

「風力エネルギーハンドブック」の概要[B]

佐賀大学/九州大学 吉田 茂雄
2025/03/28

緒言

これまで数年間にわたり、日本風力エネルギー学会の有志で、Wind Energy Handbook ed.3 [1]の和訳に取り組んできた。このたび、その和訳版が「風力エネルギーハンドブック(第3版)」[2]として、2025年03月28日に森北出版から発刊された。本稿では、同書の概要について解説する。

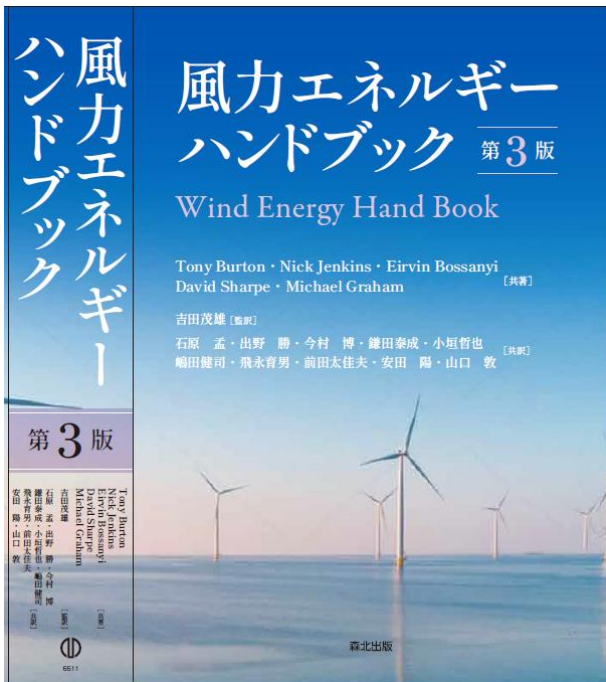


Fig 1 風力エネルギーハンドブック(第3版)表紙・背表紙

目次

- 1章 序論
- 2章 風力資源
- 3章 水平軸風車の空気力学
- 4章 風車の空気力学に関するその他のトピック
- 5章 水平軸風車の設計荷重
- 6章 水平軸風車の概念設計
- 7章 要素設計
- 8章 コントローラ
- 9章 ウェイクの影響とウインドファーム制御
- 10章 陸上の風車の設置とウインドファーム
- 11章 風力発電と電力系統
- 12章 洋上風車と洋上ウインドファーム

1章 序論

翻訳担当: 吉田 茂雄

節目次

- 1.1 風力エネルギーの歴史の変遷
- 1.2 最新の風車
- 1.3 本書の範囲

解説

約 3000 年前の脱穀・揚水用から、19 世紀後半の発電用、さらに、今日に至る風力エネルギー利用の歴史が述べられている。1980 年代より、三枚翼・アップウインドロータと誘導発電機による定速・ストール制御を特徴とするデンマーク型の風車により、風力発電は実用的な発電技術の一つとして定着した。当初の商業風車は、50 kW 程度に過ぎなかったが、さまざまな技術開発を経て、今日の大規模風車に繋がっている。1991 年に、デンマークの Vindeby に世界発の洋上ウインドファームが設置されたが、ここで使用された風車も 450 kW の定速・ストール制御機であった。一方、商業的には成功には直結しなかったが、1973 年のオイルショック以降の欧米諸国の大型風車の実証試験の貢献も、技術進歩の観点からは無視できない。

なお、1973 年に風力エネルギー開発の機運の高まりは、石油の価格の上昇と化石燃料の資源枯渇の懸念によるものだったが、1990 年頃からは、CO₂ 排出削減と気候変動緩和に対する潜在能力が高いことによるものである。2000 年代以降は、各国とも風力発電の導入に関する具体的な数値目標を挙げられるようになった。

2000 年頃までは、風力発電の総量は小さかったため、送電事業者は、風車の出力を単なる負の負荷と見なしていた。しかし、風車の設備容量が増加するにつれ、風力発電にも、電力系統の運用に寄与することが求められるようになった。系統連系のためには、送電事業者のグリッドコードの要件を遵守する必要があるが、この要件も、可変速・ピッチ制御機が定速・ストール制御機に取って代わった一因になっている。

2章 風力資源

翻訳担当: 山口 敦

節目次

- 2.1 風の性質
- 2.2 風力資源の場所による違い
- 2.3 長期的な風速変動
- 2.4 年間変動および季節変動
- 2.5 総観規模の変動と日変動
- 2.6 乱流
- 2.7 最大瞬間風速
- 2.8 極値風速
- 2.9 現在の手法
- 2.10 複雑地形中の乱れ

