

DOI: 10.7667/PSPC160251

考虑时空分布特性的风速预测模型

叶燕飞¹, 王琦¹, 陈宁², 伏祥运³, 赵阳¹

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003;
3. 江苏电力公司连云港供电公司电力调度中心, 江苏 连云港 222004)

摘要: 随着风电并网规模日益增加, 风电功率波动对电网的影响将更加显著。风速预测可以辅助电网制定调度和运行控制决策, 合理应对风电功率波动, 降低风电功率波动对电网安全稳定运行的影响。考虑风电机组的地理分布和风速的时间、空间分布特性, 建立等效风速模型。由该模型建立上、下游风电机组的风速关联关系, 修正下游风电机组的风速。在此基础上, 提出一种基于修正系数的风速预测方法, 以提高预测精度。以实际风电场地理数据和风电机组参数为基础的仿真算例验证了该方法的可行性和合理性。

关键词: 风速预测; 尾流效应; 时空分布模型; 修正风速

Wind forecast model considering the characteristics of temporal and spatial distribution

YE Yanfei¹, WANG Qi¹, CHEN Ning², FU Xiangyun³, ZHAO Yang¹

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;
2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. Lianyungang Electric Power
Dispatching and Control Center, Lianyungang 222004, China)

Abstract: With the increasing of scale of wind power integrated into power system, the influence of wind power fluctuation to the power system is more serious. Wind speed prediction can help formulate electric power grid scheduling and make operational control decision, rational response to wind power fluctuations can reduce the impact of wind power fluctuations on grid safety and stable operation. This paper establishes an equivalent wind speed model considering the geographic distribution of wind turbines and wind speed distribution in time and space. The wind speed relationship between upstream wind turbine and downstream wind turbine is established based on this model, which is used to fix the wind speed of downstream wind turbine. In addition, a wind farm power forecasting method is proposed based on wind speed revision, in order to improve the prediction accuracy of wind power. The feasibility and rationality of the method is verified by simulation examples based on actual wind farms parameters and geographic data.

Key words: wind speed prediction; wake effect; spatio-temporal distribution model; modified wind speed

0 引言

由于风的随机性和不可控性, 风力发电易受风的波动影响而产生大幅功率波动, 并可能对电网电能质量和安全稳定产生不利影响。随着风电并网规模的日益增加, 在甘肃、新疆等省区, 风电已成为主力电源之一, 在这种情况下, 风电功率波动对电网的影响将更加显著。风速预测技术近年发展迅速, 若风速预测精度满足一定要求, 其可以辅助电网制定调度和运行控制决策, 合理应对风电功率波动, 降低风电功率波动对电网安全稳定运行的影响。然而, 风电场的发电功率受微观环境影响, 在不同风

电机组间呈现一定的时间和空间分布特性。在空间上, 尾流效应是影响风电场发电功率的主要因素之一, 若后排风电机组处于前排风电机组的尾流中, 输出功率将减少, 影响风电场整体的出力^[1-8]; 由于风电机组空间分布距离较大, 风能传播的过程会使各台风电机组的功率存在一定的时间关联关系。文献[9-11]对尾流效应模型开展研究, 并指出建立合理的尾流模型, 可以有效提高风速预测和控制精度, 改善风电场的效益。故综合考虑风的时空分布特性有助于进一步改善风速预测的性能和实用性。

目前, 关于风电功率时空分布特性应用方面的文献较少, 主要应用场景为风电场微观选址、风电

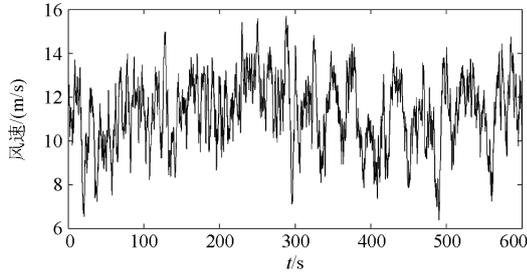


图2 风速序列

Fig. 2 Wind speed series

电能质量以及并网运行方式对电网影响的场合具有很好的适用性。

2.2 尾流模型

在风电场中，坐落在下风向的风电机组接收到的风速将低于坐落在上风向的风电机组接收到的风速，这种现象称为尾流效应。风电场中一些风电机组处于另一些风电机组的尾流中，使风电机组的性能受到影响，功率输出减小，影响整个风电场总的功率输出。确定尾流效应的物理因素主要有风电机组的排布方式、机组间的距离、风电机组的功率特性和推力特性以及风的湍流强度。

