コロナ波形変わいの線形モデルの開発と 雷サージへの影響

准 員 本 山 英 器 (同志社大)

正 員 雨 谷 昭 弘 (同志社大)

1. 緒 言

各種線路サージの解析において、大地・線路導体の表皮効果に伴う波形変わいおよびコロナによる波形変わいが重要な影響を及ぼすことはよく知られている。特に、雷サージ解析に対してコロナ波形変わいの影響は極めて大である。この観点から、線路サージ解析に際してコロナ波形変わいを導入するため各種のコロナモデルが提案されている^{(1)~(10)}。しかしながら、従来のコロナモデルはそのほとんどが非線形素子の組合せよりなっているため、取扱いがやっかいで、また設置間隔を 70 m 程度に取る必要があるため、サージ解析に際して線路に多数のコロナモデルを設置しなければならない欠点を有する。このため従来のコロナモデルはあまり実用には供されていないようである。

上記の点にかんがみ、本論文では線形抵抗、キャパシタンスおよびダイオードの簡単な組合せよりなり、かつ設置間隔を数百 m とできる線形コロナモデルを提案している。このコロナモデルは、汎用過渡現象プログラム EMTP⁽¹¹⁾ により容易に実現できるものであり、極めて実用的であると考えられる。本論文では実測結果⁽¹²⁾⁽¹³⁾と本コロナモデルによる計算結果を比較し、精度の検証を行う。また、従来のコロナモデルの最適定数値は主に単相線路を対象として決定されているので多相線路の場合について検討を行う。更に、雷サージに対するコロナ波形変わいの影響について検討する。なお計算には EMTP を用い、線路は周波数依存効果を考慮できる Semlyen モデル⁽¹¹⁾で模擬した。

2. 線形コロナモデル

本論文で提案するコロナモデルは、卯本氏らにより

Development of a Linear Model for Corona Wave Deformation and its Effect on Lightning Surges. By Hideki Motoyama, Associate & Akihiro Ametani, Member (Faculty of Engineering, Doshisha University).

本山英器：准員，同志社大学工学部電気工学科
雨谷昭弘：正員，同志社大学工学部電気工学科

提案されたコロナモデル⁽²⁾を発展させた Lee 氏の非線形コロナモデル⁽⁷⁾に基づいている。

図 1 に Lee 氏のコロナモデルを示す。同図においてコンダクタンス G およびキャパシタンス C は電圧 V に依存する非線形素子で次式により定義される。

$$\left. \begin{aligned} G &= k_g(1 - V_{c0}/V)^2 \\ C &= 2k_c(1 - V_{c0}/V) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V = 線路電圧 (コロナモデル端子電圧)， V_{c0} = コロナ臨界電圧

$$\left. \begin{aligned} k_g &= \sigma_g \sqrt{a/2h} \times 10^{-11} \\ &= \text{コロナ損失係数 (S/m)} \\ k_c &= \sigma_c \sqrt{a/2h} \times 10^{-11} \\ &= \text{コロナ損失係数 (F/m)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

σ_g, σ_c : コロナ損定数， h : 導体地上高 (m)，

a : 導体半径 (m)

上記 Lee 氏のコロナモデルの最適設置間隔は 71 m 程度であり、これより大なる設置間隔を取るとコロナ波形変わいの模擬が十分でなくなり計算精度が大幅に悪化する。このことは Lee 氏のコロナモデルのみならず、ほかの非線形コロナモデルでも同様である。また、これらのコロナモデルでは非線形要素を含むために、数値計算に際してその取扱いがやっかいである。従って、例えば汎用過渡現象解析プログラム EMTP では従来の非線形コロナモデルを直接採用することができない。以上のような理由から、従来の非線形コロナモデルはあまり実用には供されていないようである。

上記の点にかんがみ、線形素子よりなり、かつ設置

図 1 Lee の非線形コロナモデル

Fig. 1. A nonlinear corona model proposed by Lee.

図 2 本論文で提案する線形コロナモデル

Fig. 2. A linear corona model proposed in the paper.

