

審査の結果の要旨

論文題目

Numerical and analytical study of wind turbine wakes considering ambient environment and operational conditions

(周辺環境と運転条件を考慮した風車後流の数値予測と解析モデルの提案)

氏名 钱 国伟

風力発電所においては、風上風車の後流に起因する速度損失による発電量の低下および乱流強度の増加による疲労荷重の増大の2つの問題がある。風車の発電量の増加および疲労荷重の低減のために、周辺環境および運転条件を考慮した風車配置の最適化と風車制御は不可欠である。しかし、既往の風車後流モデルでは後流内の速度欠損および乱流強度の増加について、流体力学の基礎方程式に基づき導出されたものがなく、後流モデルの予測精度も不十分である。

そこで、本研究では、さまざまな周辺環境と運転条件下での風車後流に関する数値流体解析を実施し、風車後流と大気境界層との相互作用を系統的に調べる。次に、流体力学の基礎方程式に基づき、周辺環境と運転条件を考慮できる高精度な後流モデルを導出するとともに、数値流体解析の結果と比較することによりその予測精度を検証する。最後に、複雑地形上の実風車に開発された後流モデルを適用し、風観測データと比較することにより、その予測精度を検証する。

第1章では、本研究の背景、目的および既往の研究について述べるとともに、本研究の概要を示した。

第2章では、風車後流の数値流体解析に用いる数値モデルについて述べている。Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) の支配方程式を示すと同時に、風車ロータにより誘起された空気力を求めるためのアクチュエータディスクモデル (ADM-R) を述べた。また地表面粗度と植生を表す壁関数とキャノピーモデルについても示した。

第3章では、さまざまな周辺環境と運転条件下における風車後流の特性を調べるために、まずモデル風車と実風車を用いて、乱流強度の異なる2種類の流入風と推力係数の異なる2種類の運転条件下における数値流体解析を行った。予測された後流の平均速度および乱流強度を風洞実験の結果と比較することにより、数値流体解析の予測精度を検証した。次に、レイノルズ応力モデルを用いて、ヨー角度、推力係数および乱流強度の異なる8つの数値流体解析を実施し、風車の後流内における後流偏向、速度欠損および乱流強度の増加を系統的に調べた。

第4章では、乱流強度と推力係数の影響を考慮した新しい風車後流モデルの開発について述べている。まず風車後流の軸対称性と自己相似性の仮定に基づき、速度欠損および乱流強度増加量の予測モデルを提案した。次に、ヨー角度の影響による後流中心軌道の変化を解析的に予測するための新しい後流偏向モデルを提案した。さらに新しい風車後流モデルに後流偏向モデルを組み込むことにより、ロータのヨー角度の効果を考慮できる風車後流モデルを提案した。新しい後流モデルのパラメータは周囲の乱流強度と風車の推力係数の関数としてモデル化し、数値流体解析と風洞実験の結果と比較することにより、その予測精度を検証した。

第5章では、開発された風車後流モデルを実際の風力発電所に適用するための手順を示している。実地形上の風速場と風車後流を修正DDESモデルにより予測し、いくつかの風向において、LIDARにより測定された風速と比較することにより、その予測精度を検証した。次に、崖が風車後流に与える影響を系統的に調べた。風力発電所内の後流を予測するために、地形効果を含む局地風をCFD解析により予測した上、新しく提案した後流モデルにより求める風車後流の効果を加えるハイブリッド手法を提案するとともに、数値流体解析の結果と比較することにより、その予測精度を検証した。

第6章では、本論文のまとめであり、第3章から第5章までに得られた結論をまとめている。

以上のように、本研究では、乱流強度、推力係数およびヨー角度の影響を数値流体解析により系統的に調べるとともに、流体力学の基礎方程式に基づく新しい後流モデルを提案し、様々な乱流強度、推力係数およびヨー角度下における風車後流内の平均速度および乱流強度を精度よく予測できることを示した。また風車後流における地形の影響を調べ、複雑地形における新しい後流モデルの適用可能性を示した。これらの研究成果により、風力発電所における風車後流に起因する速度欠損および乱流強度の増加を精度よく予測でき、風車配置の最適化及びヨー制御による発電量の向上が可能になる。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。