受尾流影响的风的湍流强度为

$$\sigma/v = (\sigma_G + \sigma_0)/v_a \quad (3)$$

式中： σ_G 和 σ_0 分别是风电机组产生的湍流和自然湍流的均方差，通常情况下， $\sigma_G = 0.8 v_a$ ， $\sigma_0 = 0.12 v_a$ 。

尾流下降系数 k 表示尾流横截面半径 R 随风力机下游距离 X 的变化率，其表达式为

$$k = \frac{dR}{dX} = k_w (\sigma_G + \sigma_0)/v \quad (4)$$

式中， k_w 为常数。

Jensen 模型较好地模拟了平坦地形的尾流情况，模型如图 3 所示。 X 是两个风电机组的距离，叶轮半径和尾流半径分别是 R 和 R_w ，自然风速、通过叶片的风速和受尾流影响的风速分别是 v_0 、 v_T 、 v_X 。

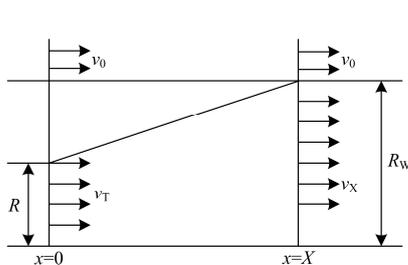


图3 Jensen 模型

Fig. 3 Jensen model

v_0 、 v_T 和风电机组的推力系数 C_T 具有如下关系：

$$v_T = v_0 (1 - \sqrt{1 - C_T}) \quad (5)$$

$$v_X = v_0 \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left(\frac{R}{R + kX} \right)^2 \right] \quad (6)$$

考虑其他风电机组的尾流效应可以得到任意一台风电机组的输入风速^[25]。

$$v_i = \sqrt{v_0^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{A_{j-i}}{A_i} (v_{j-i}^2 - v_0^2)} \quad (7)$$

式中： v_i 为风电机组接收到的风速； v_0 为不考虑尾流效应时第 i 台风电机组接收到的风速； v_{j-i} 为考虑第 j 台风电机组对第 i 台风电机组尾流影响后的风速； A_{j-i} 为第 j 台风电机组在第 i 台风电机组处扫风面积的投影； A_i 为第 i 台风电机组的风轮面积； n 为风电机组总数。

2.3 功率输出模型

尾流效应主要影响风速的空间分布，平均风速、风向及风电机组布置主要影响风电场内风电机组间的时间延迟。为提高输入风速的时间精度，对于占地面积较大的风电场需要考虑风速的延迟时间，本文计及风速在空间分布的时延效应，其计算公式为

$$t = \frac{X}{v} \quad (8)$$

式中， X 为任意两机组在迎风向上的距离。

风速的时延可以平滑风电场输出功率，使得并网点功率变化率变小，从而提高其电能质量。

风电机组的功率与风速的关系通常用式(9)来计算^[26]。

$$\begin{cases} P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \cos \theta \\ C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right)^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = R_w / r \end{cases} \quad (9)$$

