FDTD Analysis of the Current Distribution within the Grounding System for a Wind Turbine Generation Tower Struck by Lightning

Mitsuhiro Nagao Student Member (Doshisha University, dth0152@mail4.doshisha.ac.jp)

Naoto Nagaoka Member (Doshisha University, nnagaoka@mail.doshisha.ac.jp)

Yoshihiro Baba Member (Doshisha University, ybaba@mail.doshisha.ac.jp)

Akihiro Ametani Member (Doshisha University, aametani@mail.doshisha.ac.jp)

Keywords: wind turbine generation tower, lightning current, grounding, FDTD method

Transient current distribution within the grounding system for a wind-turbine-generation tower of height 61 m struck by lightning, which is shown in Fig. 1, has been calculated using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The grounding grid of the lightning-struck tower is connected electrically via an insulated wire to one neighboring-tower grounding grid located 50 m away from it.

It has become clear that high-frequency components of a lightning current tend to flow in ground through the grounding grid of the lightning-struck tower, and they become larger with increasing the ground conductivity. Relatively-lower-frequency components of the lightning current flow in ground through each of the two grounding grids, roughly in inverse proportion to the grounding resistance of each grid. For example, when two identical grounding grids of the lightning-struck tower and the neighboring tower are buried in the same ground, about 50% of the lightning current flows in the grounding grid of the neighboring tower via the insulated wire connecting these two grounding grids (see Fig. 2). The magnitude of current flowing in the down conductor inside the tower is smaller than 4% of the tower base current in all cases considered in this paper (see Fig. 3).

Fig. 2. Waveforms of current at the tower base, current flowing from the tower base to the grounding grid through two insulated grounding wires, current flowing from the down conductor inside the tower to the grounding grid through an insulated grounding wire, and current flowing out from the tower to the grounding grid of the neighboring tower in the case that the ground conductivity is 10 mS/m

Fig. 1. A model of a 61-m-high wind-turbine-generation tower struck by lightning, to be analyzed using the FDTD method

Fig. 3. Waveform of current observed at a height of 30 m along the down conductor inside the tower

FDTD法を用いた風力発電タワー雷撃時の電流分布解析

学生員 長尾 光紘* 正員 長岡 直人*
正員 馬場 吉弘* 正員 雨谷 昭弘*

FDTD Analysis of the Current Distribution within the Grounding System for a Wind Turbine Generation Tower Struck by Lightning

Mitsuhiro Nagao*, Student Member, Naoto Nagaoka*, Member, Yoshihiro Baba*, Member, Akihiro Ametani*, Member

Transient current distribution within the grounding system for a wind-turbine-generation tower of height 61 m struck by lightning has been calculated using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The grounding grid for the lightning-struck tower considered in this paper is connected electrically via an insulated wire to one neighboring-tower grounding grid located 50 m away from it. High-frequency components of a lightning current tend to flow in ground through the grounding grid of the lightning-struck tower, and they become larger with increasing the ground conductivity. Relatively-lower-frequency components of the lightning current flow in ground through each of the two grounding grids roughly in inverse proportion to the grounding resistance of each grid. For example, when two identical grounding grids for the lightning-struck tower and the neighboring tower are buried in the same ground, about 50% of the lightning current flows in the grounding grid for the neighboring tower via the insulated wire connecting these two grounding grids. When the grounding resistance of the neighboring tower is about 1/4 of that for the lightning-struck tower, about 4/5 of the lightning current flows in the neighboring-tower grounding grid. This agrees well with the trend shown by Nagaoka et al. from their measurement in the grounding system for an actual wind-turbine-generation tower struck by natural lightning.

キーワード：風力発電タワー，雷電流，接地，FDTD法

Keywords: wind turbine generation tower, lightning current, grounding, FDTD method

1. 緒言

自然エネルギー有効利用の観点から，近年，風力発電所が数多く建設されている。しかし，頻繁に被雷する⁽¹⁾ことから，適切な雷害対策が風力発電所の運用効率の向上に不可欠である。

風力発電設備での雷過電圧発生メカニズムを明らかにする目的で，山本ら⁽²⁾⁽³⁾は風力発電タワー各部に生じる雷過電圧の縮小モデル実験を，安田ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は風力発電ファームの雷過電圧の回路解析および風力発電タワーの接地電極サージ特性のFDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法⁽⁶⁾を用いた解析を行っており，風力発電設備の各部で生じる雷過電圧の特徴が明らかにされつつある。最近，長岡ら⁽⁷⁾は風力発電ファーム内の一風力発電タワーが実雷撃を受けた場合における同タワーの接地系各部に流れる雷電流を実

