動特性を有する接地モデルを用いた 500kV 送電線の雷サージ解析

正員 安田 陽* 正員 近藤 修平* 正員 原 武久*
正員 池田 敬一** 正員 園井 康夫** 正員 古岡 芳弘**

Lightning Surge Analysis for 500-kV Transmission Lines using Grounding Model with Dynamic Characteristics

Yoh Yasuda*, Member, Shuhei Kondo*, Member, Takehisa Hara*, Member,
Keiichi Ikeda**, Member, Yasuo Sonoi**, Member, Yoshihiro Furuoka**, Member

It is well known that grounding resistance under huge lightning current injection has current-dependent characteristics, whose mathematical model was already proposed by Liew and Darveniza in 1974. In this paper, where our final goal is reasonable design for lightning protection of 500-kV transmission tower, we adopt the dynamic grounding-resistance model to MODELS-ATP simulation. The effect of the model for the lightning surge analysis on 500-kV transmission line systems is discussed in detail.

キーワード: 雷サージ, 接地抵抗, 土中放電, 動特性, EMTP/ATP, MODELS

Keyword: lightning surge, grounding resistance, soil ionization, dynamic characteristics, EMTP/ATP, MODELS

1. ま え が き

送電系統に関する事故原因の約6割が落雷に起因するものであり⁽¹⁾, 落雷時の絶縁事故は鉄塔塔脚部の接地抵抗に大きく影響されることが知られている。一般に塔脚部接地抵抗値は低い程安全であるが, 特に高抵抗率を持つ岩盤地帯での建設が余儀なく選ばれている場合には, 補助電極の埋設や接地抵抗低減剤の散布をする必要があるため, 高額の費用を伴う⁽²⁾。したがって, 安全面・コスト面の両者を満足させる合理的な絶縁設計にあたっては, 送電線の事故実績と比較する上でも, より詳細な雷事故解析が必要となる。しかし, 従来の送電系統雷事故解析では, 接地抵抗は簡単のため固定抵抗として表現されていることが殆どであった。この仮定は絶縁設計としては安全側には働くものの, コスト面では過剰に見積り過ぎている懸念もある。筆者らの研究の最終的な目標は特に高抵抗地盤上の 500 kV 送電線鉄塔の接地工事にかかる費用の合理化であるが, 本論文ではその一環として, より実現現象に即した高精度な抵抗モデルの EMTP/ATP シミュレーションへの適用を試みる。

前述の通り, 一般に EMTP/ATP を用いた送電系統雷事故解析では, 接地抵抗は固定抵抗で表現されることが多い。しかし実際には, 大電流が流入した際には接地抵抗の値が低減し, 時間変化することが古くから知られている。これは土中放電による接地抵抗の低減および回復現象が時間依存変化を起こす現象である。この現象を記述するモデルとしては, Liew と Darveniza によって数値モデル(本論文では以下, 「動特性接地モデル」とする)が提案されている⁽³⁾。しかし, このモデルは複雑な条件分岐を有するため EMTP/ATP シミュレーションに適用するのは困難であり, あまり用いられてこなかったのが現状である。

一方, 我々の研究グループは動特性接地モデルの妥当性を確認することを目的に衝撃大電流試験を行い⁽⁴⁾⁻⁽⁹⁾, これまで詳細な試験結果を得ることができている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。さらに, 動特性抵抗モデルを EMTP/ATP に適用し, 数値実験も実施した。数値実験の結果, 動特性抵抗モデルは上記の衝撃大電流試験の結果を良好に再現でき, 土中放電現象による接地抵抗の変化を表現する妥当なモデルであることがわかって⁽¹¹⁾。

本論文では, この動特性接地モデルを用いた送電系統の雷サージ解析を行い, モデルの導入効果を検証する。特に多数の部材をもち, 反射波が複雑に発生するような鉄塔モデルと組み合わせた場合の効果について注目する。また, モデルが雷事故解析においてどのような影響を与えるのか検討するため, 標準的な 500kV 送電線系統を対象に ATP 解析を行い, その導入効果を従来の接地モデルと比較しながら

