

審査の結果の要旨

論文題目

Fatigue Prediction and Damage Detection of Wind Turbine High-tension Bolts Based on Field Measurement and Updated Numerical Model

(現地観測と精緻化した数値モデルを用いた風車高力ボルトの
疲労予測と損傷検知に関する研究)

氏名 劉寅

平成 25 年 3 月 12 日に発生した太鼓山風力発電所 3 号機ナセル落下事故は、調査結果からタワートップ高力ボルトの損傷によりタワートップフランジ溶接部内側の引張応力が著しく増大することにより短期間にタワーの疲労寿命に達し、タワートップ溶接部の破断が引き起こされたと結論付けられている。タワートップの高力ボルトの疲労寿命は、風車に作用する風荷重の影響を受けるとともに、風車ナセルの構造、ヨー制御機器の影響も受けるため、現地の乱流特性と実風車の制御特性を考慮した風荷重の評価および風車ナセルの 3 次元構造とヨー制御機器の影響を考慮したボルト軸力の評価が不可欠である。また高力ボルトの損傷は半年ごとに行われる定期点検の周期より短く発生したことから、高力ボルトの異常検知と損傷予測手法を確立する必要がある。

そこで、本研究では、まず風車に作用する風荷重を予測できる空力弾性モデルを構築するとともに、風車の発電量および風車タワー基部に作用する転倒モーメントに関する現地観測データと比較することにより、空力弾性モデルと制御モデルの妥当性を評価する。次に、実ナセルの詳細構造およびヨー制御機器を考慮した 3 次元 FEM モデルを構築し、現地観測から得られたタワートップでの歪分布と比較することにより、FEM モデルの予測精度を評価する。また、ボルト軸力が高力ボルトの疲労寿命に与える影響を定量的に評価することにより、太鼓山風力発電所 3 号機トップフランジにおける高力ボルトの短期損傷メカニズムを明らかにする。最後に、高度化された FEM モデルとタワートップの歪計測に基づく高力ボルトの異常検知と損傷予測手法を提案し、現地観測によりその妥当性を検証する。

第 1 章は、既往研究のレビューを行い、本研究の背景と各種数値予測モデルの現状を明らかにすると共に、本論文の概要を示した。

第 2 章では、現地の風条件および太鼓山風力発電所 1 号機を対象に風車に作用する風荷重を評価するための現地観測を実施し、現地の風条件は風車設計時に用いた国際基準 IEC の標準乱流モデルを超えていることを示した。また風車の SCADA データから、ナセル風速、風向、発電量、ローター回転速度およびピッチ角度を求めるとともに、タワー基部に設置したひずみゲージからタワーに作用する風荷重を評価した。最後に、3 次元 FEM および高力ボルトの異

常検出と軸力予測手法を検証するために、タワートップフランジ直下におけるひずみ分布の測定を実施した。

第3章では、実風車の空力弾性モデルを構築し、実測により得られた発電量、ローターの回転速度、ピッチ角度およびタワー基部に作用する転倒モーメントと比較することにより、従来の風車制御モデルに用いられた標準PIモデルおよび風車の発電量の低下を模擬したいわゆる機械損失モデルの問題点を明らかにするとともに、風車ロータに作用するトルクとスラスト力を同時に再現できるピッチ遅延を考慮した制御モデルを提案することにより、発電量、ローター一回転速度、ピッチ角度のみならず、タワーに作用する風荷重も正確に評価できる制御モデルを確立し、実測データとよく一致した結果を示した。

第4章では、風車の高力ボルトの疲労寿命を評価するため、実ナセルの詳細構造およびヨーベアリング、ヨーブレーキ、ヨーモーター等の制御機器を考慮した3次元FEMモデルを構築し、タワートップフランジが剛であると仮定した従来の3次元FEMモデルに比べ、タワートップの歪が大きく増大する実測データの再現に成功した。精緻化された3次元FEMモデルを用いて求めたタワートップのボルト軸力は、従来の3次元FEMモデルおよび設計でよく使われているセクションモデルにより求めたボルト軸力に比べ、大きく増大することを明らかにした。精緻化された空気弾性モデルおよび3次元FEMモデルより求めたボルトの疲労寿命は現地調査から得られた実際のボルト損傷間隔とよく一致し、太鼓山風力発電所におけるタワートップの高力ボルト損傷はボルト軸力の低下によるものであることを明らかにした。

第5章では、タワートップにおける歪計測と精緻化された3次元FEMにより、高力ボルトの異常検出と損傷予測のアルゴリズムを提案し、タワートップの歪変化を利用した機械学習手法および歪の変化とそのパターンに着目したMT法の検知精度を評価した。機械学習に基づきHotelling T^2 理論により算出した異常基準に比べ、MT法に基づきマハラノビス距離(MD)により算出した異常判定基準は、現地観測の結果と一致することを明らかにした。またMT法の一つであるT1法に基づくボルト軸力の予測手法を提案し、精緻化されたFEMモデルによって予測されたボルト軸力は実測値と良く一致することを示した。

第6章は、本研究の結論を示している。

以上のように、本論文では、実風車の制御特性を考慮した空力弾性モデルを構築し、現地観測によりその妥当性を評価した。また実際のナセルの構造およびヨー制御機器を考慮した3次元FEMモデルを構築し、太鼓山風力発電所3号風車のトップフランジにおける高力ボルトの短期損傷メカニズムを明らかにした。さらに精緻化されたFEMモデルとタワートップの歪計測に基づく高力ボルトの異常検出と軸力予測手法を提案した。本論文で開発した高力ボルトの疲労寿命予測手法および高力ボルトの異常検出と損傷予測手法は風力発電設備高力ボルトの安全性と信頼性の向上に大きく貢献し、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。