解説

風車は風のパワーを電力に変換する装置である。また、風力エネルギーの密度は非常に低いため、風車は非常に大きな回転する空力構造物である。したがって、風の特性は、性能・発電電力量、ならびに、荷重・耐力の観点から極めて重要である。

風速の変動には、時間変動と空間的な変動がある。時間変動は、乱流、長期的変動、年間/季節変動などで特性づけられる。風速の出現確率分布は発電電力量や疲労において重要である。本書では、特に乱流に多くの紙面が割かれ、設計基準や設計ガイドラインに基づき、乱流の定義や扱い、主要な乱流スペクトル、空間的な風速のコヒーレンスなどが詳細に解説されている。また、極値統計理論による極値風速の計算法も紹介されている。

近年、風力発電の発電量予測は経済的に非常に重要になっている。欧州などでは、風力発電所の運用者は、発電電力のマーケティングの取り決めに応じて、15分または30分先から24時間または48時間まで、可能な限り正確に出力を予測する必要がある。また、発電不足または過剰な発電には罰金が科せられる場合があるため、風力発電所の運用者が次の期間における電力の約束量の決定において、予測の信頼性も重要である。その結果、現在、さまざまな洗練された予測法が開発・使用されている。複数の機関からの気象予報と、さまざまな方法から得られた結果を積み付けして予測の不確実性を推定するための機械学習やアンサンブル平均などの統計手法を組み合わせ用いることが多い。

3章 水平軸風車の空気力学

翻訳担当：前田 太佳夫

節目次

- 3.1 はじめに

- 3.2 アクチュエータディスクの概念
- 3.3 ロータディスク理論
- 3.4 アクチュエータディスクの渦円筒モデル
- 3.5 ロータブレード理論(翼素運動量理論)
- 3.6 アクチュエータライン理論
- 3.7 運動量理論が成立しない条件
- 3.8 ブレード形状
- 3.9 ブレード枚数の影響
- 3.10 失速遅れ
- 3.11 実際の風車に対する計算結果
- 3.12 性能曲線
- 3.13 定速運転
- 3.14 ピッチ制御
- 3.15 性能の理論値と計測値の比較
- 3.16 エネルギー取得量の推定
- 3.17 風車用翼型の設計
- 3.18 空力付加装置
- 3.19 空力騒音
- 付録 A3 翼型の揚力と抗力

解説

ロータは、風を動力として変換するものであるため、ロータの空力設計は、風車の性能のほか、主要な構造・機能部品の設計荷重にも大きな影響を与える。

この章では、運動量理論、翼素運動量理論、渦理論、アクチュエータラインモデルなど、水平軸風車で使用する空力計算法を網羅的に解説している。特に、風車の開発・設計によく使用される運動量翼素理論については、翼端/翼根損失モデルや Glauert 補正などの工学的な手法や、これらを使用した設計法についても紹介されている。渦理論に関しても詳細な説明があり、基本的な特性値は運動量理論や翼素運動量理論と共通で、非同一直面内での運動量変化や、空間や物体間の干渉などの渦理論特有の特性があることが述べられている。風車ロータの翼素運動量理論は、他の日本語の文献でも紹介されているが、渦理論に関して、本書のようにまとまった資料は他にみられない。

風車ロータの性能・特性の基本となる翼型(断面形状)は、風力発電の創成期には、航空機の翼型が使用されていた。しかし、航空機の翼型は比較的狭い条件で使用されるため揚力係数が低く、フライトごとにメンテナンスができるなどに対して、風車ブレードの翼型は、幅広い条件で高い性能を発揮する必要があるほか、軽量化の観点から構造設計に有利な厚翼や、失速特性が緩やかで、前縁コンタミネーションに感度が低いなど、要件が異なる。そのため、過去数十年間にわたり、主要な研究機関で風

車用の翼型の開発が行われてきた。

翼型の空力特性改善のためのデバイスが使用されることもある。ボルテックスジェネレータやストールストリップは、ストール制御風車のブレードの最大揚力の調整用に一般的に使用されてきた。また、ボルテックスジェネレータは、今日の大型の洋上風車においても、騒音への影響が小さい内翼部の揚力改善のために負圧側に、また、層流はく離の回避のために静圧側に装着される場合もある。ガーニーフラップも内翼部の揚力改善に効果がある。そのほかの、フラップ/エルロン、モーフィング翼、ジェットフラップなどは、将来のスマートロータの技術として研究されている。