* 関西大学工学部電気工学科
〒 684-8680 吹田市山手町 3-3-35
Dept. of Electrical Eng., Faculty of Eng., Kansai University
3-3-5, Yamate-cho, Suita 684-8680

** 関西電力株式会社総合技術研究所
〒 661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3-11-20
General R&D Center, The Kansai Electric Power Co., Inc.
3-11-20, Nakōji, Amagasaki 661-0974

議論する。

2. 接地抵抗モデル

(2・1) 非線形接地抵抗 現在雷サージ解析に最も多く用いられている接地抵抗モデルは単純な固定抵抗であるが、接地抵抗の低減特性を示すモデルとしては、非線形抵抗モデル⁽¹³⁾が挙げられる。これは大電流流入時に抵抗値が電流に依存するモデルであり、絶縁破壊を起こした部分の土壤がイオン化して完全導体になると仮定され、抵抗は電流にのみ依存し時間の関数ではない。非線形抵抗モデルは次式で表される。

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_e} \quad (1)$$

ここで、 r_e [m] は土壤の絶縁破壊によりイオン化した領域を半球電極と仮定した時の等価半径であり、次式

$$r_e = \sqrt{\frac{\rho I}{2\pi E_c}} \quad (2)$$

で表される。ただし ρ [Ω m] は土壤抵抗率、 I [A] は流入電流値、 E_c [V/m] は臨界電界値である。土壤のイオン化はこの臨界電界値 E_c あるいはそれに相当する臨界電流値 I_g を越えた領域で発生するので、非線形接地抵抗モデルは次式のように表わすことができる⁽¹²⁾。

$$R = \begin{cases} R_0 & (E < E_c) \\ R_0 \cdot \sqrt{\frac{E_c}{E}} & (E \geq E_c) \end{cases} = \begin{cases} R_0 & (I < I_g) \\ R_0 \cdot \sqrt{\frac{I_g}{I}} & (I \geq I_g) \end{cases} \quad (3)$$

(2・2) 動特性接地モデル 前節の非線形抵抗モデルは、大電流が流入されると土壤の絶縁破壊のため仮想的に電極が大きくなっていくモデルであった。しかし絶縁破壊を起こした土壤の部分のみ直ちに抵抗率が0になるのではなく、順次徐々に抵抗率の低減を始めると考えるのが妥当である。また実際には、土壤抵抗率の低減過程とその回復過程は別の経路をたどる履歴特性を有することがこれまで明らかになっている。

図1 動特性接地モデルの抵抗率—電流密度特性
Fig. 1. Resistivity profiles in dynamic model.

動特性接地モデルはこうした土壤中の振る舞いを考慮した数理モデルである⁽³⁾。図1に、土壤のある位置における土壤抵抗率の特性曲線を示す。図中(A)はまだ土壤抵抗率の低減が起こっていない状態、図中(B)及び(B')は臨界電流密度 J_c を越え絶縁破壊を起こし、抵抗率が減少を始めている状態、図中(C)は流入電流の減少により再びその臨界電流密度を下回り、抵抗率が回復を始めている状態を示す。以下は文献(3)でLiewらにより提案された各状態における計算式である。すなわち、

(A) 非イオン化領域: $J < J_c$

$$\rho = \rho_0 \quad (4)$$

(B)(B') イオン化進展領域: $J \geq J_c$

$$\rho = \rho_0 \exp \frac{-t}{\tau_1} \quad (5)$$

(C) イオン化回復領域: $J < J_c$

$$\rho = \rho_{\min} + (\rho_0 - \rho_{\min}) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) \left(1 - \frac{J}{J_c} \right)^2 \quad (6)$$

