーバー電圧時間特性

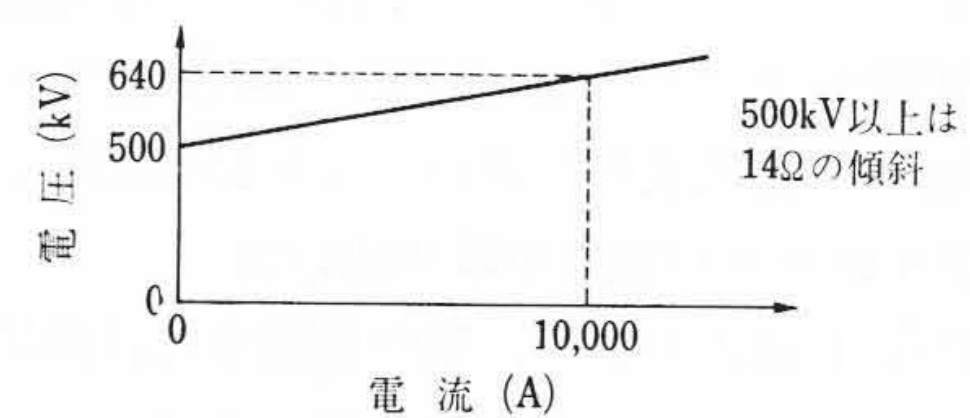


図7 避雷器制限電圧特性

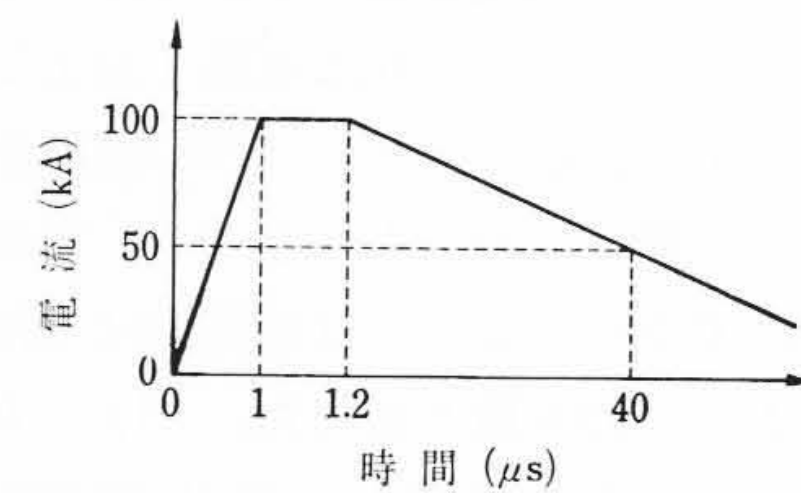


図8 雷サージ波形

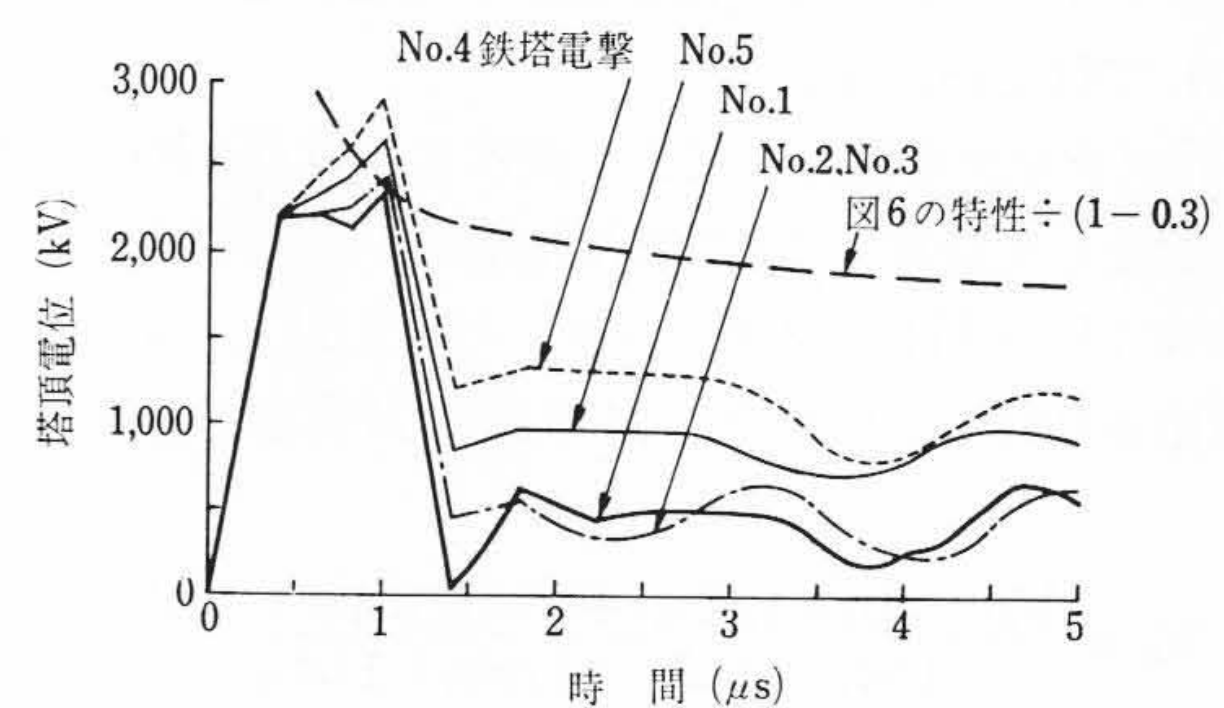


図9 雷撃鉄塔塔頂電位

3.1 計 算 条 件

- (1) サージインピーダンス, 伝播速度, 減衰率は表1に示すとおりである。
- (2) 波 頭 ひ ず み
各線路区間での波頭ひずみ曲線を $(1-e^{-t/\alpha})$ で表わす。ここで, t は時間, α はひずみの時定数である。各線路での α の値は表2のとおりとする。
- (3) がい子フラッシュオーバー電圧
50%フラッシュオーバー電圧を1,250 kVとし, 図6のような電圧時間特性をもつものとする。
- (4) 架空地線と本線間の結合率は30%とする。
- (5) 避雷器の特性は放電開始電圧を750 kVとし, 制限電圧電

