

風力発電の出力予測技術の現状と将来展望

東京大学大学院工学系研究科

石原 孟, 山口 敦

1. はじめに

風力発電は風の状況により出力が変動するため、風力発電量が増えると、需給のバランスが常に要求される電力系統に影響を与える。我が国の風力発電導入量は現在世界 8 位であり¹⁾、地域によっては欧州と同じ導入レベルに達している。平成 17 年度中に北海道電力管内では風力発電導入量が系統容量の約 5%に達する見込みであり、電力品質維持が困難となる可能性などが出てきたため、当該地域において風力発電の導入に対して制限が設けられている。

経済産業省がまとめた風力発電系統連系対策小委員会の平成 16 年度中間報告書²⁾によれば、電力系統安定化対策として7つのオプションが挙げられており、その 7 番目のオプションとして気象予測に基づく風力発電量予測システムであり、その導入が検討され始めている。一方、風力発電の導入が多い国であるデンマーク、ドイツ、スペインなどでは既に電力系統の安定運用のために風力発電量の短期予測が行われてきている。

本稿では現在世界における風力発電予測の現状を紹介し、今後日本において風力発電量予測を行う際の技術課題とその将来展望について述べる。

2. 風力発電量予測について

風力発電出力予測技術を述べる前に、まず風力発電の変動性と予測性問題について考えてみたい。風力発電の変動性問題とは風力発電の長周期変動に起因する軽負荷時(夜間等)における EDC (Economic Dispatching Control) 領域での調整力不足、風力発電の短周期変動に起因する LFC (Load Frequency Control) の領域での調整力不足問題である。一方、風力発電の予測性問題は風力発電量予測が行われていないこと(風力の出力全体が誤差となる)により、需給予測の精度が低下し、結果的に EDC 領域と LFC 領域での調整力不足を引き起こすという問題である。風力発電出力予測技術は風力発電出力の予測性を改善する技術であり、出力変動を直接吸収したり、回避したりすることができないため、風力発電の変動性を対象とする対策と一緒に実施する必要がある。

現在、風力発電量予測は主に2つの時間スケールに対して行われている。一つは翌日予測であり、系統運用者が翌日需給運用計画を策定するため、あるいは発電事業者が電力市場に電気を売るために、指定された時間(例えば正午)までに、翌日1日の30分ごとの発電量を予測するものである。二つ目は当日予測であり、系統運用者または発電事業者が電力系統の当日運用を支援するために30分~1時間

毎に十数時間先、例えば、15時間先までの30分ごとの発電量を予測するものである。

また風力発電量予測システムはウインドファームに対して行うものと、電力系統制御エリアに対して行うものに大別される。発電事業者が電力市場において売電するためには、自分が所有するウインドファームに対してのみ発電量予測を行えばよいが、電力系統運用者が需給計画策定あるいは当日運用を行うためには、電力系統エリア全体における発電量の予測が必要となる。



図1 ウィンドファーム発電量予測システム

図1はウインドファーム発電量予測システムの構成要素を示す。左から順番に入力、予測モデル、出力を示す。入力部では気象予測機関が提供する数値気象予測値およびウインドファームから収集された風向・風速、発電量などのデータを受信し、モデルの部分に送る。次に予測モデル部ではこれらのデータを用いて、物理モデルによるダウンスケーリングや統計モデルによる予測値の補正を行い、各風車そしてウインドファーム全体の発電量を求める。更に信頼性範囲を評価する。最後に、予測された発電量は出力部において翌日予測、当日予測の形で整理され、E-mail、Web、FTPなどを用いて配信される。

図2には電力系統制御エリア内の総発電量予測システムの構成要素を示す。電力系統内の全てのウインドファームにおいて発電量予測が行われることが望ましいが、現実には小規模のウインドファームにおいて発電量予測を行うことは難しいため、代表的なウインドファームについて発電量予測を行い、アップスケーリングと呼ばれる作業を通じて電力系統制御エリア内の総発電量予測を行う。