ここで ρ [Ω m] は土壤の抵抗率、 ρ_0 [Ω m] は定常抵抗率、 $\rho_{\min}$ [Ω m] は抵抗率の最小値、 τ_1 , τ_2 [msec.] はそれぞれ低減時及び回復時の時定数、 J [A/m^2] は電流密度、 J_c [A/m^2] は臨界電流密度である。これらの抵抗率の式は土壤中の任意の点における抵抗率であり、この抵抗率は電極との位置関係によって決まる。簡単のため電極を半径 r_0 の半球電極と仮定すると、電極全体の接地抵抗は、

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho(r,t)}{2\pi r^2} dr \quad (7)$$

与えられる。

図2には比較のため、電流—接地抵抗特性の実測値と共に動特性接地モデルによる計算結果も載せてある⁽¹¹⁾。このように接地抵抗の時間依存と履歴現象を詳細に模擬できるモデルであることが確認できた。

3. 500kV送電線鉄塔雷サージ解析への適用

(3・1) 500kV送電線鉄塔モデル 本報告では、動特性接地モデルを送電線雷サージ解析に適用した場合の導入効果について検討を行う。図2に示すような標準的な500kV送電鉄塔を解析対象とし、図3のような鉄塔11基からなる理想的な送電システムを想定して、接地抵抗部に動特性接地モデルを適用した場合のフラッシュオーバー発生様相の解析を行った。また今回導入した動特性接地モデルと比較対照を行うため、非線形抵抗モデルを用いた場合の解析、および固定抵抗を用いた場合の解析も併せて行った。

500kV送電鉄塔は標準的なものとして鉄塔高は82.1m、塔脚間隔14.1mと設定し、鉄塔モデルはアーム部、斜材部を考慮した伝送線路モデル⁽¹³⁾を用いた。この鉄塔モデルの

回路構成図および各部材のサージインピーダンスは図2に示す通りである。送電線線路は8相 Semlyen モデルを用い、鉄塔間の間隔は等間隔に 450 m と設定した。中央鉄塔から数えて 5 基目以遠は、左右とも反射波の返ることのない充分長い線路として 20 km の距離を持つものと設定した。

雷撃は中央鉄塔 1 号線架空地線アーム部先端に受けたものとし、雷撃のパラメータには波高値 200 kA、波頭長 1.0 μ s、波尾長 70 μ s のランプ波電流源と雷道インピーダンス 400 Ω で表現した。また、本解析で用いた各モデルの詳細は表 1 に示す通りである。

〈3・2〉 動特性接地モデルの記述 雷撃のある中央鉄塔および左右 1 基目の接地部には、今回の検討対象となる動特性接地モデルを導入した。また左右 2 基目以遠の鉄塔接地部に関しては、中央鉄塔でのフラッシュオーバーの有無には殆ど影響を与えないと見なし、単なる固定抵抗を与えた。この固定抵抗の値は、動特性接地モデルでの定常抵抗値と同じ値を設定している。土壤抵抗率は 2000 Ω m および 4000 Ω m の 2 種類を設定した。これは山岳地帯での高抵抗地盤における抵抗率を考慮しての値である。また、土壤の臨界電界値は衝撃大電流試験⁽¹⁰⁾の結果から 600 kV/m を与えた。

鉄塔塔脚基礎はそのバルク状の形状から半球電極と見なし、表面積等価半径 2.26 m の半球電極として計算を行った。この値は 500 kV 送電線用 E-100 型鉄塔の標準的な値である。また、鉄塔 1 基あたり 4 脚の塔脚基礎があるが、それらの相互距離は等価半球電極半径に比較して充分大きいため、塔脚(接地電極)間の近接効果はないものとして、接地抵抗は単純に 1/4 倍した。したがって式(1)より、土壤抵抗率 2000 Ω m、4000 Ω m に相当する定常抵抗値は、それぞれ 35.2 Ω 、70.4 Ω である。