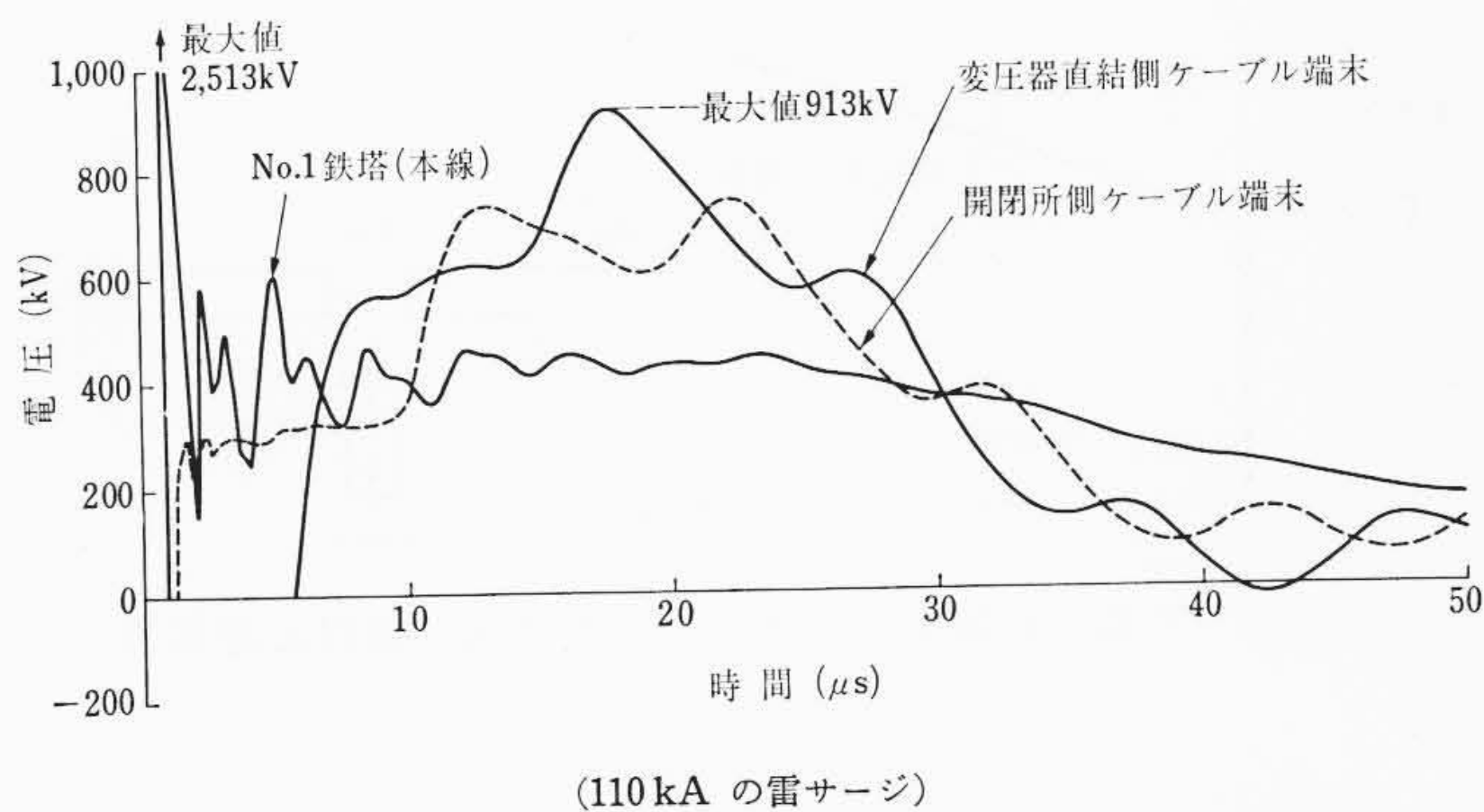


図 10 No. 1 鉄塔逆フラッシュオーバー時の電圧波形

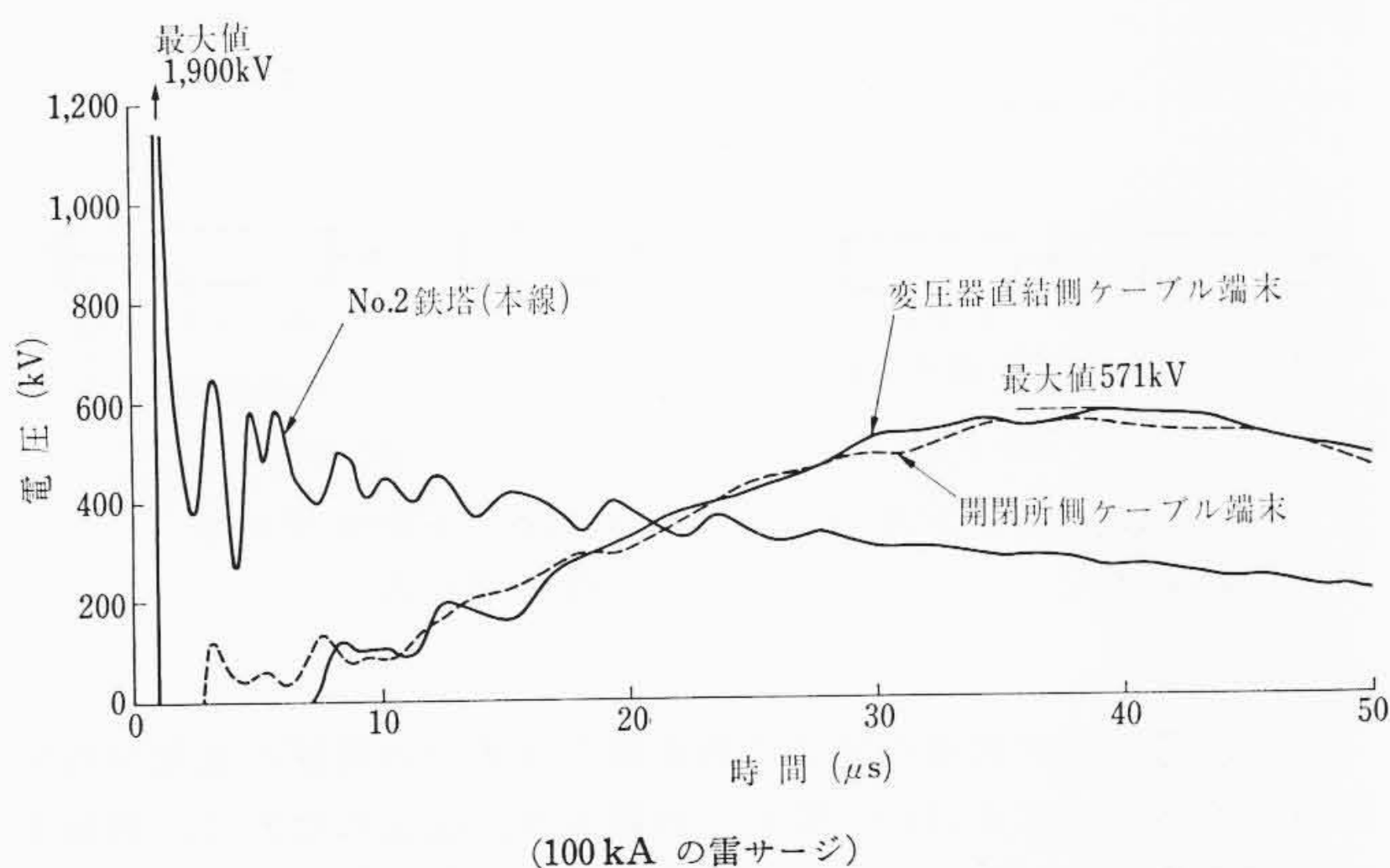


図 11 No. 2 鉄塔逆フラッシュオーバー時の電圧波形

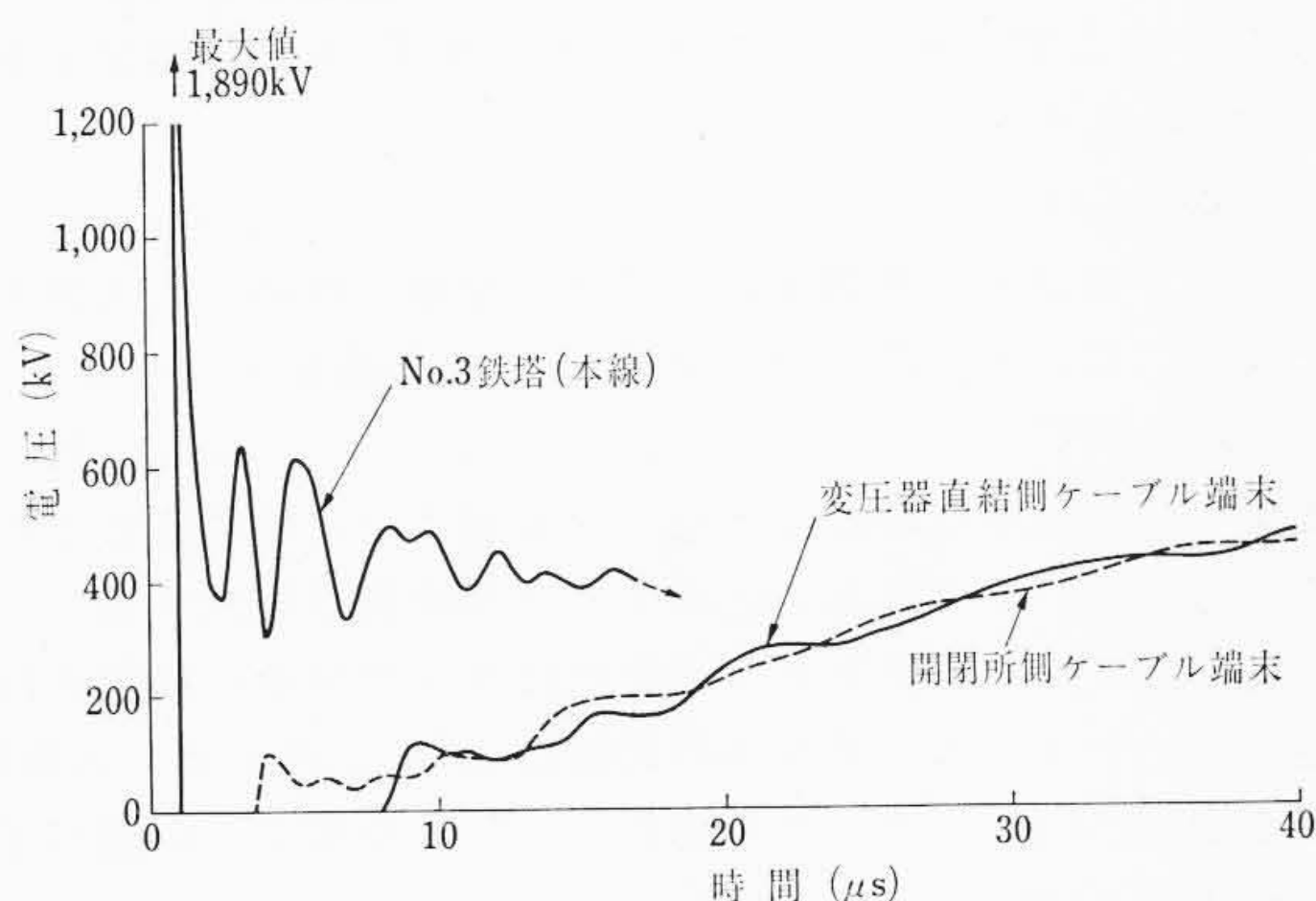


図 12 No. 3 鉄塔逆フラッシュオーバー時の電圧波形

流特性を図 7 のように近似する。

(6) 雷サージ波形は図 8 に示す波形とする。電流波形としてはほかのものが一般に使われているが、過酷な波形を仮定した。また雷道インピーダンスは 400Ω とする。

3.2 計算結果

No. 1～No. 5 鉄塔に雷撃があったときの塔頂の電圧波形を図 9 に示す。この波形と図 6 のがい子連のフラッシュオーバー電圧時間特性とを比較することにより、No. 2～No. 5 鉄塔で逆フラッシュオーバーが生じることがわかる。ただし、これは雷サージを波高値 100 kA とした場合であり、100 kA を越えれば No. 1 鉄塔においても逆フラッシュオーバーが生ずる可能性がある。

逆フラッシュオーバーしたときの雷撃鉄塔の本線およびケーブル両端の電圧変化を示したのが図 10～14 である。それぞれ No. 1～No. 5 鉄塔に雷撃があった場合に相当する。ただし、No. 1 鉄塔のみには 110 kA の雷撃があった場合を計算した。図 11～14 から推察できる

