

博士学位論文審査要旨

2007年5月15日

論文題目： 風力発電システム雷撃時に発生する過電圧に関する研究

学位申請者： 山本 和男

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 雨谷 昭弘

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 長岡 直人

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 客員教授 野田 琢

要 旨：

地球温暖化防止のための CO₂ 削減およびエネルギー源の多様化による安定供給の確保の観点から、環境への影響を配慮した新エネルギー開発が世界的に緊急の課題となっている。その中でも風力発電が最も実用的と考えられ、我が国でも 2010 年度までに風力発電設備容量 3,000 MW を目標としている。2000 年度末での風力発電設置設備容量が 144 MW であることから大幅な風力発電の建設が必要となっている。風力発電はエネルギー源が無尽蔵であり、大規模化によるスケールメリットが大であるが、丘陵地や海岸等、高雷撃密度の地域に建設されるため、雷害によるトラブルが多く発生している。

風力発電システムの雷被害は、雷撃時に雷サージ波頭部に発生する過電圧によるものと、長波尾雷によるエネルギー的破壊に分類される。本論文では、前者の過電圧発生メカニズムの解明を目的として、実験的検討や解析的検討を行っている。本論文は 8 章からなり 1 章では本論文の概要及び研究背景について述べている。

2 章では、風力発電システムの雷害対策を検討するにあたり、風力発電システムの概要、風力発電システムに多大な被害を及ぼす雷の基本特性、風力先進国の多い欧州と日本の風力発電システムにおける雷害データを取りまとめ、雷害対策の現状について説明している。また、風力発電システムの雷害対策に関する最近の研究について紹介している。

3 章では、風力発電システム上のサージ伝搬様相とそれに伴い発生する過電圧の解析を行うために、数値電磁界解析手法の一つである FDTD (Finite Difference Time Domain) 法の解析原理について説明している。

4 章では、風力発電システムの縮小モデルを、完全導体大地を模擬したアルミ板上に設置し、実験を行い、風車ブレード先端および、ナセル後方に雷撃があった場合の過渡電圧・電流の振舞いを明らかにすると共に、発生過電圧と設備構成の相関性についての貴重な知見を得ている。

5 章では、風力発電システム基礎の縮小モデルを平坦な大地中に埋設し、より実際に近い状況での実験を行い、周囲土壌の電位上昇の距離特性から、遠方より引き込まれた電力・通信・制御線周囲の土壌の電位と、その内部導体の電位の差分が絶縁被覆層に加わり、絶縁破壊や部分放電による劣化を引き起こす可能性があることを明らかにしている。また、塔脚と基礎周囲の土壌の電位上昇により、遠方から風力発電システム内に引き込まれた電力・通信・制御線と、タワー内に設置された塔脚とほぼ同電位とみなせる電力・通信・制御機器の筐体との間に耐雷設計上問題となるような過電圧が発生することを明らかにしている。更に、風力発電設備基礎の接地特性を明らかにしており、これは風力発電システム基礎の数値解析モデルを構築する場合や、実機基礎の接地特性を予測する上で貴重な結果である。

4章および5章の実験は、風力発電システムの縮小モデルを用いたものであり、雷撃電流波形が異なる場合、あるいは、接地インピーダンス特性が異なる風力発電システムで生じる雷過電圧の検討に、実験結果をそのまま適用することは難しい。そこで6章では、4章で行った実験結果について、FDTD法を用いた数値電磁界解析を行い、その精度を確認し、実用レベルにおいて、実験の代わりにFDTD法を用いた解析により風力発電システム上を伝搬するサージ現象や、それに伴い発生する各種雷過電圧を検討できることを示している。

風力発電システムの雷被害が増える中、風力発電システムへの直撃雷による被害を低減させることを目的として、避雷塔が併設されることがある。7章では、電気幾何学法 (Electro-Geometrical Method : EGM) を用いて避雷塔による雷遮蔽効果の予測計算を行い、この計算結果と6章で得られたFDTD法による解析結果を用いて、雷過電圧の確率値を試算する手法を提案している。提案方法によれば、風力発電システムが建築されている場所の雷撃電流の累積分布や雷撃波頭長の累積分布の雷性状から、雷過電圧の確率分布を計算することができ、実用的価値が大きい。

最後に8章において本論文の研究成果を総括し、今後の研究課題を記している。

我が国の風力発電設備では多数の雷被害が発生していることから、本論文は、風力発電システムに雷撃があった時のシステム各部の雷サージ特性を実験および数値シミュレーションにより明らかにすると共に、当該地域の雷性状データから風力発電システムの雷サージ過電圧発生確率の計算法を提案している。これらの成果は風力発電設備の絶縁設計および建設場所の選定に多大な貢献をなすものと期待される。以上より、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。従って、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