間隔を大とできるコロナモデルについて検討を重ねた結果、図 2 に示す線形コロナモデルを開発した。同図において、 $G_k, C_k (k=1, 2, 3)$ は線形コンダクタンスおよびキャパシタンス、 V_k は直流電圧源、 D はダイオードである。各定数は以下のように定義する。

$$V_1 = V_{c0}, V_2 = 2V_{c0}, V_3 = 3V_{c0} \dots (3)$$

上記 V_k とコロナ臨界電圧 V_{c0} を用いて G_k, C_k を次のように与える。

$$\left. \begin{aligned} G_k &= k_g \{1 - V_{c0}/(V_{c0} + V_k)\}^2 \Delta l \\ C_k &= 2k_c \{1 - V_{c0}/(V_{c0} + V_k)\} \Delta l \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

ここに、 Δl = コロナモデル設置間隔 (m)、また k_g, k_c は (2) 式に示すとおりである。

1 相が n 導体よりなる多導体線路の場合、実測結果と計算結果の比較より、導体半径 a としては n 導体に対する等価単導体の半径 (等価半径) を用いてもよいと考えられる。また、このときのコロナ臨界電圧 V_{c0} は空気の絶縁破壊電界強度が 30 kV/cm であることを考慮して次式で与えられる。

$$V_{c0} = 5nr/3C_w \{1 + (2r/s)(n-1)\sin(\pi/n)\} \quad (\text{kV}) \dots (5)$$

ここに、 n = 素导体数、 r = 素导体半径 (cm)、 s = 素导体間隔 (cm)、 C_w = 导体対地静電容量 (作用容量) ($\mu\text{F}/\text{km}$)

本論文で提案したコロナモデルは、Lee 氏の非線形 G-C 回路を 3 段の線形 G-C 回路で近似したものである。図 3 に Lee 氏の非線形モデルと本モデルの G-V、C-V 特性の比較を示す。同図より、本モデルは Lee 氏の非線形コンダクタンスおよびキャパシタンスを、線形コンダクタンスおよびキャパシタンスで階段状に近似したものであることが知られる。本モデルの Lee 氏の非線形モデルに対する近似度を調べるために、両コロナモデルに上昇率 $\alpha = 1.58 \times 10^{12}$ の直線上昇電圧波 $V = at$ を印加したときの電圧-電流特性を図 4 に示す。ただし、電流 I は次式により求めた。

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{Lee}} &= (VG + \alpha C)\Delta l \\ I_{\text{linear}} &= \sum_{k=1}^3 (VG_k + \alpha C_k) \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

(a) G-V 特性

(b) C-V 特性

—: Lee の非線形コロナモデル
---: 線形コロナモデル

図 3 G-V、C-V 特性

Fig. 3. G-V and C-V characteristics.

—: Lee の非線形コロナモデル
---: 線形コロナモデル

図 4 V-I 特性

Fig. 4. V-I characteristic.

図 4 より、本コロナモデルは Lee 氏の非線形コロナモデルを良好に模擬していることが明らかであろう。なお、図 2 のコロナモデルを EMTP など再現する場合には、ダイオードの分離およびスイッチング動作時の振動抑制のために 5Ω 程度の微少抵抗をダイオードに直列に挿入しておくほうがよい。

3. 実測結果との比較

本論文で提案した線形コロナモデルの精度およびコロナ損定数最適値について検討するために、実測結果

との比較を行う。

〈3.1〉 電力中央研究所塩原試験線での実測

文献(12)に示されている電力中央研究所塩原試験線路(こう長 1,410 m)でのコロナ波形変位実測結果との比較を行う。図5に試験線路の構造を、表1に計算条件および最適コロナ損定数を示す。

(1) 単相線路仮定の場合 従来、コロナモデル

図5 塩原試験線路

Fig. 5. Shiobara experimental transmission line.

図6 計算モデル回路

Fig. 6. A model circuit for a calculation.