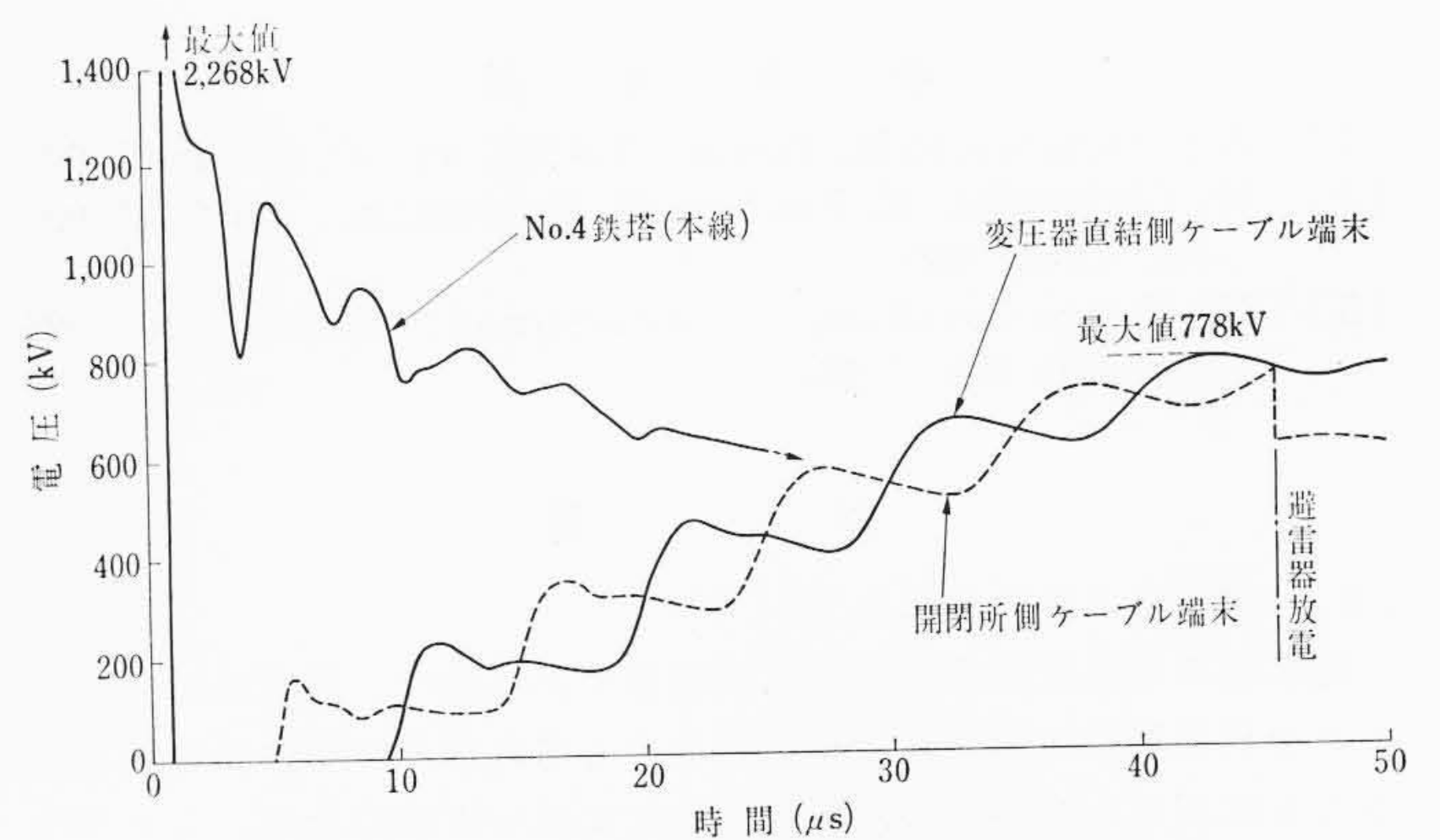


図 13 No. 4 鉄塔逆フラッシュオーバー時の電圧波形

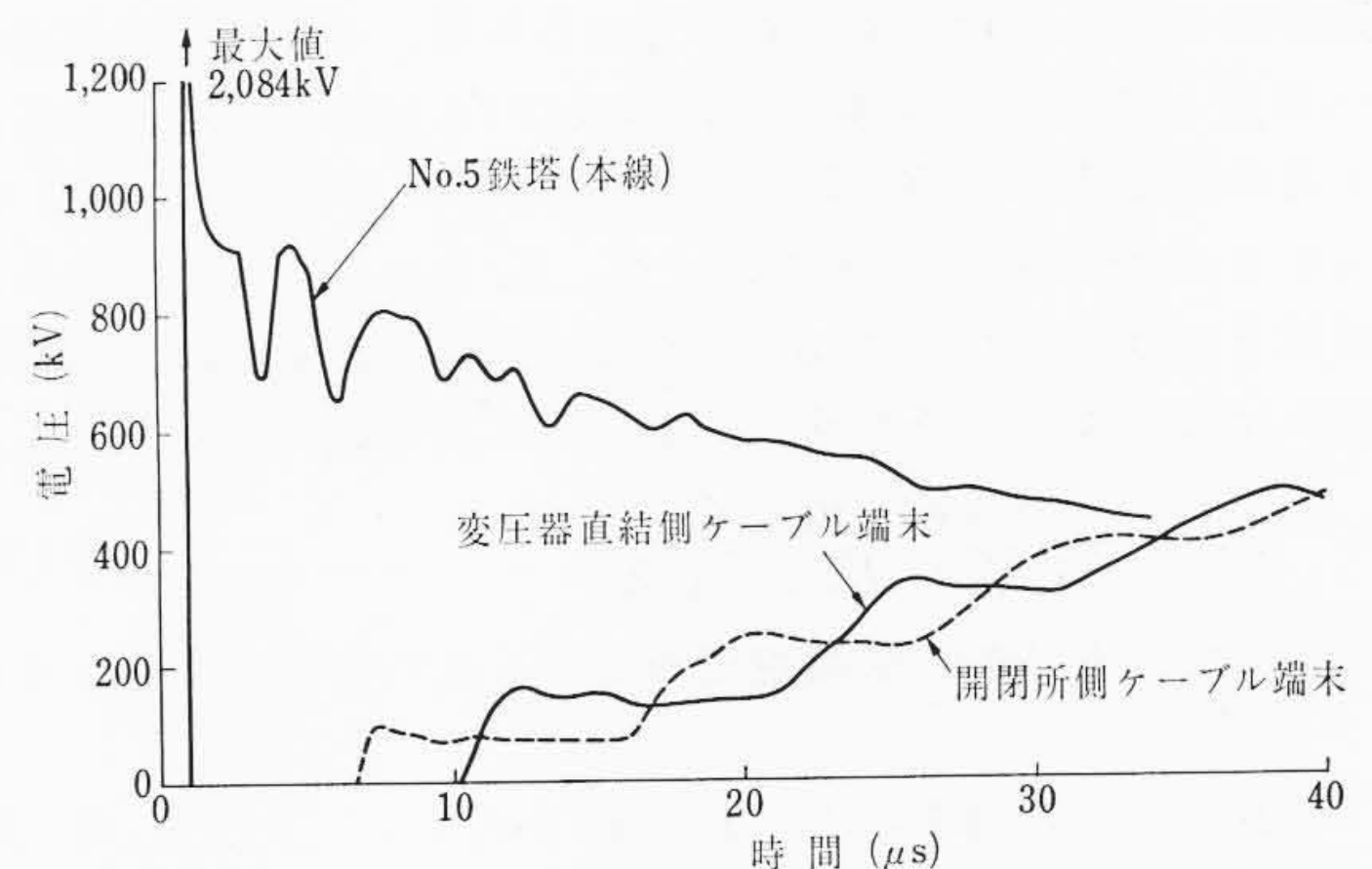


図 14 No. 5 鉄塔逆フラッシュオーバー時の電圧波形

ことは接地抵抗が低いいため、BIL 値 (900 kV) を越えることはないことである。しかし、図 13 に見られるように変圧器直結端末において避雷器放電電圧を瞬間的に越えることがある。また、100 kA より大きな電流に対しては No. 1 鉄塔での逆フラッシュオーバーが考えられ、図 10 に示すように BIL 値を越える電圧が発生するので、No. 1 鉄塔では逆フラッシュオーバーを起こさせないような対策が必要である。たとえば、No. 1 鉄塔は開閉所内にあるので、開閉所内地線(架空)連結による鉄塔頂から見たサージインピーダンスの積極的低減が図れるし、がい子連の増結なども考えられる。

ケーブルに加わる電圧は $20\sim40\mu\text{s}$ の波頭長をもつ波形となる。もちろん、この値は系統により異なるので一概には言えないが、ケーブル系統には波頭のかかなり長いサージ電圧が加わることは明らかである。

4. 結 言

架空送電線およびケーブルで構成される送電系統に雷撃があったときの任意の点の電圧波形を求める手法と、そのケーブル系統への適用について述べた。ここでとりあげた変圧器直結端末を有するケーブルを含む系統では、ケーブルに最も近い鉄塔で逆フラッシュオーバーが起こった場合には変圧器直結側のケーブル端末において BIL 値を越える電圧が生ずる可能性があり、積極的対策が必要であること、さらに、ケーブルに加わる電圧波形の波頭長は $20\sim40\mu\text{s}$ であることがわかった。この種の結果は系統の構成により異なるため、耐雷設計上個々の系統に対して計算し考察しなければならない。