測し，かなりの割合の雷電流がタワー脚部から連接接地線に流出しているという測定結果を報告している。なお，需要家設備の接地グリッドから配電線への雷電流の流出（逆流）現象やそれに起因した事故については，比較的古くから横山ら⁽⁸⁾によって指摘されており説明が進んでいる。

本論文では，FDTD法を用いて，風力発電タワーが被雷した際のタワーおよび接地系（タワー脚部と接地グリッドとの接続線，タワー内電気設備の接地線と接地グリッドとの接続線，連接接地線等）の過渡電流分布を解析し，それらに与える雷電流波形，大地導電率および被雷タワーと隣接タワーの接地抵抗の相違等の影響について検討を行ったので報告する。

2. 計算モデル

図1(a)に計算モデルの全体図を，同図(b)に雷撃を受けたタワー脚部の詳細図を示す。このモデルは，タワー，ナセル，ブレード3翼，鉄筋コンクリート基礎（ただし，見難くなることを避けるため，図1(a)の全体図には鉄筋コンクリート基礎を描いていない），不完全導体大地に埋設され

* 同志社大学

〒610-0311 京田辺市多々羅都谷 1-3

Doshisha University

1-3, Miyakodani, Tatara, Kyotanabe 610-0311

図1 被雷した風力発電タワーのFDTD計算モデル
Fig. 1. A model of a 61-m-high wind-turbine-generation tower struck by lightning, to be analyzed using the FDTD method.

たタワーの接地グリッド、そこから50m離れた隣接タワーの接地グリッド（ただし、隣接タワー地上部は接地系電流分布にほとんど影響を与えないと考えられるため考慮していない）、垂直な雷放電路および雷電流を出力する電圧源から構成される。

解析空間は75m×75m×150mとし、これを一辺0.5mの立方体セルで分割した。この解析空間を囲む6面にはLiaoの二次吸収境界条件⁹⁾を適用した。計算時間刻みは、Courantの安定条件を満たす0.9430nsと設定した。

風力発電タワーは地上高61mとし、脚部1メートルを埋設した。地面下1mから地上高59mまでは一辺4mの正方形断面を有する直方体で、そこから61mまでは2m×5mの長方形断面を有する直方体で（ナセル部分を）模擬した。タワーおよびナセルは、ステンレス鋼であることを想定し、それらの導電率を 1.1×10^6 S/mに設定した。また、タワーおよびナセル内部は空洞とした。なお、これらを完全導体と設定した場合の計算も行ったが、計算結果にほとんど相違は見られなかった。

大地の導電率は10mS/m、比誘電率は10、比透磁率は1、大地の厚みは30mとした（下面は吸収境界面と設定）。この厚みは、この大地への周波数1MHzにおける電磁波の透過深度 $3.6\text{ m} [= (2\pi f \sigma \mu_0)^{-1/2}]$ に比べて充分大きい。

鉄筋コンクリート基礎は、内側面積5m×5m、深さ1.5mの柵状の導体で模擬した。導電率は 9.9×10^6 S/m（鉄の導電率）と設定した。なお、細い鉄線を格子状に編んで作成した0.5m×0.5m×3mの直方体接地電極の過渡応答特性実測波形と、その電極を同じ大きさの金属塊で模擬して行ったFDTD計算波形とが良好に一致する¹⁰⁾ことから、鉄筋コンクリート基礎をこのように模擬することも妥当であると考えられる。この鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部との間には0.5mのギャップを設け、その部分の導電率は大地のそれと同じ10mS/mと設定した。このように基礎を設定した理由は、タワーと鉄筋コンクリート基礎内の鉄筋が電氣的に完全に接続されているとは限らないと考えたためである。また、タワー脚部と基礎の間に設けた0.5mという間隔は大きい、これは本計算で使用したセルサイズ（一辺0.5mの立方体）に起因している。それらが電氣的に良好な接続を保っている場合の計算結果は、第4・4節で示す。なお、実際のタワーでは、鉄筋コンクリート基礎の下に複数の杭（鉄筋コンクリート製）が存在するが、本計算では、それらは考慮しなかった。

