

電力系統制御エリアを対象とした 新しい風力発電出力予測モデルの開発*

A New Model of Wind Power Prediction for Control Area

石原 孟** , 山口 敦** , 小川 豪** , 酒井 和也** , 藤野 陽三**
Takeshi ISHIHARA , Atsushi YAMAGUCHI , Takeshi OGAWA , Kazuya SAKAI , Yozo FUJINO

1. 緒言

風の変動に伴う風力発電の出力変動に起因する電力系統の周波数変動問題を解消するために、気象予測に基づく風力発電出力予測システムの導入が提案されている。

筆者らの研究^[1]により、当日短時間予測の予測精度を高めるためには、発電出力予測手法に動的適合モデルを用いるのが有効であるとの結論が得られている。また、電力系統制御エリア(以下、エリアとする)の風力発電出力予測時、エリア内全てのウインドファーム(以下、WF とする)の発電出力情報を取得することは難しい。このため、エリアの風力発電出力予測を行うには、そのエリアにおける代表的な WF の発電出力予測値に基づき予測する必要がある。

そこで、本研究では、統計モデルに含まれるパラメータを、動的に推定する動的適合モデルを開発し、新しいモデルの予測精度の検証を行った。また、エリアの風力発電出力予測値およびその信頼区間を算出するための手法について提案し、発電出力予測を実施する代表的な WF 数の違いによるエリア総発電出力予測精度の変化を検証した。

2. 動的適合モデルによる発電出力予測の提案

(1) 発電出力予測手法

本研究で動的適合モデルを組み込む東京大学モデルは、まず、過去の風速の予測値と WF 総出力の観測値から WF パワーカーブを求める。次に、広域地形、土地利用データを境界条件とし、気象庁 RSM 予報値を基に、メソスケール気象モデル(RAMS)で水平解像度が 1km の風向・風速をネスティングにより予測する。これらの値を基に(1)式により WF パワーカーブによる発電出力を予測する。最後に、WF パワーカーブによる発電出力予測値とオンライン観測データを組合せ、(2)式により WF の総発電出力を補正する。

$$P_{t+k}^{pc} = f(u_{t+k}^{pred}) \quad (1)$$

$$P_{t+k}^{pp} = a(k)P_t^{meas} + b(k)P_{t+k}^{pc} \quad (2)$$

ここで、 P_{t+k}^{pc} は時刻 $t+k$ におけるパワーカーブモデルによる発電出力予測値、 u_{t+k}^{pred} は風速予測値、 P_{t+k}^{pp} は時刻 $t+k$ における発電出力予測値、 P_t^{meas} は時刻 t における発電出力実測値である。ただし、本研究では文献[1]と異なり $a(k)$ および $b(k)$ については、忘却係数付き逐次最小二乗法^[2]を用いて、過去の観測データにより、動的に求めた。

(2) 発電出力予測結果

動的適合モデルによる発電出力予測手法の有効性を確認するため、東北地方の 6 箇所の WF(図 1)における 2005 年 2 月、4 月、7 月、10 月のデータを用いて発電出力予測を行い、実測データと比較することにより検証を行った。また、比較のために、静的モデルによる予測を行った。静的モデルでは(1)式中の $a(k)$ および $b(k)$ を 2005 年 1 年のデータから上記 4 ヶ月を除いた 8 ヶ月分のデータを用いて、最小二乗法により求めた。なお、以降に述べる当日予測・翌日予測の定義や誤差の算出方法は文献[1]を参照いただきたい。

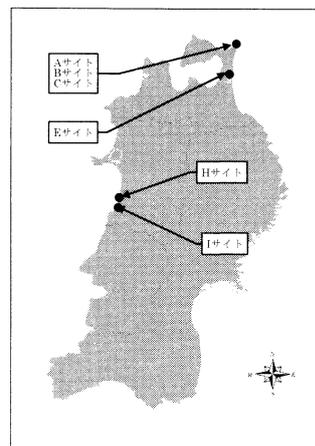


図 1 発電出力予測対象 WF の位置

* 第 28 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16

図2に2005年2月におけるAサイトの予測誤差(RMSE)を示す。横軸は当日予測の場合予測時間、翌日予測の場合時刻、縦軸は予測誤差をWFの定格出力で無次元化した値(%)である。当日予測6時間先のRMSEを静的モデルと動的適合モデルと比較すると、それぞれ15.1%、13.2%となり、動的適合モデルにより誤差が1.9%減少することが示された。同様に翌日予測24時間平均では、それぞれ19.1%、16.6%となり、2.5%改善された。これらの傾向は他の季節、WFでも確認できた。