の精度の検討は実測が多相線路で行われていても、これを単相線路と仮定して行う場合が多い。そこで、本論文でもまず単相線路仮定の場合について検討を行う。

図6に計算のモデル回路を示す。コロナモデルは $\Delta l = 352.5$ m (鉄塔間隔) ごとに設置している。線路

(a) 実測結果

(b) 計算結果(単相仮定)

(c) 計算結果(多相)

1: $d=0$ m, 2: $d=352.5$ m, 3: $d=705$ m, 4: $d=1,057.5$ m

図7 No.7 導体印加時のコロナ波形変位

Fig. 7. Corona wave deformation on No. 7 conductor.

表1 計算条件および最適コロナ損定数

Table 1. Calculated conditions and optimum corona loss constants.

ケース	計算条件	印加相条件	電 源 電 圧		コ ロ ナ臨界電圧 (kV)	コ ロ ナ損定数		図 番 号
			極性	波高値 (MV)		$\sigma_g(\times 10^6\text{s/m})$	$\sigma_c(\text{F/m})$	
1—1	単 相	単 導 体 図 5, No. 7	正	1.58	303	13	33	図 7 (b)
1—2			負	1.67		6	23	—
1—3	多 相		正	1.58		8	20	図 7 (c)
1—4			負	1.67		3	13	—
2—1	単 相	4 導 体 図 5, No. 8	正	1.63	599	5	10	図 8 (a)
2—2			負	1.69		2	7	図 9 (b)
2—3	多 相		正	1.63		2	4	図 8 (c)
2—4			負	1.69		0.5	2	図 9 (c)

終端は実測と同じく接地とした。

(a) 単導体線路の場合 図5の試験線路において、No. 7 導体(単導体)に正極性電圧 $V_m=1.58$ MV を印加した場合のコロナ波形変わり実測結果を図7(a)に示す。線路を単相と仮定し、本論文で提案したコロナモデルによる計算結果を(b)図に示す。図中①～④は線路始端からの距離 x (m) 地点での波形を示しており、①は $x=0$ 、すなわち始端での電源電圧波形を示している。

図7(b)の計算結果を(a)図の実測結果と比較すると、波形の立上り部分においては良好に一致していることが知られる。波形の後半においては多少差異が観察されるが、全般に計算結果は実測結果を良好に模擬していると考えられる。この場合の最適コロナ損定数は表1に示すように $\sigma_g=13 \times 10^6$ 、 $\sigma_e=33$ であった。

(b) 4 導体線路の場合 図5の試験線路において、No. 8 導体(4 導体)に正極性 $V_m=1.63$ MV の電圧を印加した場合のコロナ波形変わり実測結果を図8(a)に、線路を単相と仮定した場合の計算結果を

(a) 実測結果

(b) 計算結果(単相仮定)

(c) 計算結果(多相)

図8 正極性電圧 No. 8 導体印加時のコロナ波形変わり(印加相)

Fig. 8. Corona wave deformation on No. 8 conductor with a positive applied voltage.

(b)図に示す。同様に、負極性 $V_m=-1.69$ MV を印加した場合のコロナ波形変わりを図9に示す。

図8(a),(b)の比較より波形の後半を除いて本コロナモデルによる計算結果は、実測結果に良好に一致していることが知られる。このときの最適コロナ損定数は、 $\sigma_g=5 \times 10^6$ 、 $\sigma_e=10$ であった。図9の負極性の場合にも単相を仮定した計算結果[(b)図]は線路終端④の波形を除いて実測結果とほぼ良好に一致している。このときの最適コロナ損定数は $\sigma_g=2 \times 10^6$ 、 $\sigma_e=7$ であった。

コロナ損定数は表1より明らかなように、一般に正極性のほうが負極性より大である。また単導体と複導体では単導体のほうが大である。

(2) 多相線路 従来のコロナモデルは単相線路を想定して作製されている場合が多く、実測結果との比較に際しても多相線路を単相と仮定して検討が行われていることが多い。文献(7)によれば、多相線路における他相の影響はコロナ臨界電圧を10%程度変化させるだけで、コロナ波形変わりには大きな影響を及

(a) 実測結果

(b) 計算結果(単相仮定)

(c) 計算結果(多相)

図9 負極性電圧 No. 8 導体印加時のコロナ波形変わり(印加相)

Fig. 9. Corona wave deformation on No. 8 conductor with a negative applied voltage.