動特性接地モデルの定数には、土壤の定常抵抗率や臨界電流密度といった土質などに依存する既知の値のほかに、接地抵抗低減時及び回復時の時定数、すなわち式(5)中の τ_1 、 τ_2 が重要なパラメータとなる。しかしこれらの数値は実測実験のみから確認する値であり、他のパラメータから推測可能な値ではない。しかしこの値によって特性曲線は若干変化するもので、時定数の決定には充分な検討が必要である。そこで筆者らの研究グループが行った衝撃大電流試験⁽¹⁰⁾より得た特性に倣うようにこれらの値を決定し、本稿の 500 kV 送電系統解析を行った。本解析では接地抵抗低減時の時定数 τ_1 として 1.2 μ sec.、同回復時の時定数 τ_2 として 0.01 μ sec. を与えた⁽¹¹⁾。

なお、EMTP/ATP 上で解析をする場合、本モデルのように複雑な条件分岐をもつ数式の記述は従来の TACS カードだけでは非常に困難であるので、接地抵抗の記述には補助言語 MODELS⁽¹⁶⁾を用いた。MODELS において式(7)の積分計算は、接地電極付近の土壤を 0.1 m ごとの同心球状の層に分割してそれぞれの抵抗率を算出し、それらの和をとることにより数値積分を行った。接地抵抗部以外の鉄塔・送電系統等の外部回路は ATP で記述した。

図2 鉄塔電送線路モデルによる回路構成図
Fig. 2. Equivalent impedance model of tower.

図3 理想 500kV 送電網の回路構成図
Fig. 3. Schematic diagram of ideal transmission line system.

表 1 本解析における各部モデル一覧
Table 1. Examining models for the present analysis.

構成部位	モデル名	参考文献
鉄塔モデル	伝送線路モデル	[13]
送電線モデル	Semlyenモデル	[14]
フラッシュオーバーモデル	短波尾波モデル	[15]
接地モデル	固定抵抗(比較用)	[12]
	非線形抵抗モデル(比較用)	
	動特性接地モデル	[3], [11]

4. 動特性接地モデルの500kV送電線鉄塔雷サージ解析への導入効果

〈4・1〉 流入電流—接地抵抗特性曲線 図4(a)~(c)に動特性接地モデル適用時の中央鉄塔接地部への流入電流、接地部電位および接地抵抗の各波形を示す。また各図には比値が低いことが分かる。この理由としては、動特性接地モデルでは図1の模式図のように臨界電界値を超えても急激にはイオン化を始めないため、塔頂から接地部へ流れ込む分流比が相対的に低いまま維持されているからであると

推測できる。一方、接地部電位上昇に関しては、動特性接地モデルの場合、非線形抵抗モデルのそれに比べ非常に大きくなる（図4(b)）。このことから、両モデルどちらを採用するかでフラッシュオーバー発生の有無に非常に大きな影響を与えるであろうことが容易に推測できる。

図4(c)の接地抵抗波形では両者の違いはさらに顕著に見ることができる。非線形抵抗モデルは非常に変動の激しい曲線となっているが、それに対して動特性接地モデルの場合は滑らかな変化になっている。この理由としては、動特性接地モデルは流入電流に依存するだけでなく、式(5)および式(6)で表されるように時間に依存するためであり、その結果流入電流の急速な変化に関わらず緩やかな時間変化をするからであると推測できる。したがって、結果的に流入電流値の急峻な変化が影響しにくく、比較的滑らかな波形になったものと考えられる。逆に非線形抵抗モデルの場合には、式(3)で表されるように流入電流値が抵抗値に直接作用するため、図(a)のような電流波形に同期し、変化の激しい結果となる。しかし、土中放電の進展・回復が短時間に複雑に反転を繰り返すことは一般に考えにくく、このような反射波を伴い複雑に振動する流入電流に対して、非線形抵抗モデルが現実の現象を十分模擬できているとはいえない。このことより、特に複雑な反射波が重畳するような鉄塔雷サージ解析においては、非線形抵抗モデルより動特性接地モデルの方がより妥当であることがわかる。