2007年5月15日

論文題目： 風力発電システム雷撃時に発生する過電圧に関する研究

学位申請者： 山本 和男

審査委員：

主 査：	同志社大学大学院工学研究科	教授 雨谷 昭弘
副 査：	同志社大学大学院工学研究科	教授 長岡 直人
副 査：	同志社大学大学院工学研究科	客員教授 野田 琢

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期を2000年3月に修了し、2004年に同博士課程後期に入学、2007年3月単位取得退学した。

本論文の主たる内容は電気学会論文誌B(2論文)に掲載され、また、International Conference on Lightning Protection ICLP2006において発表され、すでに十分な評価を受けている。

本年4月28日午後1時より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が、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、論文に関係した諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語に関しては本工学研究科博士課程後期課程在学中に合格しており、また、ドイツ語に関しては本学工学部在学中に単位認定されており、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ならびに語学力は十分であると認める。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： 風力発電システム雷撃時に発生する過電圧に関する研究

氏名： 山本 和男

要旨：

世界の1次エネルギー消費量は、第2次大戦直後に比べ約5倍に増加し、近代文明の構築に大きく寄与しているが、同時に、大気中の二酸化炭素濃度の増加など多くの負の財産を残している。1次エネルギーの中でも化石燃料は特に自然環境へ悪影響が大きい。この化石燃料に依存したエネルギー社会を変えようと、近年、風力発電や太陽光発電等、温室効果ガスの排出量の少ない新エネルギーが注目されるようになってきている。特に風力発電はエネルギー源が無尽蔵な風エネルギーであること、大規模化によるスケールメリットがあり新エネルギーの中では事業化・商業化が最も進んだ分野であることなどの特徴があり、普及率の高い発電方法でもある。しかし、風力発電の普及が進むにつれて多くの問題点や課題も顕著となっている。自然に対する依存性が高いことや地域偏在性から電力品質の低下を招く可能性があること、風況の良い自然公園や港湾地域には土地利用規制等により容易に導入できないこと、更に最も大きな問題として、台風や雷による被害が他の発電手法に比べて極めて大であることがあげられる。特に雷害により、予測売電目標を達成できない風力発電設備を有する地方自治体が数多くあり、日本の風土に合った風力発電設備の開発が今後の普及のための大きな課題であると考えられる。

風力発電システムは、より多くの風資源を得るため、丘陵地や海岸近くの平坦な場所等、大地雷撃密度が大きな地域に建てられることが多く、さらに、周囲に高構造物が少ない場所に建設される場合が多い。そのため、風力発電システムに雷撃が集中する傾向があり、雷害によるトラブルが多く発生している。特に北陸地方から東北地方の日本海沿岸に発生する冬季雷は、太平洋側や内陸部の夏季雷に比べて非常に大きな最大電流値とエネルギーを有し、高構造物に落雷が集中する性質を持つ。すなわち、雷が風力発電システムにとっては第一の天敵となっている。しかしながら、十分な雷害対策を講じられた風力発電システムは未だ少なく、日本の特徴的な気候に耐えることができない風力発電システムが増加している。IEC (International Electrotechnical Commission) 規格や JIS (Japanese Industrial Standard) 規格で、風力発電システムの雷保護方策が定められてはいるものの、風力発電システム雷撃時の雷被害発生メカニズムが解明されているとは言い難い。最近では、国内においても NEDO や電気学会が母体となり風力発電システムの雷害対策を目的とした委員会が設立され、風力発電システムへの雷撃と雷被害の関係を解明しようとする動きが活発になっている。このような状況から明らかなように、日本の特徴的な気候に耐える風力発電システムの開発には、雷についての十分な対策が必要不可欠である。

風力発電システムの雷被害は、雷撃時に雷サージ波頭部に発生する過電圧によるものと、長波尾雷によるエネルギー的破壊に分類される。本論文では、前者の過電圧発生メカニズムの解明を目的として、実験的検討や解析的検討を行っている。

まず2章では、風力発電システムの雷害対策を検討するにあたり、風力発電システムの概要、風力発電システムに多大な被害を及ぼす雷の基本特性、風力先進国の多い欧州と日本の風力発電システムにおける雷害データを取りまとめ、雷害対策の現状について説明している。また、風力発電システムの雷害対策に関する最近の研究について紹介している。