騒音は風車設置における主要な制約の一つになっているが、風車から発生する最も重要な騒音源はブレードの空力騒音である。後縁セレーションは、後縁からの空力騒音の低減策として有効な手段の一つである。

4章 風車の空気力学に関するその他のトピック

翻訳担当：小垣 哲也

節目次

- 4.1 はじめに
- 4.2 定常なヨー状態における風車の空気力学
- 4.3 ヨー状態のロータの円形翼理論
- 4.4 非定常流
- 4.5 翼型の非定常な空力特性
- 4.6 動的失速
- 4.7 数値流体力学(CFD)

解説

前章では、正面・定常風における風車の空力解析・設計法を中心に解説した。しかし、実際には、ブレードとタワーとのクリアランスを確保するため、通常、ロータは上方に傾き(ティルト)を有しているし、風車は常に風向に追従できないため、ある程度の偏差を持って運転するため、風車ロータは風向に対して必ずしも正対しているわけではない。また、風の速度は時間的にも空間的にも変化する。本章では、ロータが風に偏差を持つ状態や、急速な流れの変化などにより生じるロータの非定常な空気力学を扱う。このような問題は数値流体力学(CFD)により解析することができるが、それには、膨大なリソースと時間を要するため、依然、前章で説明した翼素運動量理論の拡張や渦理論が有効である。

ヨー偏差やガストにおけるロータの空力特性において、翼型(ブレード断面)の動的特性も重要である。ここでは、

薄翼理論や各種動的失速モデルについて詳細に説明されている。

章の最後に、CFD について、基本的な支配方程式、解析法のほか、風車ならびに、ウインドファームにおける解析例も紹介されている。数値計算は、ハード/ソフト両面で急速に進歩しており、CFD の利用は今後も増加することが予想される。

5章 水平軸風車の設計荷重

翻訳担当：石原 孟

節目次

- 5.1 国内および国際基準
- 5.2 設計荷重の基本
- 5.3 乱流とウェイク
- 5.4 極値荷重
- 5.5 疲労荷重
- 5.6 ブレードの平均荷重

解説

風車は、IEC61400-1 などの国際的な設計基準や、ガイドラインにより設計される。本章では、冒頭で IEC61400-1 に基づき、風車の設計法の概要について述べられている。さらに、荷重の種類、終局荷重、疲労荷重、部分安全係数、ウェイクを含む風モデル、ならびに、極値荷重と疲労荷重の計算法が解説されている。風車は非線形性が強いシステムであるため、通常の上記の荷重解析法では、風車と風のモデルを定義したうえでの時刻歴の応答解析結果に統計解析を施すことにより、設計荷重を定義する。当然、これには膨大な作業と時間を要する。設計の過程では、解析モデルとそれによる設計結果には若干の差は避けられないので、モデル定義、荷重計算、設計のプロセスは、複数回繰り返す必要がある。ブレード荷重に関しては、空気力、慣性力、重力を考慮した解析的な手法も紹介されているが、このような手法は、設計サイクルの短縮に効果が見込める。

ブレードとタワーの固有振動数とモード形状の解析法、さらには、それらの連成に関するモード解析法が解説されている。さらに、回転構造体の共振を議論するうえで、ロータ速度に対する固有振動数と加振周波数を同一図上にプロットしたキャンベル線図は有用である。

近年、風車が急速に大型化・複雑化してきており、従来よりも精度の高い荷重計算が求められるようになった。それには、時刻歴の応答解析に加えて、統計処理にも高い確度が求められる。ここでは、極値統計理論の分布関

数(ガンベル分布, 対数正規分布, 3 パラメータワイブル分布, 一般化極値分布)とそれらの比較が紹介されている.

6章 水平軸風車の概念設計

翻訳担当: 今村 博

節目次

- 6.1 はじめに
- 6.2 ロータ直径
- 6.3 風車の定格
- 6.4 回転速度
- 6.5 ブレード枚数
- 6.6 ティータリング
- 6.7 出力制御
- 6.8 ブレーキシステム
- 6.9 定速, 2 段変速, 可変スリップ, および可変速運転
- 6.10 その他のドライブトレインと発電機
- 6.11 ドライブトレイン取り付け・配置方法
- 6.12 ドライブトレインコンプライアンス
- 6.13 タワーに対するロータ位置
- 6.14 タワー剛性
- 6.15 マルチロータ構造
- 6.16 増速流

解説

風車の概念設計において, まず決定すべき項目は, ロータ直径と定格出力である. ここでは, 主要諸元に対するコストモデルを定義して, 想定する風速出現確率分布において発電コストを最小化するシステムエンジニアリングの手法について紹介されている. ロータ面積に対する定格出力の比である比出力は, 特徴づけるパラメータであり, 一般に, 風速が低いサイトには比出力の低い風車が, 風速が高いサイトには比出力の高い風車がそれぞれ適している. また, 若干, 効率を犠牲にして発電時の荷重を低下させる低誘導係数ロータは, 設計上, 発電時の荷重が支配的なサイトには有効である.