次に図4(d)において接地抵抗の接地部流入電流に対する依存動特性を考察する。非線形抵抗モデルはもとより式(3)のように電流依存モデルであるので特性曲線は非常に単純な形を成し、往路と復路は同一経路をたどる。それに対して動特性接地モデルの場合は、非常に複雑な形状を呈し、かつ履歴特性を持っていることが分かる。これは図(c)の抵抗変化が滑らかなため、流入電流の複雑な変動が電流-抵抗特性のカーブにも直接反映しているためである。図(d)を見ると動特性接地モデルの特性曲線は一見奇異に見えるが、このような複雑な形状は接地部への流入電流自体の影響であり、接地抵抗の動的振るまいは、寧ろ急激な電流変化には左右されず土中放電の進展・回復の物理的メカニズムに従っていることが推測される。

したがって上記の考察から、特に鉄塔や送電線のように多数の回路要素を持ち、複雑な反射波を生成しやすい解析モデルを扱う場合は、非線形抵抗モデルは現実には即した妥当な接地抵抗の振るまいを模擬しづらいことがわかる。なぜなら、例えばランプ波のような単純な雷撃波形を流入させたとしても、各ノードで発生する反射波が重畳するため、接地部に流入する電流波形が複雑になるからである。よってそのような解析対象を想定した場合、動特性接地モデルを採用する方が、土中放電の進展および回復特性を考慮した実現現象に即した振るまいを記述できるという点で優位性があることがわかる。

〈4・2〉 フラッシュオーバー相解析 次にこのような接地抵抗モデルの違いがフラッシュオーバー事故にどのような影響

図4 送電線モデルでの解析結果(接地部での観測)
($I_{\max} = 200 \text{ kA}$, $\rho = 2000 \Omega\text{m}$, $1/70 \mu\text{sec.}$)
Fig. 4. Result of analysis on grounding system.

を与えるかについて考える。図5は同一条件下での中央鉄塔1号線上相のアーカホーン間電圧の解析例である。この図では、動特性接地モデルを用いた解析では中央鉄塔1号線上相においてフラッシュオーバーが発生し、非線形抵抗モデルの場合はフラッシュオーバーが起こらなかった例を示している。非線形抵抗モデルを用いた場合、図4(b)で見たように波頭での接地部電位上昇は低く押さえられるため、各アーカホーン間電圧の上昇も低くなり、フラッシュオーバーが起こりにくくなったものと推測できる。

次にこの解析結果の全体像を把握するため、解析対象となる系統が落雷時に確率的にどの程度フラッシュオーバー事故を起こすかを算出する。ここでは、雷撃鉄塔1号線上相の位相を基準として雷撃タイミングを30°ごとに覚えて解析を行い、そのフラッシュオーバー相数の平均値をフラッシュオーバー相数期待値(確率的なフラッシュオーバー発生相数)として評価する。表2に各接地抵抗モデルでのフラッシュオーバー相状況を示す。モデルパラメータは雷撃電流波高値 200 kA, 波頭長/波尾長 1/70 $\mu\text{sec.}$, 土壌抵抗率 2000 Ωm である。表(a), (b), (c)にそれぞれ固定抵抗, 動特性接地モデル, 非線形抵抗モデルを接地抵抗として適用した場合のフラッシュオーバー相様相を示す。表中の■印はフラッシュオーバーを起こした相を示している。同表から、固定抵抗モデル適用時のフラッシュオーバー相数期待値は4.67相、動特性接地モデル適用時は3.38相、非線形抵抗モデル適用時は2.67相、となっていることがわかる。

固定抵抗は抵抗低減現象を示さないモデルであるので、低減現象を示す他のモデルに比べフラッシュオーバー数が最も多くなる結果となっている。また、非線形抵抗モデルを用いた場合のフラッシュオーバー相数は、他の二者に比べ最も少ない結果となっている。すなわち、動特性接地モデルは固定抵抗と非線形抵抗モデルの中間の様相を呈していることがわかる。この理由としては、図4(c),(d)の抵抗特性の抵抗

図5 鉄塔1号線上相アーカホーン間電圧波形 ($I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$, $\rho = 4000 \Omega\text{m}$, 1/70 $\mu\text{sec.}$)
Fig. 5. Arcing-horn voltage waveforms at upper phase on line #1.