本論文では、数値電磁界解析手法の一つである FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いて風力発電システム上のサージ伝搬様相とそれに伴い発生する過電圧の解析を行っている。FDTD 法は、解析空間の電磁界分布を詳細に解析することが可能であり、近年、3次元構造物上

を伝搬するサージ現象を解析する手法として幅広く用いられるようになってきている。3章では、FDTD法の解析原理について説明している。

4章では、風力発電システムの縮小モデルを、完全導体大地を模擬したアルミ板上に設置し、実験を行った結果について説明している。実験では、夏季や冬季の特徴的な雷撃を模擬した急峻波電流をレセプタが設置される「ブレード先端」と避雷針が設置される「ナセル後方」の雷撃想定位置へ注入して、雷サージ波頭部に発生する風力発電システム各部の過電圧を測定している。この実験により、塔脚の電位上昇が原因で、遠方から塔脚内に引き込まれた電力・通信・制御線と塔脚内に設置された電力・通信・制御機器の筐体との間や、遠方から引き込まれた電力線と風力発電システム内に引き下げられた電力線との間に耐雷設計上問題となる過電圧が発生することを明らかとしている。また、風力発電システム上のサージ伝搬様相や、注入される電流の立ち上り時間・接地抵抗値が上述の過電圧に与える影響についても明らかとしている。タワー内地上レベルに設置された電力変換器や変圧器等の機器類とその配線類、および、制御回路とその配線類によりループ回路が形成されている場合、タワーに流れる雷電流によりタワー内の電磁界が変化し、これらループ回路に電圧が誘導する可能性があることも指摘している。

上記の実験では、風力発電システム基礎の接地を、縮小モデルと完全導体大地を模擬したアルミ板の間に抵抗を挿入することで模擬している。これは、完全導体大地上の実験により各種過電圧や雷サージ伝搬の基本特性を把握するための実験である。実際は、風力発電システムのブレード先端やナセル後方に雷撃があった場合、雷サージはそれら受雷部からタワーを介して大地に向かって伝搬し、基礎の接地インピーダンスに依存して反射・透過する。つまり、実際の過電圧発生様相を把握するためには風力発電システム基礎の過渡特性を考慮に入れた検討が必要となる。そこで5章では、風力発電システム基礎の縮小モデルを平坦な大地中に埋設し、その上に4章で用いた風力発電システムの縮小モデルを設置して、より実際に近い状況での実験を行っている。この実験では、4章で行った検討項目に加え、風力発電システム基礎単体の接地特性を明らかとし、遠方より風力発電システム内に引き込まれた電力・通信・制御線の絶縁被覆層や心線－金属シース間の主絶縁に耐雷設計上問題となるような過電圧が発生する可能性があることを指摘している。

4章や5章で行った実験結果は、ある大きさの風力発電システムを一定の比率で縮小した場合の実験結果である。そのため、ブレードやタワーの長さ、接地インピーダンス特性が異なる風力発電システムで生じる雷過電圧を検討する場合や、波頭長等の性状の異なる雷が風力発電システムに落ちた場合に生じる過電圧を検討する場合には、実験結果をそのまま適用することは難しい。そこで6章では、4章で行った実験結果について、FDTD法を用いた数値電磁界解析を行い、実用レベルにおいて、実験の代わりにFDTD法を用いた解析により風力発電システム上を伝搬するサージ現象や、それに伴い発生する各種雷過電圧を検討できることを明らかとしている。

風力発電システムの雷被害が増える中、風力発電システムへの直撃雷による被害を低減させることを目的として、避雷塔が併設されることがある。7章では、電気幾何学法 (Electro-Geometrical Method : EGM) を用いて避雷塔による雷遮蔽効果の予測計算を行い、実測結果と良好に一致した結果を得ることができた。さらに、6章で得られたFDTD法による解析結果から、遠方からの引き込まれた電力・通信・制御線と塔脚内に設置された電力・通信・制御機器の筐体との間や、遠方からの引き込まれた電力線とタワー内に引き下げられた電力線との間に発生する過電圧と、接地抵抗との関係、さらに、それら過電圧と雷電流波頭長との関係について近似式を導出している。それらの近似式を用いて雷過電圧の確率値を試算する手法を提案している。

今後は、既存の落雷位置標定システムより得られる風力発電システム建設予定地の大地雷撃密度と雷撃電流波高値、その場所での大地抵抗率から、電気幾何学法を用いてウィンドファーム内に建設された個々の風力発電システムへの雷撃頻度を予測し、それにより発生する雷過電圧を予測できるようなシステムを構築したいと考えている。さらに、風力発電システムを建設する際に、

雷害の影響を考慮に入れた費用対効果を予測できるシステムへと発展させたい。