以上のように、風力発電量予測システムには、予測精度を向上させるため、様々な物理モデルと統計モデルの組み合わせにより構成されていることがわかる。さらに、予測は

リアルタイムに行う必要があるため、データ収集から予測・配信までの一連の作業が全自動化される必要があり、実行速度と高い信頼性が要求される。



図2 電力系統制御エリア内発電量予測システム

3. 風力発電出力予測の現状

風力発電量予測に関する研究開発は、欧州を中心に1990年代初期から盛んに行われてきており、その経緯はGiebel³⁾によって詳細にレビューされている。表1にヨーロッパ各国における代表的な風力発電量予測システムの一覧を示す。デンマークにおいては、デンマーク工科大学 IMM 研究所および RISOE 国立研究所、ドイツではカッセル大学 ISET 研究所、スペインではカルロス III 世大学などで政府や EU の支援を受けて発電量予測モデルの研究開発が行われてきており、その成果は現在広く電力系統運用者によって使われている。なお、近年発電事業者が予測の義務を課せられる例も増えており、風力発電事業者による導入も進んでいる。

表1 欧州における風力発電予測システムの研究開発

時期	国	予測システム名	開発機関	サポート
1990~	デンマーク	WPPT Predictor	デンマーク工科大学 IMM 研究所 RISOE 研究所	政府, EU
1992~	ドイツ	WMEP	カッセル大学の ISET 研究所	政府
2000~	スペイン		カルロス III 世大学他	政府
1999~	EU	MORE-CARE	アテネ工科大学他	EU
2002~	EU	ANEMOS	EU 各国の大学, 研究機関, 系統運用会社, 風力発電事業者	EU

一方、日本国内における研究開発の状況は経済産業省の平成16年度調査研究報告書⁴⁾に詳しくまとめられている。2000年以後、電力会社を中心に、気象サービス会社、大学などの研究機関が共同で、風力発電量予測システムの研究

開発に取り組んできた。しかし、これらの研究開発はまだ実用化されておらず、風力発電量予測結果を系統運用に反映させた実証試験もないのが現状である。従って、我が国においても、早急に電力会社、風力発電事業者、大学などの研究機関、気象サービス会社が参加した国レベルの研究開発を実施することが望まれる。

4. 風力発電出力予測例

日本における風力発電量予測としては、東京電力と東京大学が共同で実施した八丈島風力発電所における発電量予測⁵⁾が挙げられる。図3に八丈島の鳥瞰図と風力発電所の位置を示すが、八丈島風力発電所は三原山中腹に建設されているために、複雑地形が予測精度に与える影響を調べるのに適している。また毎年多くの台風が八丈島付近を通過し、台風などの極端な気象現象の影響を調べることが出来ると期待されている。

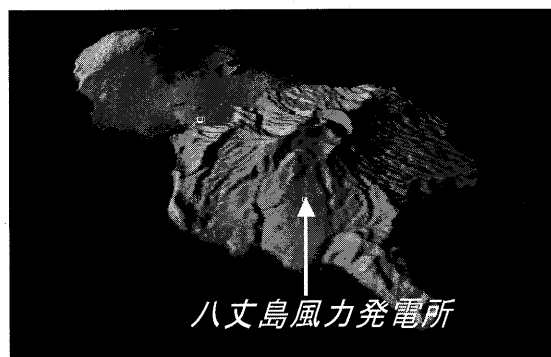


図3 八丈島風力発電所の位置

八丈島発電所において観測された風向・風速、発電量、風車の運転状況などの観測データはインターネットを通じてリアルタイムに東京大学に送信される。これらのデータは当日又は翌日発電量予測に用いられるとともに、データベースに蓄積され、実際のパワーカーブの作成に使用される。図4は観測された風速と発電量の関係を示す。メーカーが提供しているパワーカーブと大きな乖離が見られ、実測値によるパワーカーブの作成は、予測精度を向上させるには不可欠であることがわかる。更に、蓄積されたデータは予測精度の検証データや当日予測にも利用される。