低減速度がアーカホーン間電圧上昇に大きく影響しているからである、と推測できる。このことは、特に前節で議論した動特性接地モデルの妥当性を考えると、従来の固定抵抗では本来フラッシュオーバーを起こすであろう相数を多く見積もりすぎており、非線形接地抵抗モデルではフラッシュオーバー発生相数を少なく見積もりすぎている可能性があることを示唆している。

〈4・3〉 フラッシュオーバー相数期待値 同様に図6に、抵抗率・雷サージ波形・雷撃電流波高値の条件を変え、さらに解析を行った場合のフラッシュオーバー相数期待値を示す。様々な落雷状況を想定して、抵抗率は2000 Ωm および4000 Ωm , 電流源波形は1/70 $\mu\text{sec.}$ および2/70 $\mu\text{sec.}$, 電流源波高値は200 kA 及び150 kA として、すべての組み合わせに関してフラッシュオーバー相数期待値を算出した。同図を見ると明らかなように、動特性接地モデルを適用した結果は、固定抵抗と非線形モデルの中間の様相を呈することがわかる。なお、今回採用した動特性接地モデルでは、式(5),(6)の

表2 フラッシュオーバー発生様相 ($I_{\text{max}} = 200 \text{ kA}$, $\rho = 2000 \Omega\text{m}$, 1/70 $\mu\text{sec.}$, ■印はフラッシュオーバー発生を示す)
Table 2. Examples of situations of flash-over accidents (The symbol "■" denotes occurrence of flash-over accident.).

(a) 固定抵抗						
A相	1号線			2号線		
位相	上(A)	中(C)	下(B)	上(B)	中(C)	下(A)
0	■		■	■		■
30		■	■	■	■	■
60		■	■	■	■	■
90		■	■	■	■	
120		■	■	■	■	■
150		■	■	■	■	■
180	■	■	■		■	■
210	■	■			■	■
240	■	■	■		■	■
270	■	■		■	■	■
300	■		■	■		■
330	■		■	■		■
フラッシュオーバー期待値：4.67						

(b) 動特性接地モデル						
A相	1号線			2号線		
位相	上(A)	中(C)	下(B)	上(B)	中(C)	下(A)
0	■		■	■		■
30			■	■		■
60		■	■	■	■	
90		■	■	■	■	
120		■	■	■	■	
150		■	■		■	■
180	■	■			■	■
210	■	■			■	■
240	■				■	■
270	■		■			■
300	■		■	■		■
330	■		■	■		■
フラッシュオーバー期待値：3.38						

(c) 非線形抵抗モデル						
A相	1号線			2号線		
位相	上(A)	中(C)	下(B)	上(B)	中(C)	下(A)
0	■		■	■		■
30			■	■		
60			■	■		
90		■	■	■	■	
120		■			■	
150		■			■	
180		■			■	
210	■	■			■	■
240	■					■
270	■					■
300	■					■
330	■		■	■		■
フラッシュオーバー期待値：2.67

(a) 波頭長 / 波尾長 = 1 / 70

(b) 波頭長 / 波尾長 = 2 / 70

図6 フラッシュオーバー発生期待値
Fig. 6. Expectation of flash-over accidents.