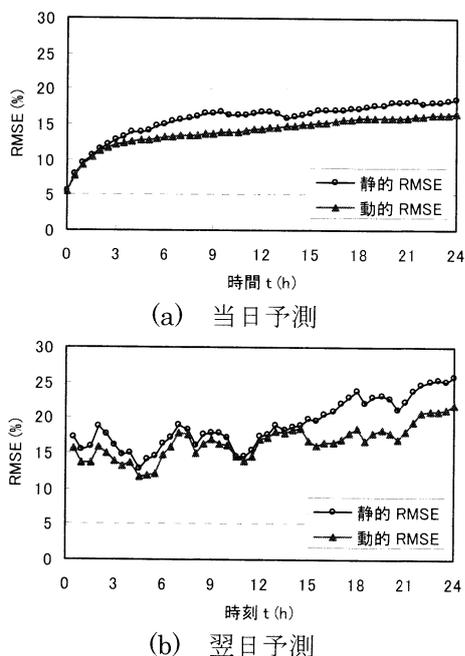


図2 Aサイトの平均二乗誤算(2005年2月)

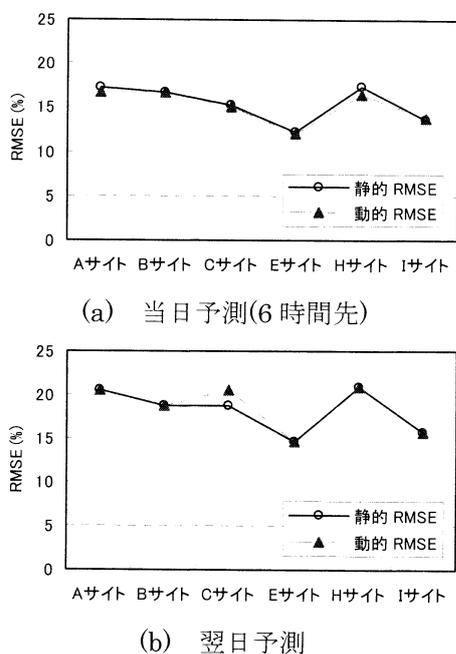


図3 各WFの平均二乗誤算(2, 4, 7, 10月の平均)

図3には各WFにおける2005年2,4,7,10月4ヶ月間の平均予測誤差を示す。当日予測6時間先では、全WFで誤差が改善されたが、翌日予測では、誤差の改善はあまりみられなかった。

3. 電力系統制御エリアの発電出力予測

エリアの風力発電出力予測を実施する場合、そのエリアにおける全てのWF発電出力情報を取得することは難しい。このため、一部の代表的なWFの総発電出力の観測値と予測値を元にエリア全体の総発電出力を予測する必要がある。本研究ではこの代表的なWFを予測WFとよび、その他のWFを非予測WFとよぶ。ここでは、予測WFの情報を元にエリアの総発電出力を予測するアップスケーリング手法について説明する。

(1) アップスケーリング手法の提案

予測WFの発電出力予測値からエリアの発電出力を予測する式(2)を次式に示す。

$$P_{area}(t) = \left(1 + \frac{P_{rate}^{free} \cdot UT^{free}}{P_{rate}^{ref} \cdot UT^{ref}} \right) \cdot P_{pred}(t) \quad (3)$$

$$UT^{ref} = CF^{ref} \cdot OT^{ref} \quad (4)$$

$$UT^{free} = CF^{free} \cdot OT^{free} \quad (5)$$

ここで、 $P_{area}(t)$ はエリア発電出力予測値、 P_{rate}^{ref} は予測WFの定格出力、 P_{rate}^{free} は非予測WFの定格出力、 UT^{ref} は予測WFの設備利用時間、 UT^{free} は非予測WFの設備利用時間、 $P_{pred}(t)$ は予測WFの発電出力予測値である。また、 CF^{ref} は予測WFの設備利用率、 CF^{free} は非予測WFの設備利用率、 OT^{ref} は予測WFの設備利用率計算対象期間の歴時間、 OT^{free} は非予測WFの設備利用率計算対象期間の歴時間である。

なお、通常、観測を行わないWFの設備利用率を得ることは出来ないため、本研究では予測WFと非予測WFの設備利用率は等しいと仮定した。この場合、(3)式は(6)式ようになる。本研究では(6)式を利用し、アップスケーリングを実施した。

$$P_{area}(t) = \left(1 + \frac{P_{rate}^{free}}{P_{rate}^{ref}} \right) \cdot P_{pred}(t) \quad (6)$$

なお、電力会社がアップスケーリングを実施する場合、買電電力量のデータから系統に連系されている全WFの設備利用率の実績値を求めることができるため、(2)式を直接利用することが可能である。デンマークにおいてはこの手法が用いられている。