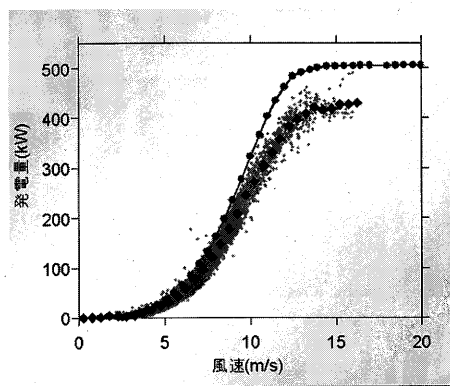


図4 実測とメーカー提供パワーカーブとの比較

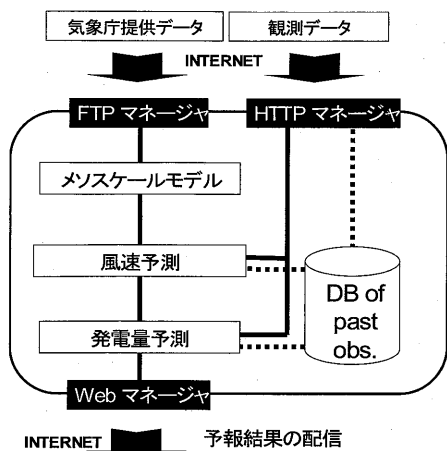


図5 本研究で構築した予測システム

図5に本研究で構築した予測システムを示す。まず、システムの入力値は気象庁提供の数値気象予報データ(GPVデータ)と風力発電所における風向・風速・発電量の実観測データであり、双方のデータともインターネットを通じリアルタイムの取得が可能である。本研究ではGPVデータとして水平空間解像度20km, 時間解像度3時間のRSMデータを用いた。次にメソスケール気象モデルにより、気象庁提供の数値気象予報データを水平スケール1km程度まで空間的にダウンスケーリングする。最後に過去の観測から得られた風速と発電量との関係(パワーカーブ)により発電量を求める。また、当日予測のためにリアルタイムに風速・発電量の観測データを取り込むことが可能となっている。

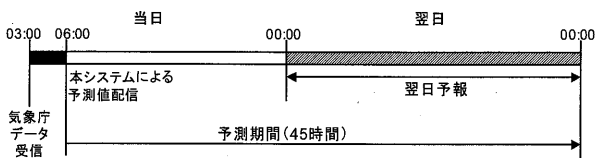


図6 予測システムのスケジュール

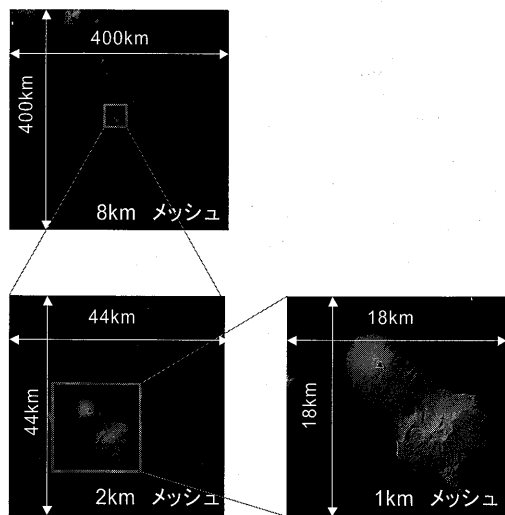


図7 メソスケールモデルの計算領域

発電量予測はオンラインで行われるために、データ受信、解析、送信などの一連の作業に関するスケジュールが大変重要となる。図6に午前3時に気象庁から配信される

GPVデータを使用した場合のスケジュールの例を示す。データを受信してから並列計算まで2時間半で予測が終了し、5時半に配信が可能であり、東京電力管内の急激な需要増加が起きる6時からの当日運用、さらに午前9時から行われる翌日運用計画作成に利用できることがわかる。