接地グリッドは、地表面から3m下（鉄筋コンクリート基礎下面から0.5m下）に配置した。このグリッドの輪郭は10m×10mとし、網目の大きさは1m×1mとした。接地グリッドを構成する導体の等価半径は、文献(11)より $0.115\text{ m} (= 0.23 \times 0.5\text{ m})$ になる。この導体半径は一般的な接地線導体の半径の10倍以上の大きさであるが、グリッド電極の接地抵抗は主としてグリッド全体（輪郭）の大きさで決まるため¹²⁾、この導体半径の影響は小さいと考えられる。

この接地グリッドとタワー脚部は、比誘電率1、断面1m×1mの絶縁体の中心に配置した等価半径0.115m(=0.23×0.5m)¹³⁾の導体2本で接続した。またタワー内電気設備の接地線を模擬する引き下げ線の上端はタワー頂部に接続し、下端は1本の絶縁導体（断面1m×1mの絶縁体の中心に配置した等価半径0.115mの導体）を介して接地グリッドに接続した。これらの絶縁導体を高導電率の土中に埋設した場合、その特性インピーダンスは90Ω程度となり、実際に用いられている被覆厚の小さい導体を埋設し

た場合の特性インピーダンスの数倍の高さとなる。しかし、長さが4m程度と短いため、立ち上がり時間数 μs の雷電流を対象とする場合には、この相違の影響は顕著には生じないと考えられる。

引き下げ線は、さらに50m離れたところに設けた隣接タワーの接地グリッドと絶縁導体で接続した。実際のタワー間隔は、この数倍以上であることが多いが、FDTD計算においてその間隔を忠実に模擬すると、それだけ解析空間と計算時間が増大するため、この間隔とした。

なお、上述したのと同じ理由で、鉄筋コンクリート基礎と接地グリッドは接続しておらず、その間には導電率10mS/m、長さ0.5mのギャップが存在する。鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部、接地グリッドとの間を導線で接続した場合の計算結果については第4.4節で示す。

ブレードは長さ30mの3翼で模擬し、ナセル中央部を中心として各翼を120°間隔で配置した。ブレードは、その材質がガラスであることを想定し、導電率を $1.0 \times 10^{-14} \text{ S/m}$ 、比誘電率を4.2に設定した。ただし、各ブレード表面の先端からナセルまでの間に等価半径0.115mの導体を設けた。この導体半径は、一般的なブレード内部の引き下げ線の半径に比べて大きい。ブレード上のサージ伝搬時間(0.1 μs 程度)より充分長い立ち上がり時間を有する雷電流を対象とする場合には、この相違の計算結果に与える影響は小さいと考えられる。ブレード上のサージ伝搬時間に近い立ち上がり時間を有する雷電流を対象とする場合には、タワーに流入する初期のピーク値が影響を受けると考えられる。

雷撃点は、ブレードの一翼(垂直に配置した翼)の先端とし、その点と雷放電路を模擬する垂直導体との間に電圧源と500 Ω の直列抵抗を挿入した。なお、500 Ω の直列抵抗を挿入したのは、タワーから見た模擬雷放電路の等価インピーダンスを実際の値(600~2500 Ω)⁽¹⁴⁾に近づけるためである。電圧源は、ピーク値30kA、立ち上がり時間約2.5 μs (10~90%立ち上がり時間)、波尾長約70 μs の電流波を出力するように設定した。また、雷放電路を模擬する垂直導体の上端は吸収境界面に接続した。

3. 計算結果

大地導電率が10mS/m、鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部、接地グリッドとの間を導線で接続していない場合の電圧源(雷放電路と垂直ブレード先端の間)から流入される電流波形を図2に示す。図3には、タワー脚部(地表面から0.75m上)の電流波形、タワー脚部から接地グリッドに流入する電流波形(タワー脚部と接地グリッドをつなぐ絶縁導体2本を流れる電流)、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流波形(観測点は連接接地線との接続点より下側)および連接接地線への流出電流波形を示す。図4には、タワー中央の引き下げ線に流れる電流波形(地表面から30m上側で観測)を示す。ただし、連接接地線電流以外は、下向きに正極性電流を正として表示している。連接接地線電流は、雷撃タワーから流出する正極性の

図2 電圧源から流入される電流波形

Fig.2. Waveform of current injected by the voltage source.

図3 タワー脚部電流、タワー脚部から絶縁導体を介して接地グリッドに流入する電流、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流および連接接地線への流出電流の各波形(下向きに流れる電流を正として表示。連接接地線電流は流出電流を正として表示)

Fig.3. Waveforms of current at the tower base, current flowing from the tower base to the grounding grid through two insulated grounding wires, current flowing from the down conductor inside the tower to the grounding grid through an insulated grounding wire, and current flowing out from the tower to the grounding grid of a neighboring tower.