式中： ρ 为空气密度； S 为风轮扫风面积； λ 为叶尖速比； w_r 为风电机组转速； β 为桨距角； θ 为偏航角； C_p 为风能利用系数。

3 时空分布模型在风速预测中的应用

本文提出一种基于修正系数的风速预测方法，其具体流程如图 4 所示。

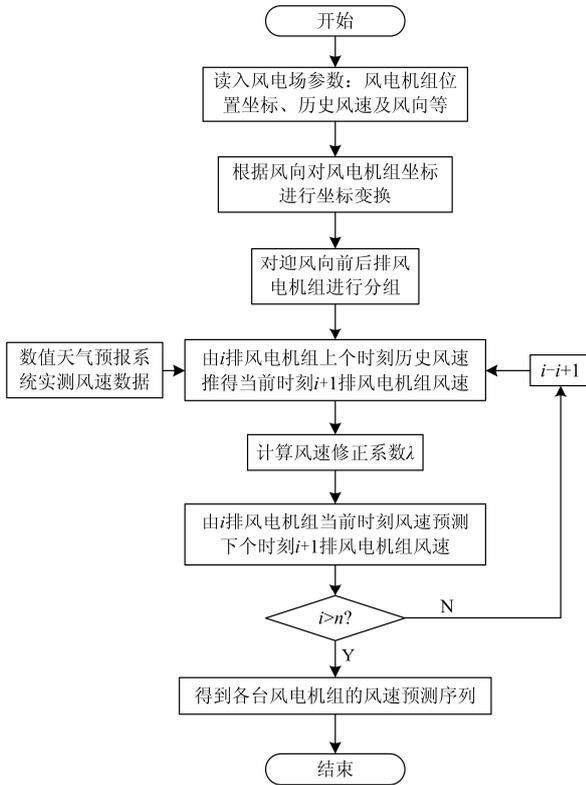


图4 风速预测流程图

Fig. 4 Flow chart of wind speed forecast

下面假设风电场呈方阵排列(如图5所示),以风向为东偏北 45° (以纸张正上方为北,右边为东)为例详细说明本文预测方法。

若 t 时刻由测风塔测得全部风电机组的风速为

$$V_t = \begin{bmatrix} v_{11}(t) & v_{12}(t) & \cdots & v_{1n}(t) \\ v_{21}(t) & v_{22}(t) & \cdots & v_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{n1}(t) & v_{n2}(t) & \cdots & v_{nm}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

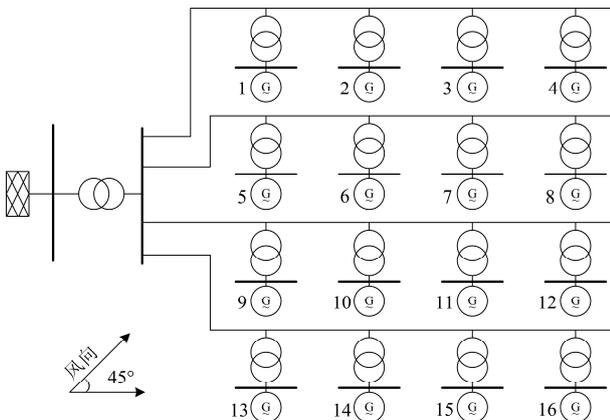


图5 风电机组分布

Fig. 5 Position of wind turbines

根据风向对风电机组分组,如表1所示。

表1 风电机组分组

Table 1 Group of DFIGs

组别	风电机组号
1	$1j, i1(i, j=1 \sim n)$
2	$2j, i2(i, j=2 \sim n)$
\vdots	\vdots
n	nm

设两排风电机组之间风的传播时间为 τ , τ 根据风速和两排风电机组之间的间距确定。则第 n 排第 j 台风电机组在时刻 t 的风速修正系数 λ_{nj} 为

$$\lambda_{nj} = \frac{v'_{nj}(t)}{v_{nj}(t)} \quad (11)$$

$$v'_{nj}(t) = v_{n-1,j}(t-\tau) \left[1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) \left(\frac{R}{R+kX} \right)^2 \right] \quad (12)$$

式中: $v_{nj}(t)$ 为该风电机组 t 时刻的实测风速; $v'_{nj}(t)$ 为根据前一排风电机组风速推算得到的 t 时刻该风电机组的风速。

以此类推,可得下风向每台风电机组的风速修正系数。由此,可以根据当前时刻第 $n-1$ 排风电机组测得的实际风速可推算第 n 排风电机组的风速:

$$v'_{n,j}(t+\tau) = v_{n-1,j}(t) \left[1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) \left(\frac{R}{R+kX} \right)^2 \right] \quad (13)$$

除以修正系数得到下一时刻的预测风速

$$v_{2j}(t+\tau) = \frac{1}{\lambda_{2j}} v'_{2j}(t+\tau) \quad (14)$$

由此可得各台风力机的风速预测序列,根据风速-功率数学模型可得风电场的预测出力。

4 算例分析

4.1 概述

本文的算例以2011年西北地区某实际风电场的的数据为依据,选取了4月6日到4月12日的风速数据作为预测样本,样本的选取间隔为10 min。为比较本文提出的预测方法的优越性,分别采用BP神经网络法和修正系数法对未来4 h的风速进行预测。两种方法对比的评价指标采用平均相对误差MAPE(Mean Absolute Percentage Error)和方均根误差RMSE(Root Mean Square Error),计算式为