(2) アップスケールリング結果

アップスケールリングによるエリアの発電出力予測に際しては、第2節と同様、図1に示す6WFにおける2005年2,4,7,10月のデータを用い、予測WF数を1~6に変化させ、予測WF数がエリアの予測誤差に与える影響を評価した。予測WFは、エリア内においてそのWFが地理的に分散することを考慮して、表1に示すように設定した。ここではエリアのWF数は6であるため、予測WF数が6箇所の場合、各WFの予測値を単純に加算することになる。

表1 予測WFの組合せ

予測WF数	1	2	3	4	5	6
予測WF	A	A,H	A,E,H	A,C E,H	A,C,E H,I	A,B,C, E,H,I

予測WF数を1箇所、3箇所および6箇所としてアップスケールリングした場合の2005年2月におけるエリアの発電出力予測結果を図4に示すとともに、その予測誤差を図5に示す。

予測WF数が1箇所の場合、6箇所の予測結果と大きく異なるが、予測WF数が3箇所の場合、6箇所の結果とほぼ同様の結果が得られた。この傾向はどの予測時間においても確認することができた。

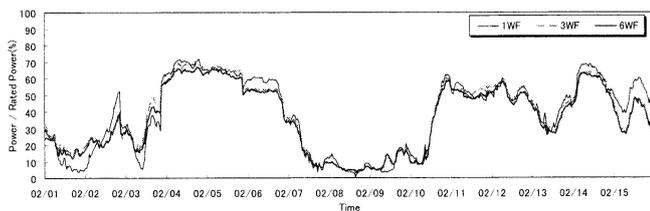


図4 アップスケールリングによるエリアの発電出力予測時系列(2005年2月 当日6時間先予測)

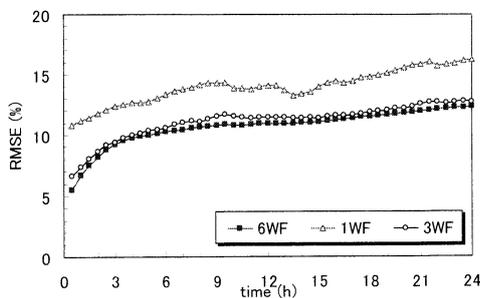


図5 アップスケールリングによるエリアの発電出力予測誤差(RMSE) (2005年2月 当日予測)

図6に2005年2月における予測WF数の違いによるエリアの発電出力予測誤差の変化を示す。予測WF数が3箇所以上の場合、エリア6WFの値に近づく結果となっている。このことから、本手法では最適な予測WF数が存在することが示され、この例ではその値が3箇所であることが分かる。

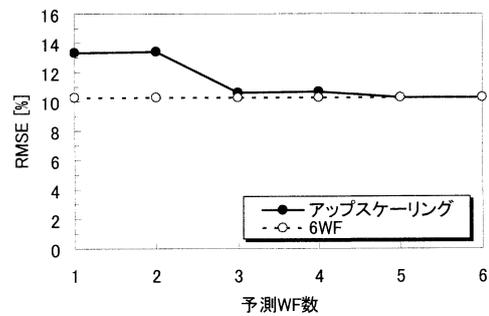


図6 予測WF数の違いによるエリア発電出力予測誤差の変化 (2005年2月 当日6時間先予測)

4. 電力系統制御エリアの予測誤差の推定

エリアの発電出力予測値の信頼区間を算定する手法の一つとしてエリアの発電出力予測誤差(標準偏差)を利用する方法がある。エリアの発電出力予測誤差についても予測WFの予測誤差からアップスケールリングにより算出するが、発電出力予測値のアップスケールリングと同じような方法で求めることは出来ない。これはエリアの予測誤差は、WF間の予測誤差に関する相関が小さくなる程、誤差が相殺され小さくなるので、各WFの予測誤差を単純に足し合わせることは出来ないためである。

本節では、各WF間の予測誤差の相関を考慮することにより、エリアの発電出力予測誤差を推定する手法を提案する。

(1) エリア発電出力予測誤差の推定方法の提案

エリア発電出力予測誤差(σ_{area})は、各予測WFの予測誤差(σ_i)とWF間の予測誤差の相関係数(r_{ij})を用いて(7)式により近似できる^[3]。

$$\sigma_{area} \approx \sqrt{\frac{1}{N_{area}^2} \sum_{i=1}^{N_{area}} \sum_{j=1}^{N_{area}} \sigma_i \sigma_j r_{ij}} \quad (7)$$

ここで、 σ_{area} はエリアの予測誤差をエリアの定格出力で無次元化した値、 N_{area} はエリアのWF数である。

なお、全てのWF間の予測誤差の相関係数が1である場合(完全相関)には、 $\sigma_{area} \approx \bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}$ は予測誤差の平均値)となり、自己相関以外の相関が全て0である場合(完全非相関)には、 $\sigma_{area} \approx \bar{\sigma} / \sqrt{N_{area}}$ となる。つまり、エリアの予測誤差は完全相関時には最大値をとり、完全非相関時には最小値をとる。以上のことから、WF間の予測誤差の相関が低いほど、エリアの予測誤差が小さくなり、また、エリアのWF数が多いほど、エリアの予測誤差が小さくなることが分かる。