ばさないとしている。しかしながら、他相との誘導により印加相電圧が低下することを考えると、他相の存在を無視して単相で解析を行うことが妥当か否か疑問である。そこで、コロナ変わりがない場合に他相の存在が印加相電圧波形に及ぼす影響についてまず検討する。図5の線路で、(i)全導体が存在する6相線路、(ii)誘導相として No. 6 導体のみを考慮した2相線路、(iii) No. 7 導体のみを考慮した単相線路仮定の三ケースについて、No. 7 導体に電圧を印加し、コロナ波形変わりを無視した場合の計算結果を図10に示す。同図より、多相線路における印加相電圧は他相の存在により波高値が10%程度低下することが明らかである。換言すれば単相仮定の場合、印加相電圧は実際の多相の場合に比して10%程度大となる。従って、多相線路でのコロナ波形変わりの実測結果を単相仮定で再現するには、コロナ損定数を大とせざるを得ない。すなわち、従来の単相仮定のコロナモデルにおける最適コロナ損定数は、実際の多相線路に適用するには過大であることが容易に推測される。なお、誘導相一相のみを考慮した図10(b)を実際の多相の場合の(a)図と比較すると、ほぼ同一の電圧波形となっている。従って、多相線路の場合、誘導相一相のみを考慮すれば十分であると考えられる。

以下、図5の試験線路で全導体を考慮した場合のコロナ波形変わりについて検討する。なお、架空地線は電位零として計算した。

(a) 単導体線路の場合 図5, No. 7 導体に正極性電圧 $V_m=1.58$ MV を印加したときの計算結果を図7(c)に示す。図7(a)の実測結果に対して良好に一致しており、(b)図の単相仮定の場合よりも計算精度は良好である。このときの最適コロナ損定数は $\sigma_c=8 \times 10^6$, $\sigma_e=20$ であり、単相仮定の場合の定数の60%程度となっている。負極性電圧印加の場合にも、

Fig. 10. Effect of an induced phase on a multiphase line (no corona wave deformation).

表1に示すように最適コロナ損定数は単相仮定の場合より小なる値となっている。これはさきに述べたように、他相の存在により印加相電圧がコロナ変わりに関係なく低下することに起因している。従って、単相を仮定して得られた従来の最適コロナ損定数を用いるとコロナ変わりが過大となることが明らかであろう。

(b) 4導体線路の場合 No. 8 導体に正極性電圧を印加した場合の計算結果を図8(c)に、負極性電圧を印加した場合の計算結果を図9(c)に示す。また、このときの最適コロナ損定数は表1に示すとおりである。正極性、負極性いずれの場合にも計算結果は実測結果の(a)図に良好に一致しており、また単相を仮定した(b)図よりも計算精度は優れている。このときの最適コロナ損定数は表1に示されるように単相仮定の場合の40%程度である。

図11に正極性電圧印加時の誘導相 (No. 7 導体) 電圧波形を示す。同図より、誘導相に関する計算結果は実測結果に比してほぼ満足できるものと考えられるが、印加相の場合と比較すると計算精度は低下している。このことは雷サージ (特にフラッシュオーバー時) の計算に際して誤差の原因となる恐れがある。しかし、誘導相電圧は印加相電圧の30%程度であり、上記計算精度の低下は10~20%程度であることから、雷サージ計算に対する影響は数%程度であり、その影響は無視できるものと考えられる。

〈3.2〉 電力中央研究所 赤城模擬送電線での実測⁽¹³⁾

前節の例では、本論文で提案したコロナモデルは実

Fig. 11. Voltage waveform of an induced phase with a positive applied voltage.

図 12 赤城模擬送電線

Fig. 12. Akagi experimental transmission line.

