

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月11日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21760220

 研究課題名（和文）雷撃を受けた風力発電タワー等高構造物内部
 および近傍過渡誘導電圧評価法の確立

 研究課題名（英文）Establishment of Predicting Transient Voltages Induced on Electrical
 Installations in and near 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・教授

研究者番号：70319466

研究成果の概要（和文）：

雷撃を受けた風力発電設備内および近傍設備内部の過渡誘導電圧の解析を電磁界計算法の一つである時間領域差分法（FDTD法）を用いて行うために必要な、コロナ放電や土中放電などのモデル群を開発し、それらの妥当性を検証した。これらのモデル群を自作したFDTD解析プログラムに組み込み、それを用いた数値計算により、設備内の雷過電圧発生メカニズムを明らかにし、雷過電圧の低減策を提案した。

研究成果の概要（英文）：

For analyzing transient voltages induced on installations in and near a wind-turbine-generator tower struck by lightning with the finite-difference time-domain (FDTD) method, several models such as a corona-discharge model and a soil ionization model have been proposed, and their validities have been shown. Then, these models have been incorporated the FDTD-simulation program developed by the author. Mechanisms for generating lightning-induced surges in a lightning-struck tower have been investigated with the FDTD program, and a countermeasure to reduce the lightning-induced-voltage peaks has been proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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，電気エネルギー，雷，電磁界解析，電磁環境

1. 研究開始当初の背景

再生可能で廃棄物を出さない風力発電が世界的に広がりつつある。最近では、高さが100メートル近い100万ワットクラスの風力発電設備も実用化されるに至っている。しかし、国内においては、このような大型設備は頻繁に雷撃を受け、それによる破壊や故障の

ため、停止している時間が長くなっており（参考文献：新エネルギー産業技術総合研究所，「風力発電システムにおける落雷と対策」，NEDO-NP-9814, 1999），雷害は大型設備の本来の発電出力および効率の高さを活かす際の障害となっている。この問題を検討する場合に最適な解析手法は何であるか，ど

のような対策が効果的であるかについて明確な指針が示されなければ、莫大な費用をかけて建設された国内の風力発電設備の非効率な運用が今後も続くことになる。

風力発電システムが受ける雷害は二つに大別でき、その一方は雷電流による絶縁体であるブレードの熱破壊である。他方は雷電流により発生する過電圧による電気設備の障害である。前者については、国内外の複数の研究機関で熱心に研究が続けられており、ブレードに導体を沿わせることで、効果的に対策できることが明らかにされつつある。一方、後者の雷過電圧については、数例の研究結果が国内の学会や国際会議において発表されているのみであり、その明確な発生メカニズムや対策について論じた雑誌論文は未だに存在していない。

このような国内外の研究動向から、本研究は、実際に役立つ成果を提供できる可能性があるだけでなく、学術的に先駆的でもあると判断される。

2. 研究の目的

雷撃を受けた風力発電設備内および近傍設備に生じる過電圧を高精度で解析評価するためには、従来法ではなく、アンテナ理論に基づく電磁界計算法を適用するのが最適であると考え、以下の事項を具体的目的として研究を実施する。

(1) 風力発電設備内部および近傍構造物内部の過渡誘導電圧の解析を電磁界計算法の一つである時間領域差分法 (FDTD 法) を用いて行うために必要な下記のモデル群を開発し、それらの妥当性を検証する。

① 雷電流が細線導体上を伝搬する際に生じるコロナ放電モデル

② 雷電流の沿面および土中放電モデル

③ 設備の細部構造を模擬するための高精度かつ高安定の領域分割法

④ 計算負荷を低減させるために必要な高性能吸収境界条件

⑤ 誘導電圧解析のための新しい前駆雷放電および帰還雷撃モデル

(2) 上記モデルを FDTD 過渡電磁界解析プログラムに組み込み、それを用いた数値計算により、設備内の雷過電圧発生メカニズムを明らかにする。

(3) 得られた結果に基づき、雷過電圧の発生しにくい設備構造や配置を提案する。

3. 研究の方法

時間領域差分法 (FDTD 法) を用いて、雷撃を受けた風力発電設備内部および近傍構造物内部の過渡誘導電圧を、高精度でシミュレーションを行うために必要な下記のモデル群を開発する。

(1) 雷電流が細線導体上を伝搬する際に生じ

るコロナ放電モデル

(2) 雷電流の沿面および土中放電モデル

(3) 設備の細部構造を模擬するための高精度かつ高安定の領域分割法

(4) 計算負荷を低減させるために必要な高性能吸収境界条件

(5) 誘導電圧解析のための新しい前駆雷放電および帰還雷撃モデル

開発したモデルの妥当性および精度は、対応する実測結果との比較により検証する。

上記モデル群を自作した FDTD 過渡電磁界解析プログラムに組み込み、雷撃を受けた風力発電設備内および近傍設備に生じる誘導電圧の解析を、想定される種々の条件化で実施し、明確には合意が得られていない風力発電設備内で生じる誘導電圧の発生メカニズムを明らかにする。また、得られた結果を整理し、誘導電圧の発生しにくい設備構造や配置を提案する。