電流を正として表示している。

図3に示したタワー脚部電流と図4に示したタワー中央の引き下げ線に流れる電流を比較すると、タワー脚部電流のピーク値が30kAであるのに対しタワー中央の引き下げ線に流れる電流のピーク値は約1kAと大幅に小さくなっている(タワー脚部電流の約3%)。なお、タワー中央部の引き下げ線に流れるこの電流の立ち上がり時刻は、タワー脚部電流の立ち上がり時刻より遅れていることから、初期の引き下げ線電流は雷撃点から直接流入したものではなく、タワー脚部から流入した電流であると考えられる。以下では、この引き下げ線電流について考察する。図3より、タ

ワー脚部電流のほとんど(約90%)は、2本の絶縁導体を介して接地グリッドに流入している。このうちの何割か(図3参照:5 μ s時点で約20%)は、中央の絶縁導体を介して連接接地線に流出している。このため、タワー内部の地表面付近においては、中心方向の電界が発生する。この電界は、中央の引き下げ線を上向きに伝搬する同軸モードの負極性電流を駆動する。上向きに伝搬する負極性電流波は、下向きに伝搬する正極性電流波と等価であるため、図4においてその極性は正として表示されている。なお、準定常状態において引き下げ線に流入している下向きの正極性電流(約1kA)は、頂部から流入したものと考えてよい。

接地グリッドと連接接地線およびタワー内引き下げ線をつなぐ絶縁導体に流れる電流は、図3において負となっている。これは、一度接地グリッドに流入した雷電流が引き下げ線を介して連接接地線に流出していることを示している。タワー脚部電流に対する連接接地線への電流流出率は、5 μ s時点において約15%、30 μ s時点において約50%となっている。なお、本論文のFDTD計算モデルでは隣接タワーの接地グリッドを50m離れたところに設けたが、実際のタワー間隔はこの数倍以上である。隣接タワーの接地グリッドをこのように近接して設置したことにより、連接接地線への電流流出率が準定常値(50%)に至る時間が実際より短くなっていると考えられる。

連接接地線が存在しない場合には、接地グリッドに流入した電流はそこから大地に流入する(図は省略)。タワー脚部から2本の絶縁導体を介して接地グリッドに流入する電流の流出率(タワー脚部電流に対する)は、タワー脚部電流に対して5 μ s時点および30 μ s時点において約90%であり、連接接地線が存在する場合とほぼ同じである。タワー内の引き下げ線に流れる電流のピーク値は、タワー脚部電流のピーク値に対して約2%であり、連接接地線が存在する場合より若干小さくなる。

次節では、連接接地線への雷電流の流出率に与える雷電流波形、大地導電率、雷撃タワーと隣接タワーの接地抵抗

の相違、および鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部、接地グリッドとの間の接続の有無の影響について検討を行う。

4. 検 討

〈4・1〉 雷電流波形の影響 前節では、立ち上がり時間2.5 μ s(10–90%立ち上がり時間)の雷電流が流入した場合の計算を行った。本節では、後続雷撃を想定し、立ち上がり時間が0.15 μ sの雷電流が流入した場合における接地系の各部の雷電流分布の計算を行う。大地導電率は前節の計算と同じ10mS/mとする。

図5に電圧源から流入される電流波形(ピーク値30kA)を示す。この波形には2つのピークが観測されるが、一番目のピークは電圧源より30m下のブレード下端とタワー頂部の接続点からの反射波に起因したものであり、二番目のピークは電圧源から約90m下に位置する大地面からの反射波に起因したものである。

図6に、タワー脚部の電流波形、タワー脚部から接地グリッドに流入する電流波形、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流波形および連接接地線への流出電流波形を示す。図6には、タワー中央の引き下げ線に流れる電流波形を示す。

図6に示したタワー脚部電流と図7に示したタワー中央の引き下げ線に流れる電流を比較すると、タワー脚部電流のピーク値が47kAであるのに対しタワー中央の引き下げ線に流れる電流のピーク値は0.7kAと大幅に小さくなっている(タワー脚部電流の1.5%)。この比は、立ち上がり時間が2.5 μ sの場合のそれ(3%)より低い。

また、雷電流の立ち上がり時間0.15 μ sの場合においては、初期(1 μ s程度)に、50%以上の電流がタワー脚部から大地に直接流出している。しかし、それ以降は、雷電流の立ち上がり時間が2.5 μ sの場合と同様に、タワー脚部の電流のほとんどが2本の絶縁導体を介して接地グリッドに流入している。接地グリッドに流入した雷電流の一部は大地に流出し、残りはタワー内部の引き下げ線と接地グリッドをつなぐ絶縁導体を介して連接接地線に流出している。タ

図4 タワー中央の引き下げ線に流れる電流波形
(地表面より30m上側で観測)

Fig.4. Waveform of current observed at a height of 30 m along the down conductor inside the tower.