低減時定数 τ_1 および回復時定数 τ_2 という、実測実験以外に推測困難なパラメータが存在する。これらの値は接地抵抗低減効果に少なからず影響を与えるため、値の決定には十分配慮しなければならない。実際、土壌の状態によっては値が異なることはLiewら自身によっても指摘されている。今回は試みとして衝撃大電流試験結果⁽¹²⁾で実際に筆者らが実測した値を用いたが、詳細なフラッシュオーバー解析を行うためには、より実測実験・モデル実験のデータを積み重ねる必要があるであろう。

5. ま と め

本稿では 500 kV 送電系統において安全でかつ経済的な、合理的接地設計を行うことを目的に、より詳細な物理現象を記述する接地抵抗モデルである、動特性接地モデルの導入に関する評価を行った。MODELS-ATPを用いた解析の結果、以下の結果を得た。

- ・鉄塔雷サージ解析のように反射波が多く含まれる流入電流を想定する場合、動特性接地モデルは非線形抵抗モデルと比較して、妥当な抵抗変化特性を記述

できることが明らかになった。

- ・鉄塔雷サージ解析においては、動特性接地モデルによるフラッシュオーバー数は固定抵抗モデルより大きく非線形抵抗モデルより少なくなることが明らかになった。このことは、特に高抵抗地盤では、従来の固定抵抗モデルは過剰に見積もりすぎ、非線形抵抗モデルは過少に見積もりすぎている可能性があることを示唆している。

送電系統のサージ解析では、接地部のモデルはアークホーン間電圧上昇、ひいてはフラッシュオーバーの有無に非常に大きな影響を与える。本報告で議論したように、動特性接地モデルの雷サージ解析への導入は、従来のモデルに比べて、より詳細に現実の土中放電現象・抵抗低減現象を模擬することができ、より詳細なサージ解析を行うことが可能になったと言える。

動特性モデルには放電進展・回復時定数の決定など若干の検討すべき問題点も残されており、今後は実測実験・モデル実験によるデータを蓄積し、時定数決定のための方法を検討しなければならないであろう。しかし、この動特性モデルを採用することでより詳細なEMTP-ATPサージ解析を行うことができ、さらには事故率計算と比較することで安全かつ経済的な合理的接地設計が可能になるものと期待できる。

(平成14年2月1日受付, 平成14年7月1日再受付)

文 献

- (1) 寺井:「電力系統の運用と雷」, 電気学会関西支部「雷観測・耐雷解析・耐雷対策の技術動向」講演会資料, pp.1-7 (2000)
- (2) 三田・法貴: 絶縁と閃絡防止, オーム社 (1954)
- (3) A.C.Liew, and M.Darveniza: "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", *Proc. IEE*, **121**, No.2, pp.123-135 (1974)
- (4) 竹内・足立・原:「各種接地方式の大電流領域接地抵抗特性について」, 電気学会高電圧研資, **HV-97-89** (1997-7)
- (5) T. Matsui, M. Adachi, H. Fukuzono, S. Sekioka, O. Yamamoto, and T. Hara: "Measurements of Grounding Resistances of a Transmission-Line Tower Base Connected with Auxiliary Grounding Electrodes for High Impulse Currents", *Proc. on 10th International Symposium on High Voltage Engineering*, pp.257-260 (1997)
- (6) 竹内・足立・安田・原・福岡・関岡:「接地電極の土中放電に関する検討」, 電気学会放電・高電圧合同研資, **HV-97-156** (1997-10)
- (7) 竹内・足立・安田・原・福岡・関岡:「接地電極の土中放電に関する検討(その2)」, 電気学会放電研資, **ED-97-189** (1997)
- (8) M. Takeuchi, M. Adachi, Y. Yasuda, T. Hara, H. Fukuzono, and S. Sekioka: "Current Dependent Characteristic of a 500kV Transmission Tower Footing Base", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.4, pp.373-380 (1998-4) (in Japanese)
- (9) 竹内・足立・安田・原・福岡・関岡:「500kV送電鉄塔基礎の衝撃大電流領域接地抵抗特性」, 電学論B, **118**, 4, pp.373-380 (1998-4)
- (10) M. Takeuchi, K. Kawabata, Y. Yasuda, T. Hara, H. Fukuzono, and S. Sekioka: "Impulse Characteristic of a 500kV Transmission Tower Footing Base with Various Grounding Resistance", *Proc. on 24th Int. Conf. On Lightning Protection* (1998).
- (11) 竹内・川端・安田・原・池田・川端:「修正Liew-Darvenizaモデルによる送電鉄塔接地抵抗サージ動特性」, 平成13年電気学会全国大会, No.7, p.2965 (2001)
- (12) T. Hara, Y. Yasuda, Y. Hirakawa, N. Hayanose, M. Takeuchi, and K. Kawabata: "Flashover Analyses of Transmission Towers with Nonlinear

