

平成 21 年 2 月 2 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006 年度 ～ 2008 年度

課題番号：18760220

研究課題名 (和文)

風力発電タワー等被雷構造物近傍の過渡電磁界および誘導電圧評価法の確立

研究課題名 (英文)

Establishment of predicting transient electromagnetic fields and induced voltages in the vicinity of a tall structure such as a wind-turbine-generator tower struck by lightning

研究代表者 馬場 吉弘 (BABA YOSHIHIRO)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：70319466

研究成果の概要： 雷撃を受けた風力発電タワー内および接続接地線で接続された隣接タワー脚部接地系の過渡電流分布と各タワー内に生じる電磁界の解析を、自作した時間領域有限差分 (FDTD) 法に基づく数値電磁界解析プログラムを用いて行った。その結果、タワー内に生じる電界は脚部ほど大きく、また水平かつ中心方向電界が最大となることが判明した。しかし、その大きさは比較的小さく、例えば大地導電率 10 mS/m で、立ち上がり時間 2.5 μ s、ピーク値 30 kA の雷電流が流入した場合においても、1 kV/m 程度であった。タワー間を接続する接地線の両端を埋設し、各タワーの接地グリッド間を直接接続することによって、タワー内発生電界をさらに著しく低減できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,000,000	0	1,000,000
2007 年度	500,000	0	500,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	150,000	2,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：風力発電, 雷, 雷電流, 過電圧, 電磁界, 電磁環境, FDTD 法, 電磁界解析

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の抑制と環境保全時代の形成に向けて、再生可能で、廃棄物を出さない風力発電の利用が世界的に広がりつつある。風力発電設備は、風力エネルギーを回転エネルギーに変換するブレード (風車の羽根)、回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機、発電した電気エネルギーを送電に適した高電圧に変換する変圧器、これらを制御

する電子回路などを内装したナセル (収容カバ) 、そしてこれらを大地から支えるタワーから構成されている。最近では、タワーの高さが 100 メートルを超える 100 万ワットクラスの風力発電設備も実用化されており、そこへの被雷頻度も高くなっている。

上述のように、風力発電設備においては、重要な電気機器や電子制御回路がタワー頂部のナセル内に配置されているため、故障に

伴う設備の修理や交換には莫大な労力と経費が必要になる。このため、雷電流による誘導電圧がナセル内部に生じない、あるいは侵入しないような電氣的設計が求められているが、これらについては未だに十分な検討がなされるには至っていない。このような検討を行うためには、風力タワーあるいは同一ファーム内の別の風力タワーに落雷が生じた際に、その内部あるいは近傍に生じる電磁界および過電圧を適切に予測計算できるモデルの開発が不可欠である。

2. 研究の目的

科研費交付期間に下記の事項を明らかにすることを目的とした。

- (1) 風力発電タワー等の地上高構造物への雷撃を表現するモデルの開発を行う。
- (2) 上記モデルを筆者の作成した有限差分時間領域 (FDTD) 法に基づく電磁界解析プログラムに組み込み、風力発電タワーの内部および周囲に生じる電磁界および過電圧の解析を行う。
- (3) 得られた結果に基づき、電磁環境 (EMC) の観点から風力発電設備の設計指針を示す。

3. 研究の方法

- (1) 風力発電タワー等の地上構造物への雷撃モデルの開発

風力発電タワーが雷撃を受けた際の過渡電流分布やタワー内部および近傍に発生する電磁界および誘導電圧の解析を行うために必要な電磁界計算プログラムの開発を行い、また必要なモデル開発を行う。必要なモデルは、

- ① 帰還雷撃モデル；
- ② 帰還雷撃を受けた構造物モデル；
- ③ 接地導体を表現する埋設導体モデル；
- ④ FDTD 電磁界計算用の任意半径導体表現法；
- ⑤ 効率的な FDTD 電磁界計算を実現するための高精度吸収境界条件；

- (2) 提案雷撃モデルの電磁界解析プログラムへの組込

3 (1) で開発した①～⑤のモデルを、自作した FDTD 法に基づく電磁界解析プログラムに組み込み、それらを用いて予備的な計算を実施し、同プログラムの計算安定性および計算精度について検討を行う。

