

氏名	土屋 敬一
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成8年12月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和37年3月 東北大学工学部電気工学科卒業
学位論文題目	風力発電システムの実用化に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 豊田 淳一 東北大学教授 阿部 健一 東北大学教授 犬竹 正明

論文内容要旨

本論文は筆者が東北電力(株)竜飛ウインドパークで風力発電システムを実用化する過程の中で遭遇した事項の中から、主要な4項目を取り上げまとめたもので、これらは風力発電システムを実用化する上で、有用な解析手法、新しい知見として一般性が高いものと思われる。以下その要旨を述べる。

(1) 局地的風力エネルギー利用可能量の推定法

ウインドパーク内に複数の風車を設置する場合、最適位置を決めるため、サイト内の任意の位置における取得エネルギー量を効率良く、また精度よく予測する必要がある。

そのための手法として風洞試験と数値シミュレーション WASP¹⁾ をとりあげ、風力エネルギー取得の予測に適用し、その精度を検証した。

その結果、両手法とも地形起伏が小さい場所（風の乱れが無い）では非常に良い精度で予測できる事が分かった。

しかし、WASP では地形起伏が大きい場所、風洞試験ではこれに加え地表面の粗度状態を正確に模擬出来ない場合には予測精度が悪くなった。

その程度は実測値に対する比で、WASP (Park) は± (10~19) %の差で、風洞試験は18~37%多く予測された。

その理由は、一般に地形起伏が大きい場所は、風の乱れが大きいのが、この様な場合、風車翼は慣性が大きいため翼制御が風速の速い変化に追従出来ず、当風車では制御特性上出力が設計値より小さくなる。このため、風の乱れが大きい場所では、実風車の取得エネルギー量が計算値より減少する。

一方 WASP では計算モデルで乱れを全く考慮していないため、乱れを受ける実機とは異なった値に計算される。

また、風洞試験では地形模型の表面状態を正確に模擬するのが難しく、実際と比べ表面状態が滑らかになり易い。このため地表面の風速減衰が実際より少なく、風速が高めに計測され、したがって取得エネルギー量が実際より大きく計算されるためと考えられる。

ここでの目的は、両手法を風の乱れの多いところに適用した場合どの程度予測精度が悪くなるかを検証する事にある。

WASP は欧州等で広く使われている市販のプログラムであり使い勝手がよい。

一方、風洞試験は伝統的手法で馴染みが深い。特に、タフト等により風の流れが可視化でき、直感的理解に便利である。しかし、地表面粗度の模擬精度を現状以上に改善するには、かなりの時間と経費を要し実用的ではない。

したがって、これら予測手法の当面の利用法としては、風力発電機を設置するには非常に条件が悪いと考えられる、

竜飛ウインドパーク程度の地形条件のところでは、現状程度の模擬方法で行った場合、実測値に対する比でWASPは約±(10～20)%程度の差で、風洞試験は約20～40%程度多く、予測されるという事実を考慮して、利用すべきである。

(注)1) : Wind Atlas Analysis and Application Simulation Program

(2) 風力発電システムのモデリングと制御特性の改善

設置した風力発電システムの制御特性を改善したい事がしばしば起こるが、これをいきなり実機で行うより、何らかのシミュレーションで事前に検討し、最適なものを見出すという手法が効率的である。

ここでは竜飛ウインドパークで運転されている風力発電システムの発電特性に関する精度の良いシミュレーション法を得、これを使って制御特性の改善を試み、フィードフォワード制御を加える事によって顕著な効果を得ることを明らかにした。

(3) 風車翼の疲労寿命予測

風力発電システムの機能を正常に維持するためには適切な点検・保守が欠かせないが、この中で翼の疲労による折損は重大事故となるので、細心な検査が必要である。

しかし、翼表面の微細な亀裂等は翼を取り外し地上に下ろして点検しなければ発見することが出来ないため頻繁に検査するのは費用と時間が高む。もし、精度の高い疲労寿命の予測が出来れば、その時期近くになってから詳細な検査をすれば良いので検査が合理化される。