測結果と比して良好な精度を有していることが明らかとなった。しかしながら、前節とは大きく異なる定数を有する線路の場合にも本コロナモデルの精度が良好であるかどうか疑問が残る。そこで本節では、電力中央研究所赤城模擬送電線での実測結果との比較検討を行う。

図 12 に赤城模擬送電線の構造を示す。図 13 に実測および計算結果を示す。計算結果は、(i) 架空地線を含め 5 相系とした場合、(ii) 架空地線を電位零として消去した場合、(iii) 架空地線を無視して単相線路と仮定した場合の三ケースについて示してある。同図より、ケース (i)、(ii) は実測結果に良好に一致している。従って、本論文で提案したコロナモデルは本例の場合にも満足し得る精度を有していると言える。また、架空地線はその電位を零と仮定して消去することにより、コロナ変わいの計算を行えば十分であると考えられる。しかしながら、架空地線を無視したケース (iii) では波形変わいが過大となっている。これは架空地線が存在しないので、線路の帰路電流がすべて大地を環流するため大地帰路インピーダンスの影響が架空地線の存在を考慮した他のケースに比して大となることに起因している。すなわち、大地帰路インピーダンスの周波数依存効果に伴う波形変わいが大となり、これがコロナに伴う波形変わいに重畳して大なる変わいをもたらす。参考のために上記各ケースにおける最適コロナ損定数を次に示す。

印加波形: ---, 実測結果: —
計算結果 (i) GW あり: ××, (ii) GW 消去: ○○
(iii) GW 無視: ●●

図 13 コロナ波形変わい実測および計算結果

Fig. 13. Field test and calculated results of corona wave deformation.

$$\sigma_c = 7: \text{(i) } \sigma_g = 7 \times 10^6, \text{ (ii) } \sigma_g = 3.5 \times 10^6 \\ \text{(iii) } \sigma_g = 1.7 \times 10^6$$

上記より明かなように、ケース (iii) ではコロナ損定数 σ_g は他のケースよりかなり小となっている。 σ_g が大なるほどコロナ変わいは大となる⁽¹⁰⁾ ことより、ケース (iii) の σ_g が小となるのは、さきに述べた大地帰路インピーダンスに伴う波形変わいが大であることに対応していると考えられる。

以上より、コロナ変わいの解析に際して架空地線を無視して単相仮定の下に計算を行うと、大地帰路インピーダンスの影響で波形変わいが過大となり、これに伴い最適コロナ損定数が小さくなり過ぎることが明らかである。従って、コロナ変わいの解析に際して架空地線の存在を無視すべきではないと考えられる。この際、架空地線も含めて計算を行うと導体数が大となるので、その電位を零と仮定して消去する方法を用いるのが適当であろう。

なお本例の場合、最適コロナ損定数は前節と比べてかなり小となっている。これは本例で取上げた線路の半径が極めて小なること、あるいは印加電圧がコロナ開始電圧よりはるかに大であることに起因していると考えられる。

4. コロナ変わいを考慮した雷サージ計算

本章ではさきに述べたコロナモデルを用いてコロナ変わいを考慮した雷サージ計算を行い、雷サージに対するコロナ変わいの影響について検討する。

計算は文献 (14) で取上げられている UHV モデル系統を対象として行った。線路は 3 相 2 回線で架空地線 2 条を有しており、全体として 8 相回路となるが、これでは計算が煩雑となりすぎる。そこで、文献 (15) で提案されている 2 相回路モデルを採用し、本線 1 条、等価架空地線 1 条の 2 相回路として計算を行う。

図 14 雷サージ計算回路

Fig. 14. A circuit for a lightning surge calculation.

図 14 に計算回路を示す。鉄塔間隔は 450 m, 第 1 鉄塔から変電所までの距離は 100 m である。線路左端は線路サージインピーダンスに対応する整合抵抗で接地し, 右端の変電所ではサージインピーダンス 70 Ω, 伝搬速度 270 m/μs のガス絶縁母線が接続されているものとしている。なお, ガス母線左端および右端のキャパシタンスは各ブッシングおよび分路リアクトルを模擬している。雷撃は第 1 鉄塔塔頂に電流波高値 $I_0 = 200 \text{ kA}$ で $2 \times 70 \mu\text{s}$ のインパルス波が侵入するものとした。その波形は次の二重指数関数で定義する。