設計における選択肢として, ロータ形式(ブレード枚数, ロータ位置など), ドライブトレイン形式(高速/中速/ダイレクトドライブなど), 発電機(かご誘導発電機/二重給電誘導発電機(DFIG)/巻線同期発電機/永久磁石同期発電機など), 出力・速度制御(定速・ストール制御/可変速・ピッチ制御など)などがある. それぞれの設計上の選択肢に対する得失があり, 各選択肢が他の別の領域にも影響するので, 型式の選定は非常に複雑な問題である.

今日, 大型の洋上風車に関しては, 可変速・ピッチ制御の優位性については異論がなく, 上記の選択肢にも, 既に選択肢にならなくなっているものも少なくない.

7章 要素設計

翻訳担当: 飛永 育男

節目次

- 7.1 ブレード
- 7.2 ピッチベアリング
- 7.3 ハブ
- 7.4 増速機
- 7.5 発電機
- 7.6 機械ブレーキ
- 7.7 ナセル架構
- 7.8 ヨー駆動装置
- 7.9 タワー
- 7.10 基礎

解説

本章では, 風車の主要な部品の設計法について述べている.

ブレードの設計には, 発電電力量の最大化, 終局荷重/疲労荷重に対する耐力, タワーとのクリアランス, 固有振動数, 軽量化, 低コスト化などの設計目標がある. これには, 空力設計はもとより, 材料(エポキシ/ポリエステル, GFRP/CFRP, 木材/コア材ほか), 構造設計, ならびに, 製造方法の全てが影響する. 本書では, モールドレイアウト, 樹脂の含浸方法, などの一般的な製造法, ならびに, ファイラメントワインディング, 翼根部の取り付け法, ならびに, セグメント構造などの新技術も紹介されている. また, 洋上風力においては, 雨滴, 雹, 砂などの浮遊固形物により発生する前縁エロージョンの問題が顕著になっている. 前縁エロージョンによって滑らかな翼表面が粗面化すると, 揚力の低下や抗力の増加を引き起こすため, 発電量の減少につながる. また, 極端な場合は, 構造強度が失われる.

ハブやナセル架構などの構造部品には, ロータのスラスト荷重, 各翼のスラスト荷重, 重力によるモーメントなどの組み合わせによる複雑な荷重が作用するため, 構造設計には, 有限要素解析が必要である.

増速機の役割は, ロータ速度を発電機速度まで増速することである. 定格出力 300 kW~5 MW の標準的な風車の定格時のロータ速度は 48~12 rpm であり, これには, 1:31~1:125 の増速比が必要となる.

タワーの設計においては、共振回避のための固有振動数の設定が重要である。基本的に、タワーの1次曲げ固有振動数は、ロータとブレードによる加振周波数を避ける必要があるが、定速制御よりは可変速制御、3枚翼ロータよりは2枚翼ロータの方が設定範囲は狭くなるので、注意を要する。また、鋼管タワーの設計法、ボルトフランジ、開口部などの設計法についても詳細に述べられている。

また、陸上風車の基本的な基礎形式である直接基礎、群杭基礎、コンクリートモノパイル基礎についても紹介されている。

8章 コントローラ

翻訳担当：吉田 茂雄

節目次

- 8.1 風車コントローラの機能
- 8.2 閉ループ制御：課題と目的
- 8.3 閉ループ制御：一般的な方法
- 8.4 閉ループ制御：解析的設計方法
- 8.5 ピッチアクチュエータ
- 8.6 制御システムの実装

解説

風車の監視制御においては、風車の運転状態、待機（外部条件が良ければ発電可能な状態）、起動、発電、停止、故障停止などの制御モードを定義する。監視制御では、ある状態から別の状態への遷移を決定するのと、それに必要なシーケンス制御を実行する。風車の閉ループ制御では、予め設定された動作曲線や特性を維持するように風車の動作状態を自動的に制御するソフトウェアベースのシステムで、発電機トルク制御、ピッチ制御、ヨー制御がある。

風車の安全システムは、重大問題が発生した場合や、発生する可能性がある状況において、風車を安全な状態（フルフェザー、遊転）にする。安全システムは、制御システムに不具合が発生した場合に優先的に動作する。そのため、安全システムは可能な限り制御システムから独立させ、冗長性と高い信頼性が確保されるように設計しなければならない。