その上で、風力発電タワーが被雷した際の接地系の過渡電流分布およびタワー内部の発生電界の解析を、種々の条件下 (大地定数や接地系の接続法を変更) で行う。

- (3) 風力発電設備の電磁環境設計指針の検討

3 (2) で得られた成果に基づき、タワー内の発生電界の抑制法の提案を行う。

4. 研究成果

- (1) 雷撃を受けた風力発電タワー内および連接接地線で接続された隣接タワー脚部接地系の過渡電流分布と各タワー内に生じる電磁界の解析を、自作した時間領域有限差分 (FDTD) 法に基づく数値電磁界解析プログラムを用いて行った。それにより、連接接地線への流出電流は、時間の経過とともに上昇し、最終的な流出率は各タワーの接地抵抗の逆比に等しくなることを示した。タワー内発電機の接地線に流れる電流のピーク値は、雷電流の 1～2%程度である。タワー内に生じる電界は脚部ほど大きく、また水平かつ中心方向電界が最大となる。しかし、その大きさは比較的小さく、例えば大地導電率 10 mS/m で、立ち上がり時間 2.5 μ s、ピーク値 30 kA の雷電流が流入した場合においても、1 kV/m 程度である。タワー間を接続する接地線の両端を埋設し、各タワーの接地グリッド間を直接接続することによって、タワー内発生電界をさらに著しく低減できることを示した (関連発表論文：5. 雑誌論文③)。
- (2) 風力発電設備等に雷電流が流入した際の発生過電圧に影響をおよぼす土壤電気定数の周波数特性簡易測定法を開発した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑨)。
- (3) 雷により配電線や通信線に生じる誘導電圧に影響を与える水平電界の新しい測定法を開発し、その実用可能性を実証した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑩)。
- (4) 電気設備に用いられている水平接地電極の雷サージ特性を、自作した FDTD 法に基づく電磁界解析プログラムを用いて評価し、得られた結果に基づき回路計算モデルを提案した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑦および⑪)。
- (5) 雷に起因した過渡電磁界やそれにより電気設備に生じる雷過電圧の解析手法としてしばしば用いられるモーメント法に関するレビュー論文を執筆した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑫)。
- (6) 帰還雷撃や被雷構造物の電磁界モデルの開発を行い、またそれらのレビュー論文を執筆した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑧および⑬)。
- (7) 雷撃に起因した風力発電タワー等の地上構造物頂部に生じる電界、磁界の評価を行った (関連発表論文：5. 雑誌論文⑭)。
- (8) 風力発電タワー等の地上構造物および上向きリーダ放電の存在を考慮した帰還雷撃の工学モデルを開発した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑮)。
- (9) 2次元および3次元 FDTD 法を用いた電磁界およびサージ解析に有用な任意半径導体模擬法を開発した。また、その高精度化、高安定化手法を提案した (関連発表論文：5. 雑誌論文②、④、⑤および⑩)。

(10) FDTD 法を用いた電磁界およびサージ解析に有用な高性能吸収境界条件を開発した。

(関連発表論文：5. 雑誌論文⑩)。

(11) 遠方での測定磁界から雷撃構造物頂部および脚部における電流ピーク値を推定するための理論式を導出した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑬)。

(12) 風力発電設備等のサージ，電磁界解析時に用いる帰還雷撃の工学モデルのレビュー論文を執筆した (関連発表論文：5. 雑誌論文⑥)。

(13) 雷インパルス電圧測定法の応答特性の評価を，FDTD 法を用いた解析により明らかにした (関連発表論文：5. 雑誌論文⑨)。

(14) 風力発電タワー等垂直構造物の特性インピーダンス理論式の妥当性について検討を行った (関連発表論文：5. 雑誌論文①)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① 馬場吉弘, 垂直導体の特性インピーダンス理論式について, 電気学会論文誌B, 129・3 掲載決定 (2009) 査読有
- ② Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, Representation of an arbitrary-radius wire for FDTD calculations in the 2D cylindrical coordinate system, IEEE Trans. EMC, 50・4, 1014-1018 (2008) 査読有
- ③ 長尾光紘・長岡直人・馬場吉弘・雨谷昭弘, FDTD法を用いた風力発電タワー雷撃時の電流分布解析, 電気学会論文誌B, 128・11, 1393-1400 (2008) 査読有
- ④ Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, An improved thin wire representation for FDTD computations, IEEE Trans. Antennas and Propagation, 56・10, 3248-3253 (2008) 査読有
- ⑤ Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, Modification on a thin wire representation for FDTD calculations in non-square grids, IEEE Trans. EMC, 50・2, 427-431 (2008) 査読有
- ⑥ 馬場吉弘, 帰還雷撃の工学モデルと雷電磁界パルス計算への応用, 電気学会論文誌B, 128・5, 785-794 (2008) 査読有
- ⑦ N. Theethayi, Y. Baba, F. Rachidi, and R. Thottappillil, On the choice between transmission line equations and full wave Maxwell's equations for transient analysis of buried wires, IEEE Trans. EMC, 50・2, 347-357 (2008) 査読有
- ⑧ Y. Baba, and V. A. Rakov, Applications

of electromagnetic models of the lightning return stroke, IEEE Trans. Power Delivery, 23・2, 800-811 (2008) 査読有