$$I = I_0 K_0 \{ \exp(-at) - \exp(-bt) \}$$

$$K_0 = 1.0024, a = 0.01025 (\mu\text{s}^{-1}),$$

$$b = 2.8188 (\mu\text{s}^{-1})$$

(4.1) フラッシュオーバーなしの場合 図 15 に第 1 鉄塔および変電所入口での本線 (PW) および架空地線 (GW=塔頂) の雷サージ波形計算結果を示す。ケース 1 はコロナ変わりを無視した場合, ケース 2 は本線, 架空地線ともにコロナ変わりを考慮した場合である。同図より, コロナ変わりにより電圧が低下すると共に波形が遅延し, 最大値発生時刻が遅くなるのが観察される。表 2 (a) に回路各部の最大電圧およびその発生時刻を示す。表中ケース 3 は架空地線のみコロナ変わりを考慮した場合, ケース 4 は本線のみコロナ変わりを考慮した場合である。同表より, ケース 4 のアークホーン電圧および変電所入口 (引留) 鉄塔塔頂電圧を除き, 最大電圧はコロナ変わりにより 10~30% 程度低下していることが知られる。これは当然予測されることであろう。最大電圧発生時刻は図 15 で観察されたのと同じくコロナ変わりにより大となっている。ケース 4 の場合, アークホーン電圧および変電所入口架空地線 (引留鉄塔塔頂) 電圧は, コロナ変わりなしのケース 1 より大となっており, 本線および架空地線両者のコロナ変わりを考慮したケース 2 よりも 30% 以上大である。他のノードに関しても最大電圧はケース 2 に比べてほとんど大となっている。従って, 雷

(a) 第一鉄塔 PW: ○, GW: ●

(b) 変電所入口 PW: ○, GW: ●

ケース 1: コロナ変わりなし : —
ケース 2: コロナ変わりあり (PW, GW): ---

図 15 フラッシュオーバーなしの場合の雷サージ波形

Fig. 15. Lightning surge waveforms without flashover.

表 2 雷サージ電圧最大値

Table 2. Maximum lightning surge voltages.

(a) フラッシュオーバーなし

ケース		1		2		3		4	
		kV	μs	kV	μs	kV	μs	kV	μs
第一鉄塔	塔 頂	13,037	0.67	11,086	0.98	11,173	0.97	12,847	0.67
	アークホーン	7,317	0.67	6,527	0.91	6,490	1.13	8,230	0.66
	本 線 (PW)	4,826	0.66	3,299	1.11	3,757	0.83	3,854	0.75
変入電所口	塔 頂	5,008	0.67	3,732	1.22	3,720	1.28	5,084	0.67
	本 線	593	2.41	385	3.16	511	3.02	367	5.08

(b) フラッシュオーバーあり

ケース		1		2		3		4	
		kV	μs	kV	μs	kV	μs	kV	μs
第一鉄塔	塔 頂	13,028	0.70	10,279	0.82	10,750	0.86	12,606	0.67
	アークホーン	6,434	0.66	5,588	0.66	4,564	0.66	7,626	0.66
	本 線	7,629	0.83	7,647	1.17	8,695	1.00	6,355	1.05
変入電所口	塔 頂	5,008	0.67	3,539	1.06	3,386	1.00	5,084	0.67
	本 線	4,649	3.06	5,150	3.45	5,269	3.13	4,311	3.14

ケース 1: コロナ変わりなし
ケース 2: PW, GW ともコロナ変わりあり
ケース 3: GW のみコロナ変わりあり
ケース 4: PW のみコロナ変わりあり

Fig. 16. Lightning surge waveforms with flashover.