この式を用いて予測WFの予測誤差からエリア全体の予測誤差を求めることを考えるが、非予測WFに関

しては、相関係数(r_{ij})および予測誤差(σ)が未知である。そこで、これら未知の相関係数については、以下に述べるモデル式を、未知の予測誤差については、予測WFの予測誤差の平均値をそれぞれ用いることによりエリア予測誤差を求めることとする。

非予測WFのWF間の予測誤差の相関係数を求めるモデル式としては、式(8)を提案する。従来採用されている指数モデル^[3]の問題点を解決した。

$$r_{ij} = (1-a)e^{-\frac{d_{ij}}{b}} + a \cdot e^{-\frac{d_{ij}}{c}} \quad (8)$$

ここで、 a 、 b 、 c はモデルパラメータ、 d_{ij} はWF i 、WF j 間の距離である。この式は $d=0$ の時 $r=1$ という条件を満足している。本研究では東北6箇所のWFの予測誤差の相関の実測値を用いて、非線形最小二乗法により a 、 b 、 c を決定した。図7に東北6WF間の相関について、本研究で提案したモデル式と実測値の比較を示す。本モデルにより各WFの相関が正しく評価されていることがわかる。

(2) 発電出力予測値の予測誤差推定結果

以上で述べた方法により、予測WFの発電出力の予測誤差からエリア発電出力の予測誤差を求める場合に、予測WF数の違いによる結果の相違を図8に示す。エリアの予測誤差は、発電出力予測のアップスケーリングと同様、予測WF数が増加するほど減少している。本手法では最適な予測WF数が存在することが示され、この例ではその値が3箇所であることが分かる。

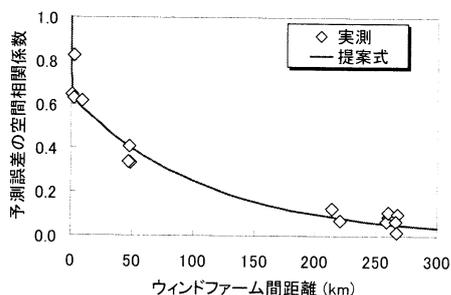


図7 予測誤差の空間相関係数

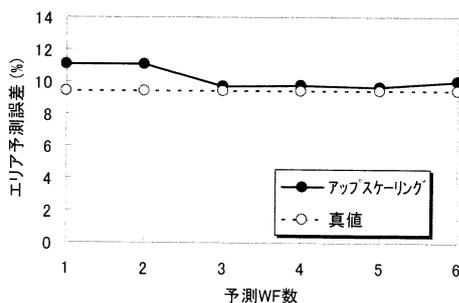


図8 予測WF数の違いによるエリアの発電出力予測誤差の変化(2005年2,4,7,10月 当日予測 6時間先)

6. まとめ

本研究では、動的適合モデルによる発電出力予測手法を提案するとともに、アップスケーリングによるエリア発電出力値および予測誤差を求める手法を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 発電出力予測モデルにおいて、予測に用いるパラメータを過去のデータにより、忘却係数付き逐次最小二乗法を用いて動的に求める手法を開発した。東北地方6箇所のWFにおいて予測精度の検証を行った結果、動的適合モデルを用いることにより、当日予測の精度が向上することが分かった。
- 2) 代表的なWFの発電出力予測値から電力系統制御エリアの発電出力を予測する手法を提案した。予測WF数を変化させて検証した結果、アップスケーリングに用いる最適な予測WF数が存在することが分かった。
- 3) WF間の予測誤差の相関を考慮する式を提案することにより、代表的なWFの予測誤差から電力系統制御エリアの予測誤差を推定する手法を構築した。予測WF数を変化させて検証した結果、発電出力予測と同様に、アップスケーリングに用いる最適な予測WF数が存在することが分かった。

謝辞

本研究は新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業である「風力発電電力系統安定化等技術開発—気象予測システム—気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」の研究の一環として実施したものである。

文献

- [1] 山口敦, 石原孟, 小川豪, 酒井和也, 藤野陽三, 電力系統制御エリアを対象とした風力発電出力予測モデルの適用可能性に関する研究, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム
- [2] Torben Skov Nielsen, Using Meteorological Forecasts in On-line Predictions of Wind Power, Institute of Mathematical Modelling Technical University of Denmark, 1999.
- [3] Ulrich Focken, Matthias Lange, Kai Monnich, Hans-Peter Waldl, Hans Georg Beyer Armin Luig, Short-term prediction of the aggregated power output of wind farms—a statistical analysis of the reduction of the prediction error by spatial smoothing effects, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.231-246, 2002.