4. 研究成果

主な研究成果を以下に列挙する。

(1) 雷電流が細線導体上を伝搬する際に生じるコロナ放電の FDTD 解析モデルを開発し、その妥当性を実測結果との比較により実証した。FDTD 解析に使用できるコロナ放電モデルは、これが世界で初めてのものであり、国内外の関連分野へのインパクトは大きい (関連発表文献: 雑誌論文④, ⑥)。

(2) 雷電流が土中に埋設された接地電極に流入した場合、接地電極周囲に放電が生じ、発生電圧が低減されることが知られている。この現象のモデル化を行い、その妥当性を実測結果との比較により実証した (関連発表文献: 学会発表④)。

(3) 領域分割に基づく FDTD 解析は、微細構造を有する系が対象の場合、小さなセルで三次元領域を表現する必要があるため、計算機メモリや計算時間が増大するという問題がある。微細構造を有する箇所のみを小さなセルで表現する手法の実用性を、電力線への誘導雷サージ解析に適用し、その妥当性を実証した。サージ解析分野においては、FDTD 解析は、等間隔グリッドで行われることがほとんどであったため、本分割手法の妥当性を実証した意義は大きい (関連発表文献: 雑誌論文⑤, 学会発表⑩)。

(4) FDTD 法により開空間の解析を行う場合には、解析対象を含む空間を反射波を生じ難い人工的な境界面 (壁) で囲む必要がある。この境界条件を吸収境界条件という。移流方程式に基づく新しい吸収境界条件を着想し、その妥当性について検討を行った (関連発表文献: 学会発表⑥)。

(5) 誘導電圧等の解析には、雷電磁界パルスの放射源となる落雷 (帰還雷撃) モデルが必須となる。誘導電圧解析に適した帰還雷撃モデ

ルを提案し、その妥当性を雷電流および雷電磁界波形の測定結果等との比較により実証した(関連発表文献:雑誌論文⑨, ⑩, ⑱)。(6) 雷撃を受けた風力発電設備内および連接接地線で接続された隣接設備接地系の過渡電流分布と各設備内に生じる電磁界の解析を、FDTD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。電磁界解析に基づく、このような詳細な検討結果は、これまでにほとんど無く、国内外の関連分野へのインパクトは大きい(関連発表論文:雑誌論文⑰, 学会発表①, ③, ⑨, ⑫, ⑭)。

(6) FDTD法と同じ差分法に分類される新しい数値計算手法の一つとして、CIP (Cubic-Interpolated Pseudo-particle) 法がある。この手法は、解析空間各点の電界値、磁界値だけではなく、それらの空間微分値情報も考慮することにより、差分近似誤差を小さくできる。このため、流体力学分野においては、広く用いられている。この手法に基づき、電磁界解析プログラムを開発し、その妥当性を厳密解による計算波形等との比較により実証した。CIP法が実用的な雷電磁界パルスに適用されたのはこれが最初であり、国内外の関連分野へのインパクトは大きい(関連発表文献:雑誌論文③)。

(7) 空間を三次元伝送線路網で表現し、伝送線路の各接続点(ノード)での入射・反射を格子図法的に計算することで、電磁波伝搬を時間領域で計算する手法(TLM: Transmission Line Modeling)がある。この手法に基づき、電磁界解析プログラムを開発し、それを雷撃を受けた導体系や接地電極のサージ解析に適用し、その妥当性を実測波形との比較により実証した。TLM法が接地電極等のサージ解析に適用できることが実証されたのはこれが最初であり、国内外の関連分野へのインパクトは大きい(関連発表文献:雑誌論文①, ⑭, ⑳)。

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 22 件)