可変速・ピッチ制御の風車では、定格未満の風速域において、風車は出力の最大化を目指す。ここで、最適なピッチ角は風速によりほとんど変化しないため、ピッチ角は固定させることが多い。その場合、最適な周速比は一定なので、トルク指令値を発電機速度の2乗に比例させることにより、最適な周速比に概ね追従することができる。

また、定格発電時には、発電機のトルク制御で出力またはトルクを一定に保ち、ピッチ制御で回転速度を目標値に保つ。また、風車の特性は非線形性が強いので、定格域の風速の指標となるピッチ角に対して、ピッチ制御のゲインスケジューリングを適用するのが一般的である。

可変速制御には、周波数コンバータを介して発電機の固定子を電力系統に接続する方法と、二重給電誘導発電機で、巻線発電機の固定子を直接電力系統に接続し、回転子もスリップリングと周波数コンバータを介して電力系統に接続するものがある。後者の場合の周波数コンバータは、回転子が分担する出力に相当する容量でよい。

風向は常時変動するため、風車を常時風に正対させることはできないため、発電電力量の最大化のためにはアクティブヨー制御が必要である。また、これ以外にも、起動時やケーブルのねじれ戻しなどにもアクティブヨー制御が必要となる。

風車の制御は荷重に対しても影響する。制御による荷重低減策として、発電機トルク制御によるドライブトレインの振れ振動の制御、コレクティブピッチ制御によるタワーのアクティブ制振、独立ピッチ制御によるロータ曲げの低減、ナセルライダーによる予測制御などがある。

本章では、代表的な制御工学的な手法による、閉ループ制御コントローラの設計法も簡単に紹介されている。風車の閉ループ制御には、設計と現場調整の容易さや認証の観点から、各種フィルタを組み合わせた古典制御を使用するのが一般的である。そのほかに、セルフチューニング制御、LQG/最適フィードバック、 H_∞ などのモデルベース制御、ファジー制御、ニューラルネットワークなどの現代制御が実機に適用されることはほとんどない。

また、章の最後に、コントローラの実装に必要な、離散化についての解説もある。

9章 ウェイクの影響とウインドファーム制御

翻訳担当：鎌田 泰成

節目次

- 9.1 はじめに
- 9.2 ウェイクの特性
- 9.3 アクティブウェイク制御法
- 9.4 ウインドファーム制御と電力系統

解説

風車は風からエネルギーを抽出すると、風車の背後に風速の低下と乱れ強度の増加を特徴とするウェイクを発生させる。そのため、ウインドファーム内で運転する風車

は、自由流中で運転する風車よりも発電電力量が低下し、より大きな変動荷重を受ける。これらのウェイクの影響は、ウインドファームの大規模化に伴い、重要性が高まっている。

ウェイク損失は風車間距離に大きく依存し、風速(風車のスラスト)、風向、大気安定度、ならびに、乱流強度の影響を受ける。IEC61400-1, ed.4 には、ウインドファーム内の乱れ増加に関する指針が示されている。

近年、アクティブウェイク制御、あるいは、ウインドファームフロー制御として知られるウインドファーム制御によりウェイクの影響を最小化する技術が注目されている。これは、個々の風車を設計通りに運転する代わりに、ウインドファームコントローラが個々の風車の運転に変更を加えることにより、ウインドファーム全体の経済性を最大化しようとするものである。

風車背後のウェイクは、単純に卓越風の下流方向に広がる静的な速度欠損場としては表せない。それは、ウェイクの中心線が、風車のヨーミスアライメントにより横方向に、また、ロータティルトとウインドシアーにより鉛直方向に、それぞれ変移動する可能性があるためである。また、ウェイク蛇行も発生する。

CFD により詳細な流れ場の解析が可能であるが、それには、大量の計算リソースが必要になる。ウインドファームのコントローラを設計およびテストするためには、半経験的なモデルが必要である。風車の翼の周りの詳細な流れをモデル化する代わりに、アクチュエータラインモデルにより、回転するブレード周りの流れ(力の反作用)を計算することも多い。また、風車をアクチュエータディスクモデルなどに単純化すると、計算負荷はさらに軽減するが、個々のブレードの影響は計算されない。