終わりにのぞみ、本研究遂行にあたり有益なご助言をいただいた日立電線株式会社半沢氏に深謝する。

参 考 文 献

- (1) A.J. McElroy, R.M. Portor: TAIEE 82, (4), 88 (April '63)
- (2) M. Christoffel, E. Fischer, G. Hosemann: ETZ(A) 83, 761 (Nov. '62)
- (3) N. Hyltén-Cavallius, S. Annestrand: GIGRE No. 325 (Appendix III) (1964)

付 録

〔I〕 避雷器の特性の入れ方

避雷器の制限電圧電流特性は非線形であるので、進行波計算ではこれを折線近似する。屈折点の数を多くすればそれだけ精度が上がることは明らかであるが、計算もそれに伴い複雑になる。ここでは簡単に付図1のように近似した場合の進行波の反射透過の状態を計算してみる。対象とする線路は付図2に示したもので、左から A_{i0} なる電圧波が進行してくるものとする。避雷器が領域1にあるときにも避雷器がない場合と全く同等であるから、 i 点で反射透過して左右へ伝播してゆく波は本文(3)および(4)式で計算される。また、 i 点の電位 V_i は(5)式で計算される。この電位が付図1の E_a よりも小さければそのままよいが、 E_a よりも大きくなったときには領域2にはいるために(3)~(5)式で計算したものにある補正をしなければならない。その補正電圧 ΔV は次の式で与えられる。

$$\Delta V = -\frac{(V_i - E_a)/Z_a}{1/Z_i + 1/Z_{i+1} + 1/Z_a} \quad \text{付(1)}$$