図5 電圧源から流入される電流波形

Fig.5. Waveform of current injected by the voltage source.

図6 雷電流の立ち上がり時間が $0.15\mu\text{s}$ の場合における雷撃を受けたタワーの接地系各部の電流波形

Fig. 6. Waveforms of currents at different points within the grounding system for the lightning-struck tower when the 10-to-90% risetime of injected lightning current is $0.15\mu\text{s}$.

図7 雷電流の立ち上がり時間が $0.15\mu\text{s}$ の場合におけるタワー中央の引き下げ線に流れる電流波形
Fig. 7. Waveform of current observed at a height of 30 m along the down conductor inside the tower when the 10-to-90% risetime of injected lightning current is $0.15\mu\text{s}$.

タワー脚部電流に対する連接接地線への電流流出率は、 $5\mu\text{s}$ 時点で10%、 $30\mu\text{s}$ 時点で50%となっている。このように、準定常状態において約半分の雷電流が連接接地線に流出するのは、雷撃を受けたタワーの接地グリッドとそれと全く同一の隣接タワーの接地グリッドが同じ導電率を有する大地内に並列に存在するため、言い換えれば、それらの接地抵抗値が全く同一であるためである。

以上のことから、雷電流の急峻成分は雷撃を受けたタワーの接地グリッドを介して大地に流出する割合が高いが、緩やかな成分に対しては、各接地グリッドの接地抵抗の逆比割合で分流することが確認された。連接数が増し、連接接地の合成抵抗値が低下すれば、雷撃を受けたタワーから連接接地線への流出率はさらに高くなることが予想される。

〈4・2〉 大地導電率の影響 前節までは、大地導電率

図8 大地導電率が 1 mS/m の場合における雷撃を受けたタワーの接地系各部の電流波形

Fig. 8. Waveforms of currents at different points within the grounding system for the lightning-struck tower when the ground conductivity is 1 mS/m .

を 10 mS/m と設定して計算を行ってきた。本節では、大地導電率を 1 mS/m に変更した場合における風力発電タワー接地系各部の雷電流分布の計算を行う。なお、この計算では雷電流の立ち上がり時間は約 $2.5\mu\text{s}$ とする。

この条件で計算したタワー脚部の電流波形、タワー脚部から接地グリッドに流入する電流波形、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流波形および連接接地線への流出電流波形を図8に示す。

図8より、大地導電率が 1 mS/m の場合にも、タワー脚部電流のほとんど($5\mu\text{s}$ 時点および $30\mu\text{s}$ 時点で約90%)の電流は、2本の絶縁導体を介して接地グリッドに流入している。また接地グリッドに流入した雷電流の約半分が連接接地線に流出している。タワー脚部電流に対する連接接地線への電流流出率は、 $5\mu\text{s}$ 時点で45%、 $30\mu\text{s}$ 時点で50%となっている。大地導電率が 10 mS/m の場合に比べて、 $5\mu\text{s}$ での流出率は高くなっているが($20 \rightarrow 45\%$)、 $30\mu\text{s}$ での流出率はほぼ同じである。タワー中央の引き下げ線に流れる電流は示していないが、波形は図4とほぼ同じである。引き下げ線電流のピーク値はタワー脚部電流ピーク値の約4%となっており、大地導電率が 10 mS/m の場合(約3%)に比べて若干大きくなっている。

以上のことから、雷電流の急峻成分に対しては、大地導電率が低いほど連接接地線への流出率が高くなること、緩やかな成分に対しては、各接地グリッドの抵抗値の逆比で各接地グリッドに分流することが確認された。

〈4・3〉 隣接タワーの接地抵抗の影響 前節までは、雷撃を受けたタワーの接地グリッドの形状と隣接タワーの接地グリッドの形状を同一として計算を行ってきた。本節では、雷撃を受けたタワーの接地グリッド形状をそのままとし(輪郭 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、グリッドの網目の大きさ $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、埋設深さ 3 m)、隣接タワーの接地電極を平面グリッドから直方体グリッド($10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 20\text{ m}$ 、グリッドの網目の大きさは $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、埋設深さ $3 \sim 23\text{ m}$)に変更して計算を行

図9 雷撃を受けたタワーの接地グリッドの接地抵抗が隣接タワーのそれより約4倍高い場合における雷撃を受けたタワーの接地系各部の電流波形

Fig. 9. Waveforms of currents at different points within the grounding system for the lightning-struck tower when the ground resistance of the lightning-struck tower is about 4 times higher than that of the neighboring tower.