Grounding Resistance Model", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.2, pp.234-241 (2000-2) (in Japanese)

原・安田・平川・早ノ瀬・竹内・川端：「非線形接地モデルによる鉄塔雷撃多相フラッシュオーバー解析」, *電学論誌B*, **120**, 2, pp.234-241 (2000-2)

- (13) T. Hara, Yamamoto, Kitagawa, and Ono: "Multi-Phase Flashover Analysis of Transmission Tower When Struck by Lightning", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.6, pp.685-691 (1996-6) (in Japanese)

原・山本・北川・小野：「送電鉄塔雷撃時の多相フラッシュオーバー解析」, *電学論誌B*, **116**, 6, pp.685-691 (1996-6)

- (14) 日本EMTP委員会：ATP RULE BOOK, 日本EMTP委員会 (2000)

- (15) H. Motoyama: "Development of a New flashover Model for Lightning Surge Analysis", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.7, pp.839-846 (1995-7) (in Japanese)

本山：「雷サージ解析のための新フラッシュオーバーモデルの開発」, *電学論誌B*, **115**, 7, pp.839-846 (1995-7)

- (16) 野田・L. Dube：シミュレーションモデル記述言語 MODELS例題集, 日本EMTP委員会 (1996)

原 武 久 (正員) 1943年2月18日生まれ。1970年3月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月京都大学工学部助手。1975年4月同助教授。1997年4月関西大学工学部教授となり現在に至る。京都大学工学博士。電力系統におけるサージ過電圧の解析および絶縁設計, 放電の基礎過程のシミュレーション, 有限要素法等による機器やプラズマの電磁界解析, 電力システムのニューラルネットワーク

ワーク応用の研究に従事。1974年電気学会論文賞受賞, 1993年日本シミュレーション学会論文賞受賞。日本シミュレーション学会, エネルギー・資源学会, 電気設備学会, 日本大気電気学会, 放電研究グループ会員。

池 田 敬 一 (正員) 1970年12月26日生まれ。1995年3月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年関西電力(株)入社。同社総合技術研究所勤務。

園 井 康 夫 (正員) 1952年12月5日生まれ。1977年3月京都大学大学院研究科修士課程修了。同年関西電力(株)入社。同社総合技術研究所勤務。工学博士。

古 岡 芳 弘 (正員) 1955年12月17日生まれ。1978年3月福井大学工学部電気工学科卒業。同年4月関西電力株式会社入社。現在、総合技術研究所勤務、主幹。

安 田 陽 (正員) 1967年2月15日生まれ。1989年3月横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業。1994年3月同大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月関西大学工学部助手, 1999年専任講師となり現在に至る。工学博士。現在は主として, 分散型電源を有する電力系統のサージ問題に関する研究に従事。1997年電気学会優秀論文発表賞受賞。電子情報通信学会, 日本シミュレーション学会, 日本太陽エネルギー学会, 日本風力エネルギー協会会員。

近 藤 修 平 (正員) 1977年11月9日生まれ。2000年3月関西大学工学部電気工学科卒業。2002年3月関西大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月日本電気(株)入社。在学中は雷サージ解析および接地抵抗モデルの構築に従事。