ウェイクの影響の評価として、エンジニアリングモデルと呼ばれる簡略化されたモデルが依然、広く使用されている。これには純粋に経験的なモデルから、ナビエ・ストークス方程式を簡略化したより物理的なモデルまで、さまざまなものがある。ウェイク速度欠損の最も単純なモデルは PARK または Jensen モデルである。これは経験的な角度でウェイクの幅を線形的に拡幅し、運動量の損失が風車スラスト推力に等しくなるようにするものである。ウェイク制御やウェイクの影響を受ける風車の荷重計算には、より現実的なモデルが提案されている。

ウインドファーム制御の代表的なものに、従来のセクターマネジメント、誘導速度制御、ならびに、ウェイクステアリング制御がある。ウェイクステアリング制御は、風車のヨーミスアライメントを調整することにより、ウェイクを下流側の風車から離すように制御する比較的新しい技術である。

なお、ウェイクにより風上側の風車によるウェイクの高い乱れと、それに起因する風の勾配により、下流側の風車の疲労荷重は増加する。ウェイクステアリング制御により、風下側の風車の疲労は改善するが、風上側の風車は通常の設計では想定しないような大きなヨー角で運転するため、疲労荷重が増加する可能性がある。いずれにしても、ウインドファーム全体の経済性による評価が必要である。

10 章 陸上の風車の設置とウインドファーム

翻訳担当: 出野 勝

節目次

- 10.1 事業開発
- 10.2 景観と視覚的影響の評価
- 10.3 騒音
- 10.4 電波障害
- 10.5 生態系調査

解説

陸上のウインドファームには、基礎とアクセス道路の建設、系統連系、風車建設用の敷設エリア、プロジェクトの開発と管理などが必要である。ウインドファームのコストはプロジェクトごとに異なり、市況の影響も受ける。系統連系、プロジェクト開発、管理などの固定費の低減のためには、大規模なプロジェクトが有利である。一方、単機の風車や小規模なウインドファームで地域の関与や利益が得られる計画は、容易に許可が得られることが多い。

ウインドファームの開発は、適地選定、事業性評価、事業計画(許認可)申請書の準備と申請、建設工事、運転、解体と用地復旧で構成する。それらのうち、技術的・経済的な成立性よりも、環境への配慮や、合意形成のための対話・相談がより難しい。

ウインドファームの開発においては、系統連系と電力の販売方法についても検討する必要がある。風力資源が豊富な地域は、人口密度が低く配電系統は弱いことが多いため、系統連系に必要な電力系統の強化に費用と時間を要する。他のウインドファームがすでに連系されている場合にはさらに難しい。

また、景観と視覚的影響への配慮により、発電電力量の妥協が必要となることが多い。ウインドファームの開発に対する個々の認識は、風車のサイズ、数、色などの物理的なパラメータだけでなく、風力発電に関する個々の認識によっても変化する。

風車からの騒音も重要な環境影響の一つである。技術

的には、風車からの騒音の低減技術とウィンドファームが発生させる騒音の予測技術がある。騒音の伝搬には、地表面、風と温度の変化による大気の不均一性、風の乱流などの影響を考慮する必要がある。

風車はさまざまな通信システムの基礎を形成する電磁信号に干渉する可能性があるため、電磁干渉に関しても十分評価する必要がある。風車の発電機、制御装置からは、電磁放射が発生する可能性があるが、適切なスクリーニングと抑制によって影響を最小限に抑えることができる。

また、ウィンドファームは生態系が重要な地域に建設されることがよくあり、環境影響評価書にはその地域の生態系に関する包括的な調査、生態系の保存、ウィンドファーム(建設工事中と操業中)の影響、ならびに、対策が含まれる。

11 章 風力発電と電力系統

翻訳担当：安田 陽

節目次

- 11.1 まえがき
- 11.2 風車の電気システム
- 11.3 ウィンドファームの電気システム
- 11.4 ウィンドファームの配電系統への接続
- 11.5 送電系統のグリッドコードと大規模ウィンドファームの接続
- 11.6 風力発電と発電システム
- 11.7 電力品質

解説

大規模なウィンドファームは高圧配電系統または送電系統に接続され、グリッドコードに従って設計される。大規模ウィンドファームの数や容量は増加しているため、風車の出力電力が系統周波数に影響を与え、系統との無効電力授受によって送電系統の電圧に影響を与えるようになってきている。そのような場合にも発電を継続させるためには、電力価格以外の商業的なメカニズムが必要になる。

ある程度までの容量の風力発電はマイナスの負荷とみなすことができるが、大規模なウィンドファームは電力系統の安全な運用に必要な事故時運転継続機能、電圧制御、ならびに、周波数応答に貢献することが求められる。供給する電力の電圧や周波数が、要求値から逸脱する可能性は高い。これらは過渡現象や短時間の変動(電圧降下や動揺など)から長期的な波形の歪み(フリッカ、高