- ①S. Yuda, S. Sawaki, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, Application of the TLM method to transient simulations of a conductor system with a lossy ground: grounding electrodes and an overhead wire, IEEE Trans. EMC, Vol.55, No.1, pp.175-182 (2013-2) 査読有
- ②H. Oka, Y. Baba, M. Ishii, N. Nagaok, and A. Ametani, Parametric study on unit step responses of impulse voltage measuring systems based on FDTD simulations, IEEE Trans. PWRD, Vol.28, No.1, pp. 376-382 (2013-1) 査読有
- ③梶田健太, 宮川昂太, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, 高見潤, 岡部成光, C型CIP法の雷電磁界解析への応用, 電気学会論文誌 B, Vol.133, No.1, pp. 106-113 (2013-1) 査読有
- ④T. H. Thang, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, J. Takami, S. Okabe, and V. A. Rakov, FDTD simulation of lightning surges on overhead wires in the presence of corona discharge, IEEE Trans. EMC, Vol.54, No.6, pp.1234-1243 (2012-12) 査読有
- ⑤ H. Sumitani, T. Takeshima, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, J. Takami, S. Okabe, and V. A. Rakov, 3-D FDTD computation of lightning-induced voltages on an overhead two-wire distribution line, IEEE Trans. EMC, Vol.54, No.5, pp. 1161-1168 (2012-6) 査読有
- ⑥T. H. Thang, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, J. Takami, S. Okabe, and V. A. Rakov, A simplified model of corona discharge on an overhead wire for FDTD computations, IEEE Trans. EMC, Vol.54, No.3, pp.585-593 (2012-6) 査読有
- ⑦大久保堅司, 西村荘治, 合田豊, 馬場吉弘, 電力・エネルギー分野を支える変電技術の展開, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.5, pp. 388-391 (2012-5) 査読有
- ⑧A. Shoory, F. Vega, P. Yutthagowith, F. Rachidi, M. Rubinstein, Y. Baba, V. A. Rakov, K. Sheshyekani, and A. Ametani, On the mechanism of current pulse propagation along conical structures: Application to tall towers struck by lightning, IEEE Trans. EMC, Vol.54, No.2, pp. 332-342 (2012-4) 査読有
- ⑨Y. Baba, and V. A. Rakov, Simulation of corona at lightning-triggering wire: Current, charge transfer, and field-reduction effect, J. Geophys. Res., Vol.116, No.D21115, doi:10.1029/2011JD016341 (2011-11) 査読有
- ⑩P. Yutthagowith, A. Ametani, N. Nagaoka, and Y. Baba, Application of the partial element equivalent circuit method to analysis of transient potential rises in grounding systems, IEEE Trans. EMC, Vol.53, No.3, pp.726-736 (2011-8) 査読有
- ⑪馬場吉弘, 高構造物への雷撃に関わる最近

の研究動向, 電気学会論文誌 B, Vol.130, No. 8, pp.769-779 (2010-8) 査読有

⑫N. Okazima, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, K. Tenma, and T. Shimomura, Propagation characteristics of power line communication signals along a power cable having semiconducting layers, IEEE Trans. EMC, Vol.52, No.3, pp. 756-759 (2010-8) 査読有

⑬A. Ametani, M. Mishitsuji, N. Nagaoka, Y. Baba, and S. Okabe, On the equivalence of a conducting plate in a laboratory experiment to a real earth, IEEE Trans. EMC, Vol.52, No.3, pp. 691-697 (2010-8) 査読有

⑭岡嶋直人, 湯田晋介, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, TLM 法による集中定数回路要素を考慮したサージ解析, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 6, pp. 559-565 (2010-6) 査読有

⑮P. Yuthagowith, A. Ametani, N. Nagaoka, and Y. Baba, Lightning induced voltage over lossy ground by a hybrid electromagnetic-circuit model method with Cooray-Rubinstein formula, IEEE Trans. EMC, Vol.51, No.4, pp.975-985 (2009-11) 査読有

⑯H. Motoyama, Y. Kinoshita, K. Nonaka, and Y. Baba, Experimental and analytical studies on lightning surge response of 500-kV transmission tower, IEEE Trans. PWRD, Vol.24, No.4, pp. 2232-2239 (2009-10) 査読有

⑰M. Nagao, N. Nagaoka, Y. Baba, and A. Ametani, FDTD electromagnetic analysis of a wind turbine generator tower struck by lightning, IEEE Trans. PE, Vol.129, No.10, pp.1181-1187 (2009-10) 査読有

⑱馬場吉弘, 帰還雷撃の電磁界モデル, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.9, pp.1139-1151 (2009-9) 査読有

⑲A. Ametani, T. Yoneda, Y. Baba, and N. Nagaoka, An investigation of earth-return impedance between overhead and underground conductors and its approximation, IEEE Trans. EMC, Vol.51, No.3, pp. 860-867 (2009-8) 査読有

⑳Y. Baba, and V. A. Rakov, Electric and magnetic fields predicted by different electromagnetic models of the lightning return stroke versus measured fields, IEEE Trans. EMC, Vol.51, No.3, pp.479-483 (2009-8) 査読有

㉑馬場吉弘, こんなところにも活かされている雷サージシミュレーション, 電気学会誌, vol.129, No.7, pp.430-433 (2009-7) 査読有