う。なお、各接地グリッドを対象に大地導電率を 10 mS/m と設定して別途行った計算によれば、 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ の平面接地グリッドの接地抵抗値は約 2Ω 、 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ の直方体接地グリッドのそれは約 0.5Ω であった。

上述の条件で計算したタワー脚部の電流波形、タワー脚部から接地グリッドに流入する電流波形、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流波形および連接接地線への流出電流波形を図9に示す。ただし、大地導電率は 10 mS/m 、雷電流の立ち上がり時間は約 $2.5 \mu\text{s}$ とした。

タワー脚部電流のほとんど ($5 \mu\text{s}$ 時点および $30 \mu\text{s}$ 時点で約 90%) は、2本の絶縁導体を介して接地グリッドに流入している。接地グリッドに流入した雷電流は、初期には大地に流出する割合が高いが、徐々に連接接地線に流出する割合が高くなっている。連接接地線への流出率は、タワー脚部電流に対して、 $5 \mu\text{s}$ 時点で 15%、 $30 \mu\text{s}$ 時点で 65% となっている。連接接地線への電流流出量は、時間の経過とともに上昇し、最終的には各接地グリッドの接地抵抗の逆比に等しい 80% ($= 2 \Omega / 2.5 \Omega \times 100\%$) が流出する。長岡らの実測結果において、雷撃を受けたタワー脚部の電流の 80% 以上が連接接地線に流出しているのも、上記と同じ原因によるものと考えられる。

タワー中央の引き下げ線に流れる電流は示していないが、タワー脚部電流ピーク値の約 4% のピーク値を有する電流が流れている。

〈4・4〉鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部、接地グリッド間の接続の影響 前節までは、鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部、接地グリッドとの間を電線で接続していない場合を対象に計算を行ってきた。本節では、これらの間が電氣的に完全に接続されている場合の計算を行う。なお、本節の計算では、大地導電率は 10 mS/m 、雷電流の立ち上がり時間は約 $2.5 \mu\text{s}$ とする。

図10 鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部および接地グリッドとの間を接続した場合における雷撃を受けたタワー接地系各部の電流波形

Fig. 10. Waveforms of currents at different points within the grounding system for the lightning-struck tower when the steel-reinforced-concrete substructure is connected perfectly with the tower foot and to the grounding grid.

鉄筋コンクリート基礎と接地グリッド間は接続せずに、鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部を密着（接続）させた場合（タワー脚部と接地グリッド、タワー内引き下げ線と接地グリッドをつなぐ絶縁導体はそのまま）におけるタワー中央の引き下げ線に流れる電流のピーク値は脚部電流ピーク値の約 2% となった。連接接地線への流出率は、タワー脚部電流に対して、 $5 \mu\text{s}$ 時点で約 15%、 $30 \mu\text{s}$ 時点で約 50% となった。これらの比は、鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部間に 0.5 m の導電率 10 mS/m のギャップが存在する場合の比（図3および図4参照：3%、20%、50%）とそれほど変わらない。

鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部は接続せずに、鉄筋コンクリート基礎と接地グリッドを4本の裸導体で接続した場合におけるタワー中央の引き下げ線に流れる電流のピーク値は脚部電流ピーク値の約 2% となった。連接接地線への流出率は、タワー脚部電流に対して、 $5 \mu\text{s}$ 時点で約 15%、 $30 \mu\text{s}$ 時点で約 50% となった。これらの比は、鉄筋コンクリート基礎と接地グリッド間を接続していない場合の比とほぼ同じである。

鉄筋コンクリート基礎とタワー脚部および接地グリッドの間を接続した場合におけるタワー脚部の電流波形、タワー脚部から接地グリッドに流入する電流波形、タワー内引き下げ線から接地グリッドに流入する電流波形および連接接地線への流出電流波形を図10に示す。この場合には、鉄筋コンクリート基礎を介して接地グリッドに流入する電流が増えるため、タワー脚部と接地グリッドをつなぐ2本の絶縁導体に流れる電流が図3のそれと比較して極めて小さくなっている（ $30 \mu\text{s}$ 時点において、図3では脚部電流の約 50%、図10では脚部電流の約 10%）。一方、連接接地線への流出率については、タワー脚部電流に対して、 $5 \mu\text{s}$ 時点で約 15%、 $30 \mu\text{s}$ 時点で約 50% となった。この比は、鉄