気象庁提供のRSM数値気象予報データは水平解像度が20kmであり、対象地点近傍の複雑地形を十分に再現できない。そこで、本研究ではメソスケール気象モデルとしてコロラド大学で開発された地域気象モデルRAMS (Regional Atmospheric Modeling System)を用い、3段階にネステイングされたグリッドにより、水平解像度1kmの解像度を持つ予測値にダウンスケーリングを行った(図7)。

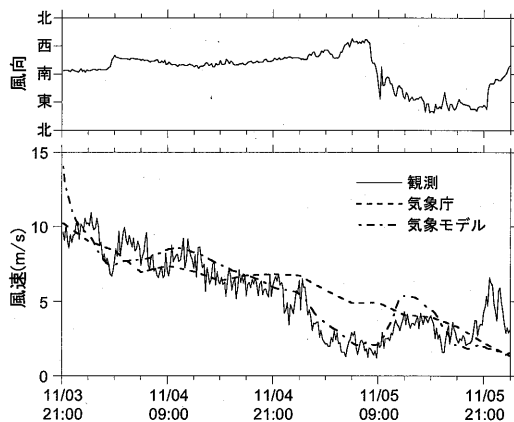


図8 八丈島風力発電所における風向と風速の予測

このようなダウンスケーリングにより、予測精度が改善された一例を示す。図8には気象庁提供の水平解像度20kmのRSMデータを風車地点に内挿した予測値と、メソスケールモデルRAMSにより水平解像度1kmまでにダウンスケーリングした予測値を観測値と比較したものを示す。11月3日21時から4日21時付近までは風速が徐々に減少しているが、両者ともこの現象をよく捉え、観測データと同じ傾向が見られる。ところが、観測データによると11月4日21時過ぎに風向が西から北に変化した際に風速が大きく減少しているが、気象庁提供のRSMデータはこの現象を捉えられていないのに対し、地域気象モデルRAMSによりダウンスケーリングした予測値はこの現象を捉えている。これは風力発電所の北側に位置する三原山による風速の減少の効果を、気象庁提供の予報データが予測できないためである。この結果、翌日発電量予測の平均絶対誤差(Mean Absolute Error)は27%から17%に減少した。このことから、日本における複雑地形中の発電量予測のためには水平スケール1km程度にまでダウンスケーリングする必要があることがわかる。

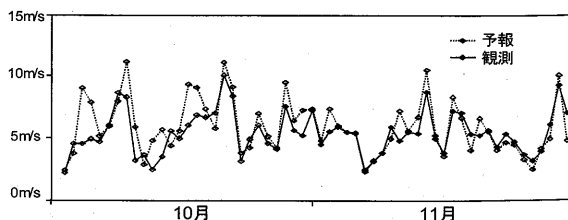


図9 八丈島風力発電所における日平均風速

しかし、気象シミュレーションによるダウンスケーリングを行っても精度が改善されない日も多く見られる。図9に10月と11月の日平均風速を示す。翌日予測値は概ね気象現象を的確に予測しているが、10月初期に風速を大幅に過大評価している日がある。これは気象庁提供の予報データが、台風の到来を実際よりも早目に予報したためであり、今後の予測精度の向上には台風到来時期の予報精度の向上が望まれる。

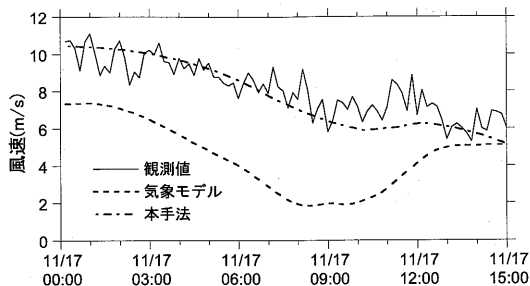


図10 11月17日00時における風速の当日予測

数値気象予報データに基づき、気象モデルにより求めた予測値は気象現象の時間変化を再現しているが、必ず誤差を伴う。一方、予測初期においては最新の観測値を予測値とすれば予報誤差はなくなる。そこで、本研究では気象モデルによる予測値と、最新の観測データを組み合わせることにより短期予測精度の改善を試みた。図10は11月17日午前00時における当日予測を示す。気象モデルによる予測では予測初期に大きな誤差が見られるが本研究で提案した手法により最新の観測値を取り込むことにより短期予測の誤差が減少する。

