

博士學位論文審査要旨

2015年2月17日

論文題目： 垂直導体のサージ伝搬特性を考慮した風力発電タワー周波数依存回路解析モデル

学位申請者： 池田 陽紀

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

副査： 名古屋大学エコトピア科学研究所 教授 舟橋 俊久

要 旨：

従来の風力発電タワー高精度雷サージ解析は、専ら電磁界解析手法によっていたが、計算機資源の制約からタワー1基の解析に限られていた。本論文では、単機の電磁界解析または実測結果から、周波数依存 Semlyen 線路モデルの線路定数を導出することで、垂直導体のサージ伝搬特性を表現する垂直導体回路解析モデルを導出し、複数機からなる発電所の解析を可能としている。

本論文は全7章から構成されており、第1章では本研究の目的と背景について述べている。第2章では、風力発電システムの落雷による被害状況に加え、雷サージ解析に用いられている数値電磁界および回路解析プログラムの特徴について述べている。第3章では、FDTD 解析結果から EMTP に内蔵されている周波数依存 Semlyen 線路モデルを導出する手法についてまとめている。第4章では提案垂直導体回路モデルを長時間解析に対応させるための修正法について述べていると共に、垂直パイプタイプ多導体への応用法について述べている。従来多導体モデルの大地帰路成分を提案垂直導体モデルに置換することにより、風力発電タワーに内蔵されるケーブルを含めた解析が可能となり実用性が極めて高いことを示している。また縮小風車タワーモデルを用いた実測も行い、提案法の精度についても確認している。第5章では今後普及が推測される浮体式洋上風力発電システムについて検討するため、海水中における電流の振る舞いについて明らかにし、洋上浮体構造物のひとつである船舶の雷被害について検討している。第6章では、提案した解析法を用いて、複数機の発電機からなる陸上・洋上風力発電所の雷サージ特性を解析し、洋上風力発電においても高いサージ電圧が発生し得ることを示している。最終章である第7章では、本論文の成果をまとめている。

本論文で提案した各種解析モデル・手法は、陸上、洋上を問わず複数機の風力発電タワーからなる風力発電所における高精度雷サージ解析を可能とすると共に、速やかに汎用回路解析プログラムに導入できることから、世界各国の風力発電システムによる安定な電力供給に貢献するもので、これらの成果はこの分野の発展に多大なる貢献をなすものである。よって本論文は博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2015年2月17日

論文題目： 垂直導体のサージ伝搬特性を考慮した風力発電タワー周波数依存回路
解析モデル

学位申請者： 池田 陽紀

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

副査： 名古屋大学エコトピア科学研究所 教授 舟橋 俊久

要 旨：

博士論文提出者は本学理工学研究科博士課程（前期課程）を2012年3月に修了し、引き続き2012年4月に本学理工学研究科博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、電気学会電力・エネルギー部門論文誌，134巻，2号，pp.127-132，および Electric Power Systems Research (EPSR)，Vol.113，pp.151-156に掲載され、また電気学会電力・エネルギー部門論文誌，135巻，3号，に掲載が決定しており、十分な評価を得ている。

2015年1月17日午後3時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する学術講演会が開かれ、種々の質疑・討論が行われた、提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、論文提出者の十分な学力を確認できた。なお、提出者は、英語による論文発表のほか、本学理工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。

以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 垂直導体のサージ伝搬特性を考慮した風力発電タワー
周波数依存回路解析モデル

氏 名： 池田 陽紀

要 旨：

現在世界中で普及している風力発電システムは、その地上高と風況を考慮した立地条件からしばしば落雷の被害を受け、稼働率の低下が深刻化している。本論文は、垂直導体である風力発電タワーにおける雷サージ解析の高精度化、高速化を目的とした垂直導体回路解析モデルの提案とその有用性の検討、さらに風力発電所や洋上風車への拡張性についてまとめたものである。

第二章では、風力発電システムの内部構成や普及状況、落雷による被害状況について述べる。地上高 60m を超える金属製タワーの上部に発電機や制御機器を内蔵するナセルを据え、さらにハブを介して 40m 以上の長さとなるブレードを有する風力発電システムは全高が 100m をゆうに超える。また、空気の流れである風の運動エネルギーから電気エネルギーを取り出す風力発電システムは、その効率向上のために沿岸地域や山岳地帯などの高構造物が無く、より風況の良い地域に建設される。このような立地条件と地上高の高さから、風力発電システムは、しばしば雷被害を受ける。(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による平成 21 年度風力発電設備の故障・事故調査によれば、日本国内で故障の報告があった 147 件中の約 25% が落雷によるものである。これにより破損した部位は風向風速計や制御機器などの弱電機器およびブレードであることから、雷電流侵入点はブレードやナセルの角部などタワーの上部であることが推測できる。風力発電所に設置された複数機の風車は電力線や通信ケーブルによって、隣接風車や別建屋に配置される制御機器と接続される。落雷による雷サージがこれらの連系ケーブルに進入した場合、落雷による被害は系統全体に及ぶ危険性もある。風力発電システムにおける耐雷対策は必須である。