㉒松田卓巳, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, 3次元 TLM 法の雷電磁界・サージ解析への応用, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.7, pp. 948-956 (2009-7) 査読有

[学会発表] (計 18 件)

①池田陽紀, 長岡直人, 馬場吉弘, 雨谷昭弘, FDTD 解析結果より導いた Semlyen 線路風車

タワーモデルによる回路解析と縮小実験, 電気学会高電圧研究会, No.HV-13-019, 京都 (2013-1) 査読無

②N. Shibata, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, and N. Itamoto, FDTD simulation of LEMPs considering ground geometry and grounded structure, Paper presented at Int. Workshop on High Voltage Engineering, No. ED-12-120/SP-12-046/HV-12-049 (2012-11) 査読無

③Y. Ikeda, N. Nagaoka, Y. Baba, and A. Ametani, An equivalent circuit synthesis for a wind turbine tower using transient response calculated by FDTD, Paper presented at CIGRE SC C4 Colloquium, Hakodate, Japan (2012-10) 査読有

④K. Otani, Y. Shiraki, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, and N. Itamoto, FDTD simulation of grounding electrodes considering soil ionization, Paper presented at 2012 ICLP, Vienna, Austria (2012-9) 査読有

⑤Y. Baba, A. Borghetti, V. Cooray, G. Diendorfer, L. Grcev, C.A. Nucci, M. Paolone, F. Rachidi, V. A. Rakov, M. Rubinstein, and R. Thottappillil, EMC aspects of lightning, 2012 EMC Europe Symp., Tutorial, Rome, Italy (2012-9) 査読無

⑥萩本篤俊, 笠井政治, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, FDTD 電磁界解析のための吸収境界条件の開発, 平成 24 年電気学会 B 大会, No. 316 (2012-9) 査読無

⑦S. Takeshita, A. Ametani, N. Nagaoka, and Y. Baba, An investigation of incoming lightning surges from a communication line, Paper presented at 2012 APEMC Symp., Singapore, No.TH-PM-LIGHT-1, pp.853-856 (2012-5) 査読有

⑧馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, 電力ケーブルにおける電力線搬送通信信号の伝搬特性, 第 49 回同志社大学理工研究発表会/2011 年学内研究センター合同シンポジウム, pp. 57-60 (2011-12) 査読無

⑨池田陽紀, 長岡直人, 馬場吉弘, 雨谷昭弘, FDTD 法風車タワー過渡応答からの回路モデル導出法, 電気学会高電圧研究会, No. HV-11-093, 函館 (2011-12) 査読無

⑩住谷裕, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, サブグリッド法を用いた FDTD 法による誘導雷サージ解析, 電気学会高電圧研究会, No. HV-11-076, 函館 (2011-11) 査読無

⑪Y. Baba, FDTD-based surge simulations, Paper presented at ISET 2011, pp. 31-36, Chiang Mai, Thailand (2011-11) 査読無

⑫重見賢太, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘, FDTD 法による雷撃時風力発電設備内の過渡電磁界解析, 平成 22 年電気学会 B 大会, No. 336 (2011-8) 査読無

⑬Y. Baba, and V. A. Rakov, FDTD simulation of

field-reduction effect at ground due to corona at lightning-triggering wire, Paper presented at 2011 URSI General Assembly, Istanbul, Turkey (2011-8) 査読無

⑭ K. Shigemi, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, FDTD surge analysis of the grounding system for a wind-turbine tower struck by lightning, Int. Symp. Winter Lightning, Sapporo, Japan (2011-6) 査読有

⑮ S. Irie, A. Ametani, N. Nagaoka, and Y. Baba, Experimental and FDTD investigation of surge propagation characteristics on steel frames and concrete walls in a building, Proc. Int. Conf. Power System Transients, Delft, The Netherlands (2011-6) 査読有

⑯ 馬場吉弘, 板本直樹, 雷サージ解析の最新動向, 放電学会シンポジウム, pp.16-21 (2010-11) 査読無

⑰ S. Hashimoto, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, and N. Itamoto, An EMTP model of a transmission tower struck by lightning, Proc. Int. Workshop on High Voltage Engineering, No. ED-10-66, pp.37-41 (2010-11) 査読無

⑱ Y. Baba, and V. A. Rakov, FDTD modeling of polarization of a conductor in a quasi-uniform electric field, 2010 AMEREM, Ottawa, Canada (2010-7) 査読無

[図書] (計1件)

① Y. Baba, and V. A. Rakov: "Electromagnetic Models of Lightning Return Strokes" (pp. 263-313) in Lightning Electromagnetics, IET (2012-6)

[その他]

ホームページ等

https://kenkyudb.doshisha.ac.jp/rd/html/japanese/researchershtml/199007/199007_Researcher.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・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 :