調波、不平衡など)まで多岐にわたる。特に、コンピュータで制御された制御回路やパワーエレクトロニクス機器によるコンバータを含む高感度負荷機器の使用が増加しており、電力系統に起因する擾乱によって機器が誤動作すると商業的に影響を受ける需要家も認識しつつあるため、電力品質の重要性は高まっている。配電事業者から系統連系や継続運転の許可を得るうえで、風車が配電系統の電力品質を低下させないことは必要不可欠である。IEC 61400-21 で考慮されている主な項目は、電圧変動、高調波電流および高調波電流、系統電圧降下に対する応答、有効電力制御、無効電力機能および設定値制御、系統保護である。高調波電圧の歪みは風車の損失増加につながり、また制御システムの動作やパワーエレクトロニクス機器によるコンバータの性能に支障をきたす可能性がある。

ウィンドファームは、広大な敷地に設置された多数の風車による発電出力を、中圧集電系統によって集電される。大規模なウィンドファームでは、系統に及ぼす影響を評価し、風車を効果的に運転できるような系統条件を確保するために系統解析(潮流解析、事故解析、角安定度解析、電磁界解析)が必要である。

風力発電が電力系統に大量導入されると、火力発電から供給される正味負荷は減少するが、利用可能な電源の不確実性は増加する。そのため、風力発電の出力予測は、系統運用において非常に重要となる。風力発電の出力を予測する方法には、統計的モデルと物理モデルがある。統計的予測モデルは、大量のデータを使って、過去の出力と気象の関係を求め、数値気象予報に基づき出力を一律に予測する。物理的予測モデルは、ウィンドファーム内の風の流れと風車の出力曲線を表現する。この手法は、局所的数値気象予報モデルによる風速予測を、48 時間の時間範囲で 8 時間毎に、概ね 20 km 四方のグリッドで実施する。次に、この風速予測をウィンドファームのサイト内の風車高さに変換する。平坦な地形では空間内挿法で行われるが、より複雑な地形ではメソスケールモデルが用いられ、CFD のマイクロスケールモデルと併用される場合もある。

雷は風車にとって重大な危険要因であり、特にブレードや構造物を直撃雷から保護し、電気および制御システムを直撃と誘導過電圧の両者から保護するために、適切な保護手段を講じる必要がある。風車の雷保護に関する規格は、IEC 61400-24 に示されている。雷事故の大半は制御システムと電気システムに関するものだが、ブレードの損傷は修理費用が最も高く、風車稼働率への影響も大きい。ブレードに直撃した雷がブレードの外皮を貫通してアークを形成すると、ブレードを噴破させたり、ブレード構

造に亀裂を生じさせたりすることがあるため、雷を保護システムに直接着雷させ、適切な断面積を持つ金属導体でブレードの長手方向に安全に導通させることが不可欠である。さらに、雷電流をピッチ、主軸、ヨーの各軸受を安全に通過させ、ナセル内の発電機や制御機器を損傷しないようにする必要がある。

12章 洋上風車と洋上ウインドファーム

翻訳担当：嶋田 健司, 安田 陽(12.10のみ)

節目次

- 12.1 洋上ウインドファーム
 - 12.2 洋上の風力エネルギー賦存量
 - 12.3 設計荷重
 - 12.4 風車サイズの最適化
 - 12.5 洋上風車の信頼性
 - 12.6 着床式支持構造:概要
 - 12.7 着床式支持構造
 - 12.8 浮体式支持構造物
 - 12.9 洋上ウインドファームの環境影響評価
 - 12.10 洋上集電・送電システム
- 付録 A12 発電コスト

解説

洋上ウインドファームのメリットは、環境・社会への影響を抑えながら、広大なエリアを利用できること、超大型の風車をサイトまで直接海上輸送することができること、平均風速が高く、高い設備利用率が得られること、風の乱れが小さいこと、電力消費地に近いことなどである。一方、設置・運用コストが高いことや、開発・建設に時間がかかることがあることがデメリットである。

着床式洋上風車にこれまで用いられてきた基礎のうち、モノパイルが約80%を占め、ジャケット(～15%)と重力式(～5%)がそれに続く。水深30～35mまではモノパイルや重力式基礎中心だが、より水深の大きい海域でも経済性に優れたモノパイル基礎を適用するための研究が進められている。特に、本書では、モノパイル基礎の設計について詳細に紹介されている。