したがって、最終的な伝播電圧および i 点の電位は次のようになる。

$$B^{i-1}_{i0+ti-1} = \{A_{i0}(p_i - 1) + \Delta V\} \cdot r_i \quad \text{付(2)}$$

$$A^{i+1}_{i0+ti} = \{A_{i0} \cdot p_i + \Delta V\} \cdot r_{i-1} \quad \text{付(3)}$$

$$V_i = V_{i0} + A_{i0} \cdot p_i + \Delta V \quad \text{付(4)}$$

また、その後に来てくる波の透過係数は次のように変化する。

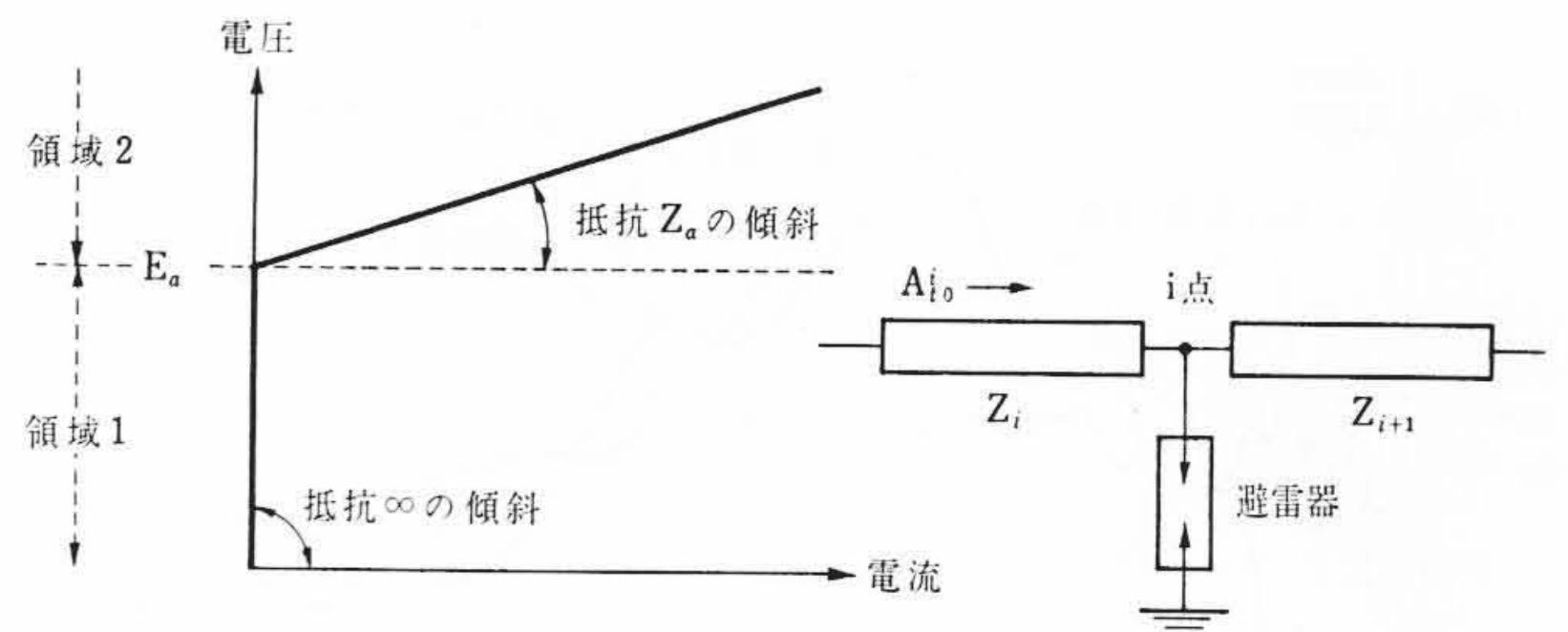
$$p_i = \frac{2/Z_i}{1/Z_i + 1/Z_{i+1} + 1/Z_a} \quad \text{付(5)}$$

$$q_i = \frac{2/Z_{i+1}}{1/Z_i + 1/Z_{i+1} + 1/Z_a} \quad \text{付(6)}$$

次に、避雷器の状態が領域2にあるときに左から A_{i0} の電圧波が侵入してくるものとする。 i 点で反射透過し左右へ伝播してゆく波および i 点の電位は付(5)、付(6)式の透過係数を用いて本文(3)、(4)、(5)式で計算される。このようにして求められた i 点の電位 V_i が E_a より大であればそのままよいが、 E_a よりも小になったときには領域1にはいるために前述と同様にある補正をしなければならない。この補正電圧 ΔV は次式で与えられる。