- ⑨ Y. Baba, A. Tamano, M. Ishii, N. Nagaoka, and A. Ametani, FDTD analysis of the unit step response of a circuit measuring chopped lightning impulse voltages, IEEE Trans. Power Delivery, 23・1, 502-503 (2008) 査読有
- ⑩ 岡澤光起, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, FDTD法を用いた電磁界・サージ解析のための吸収境界条件の高性能化, 電気学会論文誌B, 128・1, 285-290 (2008) 査読有
- ⑪ 谷口洋平, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, 二次元円筒座標系におけるFDTD計算のための細線導体模擬法, 電気学会論文誌B, 128・1, 263-269 (2008) 査読有
- ⑫ Y. Baba, and V. A. Rakov, Influences of the presence of a tall grounded strike object and an upward connecting leader on lightning currents and electromagnetic fields, IEEE Trans. EMC, 49・4, 886-892 (2007) 査読有
- ⑬ Y. Baba, and V. A. Rakov, Lightning strikes to tall objects: currents inferred from far electromagnetic fields versus directly measured currents, Geophysical Research Letters, 34, 5 pages (2007) 査読有
- ⑭ Y. Baba, and V. A. Rakov, Electromagnetic fields at the top of a tall building associated with nearby lightning return strokes, IEEE Trans. EMC, 49・3, 632-643 (2007) 査読有
- ⑮ Y. Baba, and V. A. Rakov, Electromagnetic models of the lightning return stroke, Journal of Geophysical Research, 112, 17 pages (2007) 査読有
- ⑯ 馬場吉弘, 加藤正平, 雷サージ解析技術の現状と将来展望: モーメント法を用いた解析, 電気学会雑誌, 126・10, 664-671 (2006) 査読有
- ⑰ M. Tsumura, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, FDTD simulation of a horizontal grounding electrode and modeling of its equivalent circuit, IEEE Trans. EMC, 49・4, 817-825 (2006) 査読有
- ⑱ 浅野修一, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, 2 垂直導体プローブによる過渡水平電界の測定, 電気学会論文誌B, 126・11, 1171-1177 (2006) 査読有
- ⑲ 吉村貴広, 長岡直人, 馬場吉弘, 雨谷昭弘, 土壌の周波数依存導電率および比誘

電率の二平板電極による測定, 電気学会論文誌B, 126・9, 954-955 (2006) 査読有

[学会発表] (計15件)

- ① Y. Baba, and V. A. Rakov, Electric and magnetic fields predicted by lightning return stroke electromagnetic models, 20th International Zurich Symposium on EMC, Zurich, Switzerland (2009) 査読有
- ② Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, An arbitrary-radius-wire representation for FDTD computations in the 2D cylindrical coordinate system, International Workshop on High Voltage Engineering, Kyoto (2008) 査読無
- ③ M. Nagao, N. Nagaoka, Y. Baba, and A. Ametani, FDTD electromagnetic analysis of a wind turbine generator tower struck by lightning, International Workshop on High Voltage Engineering, Kyoto (2008) 査読無
- ④ Y. Baba, and V. A. Rakov, Lightning electromagnetic fields in the immediate vicinity of a tall tower, 2008 URSI General Assembly, Chicago, USA (2008) 査読有
- ⑤ Y. Baba, and V. A. Rakov, Evaluation of lightning return stroke electromagnetic models, 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden (2008) 査読有
- ⑥ Y. Baba, and V. A. Rakov, Electromagnetic models of lightning, 19th International Zurich Symposium on EMC, Singapore (2008) 査読有
- ⑦ Y. Baba, and V. A. Rakov, Lightning strikes to tall towers: Currents inferred from electromagnetic fields versus directly measured currents, International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil (2007) 査読有
- ⑧ Y. Baba, and V. A. Rakov, Electric fields at the top of tall building associated with nearby lightning return strokes, 18th International Zurich Symposium on EMC, Munich, Germany (2007) 査読有
- ⑨ Y. Baba, and V. A. Rakov, A study of current waves propagating along vertical conductors and their associated electromagnetic fields, International Conference on Power System Transients, Lyon, France (2007) 査読有
- ⑩ N. Nagaoka, H. Morita, Y. Baba, and A. Ametani, Numerical simulation on lightning surge response of seismic isolated building by FDTD and EMTP, International Workshop on High Voltage Engineering, Hamamatsu, Japan (2007) 査読無
- ⑪ Y. Baba, and V. A. Rakov, Effects of tall building on lightning electromagnetic fields, International Workshop on High Voltage Engineering, Hamamatsu, Japan (2007) 査読無
- ⑫ Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, Modeling of thin wires for FDTD simulations implemented in non-square grids, International Workshop on High Voltage Engineering, Hamamatsu, Japan (2007) 査読無
- ⑬ H. Yamamoto, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, FDTD analysis of voltages induced on an overhead wire due to surges propagating along a grounding mesh conductor, International Workshop on High Voltage Engineering, Hamamatsu, Japan (2007) 査読無
- ⑭ K. Okazawa, Y. Oka, M. Shimazoe, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, FDTD simulation of lightning-induced voltages on an overhead wire above lossy ground, International Conference of Lightning Protection, Kanazawa, Japan (2006) 査読有
- ⑮ M. Tsumura, H. Yamamoto, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, FDTD simulation of a horizontal grounding electrode and its equivalent circuit modeling, International Conference of Lightning Protection, Kanazawa, Japan (2006) 査読有

[図書] (計1件)

- ① H. D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Lightning: Principles, Instruments and Application, 641 pages, Springer-Verlag (2009) Chapter 1 (pp. 1-21) "Present Understanding of the Lightning Return Stroke" 執筆担当

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://kenkyudb.doshisha.ac.jp/rd/searc>

h/researcher/199007/index-j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 吉弘 (BABA YOSHIHIRO)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：70319466

(2) 研究分担者 なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし ()

研究者番号：