洋上風車の設計には、IEC61400-3などの設計基準があり、同基準に基づき、風、海象、風車の運転状態などの組み合わせで、荷重ケースが定められている。風の条件については、2章や5章にも述べられているが、波浪などの様々な海象条件については本章で詳細に説明されている。

洋上構造物に作用する波荷重の計算には、水深や波

長に対して波高が低い場合には、Airy 波(線形)理論が使用されるが、波高が相対的に高くなると、Stokes 波やDean の流れ関数などの非線形理論を用いる必要がある。波長に比べて小さい部材の荷重はモリソン式により求められるが、部材が大きくなると、波の回折を考慮して、構造の各面に作用する変動波圧を数値的に求める必要がある。

風車の部品に不具合が発生した場合には、かなりの時間停止する必要がある。特に、洋上風車の場合には、風車へのアクセス自体に時間と費用がかかる。天候にも大きく左右され、停止時間が長くなるので、洋上風車には陸上風車よりも1桁高い信頼性が必要である。安全性確保の最終的な手段として冗長性を持たせることも必要不可欠である。また、状態監視により初期不良が故障に至る前に検知できれば信頼性は向上する。

水深が大きくなると、着床式基礎のコストは急激に大きくなるため、浮体式支持構造物に注目が集まっている。浮体式支持構造は、主な安定化原理によって、スパーク型、バージ型/セミサブ型、ならびに、テンションレグプラットフォーム(TLP)に分類される。

浮体式洋上風力発電には、水深の大きい場所を利用できるほかに、風車設置場所の水深や地盤の状態に合わせて支持構造を調整する必要がないため、波浪条件の似たすべてのウインドファームに同じ設計のものを設置することなどのメリットがある。また、風車を岸壁や保護水域で設置することができるため、天候に左右されにくく、外洋でSEP船を用いる必要がない。その一方で、また、浮体式構造物の6自由度の応答解析は、着床式構造物より格段に複雑で、海底に係留用のアンカーを設置し、アンカーと浮体式構造物を接続する必要がある。

洋上ウインドファームは、海洋環境にかなりの影響を及ぼす可能性があるため、陸上の大規模ウインドファームと同様、建設と運転の許諾申請に先立って、環境影響評価が必要になる。

ほとんどの大規模な洋上ウインドファームは、交流送電を採用しているが、送電距離が長い(50～70 km以上)大規模なウインドファーム(300 MW以上)では、高電圧直流(HVDC)送電の方がより低コストになる。

結言

風力エネルギーハンドブックは、約850ページ(原著は約1000ページ)にわたり、風力発電に関するあらゆる側面について詳細に述べられている。その中で、学術的な基礎的な内容については普遍性があるものの、最新の技術、基準、情報、ならびに、国・地域固有の特性や要件などは、必ずしも反映されていない。これらの部

分に関しては、適宜、関連の情報で補いながら読み進めていただきたい。

本翻訳作業を進めてきた間、国内の風車メーカーの撤退や洋上風力の本格化など、国内の風力業界に大きな状況変化があった。前者は、風車に関する詳細な情報や技術力の低下・散逸が、後者は、風力発電の計画、開発、運転・保守に関わる技術者の不足が懸念される事態である。いずれにしても、本書の社会的な価値や意義は、着手した当初よりも高くなっていると認識している。

合理性を追求すると、研究、設計、ならびに、開発などは、専門分野の縦割りになりがちだが、問題解決やイノベーションは分野間をまたがる領域で生まれることが少なくない。そのような意味で、風力発電にかかわる全ての技術者・研究者には、本書は専門分野に関わらず、大凡理解していただきたい。

本事業では、日本風力エネルギー学会のホームページ(<https://www.jwea.or.jp/>)上で、講習会に代わって、読者の積極的な学習を支援するサービスを提供する。これを活用して、我が国の技術者・研究者の質の向上と量の拡大を支援したいと思っている。

なお、本稿は、文献[3]の一部を加筆・修正したものである。

謝辞

本文中に記載した各章の担当者には、翻訳にご尽力いただいた。また、森北出版の上村沙帆氏には、今回の発刊の機会をいただき、鈴木遼氏には、丁寧な編集をしていただいた。また、日本風力エネルギー学会の玉田眞二氏には、本書の普及事業にご尽力いただいた。

参考文献

- [1] Burton T.L., Jenkins N., Bossanyi E., Sharpe D., Graham M., Wind Energy Handbook, ed.3, Wiley, 2021.
- [2] 吉田茂雄(監訳), 風力エネルギーハンドブック(第3版), 森北出版, 2025.
- [3] 吉田茂雄, 風力エネルギーハンドブックの概要, 風力エネルギー, 48(3), 2024, 415-422.