

## 審査の結果の要旨

氏 名 ユン ジェソン

風車の維持保守を行う際に、全ての風車に対して定期点検を行う代わりに、風車の状態に基づきメンテナンスを行う手法 (Condition-Based Maintenance) を用いることにより、風車の維持保守コストを削減でき、風力発電のコスト競争力を高めることが可能である。現在利用可能ないくつかの手法の中では、計測に基づく状態監視手法 (Measurement-based Condition Monitoring) は、風車に作用する荷重を直接に評価し、損傷をリアルタイムに検知できる最も分かりやすい方法と言えるが、風車の耐用年数と同じ期間にわたり主要構造にセンサーを設置する必要があることから、コストの面で風力発電の分野への導入が難しい。一方、シミュレーションに基づく状態監視手法 (Simulation-based Condition Monitoring) は、余分な計測を行うことがなく、風車の主要構造に作用する荷重を評価することが可能であるが、構造パラメータの変化を反映し、風車の損傷を検知することは難しい。さらに、統計解析に基づく状態監視手法 (Statistics-based Condition Monitoring) はコンピュータによる監視制御とデータ収集システム (以下、SCADA システムを呼ぶ) と短期間の計測により適度なコストで風車の主要構造に作用する荷重を評価できることから、近年いくつかの研究がなされてきた。しかし、この方法は、構造パラメータの変化を反映し、風車の損傷を検知できないのに加え、短期間の計測で現れない制御状態および風条件に対応する荷重の評価は外挿になってしまうという問題がある。

そこで、本研究では、低コストで信頼性の高い風車の状態監視を行うことを目的とし、システム同定および動的応答解析を組み込んだ物理モデルに基づく状態監視手法 (Physical model-based Condition Monitoring) を提案している。システム同定により風車の剛性を正確に再現すると共に風車の可動部による減衰効果も精度よく評価している。また SCADA システムにより観測された風速データを利用した 3 次元風速場の生成手法を提案することにより、風応答の計測値との相関および最大応答の予測精度を向上させると共に、損傷検知の指標を提供している。本研究で提案したシステム同定および動的応答解析手法は、400kW のストール制御風車の観測データを用いて精度検証を行っている。論文の構成ならびにその概要は下記の通りである。

第 1 章は序論であり、国内外における風車の状態監視に関する既往研究のレビューを行い、本研究の目的を明らかにするとともに、本論文の構成を記述している。

第 2 章では、SCADA システム、動的応答解析、システム同定及び性能評価から構成される物理モデルに基づく状態監視手法について詳細に説明している。本手法では、風車に組み込まれている SCADA システムにより得られた風速データを用いて自然風を発生させ、風車の動的応答解析を行うと共に、加速度データを用いてシステム同定を行い、風車の構造パラメータを精度よく求めることができる。

第 3 章は、風車の空力弾性モデルの精緻化方法について説明している。本論文では SCADA システムから求められた固有振動数に基づき、ERA 法 (Eigensystem Realization Algorithm) により空力弾性モデルに用いる剛性を同定した。さらに風車の可動部を模擬できる等価モデルを提案することにより、前後と左右方向における風車の構造減衰の違いを再現した。これらの可動部のパラメータを決定するために、SCADA システムから得られた加速度データから RDT 法 (Random Decrement Technique) により求めた減衰を組み込んだ目的関数を用いている。剛性と減衰の同定にはシンプレックス法を用いて目的関数の最適化を行うことにより実現している。

第4章では、400kW ストール制御風車における観測データを用いて、風車モデルの精緻化手法の精度検証を行った。風車ナセルの中にあるドライブトレインを正確に再現するために、ナセルの底板および高速と低速シャフトの剛性を考慮した空力弾性モデルを用いた。精緻化された空力弾性モデルを用いた場合に、固有振動数の推定誤差は2%以下となり、風車タワー基部における転倒モーメントのパワースペクトル密度も観測値とよく一致することを明らかにした。低速シャフトを模擬した同等モデルのパラメータを決定した後に、風車の固有振動数の変化は剛性パラメータを再度同定することにより校正した。

第5章では、AR モデル (Auto-Regressive) を利用し、変動風のパワースペクトルや空間相関を満足する自然風発生手法を三次元に拡張するとともに、SCADA システムから得られた風速の時系列データを利用することにより、AR モデル中の誤差項の不確かさを低減させ、風応答の観測値と予測値との間の相関を高めた。

第6章では、従来手法と提案手法により生成された自然風を用いて 400kW ストール制御風車の動的応答解析を行い、観測結果と比較することにより、精度検証を行った。本論文で提案した手法を用いた場合、最大モーメントの予測を安定かつ高精度で行うことを可能にし、応答予測の二乗誤差が70%から27.5%まで低減した。また提案手法により生成された自然風を用いることにより、風応答の予測値と観測値との相関係数の平均値が0.14 から0.55に増大し、その理由についてはスペクトル解析により明らかにした。

第7章は、結論であり、第3章から第6章までに得られた結論をまとめるとともに、今後の課題に言及している。

以上のように、本論文は、物理モデルに基づく状況監視手法を提案し、400kW のストール制御風車を用いて精度検証を行った。この手法では、前後方向に自由に動く低速シャフトを再現するため可動部を模擬した等価モデルを空力弾性モデルに組み込み、モデルのパラメータを決定することにより、前後と左右方向における風車の構造減衰の違いを再現した。さらに、風観測データを組み込んだ自然風の生成モデルを用いることにより、風応答の解析値と観測値の相関が増加し、最大モーメントの予測精度が向上した。

これらの研究成果は、物理モデルに基づく風車の状態監視手法に対する理論的基盤を与え、風車の状態監視の高度化および維持保守コストの低減に貢献するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。