地上高が 100m 程度の風車は高層ビルや電波塔、送電鉄塔とならび比較的大きな構造物の一つである。そのため、雷サージ解析を目的として実機を用いた実験を行うことは技術的および経済的に容易ではない。そのため、雷サージ解析はもっぱら計算機による数値解析に頼らざるを得ない。近年雷サージ解析には FDTD 法に代表される数値電磁界解析や汎用回路解析プログラムの一つとして現在世界中で使用されている EMTP を用いた回路解析法などが広く用いられる。解析空間広さが計算機メモリ容量により制限を受ける数値電磁界解析では、全系統が数 km におよび、風車高さが 100m 程度となる大規模な対象物全体を詳細に模擬することはできない。また、計算にも比較的長時間を要するために解析効率も低く、計算時間短縮のための研究もなされている。一方で、等価回路により模擬対象物を表現し、節点方程式を解くことで節点における電流電位を得る回路解析法は計算時間も極めて短く汎用性が高い。しかし、水平導体とは異なる特性を有する垂直導体を理論的に表現するモデルは存在しない。そのため、実際の構造物をより忠実に表現し、数値シミュレーションによる実現象の再現性を向上させる新たな解析手法が必要である。

三章では、FDTD 解析結果から EMTP に内蔵されている周波数依存 Semlyen 線路モデルを導

出する手法についてまとめている。提案手法では、FDTD 解析または実測結果から得た垂直導体上端における電流電圧特性から、周波数依存線路モデルの一つである Semlyen 線路モデルの線路定数を導出することで、垂直導体のサージ伝搬特性を表現する垂直導体回路解析モデルを得ることができる。本モデルによるシミュレーション結果は高電圧が発生する短時間領域の FDTD 法によるシミュレーション結果、実測波形を共に良好に再現する。垂直導体である風車タワーにおけるサージ伝搬特性を高精度に表現する提案モデルは、送電・制御ケーブルや電力機器などの等価回路モデルと共に用いることにより、極めて汎用性が高い数値シミュレーションが実行可能となった。

四章では、三章で提案した垂直導体モデルは、垂直導体が持つ等価キャパシタンスの約 20%の静電容量をもつキャパシタをタワー上端に並列に挿入することで容易に長時間解析に利用可能となることを明らかにした。これにより、複数機の風車からなる風力発電所を対象とした雷サージ解析が容易となった。さらに四章では、筒状導体内にさらに導体を有するパイプタイプ系多導体への拡張法についても述べた。風力発電タワー内部にはナセル内で発電された電力を送電するための電力線や、風車のヨー制御などを行うための制御機器のモニタや制御用の通信ケーブルなどが内蔵される。そのため、風車タワーは垂直パイプタイプ系多導体となる。雷サージが風力発電所全体に波及する様相について検討するためには、内部導体を有する垂直多導体モデルは必要不可欠である。パイプタイプ系多導体は、高周波領域において各線間波モードは大地帰路モードと完全に分離されることから、最も外側の導体にのみ垂直導体の特性を付与するだけで、容易に垂直パイプタイプ系多導体を表現することができる。この手法により導出された垂直パイプタイプ系多導体回路解析モデルは、実風車を 1/30 に縮小したアルミ製パイプを用いて縮小実験の結果を良好に再現することができ、その実用性を示した。これにより、電磁解析では不可能であった、垂直多導体系の過渡現象解析をはじめ可能とした。

五章では今後普及が推測される浮体式洋上風力発電システムにおける雷被害の可能性、およびメカニズムについて検討するため、大地条件とは大きく異なる海水の特性について調査・検討するとともに、洋上における直撃雷、近傍雷による過渡電位上昇について検討した。船舶などの洋上構造物を介して、あるいは洋上の波頭に直接落雷することにより海水中に進入した高周波成分を含む雷電流の成分の多くは、導電率が極めて高い海水において、その表面に集中することを明らかにした。また、浮体式洋上風力発電システムが落雷を受けて、そのフロート部分に雷電流が進入した場合、その点の過渡電位上昇はフロートの喫水線下長や接触面積ではなく、フロートへの均一な電流流入により低減することが可能であることが明らかとなった。また、フロート喫水線下に防錆用などの絶縁性塗料などによる保護塗膜が存在する場合、フロートと海水間には等価的にキャパシタが挿入された状態となることが明らかとなった。さらに、洋上構造物においては、直撃雷のみならず近傍雷によっても被害を受ける危険性があることも示し、洋上構造物における雷対策の必要性を明らかにした。

そして六章では、三章、四章、五章における垂直導体回路解析モデル提案から多導体、長時間解析モデルへの拡張、さらに洋上風力発電システムにおける雷被害に関する検討の集大成として、陸上、および洋上風力発電所における雷サージ解析を実施した。風車タワーにおける垂直導体サージ伝搬特性を考慮することで、被雷風車における過渡電圧は低下した。すなわち、従来回路解析法では過大な電圧が推定されていたことを明らかにした。一方で、被雷風車に隣接する風車タ

ワー上端においては、従来手法によるシミュレーションに比してタワーに内蔵されたケーブルシースに大なる電位差が観測された。本論文で得られた結果は、合理的な耐雷設計を可能とし、安定な電力供給を安価に実現することに貢献し得る。

また、陸上に比して十分な低接地抵抗を得られることから、特段の耐雷対策は不要であると考えられてきた洋上風力発電システムにおいて、制御機器などの弱電機器の耐圧を超える過渡電圧が生じ得ることを示し、洋上風力発電システムにおける雷害対策の必要性を示すとともに、提案手法による垂直導体モデルを用いた雷サージシミュレーションの汎用性を示した。

本論文において提案した各種解析モデル・手法は、陸上、洋上を問わず複数機の風力発電システムからなる風力発電所における高精度雷サージ解析を可能とした。なお、提案法を世界で広く用いられている EMTP に導入することにより解析は容易となり、かつ EMTP の有する汎用性を利用できる。したがって、本論文の研究成果は、速やかに我が国のみならず世界各国で利用できることから、風力発電システムによる安定な電力供給に貢献できると考えられる。