筋コンクリート基礎と接地グリッド間を接続していない場合の比と同じである。このことは、タワー脚部から接地グリッドへの雷電流の主たる経路が内部絶縁導体から鉄筋コンクリート基礎に変わるのみで、連接接地線への流出電流はそれほど変化しないことを示している。タワー中央の引き下げ線に流れる電流のピーク値は脚部電流ピーク値の約2%であり、これについても鉄筋コンクリート基礎と接地グリッド間を接続していない場合の比とはほぼ同じである。

5. 結 言

本論文では、FDTD法を用いて、雷撃を受けた風力発電タワーの接地系各部の電流分布の計算を行った。その結果、以下の事項が明らかになった。

雷電流の急峻成分については、雷撃を受けたタワーの接地グリッドを介して大地に流出する割合が高い。急峻成分の連接接地線への流出率は大地導電率が低いほど高くなる。

雷電流の緩やかな成分は各接地グリッドの接地抵抗値の逆比で各接地グリッドに分流することが確認された。例えば、雷撃タワー接地グリッドと隣接タワー接地グリッドがそれぞれ 2Ω の接地抵抗を有する場合には、雷撃タワーの脚部電流の約50%が連接接地線に流出する。また、雷撃タワー接地グリッドの接地抵抗が 2Ω 、隣接タワー接地グリッドのそれが 0.5Ω 場合には、雷撃タワーの脚部電流の80%近くが連接接地線に流出する。

今後は、本論文で得られた接地系各部の雷電流分布に関する結果に基づき、雷撃タワーおよび隣接タワー内部に生じる電磁界および内部回路に生じる過渡電圧について検討を進める予定である。

本研究は科学技術研究費補助金若手研究B(18760220)の補助を受けて行われたことを記し、関係各位に感謝致します。

(平成19年12月6日受付, 平成20年5月25日再受付)

文 献

- (1) S. Enmei and M. Ideno: "Lightning damage realities of wind power generation systems", 2007 National Convention Record, IEE Japan, No.7-S8-2 (2007) (in Japanese)
延命正太郎・出野 勝:「風力発電設備の雷害実態」, 平成19年電気学会全国大会, No.7-S8-2 (2007)
- (2) K. Yamamoto, T. Noda, S. Yokoyama, and A. Ametani: "An experimental study of lightning overvoltages in wind turbine generation systems using a reduced-size model", *IEEE Trans. PE*, Vol.126, No.1, pp.65-72 (2006-1) (in Japanese)
山本和男・野田 琢・横山 茂・雨谷昭弘:「縮小モデルを用いた風力発電システムの雷過電圧に関する実験的検討」, 電学論 B, **126**, 1, pp.65-72 (2006-1)
- (3) K. Yamamoto, T. Ohta, T. Noda, S. Yokoyama, and A. Ametani: "An experimental study of lightning overvoltages in wind turbine generation systems—experiments using a reduced-size model on actual soil", *IEEE Trans. PE*, Vol.126, No.12, pp.1230-1238 (2006-12) (in Japanese)
山本和男・太田朋克・野田 琢・横山 茂・雨谷昭弘:「風力発電システムの雷過電圧に関する実験的検討—実際の土壌における縮小モデル実験」, 電学論 B, **126**, 12, pp.1230-1238 (2006-12)
- (4) Y. Yasuda, T. Hara, and T. Funabashi: "Analysis on lightning surge propagation in wind farm", *IEEE Trans. PE*, Vol.125, No.7, pp.709-716 (2005-7) (in Japanese)