ここでは、サイトで実測された有限個のデータを用いて、疲労寿命を推定する方法を提案し、従来行われている実測値を既知の分布で近似する方法と比較した。

その結果、前者による推定寿命は約12年、後者によるそれは約23年と約2倍の差がある事が分かった。その原因は、次の様な理由によると考えられる。

当サイトは山岳地形のため風の変化が激しい。しかし、翼には慣性があるのでピッチ角制御が風の速い変化に追従できず、数としては少ないものの突発的な大きい応力を全風速範囲に渡って受ける。

前者はこれら実測値を全てそのまま取り入れ、ある風速範囲(bin)ではその様な応力の発生状態が常に起こっているものとして寿命を推定している。

一方後者は、応力の発生頻度を既知の関数で近似するため、風の乱れ等によって発生するパルス状の大きな応力は平滑化されてしまい、疲労寿命が長めに計算される。

あるサイトの風車翼の寿命推定にはそのサイトでの実測値をそのまま使う本例の様な方法が適切と思われる。

(4) 風車への落雷様相と対策

模擬試験によって風車への落雷様相を把握し、それに基づいて以下の様な落雷対策を提案した。

[GFRP 翼の採用]

CFRPは雷雲に対しては金属に近い特性を有し落雷しやすい。また燃焼しやすいので、落雷の多い地方では、CFRP製翼は避けるべきである。

一方GFRPは絶縁性が高く、落雷しにくい。また、落電流によるアークにも非常に強く、燃焼の恐れが無く、機械的強度の低下もない。

このため出来るだけGFRP翼を選ぶべきである。

[避雷針の設置]

避雷針を設置する事により、翼およびナセル上のセンサー類(風向・風速計等)への落雷を大幅に防止出来る。特に夏季に多い負極性雷に対してはその効果は抜群である。

このため、風車には避雷針を設置すべきである。

[塩分汚損の影響]

GFRP翼でも海塩水で汚損されると、翼に落雷する回数が非常に多くなり、CFRPに近い特性となる。しかし、先に述べた様にGFRP翼を採用する事により問題は無くなる。

審査結果の要旨

風力発電が、本格的に導入されてきたのは1970年代の石油危機を契機としてであり、環境負荷の小さな発電システムとして開発が進められてきている。実用化の課題は、発電コストの低減、運転のしやすさ、信頼性・耐久性の向上、自然被害対策などをあげることができる。著者は、電気事業者の立場から4回の風力発電システムの建設・試験・運転・保守を通して、その開発と実用化研究に取り組んできている。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、風力発電システムを概説している。

第2章では、局地的な風力エネルギーの利用可能量の推定法について述べている。風洞試験と数値シミュレーションツールにより、複雑な山岳地形の竜飛地域を対象に風況予測を行い、風車毎の取得エネルギーの推定値と実測値とを比較して、風況予測法の適用限界を明らかにしている。

第3章では、風力発電システムのモデリングと制御特性の改善について述べている。風車・誘導発電機・ロータ駆動・制御機構のモデルを組み合わせて、風況の変化に対応可能な実用的風力発電システムのシミュレーションモデルを構築している。これを用いて風速の変化に対して安定かつ有効に風力を電気エネルギーに変換し、風車翼の慣性による遅れ等を補償するフィードフォワード制御法を提案している。これは有用な成果である。

第4章では、風車翼の疲労寿命予測について述べている。疲労寿命は、回転翼に貼った歪みゲージ応力の短期の実測値をベースに、長年月にわたる応力発生数の予測から推定する。風の乱れの大きなサイトでは、従来の平均的応力分布を用いる寿命予測では風況を十分に反映しておらず、実測応力をベースにした寿命予測が妥当であることを述べている。

第5章では、風車への落雷様相と対策について述べている。風力発電サイトは、風を遮る高い構造物や木がないため、風車自身が避雷針となって落雷するケースが発生している。1/25縮尺の風車モデルと人工雷電圧・雷電流発生装置を用いて、翼の長さ・翼材質・雷極性・避雷針の有無・塩分汚損・ジュール熱損傷等について実験的に検討している。その結果、落雷対策としてガラス繊維強化プラスチック翼の採用と避雷針の設置が不可欠であることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、利用可能な風力エネルギー、発電システムの運転特性、翼の疲労寿命予測、雷被害対策の研究を行い、風力発電システムの実用化に有用な知見を加えたものであり、電力システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。