5. 今後の展望

以上のように、日本で風力発電量予測システムを開発する際には以下の3つの技術課題が残されている。

- 1) 複雑地形の影響を再現するための高速・高解像度のダウンスケーリング手法の提案(地理的要因),
- 2) 台風などの極端な気象現象に対する高精度な予測手法の開発(気象的要因),
- 3) 風力発電量モニタリングシステムの構築による短期発電量予測精度の向上

また予測システムの開発に当たって、季節、場所による発電量予測の不確実性要因の解明や予測発電量の信頼性範囲の明確化が必要である。今後、風力発電出力予測に関する研究開発を行う際には以上に述べた諸問題を克服し、日本に適した予測システムを開発されることが望まれる。

第2節にも述べたように、風力発電予測技術は風力発電出力の予測性を改善するものであり、風力発電出力の変動性を抑制するため、表2に示されている各周波数変動対策と一緒に使う必要がある。表2に示すように、風力発電量予測技術は1番の対策である「風力発電連系可能量の正確な把握」にオフラインで利用され、2番～5番の対策にオフラインとオンラインの形で利用される。

表2 風力発電量予測技術の利用形態

オプション番号	対策内容	利用形態	
		オフライン	オンライン
1	風力発電連系可能量の正確な把握	○	×
2	調整力の拡大に向けた電源運用	○	○
3	風力発電機の解列・出力抑制	○	○
4	会社間連系線の活用	○	○
5	蓄電池の導入	○	○

図11には風力発電量予測技術利用の将来像を示す。風力発電量予測技術のオフライン利用により、風力発電連系可能量を正確に把握でき、それに基づき、必要な蓄電池の容量や風力発電機の解列・出力抑制の回数、会社間連系線の活用方法などを検討できるようになる。そして、風力発電量予測技術のオンライン利用により、風力発電量の予測結果を電源運用と系統運用に織り込むと共に、蓄電池による短周期変動と予測誤差の吸収並びに風力発電機の解列・出力抑制と会社間連系線の活用による長周期変動の回避を実現する。

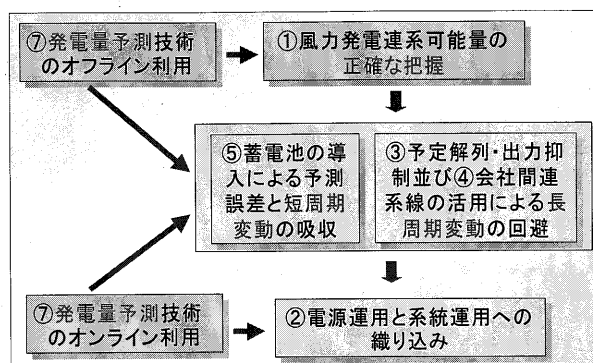


図11 風力発電量予測技術利用の将来像

参考文献

- 1) Operating wind power capacity, *Wind Power Monthly*, Vol. 21, No. 4, p. 66, 2005.
- 2) 風力発電系統連系対策小委員会中間報告書, 経済産業省, 2004.
- 3) G Giebel, *The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power*, Project ANEMOS, 2003.
- 4) 新エネルギー等電力市場拡大促進対策基礎調査等(気象予測に基づく風力発電量の予測システムに関する調査)報告書, イー・アンド・イーソリューションズ(株), 2005.
- 5) 山口敦, 甲斐悠資, 石原孟, 福本幸成, 気象シミュレーションと現地観測データに基づく風力発電量予測システムの構築と検証, *日本風工学会誌*, Vol. 30, No. 2, pp. 241-242, 2005.