

審査の結果の要旨

論文題目

Fatigue prediction of wind turbine main shaft bearing based on field measurement and three dimensional drivetrain model

(現地観測と3次元ドライブトレインモデルを利用した風車主軸軸受の疲労予測に関する研究)

氏名 王 帥

主軸軸受は、損傷時に風車の長期停止や高額な修理費用が発生するため、ドライブトレインの中で最も重要な部品の1つである。しかし、1つの主軸軸受と2つのトルクアームから構成される3点支持 (TPM, Three-Point Mounting) のドライブトレイン (DTS, Drivetrain System) にある主軸軸受は、損傷率が高いと知られている。米国の調査では、約6年の間に20%の主軸軸受が損傷することが報告されている。一方、日本では、苫前風力発電所において、主軸軸受の損傷率は65%に達した。しかし、現行の国際基準 (ISO 281) に示す予測式により求められた軸受の定格寿命は約141年であり、実際の損傷率を説明できない。その理由として、まずこれまでドライブトレインの1次元剛体モデルを用いたが、実際のドライブトレインは3次元弾性体であり、1次元剛体モデルでは主軸軸受に作用する曲げモーメントとトルクアームの変位を正確に予測できない。また、軸受内部に隙間がある場合に衝撃荷重が発生することが知られ、様々な作動環境における軸受の荷重係数が経験的に定められているが、風車の主軸軸受に適用できる荷重係数は不明である。さらに、風車の主軸軸受における荷重係数を求める数値モデルも提案されていないのが現状である。

そこで、本研究では、まず、ドライブトレインの3次元弾性モデルを作成し、主軸に作用する曲げモーメントおよびトルクアームの変位を評価すると共に、現地観測の結果と比較することにより、その予測精度を検証した。次に、主軸と内輪および外輪とハウジングを弾性体とし、ローラーと内部隙間を非線形バネでモデル化することにより、主軸軸受内に隙間がある場合と隙間がない場合における主軸軸受の荷重係数を求めた。最後に、本研究により求めた荷重係数および内部隙間による寿命比を従来の軸受定格寿命の予測式に導入することにより、苫前風力発電所の主軸軸受の定格寿命を予測し、主軸軸受の実際の損傷記録に近い結果を得た。

第1章では、風車のドライブトレインおよび軸受の疲労予測の理論について紹介すると共に、本研究の目的と本論文の構成を述べている。

第2章では、苫前風力発電所で実施した現地観測および現地調査の概要を説明すると共に、ウィンドファームおよび風車の空力弾性モデルを作成するための諸元を記述した。そして、ウィンドファーム周辺における風況観測データに基づき、空力弾性モデルの入力として必要な風況データを整理した。さらに、風車タワーおよび主軸に作用する風荷重、トルクアームの変位等を計測し、風車、ドライブトレイン、主軸軸受に関する各種モデルの検証データをまとめた。最後に、主軸軸受の疲労寿命予測に必要なパラメータを現地調査により決定した。

第3章では、アクティブストール制御風車の空力弾性モデルを構築すると共に、スプリットピッチ制御を用いて、風車タワー基部に作用する風荷重を予測し、観測結果との比較検討を行った。スプリットピッチ制御を用いる場合は、スプリットピッチ制御を適用しない場合に比べ、風車タワーの発散振動が抑制された。またタワーベースモーメントのパワースペクトル密度により同定

したピッチオフセット角度を用いることにより、予測されたタワーベースモーメントは、観測された値とよく一致する結果を得た。

第4章では、主軸の曲げモーメントとトルクアームの変位を評価するために、ドライブトレインの3次元弾性モデルを構築し、主軸軸受およびトルクアームのバネ定数を文献調査およびパラメータ同定により決定した。3次元弾性モデルにより求めた主軸の曲げモーメントは1次元剛体モデルによる過大評価を大きく改善した。また、1次元剛体モデルが再現できなかったトルクアームの3次元挙動は、3次元弾性モデルにより再現され、予測されたトルクアームの風方向、風直角方向および鉛直方向の変位は現地観測から得られた値とよく一致した。

第5章では、主軸軸受の荷重係数を評価するために、内部隙間がある場合の衝撃荷重を再現できる数値モデルを構築し、主軸と内輪および外輪とハウジングを弾性体とし、ローラーと内部隙間をバネによりモデル化した。そして、内部隙間のない軸受ではローラーを線形バネによりモデル化し、磨耗等により内部隙間が発生した軸受では、ローラーと内部隙間を非線形ばねによりモデル化した。内部隙間がある場合には、内部隙間がない場合に比べ、衝撃荷重により主軸軸受到作用する荷重が増大することを明らかにした。最後に、風車主軸軸受の定格寿命を予測するために、通常運転時における様々な風速条件に対して主軸軸受の荷重係数を求めた。

第6章では、苫前風力発電所における主軸軸受の損傷データをワイブル分布に当てはめることにより、90%の信頼性を有する主軸軸受の定格寿命 L_{10} が約8年であることを明らかにした。そして、従来の軸受定格寿命の予測式に内部隙間による寿命比および主軸軸受の荷重係数を導入することにより、苫前風力発電所における主軸軸受の定格寿命の予測値は141年から12年まで短くなり、主軸軸受の損傷データに近い結果を得た。

第7章では、本研究から得られた結論をまとめている。

本研究から得られた成果は、ドライブトレイン3次元挙動および主軸軸受の衝撃荷重を求めるための新しいモデルを提供し、軸受定格寿命の予測精度の向上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られる。