- 安田 陽・原 武久・舟橋俊久:「ウィンドファームの雷サージ伝搬解析」, 電学論 B, **125**, 7, pp.709-716 (2005-7)
- (5) Y. Yasuda, T. Yoshioka, and T. Ueda: "FDTD transient impedance analysis of ring earth electrode for wind power generation", The Papers of Technical Meeting on HV, IEE Japan, No.HV-06-41, pp.25-30 (2006) (in Japanese)
安田 陽・吉岡卓磨・植田俊明:「FDTD法による風車環状接地電極の過渡インピーダンス解析」, 電気学会高電圧研資, No.HV-06-41, pp.25-30 (2006)
- (6) K.S. Yee: "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.14, No.3, pp.302-307 (1966)
- (7) N. Nagaoka, Y. Baba, A. Ametani, H. Morita, T. Azuma, and T. Yamamoto: "A measurement of current distribution characteristics due to lightning to a wind-turbine tower", Proc. of 2007 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.456 (2007) (in Japanese)
長岡直人・馬場吉弘・雨谷昭弘・森田祐志・東 竜也・山本達也:「風力発電タワー雷撃時の電流分布特性測定」, 平成19年電気学会B部門大会, No.456 (2007)
- (8) S. Yokoyama and H. Taniguchi: "The third cause of outages on power distribution lines due to lightning—backflow current from customer's facility into power distribution line", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.10, pp.1332-1335 (1997-10) (in Japanese)
横山 茂・谷口弘光:「第3の配電線雷害原因—需要家設備から配電線への雷電流の逆流現象」, 電学論 B, **117**, 10, pp.1332-1335 (1997-10)
- (9) Z.P. Liao, H.L. Wong, B.-P. Yang, and Y.-F. Yuan: "A transmitting boundary for transient wave analysis", *Science Sinica, Series A*, Vol.27, No.10, pp.1063-1076 (1984)
- (10) K. Tanabe, A. Asakawa, M. Sakae, M. Wada, and H. Sugimoto: "Verifying the computational method of transient performance with respect to grounding systems based on the FD-TD method", *IEEE Trans. PE*, Vol.123, No.3, pp.358-367 (2003-3) (in Japanese)
田辺一夫・浅川 聡・坂江摩己・和田 勝・杉本仁志:「FD-TD法に基づく電力設備接地系の過渡応答解析手法の検証」, 電学論 B, **123**, 3, pp.358-367 (2003-3)
- (11) Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani: "Modeling of thin wires in a lossy medium for FDTD simulations", *IEEE Trans. EMC*, Vol.47, No.1, pp.54-60 (2005-1)
- (12) 高橋健彦: 接地・等電位ボンディング設計の実務知識, オーム社 (2003)
- (13) T. Noda and S. Yokoyama: "Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation", *IEEE Trans. PWRD*, Vol.17, No.3, pp.840-847 (2002)
- (14) B.N. Gorin and A.V. Shkilev: "Measurements of lightning currents at the Ostankino tower", *Elektrich.*, No.4, pp.64-65 (1984)

長 尾 光 紘 (学生員) 1984年11月生。2007年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程(前期)入学, 現在に至る。FDTD法を用いた電磁界解析に関する研究に従事。

長 岡 直 人 (正員) 1957年10月生。1982年3月同志社大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1985年同大学工学部助手, 1988年同専任講師, 1992年同助教授。1999年同教授, 現在に至る。2005年10月から2006年9月アイルランド国立大学ゴールウェイ校客員教授。2008年4月から同志社大学生命医科学研究科教授兼任。同志社大学入試センター所長, アドミッションズオフィス所長。博士(工学)。電気回路シミュレーションおよび数値解析モデルの開発に従事。1993年電気設備学会論文賞, 1994年照明学会論文賞受賞。電気設備学会, 照明学会, IEEE, IET 会員。

馬 場 吉 弘

(正員) 1971年2月生。1994年3月東京大学工学部電気工学科卒業。1999年3月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年4月同志社大学助手, 2001年4月同専任講師, 2005年4月同助教授。2007年4月同准教授, 現在に至る。2003年4月~2004年8月フロリダ大学客員研究員。電磁界パルスに関する研究に従事。1999年電気学会論文賞受賞。2007年AGU雑誌ハイライト論文。AGU, IEEE, IET 会員。

雨 谷 昭 弘

(正員) 1944年2月生。1968年3月同志社大学大学院電気工学専攻修士課程修了。1973年マンチェスター大学院博士課程修了。Ph.D. 1977年同志社大学助教授。1976年から1981年米国BPAにてEMTPの開発に従事。1985年同志社大学教授, 現在に至る。1988年Leuven大学教授兼任。1966年から1998年同志社大学理工学研究所所長。1998年から2001年同大学学術情報センター所長。2005年から2008年学校法人同志社評議員。2007年から同志社大学インフラストラクチャー研究センター長。分布定数回路, 過渡現象, 高調波, 数値解析法の開発に従事。英国技術士。2003年電気学会理事, 2004年同副会長。1976年電気学会論文賞, 1996年照明学会論文賞, 2006年電気学会業績賞受賞。日本工学アカデミー会員。CIGRE特別会員。IEEE, IET フェロー。