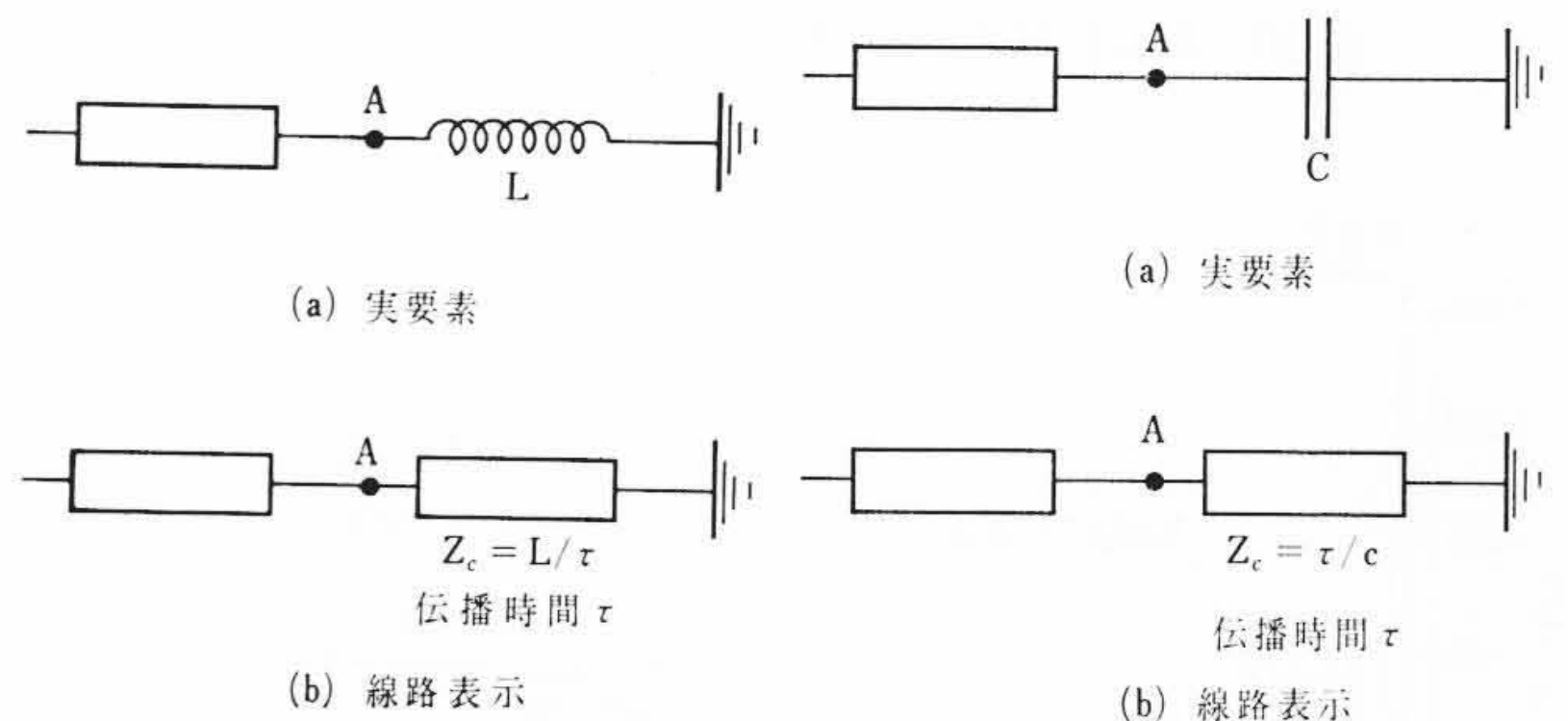
$$\Delta V = -\frac{(E_a - V_i)/Z_a}{1/Z_i + 1/Z_{i+1}} \quad \text{付(7)}$$

したがって、最終的な伝播電圧および i 点の電位は付(7)式で計算された ΔV と付(5)、(6)式の透過係数を用いて、付(2)、(3)、(4)式により計算されるものである。また、その後に来てくる波に対する透過係数は本文(1)、(2)式で与えられるものになる。



付1図 近似した避雷器特性

付2図 線路と避雷器



付3図 インダクタンスの線路表示法

付4図 コンデンサの線路表示法

なお、避雷器未放電の状態にある場合は i 点の電位が放電開始電圧以下であれば本文(1)~(5)式で計算され、以上になれば、領域1から領域2へ移り変わったときと全く同じ操作を行えばよい。

〔II〕 集中定数(インダクタンス、コンデンサ)の入れ方

インダクタンスは付図3に示すような短い線路として表わすことができる。ここで、サージインピーダンス Z_c と伝播時間 τ との間に次の関係をもたせる。

$$Z_c = L/\tau \quad \text{付(8)}$$

また、コンデンサは付図4に示すような短い線路として表わすことができる。ここで、 Z_c と τ との間に次の関係をもたせる。

$$Z_c = \tau/C \quad \text{付(9)}$$

精度よく計算するためには τ をできるだけ小さくすることが必要である。しかし、そうすることにより計算時間は増大する。だいたいの目安として、インダクタンスまたはコンデンサに接続されている線路のサージインピーダンスの10倍以上(インダクタンスの場合)または1/10以下(コンデンサの場合)に Z_c になるように選ばないとされている(付1)。

参 考 文 献

- (付1) J.P. Bickford, P.S. Doepel: PEE, 114, (4), 465 (April, '67)