サージ計算に際して本線のみコロナ変わりを考慮するのは不適当であると言える。なお、鉄塔（架空地線）電圧のみを問題とする場合には、架空地線のみコロナ変わりを考慮すれば十分であることがケース 2、3 の比較より明らかである。

〈4・2〉フラッシュオーバーありの場合 図 16 にフラッシュオーバーありの場合の雷サージ波形計算結果を示す。また表 2 (b) に回路各部の最大電圧およびその発生時刻を示す。これらの結果より、塔頂（架空地線）およびアークホーン電圧はコロナ変わりにより低下するが、本線電圧は多少大となっていることが知られる。塔頂電圧が低下するのは、コロナ変わりにより架空地線上の進行波が減衰することより当然であろう。アークホーン電圧の低下は、塔頂電圧の低下と本線電圧の上昇により直ちに理解される。本線電圧がコロナ変わりを考慮した場合に上昇するのは、コロナ変わりにより低減された架空地線進行波が、引留鉄塔で負反射するときの本線への負極性誘導電圧が小となることに起因するものと考えられるが、コロナ変わりによるフラッシュオーバー時アークホーン電圧の変化も影響するものと推測され、今後の検討が必要であろう。

なお、本線のみコロナ変わりを考慮したケース 4 はケース 2 とかなり異なった結果を与えており、フラッシュオーバーなしの場合と同様、これは不適当であると言える。

5. 結 言

本論文では抵抗、キャパシタンスおよびダイオードの簡単な組合せからなる線形コロナモデルを提案した。このコロナモデルはコロナ変わり実測結果との比較より、満足し得る計算精度を有していることが明らかとなった。本モデルはその設置間隔が数百 m と、従来の非線形モデルの 5 倍程度大であり、鉄塔ごとの設置で十分であるので実用に極めて有利であると考えられる。また、線形素子のみで構成されているので、EMTP などで容易に実現できるのも実用に際して便利である。

本コロナモデルを用いて雷サージに対するコロナ変わりの影響について検討を行った。その結果、コロナ変わりにより雷サージ電圧は全般的に低下することが確認された。しかしながら、フラッシュオーバー時の変電所入口電力線電圧は、コロナ変わりを考慮した場合 10% 程度大となる現象が見いだされた。この現象は変電所の絶縁協調に際して重要な問題となる可能性があり、今後の検討が必要であろう。(昭和 61 年 8 月 11 日受付)

文 献

- (1) C. Wagner & B. Loyd: "Effect of corona on travelling waves", *AIEE Trans.*, 75-III, 858 (1955-10)
- (2) 卯本・原: 「コロナ損を考慮した単導線伝搬方程式の数値解析」, 電学誌, 89, 909 (昭 41-5)
- (3) M. Khalifa, et al.: "Computation of corona current and its effect on traveling surges", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, 1816 (1970)
- (4) H. Kudyan & C. Shih: "A nonlinear circuit model for transmission lines in corona", *ibid.*, PAS-100, 1420 (1981)
- (5) R. Harrington & M. Afghahi: "Implementation of a computer model to include the effects of corona in transient overvoltage calculations", *ibid.*, PAS-102, 902 (1983)
- (6) C. Gary, G. Dragon & D. Critesu: "Attenuation of travelling wave caused by corona", *CIGRE 27th Session*, Report 33-13 (1978-8)
- (7) K. Lee: "Non-linear corona models in an electromagnetic transients program", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-102, 2936 (1983)
- (8) A. Inoue: "Propagation analysis of overvoltage surges with corona based upon charge versus voltage curve", *ibid.*, PAS-104, 655 (1985)
- (9) A. Semlyen & H. Wei-Gang: "Corona modelling for the calculation of transients on transmission lines", presented at IEEE PES Summer Meeting 85, SM 380-1 (1985-7)
- (10) 雨谷・芝崎: 「コロナ波変遷の Z 変換法による解析」, 電気評論, 70, 930 (昭 60-10)
- (11) W. Scott-Meyer: "EMTP Rule Book", B.P.A (1982)
- (12) A. Inoue: "High voltage traveling waves with corona discharge on bundled conductors", presented at IEEE PES Winter Meeting, A 78, 170-3 (1978-1)
- (13) 井上・三宅・熊谷: 「高電圧進行波におけるコロナストリーマ」, 電中研究報告, 1800, 31 (昭 56-3)
- (14) J. Ozawa, et al.: "Lightning surge analysis on a multi-conductor system for substation insulation design", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-104, 2244 (1985)
- (15) 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)