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N |V_R - V_i|}{\sum_{i=1}^N |V_R|} \quad (15)$$

$$RMES = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_R)^2}{N}} \quad (16)$$

式中： V_R 为风速实际值； V_i 为风速预测值； N 为样本总数。

4.2 预测效果分析

分别采用两种方法得到 4 月 6 日的预测结果如图 6 所示。

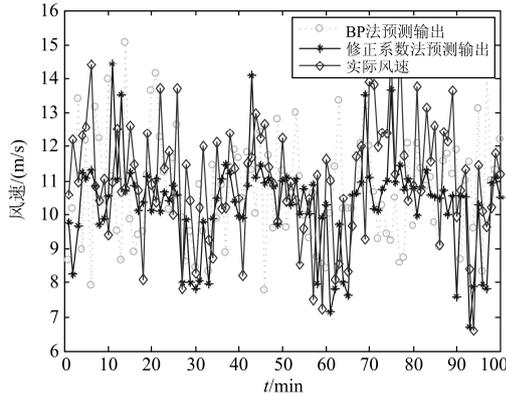


图 6 预测结果

Fig. 6 Prediction result

由图 6 可见，修正系数法的预测曲线与实际风速更为接近。其余的预测效果与 4 月 6 日相同。下面进一步结合预测误差的量化指标和分布情况详细说明修正系数法的优越性。具体误差的统计结果如表 2 所示。

表 2 预测误差

Table 2 Errors of prediction

指标	修正系数法	BP 神经网络法
MAPE	0.1285	0.1738
RMSE	0.1599	0.2217
Max(%)	0.5120	0.9146
Min(%)	0.0002	0.0004

由表 2 可知，从该 4 个指标的统计情况来看，本文提出的预测方法效果更好。

对本算例 1000 个样本点的误差进行统计，预测结果的误差分布如图 7 和图 8 所示。

由图 7 和图 8 可见，BP 神经网络法预测误差在 -0.6 到 0.9 之间，修正系数法的预测误差在 ±0.5 以内。修正系数法的预测误差明显比 BP 神经网络法预测误差分布窄，有约 90% 的预测误差在 ±0.2 范围内。

4.3 讨论

风电功率预测受很多因素影响，时空分布特性是其中一个很重要的影响因素，风向不同对修正系

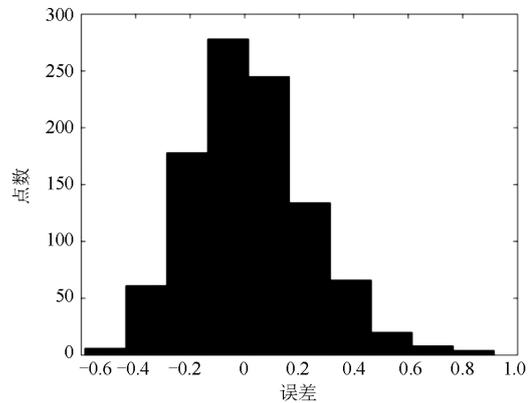


图 7 BP 神经网络法预测误差分布

Fig. 7 Prediction error distribution of BP neural network

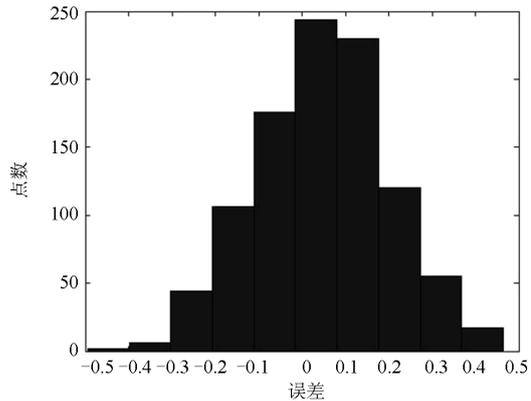


图 8 修正系数法预测误差分布

Fig. 8 Prediction error distribution of correction coefficient

数模型会有一定影响，从而影响风电功率预测效果，因此，本方法的可靠性需要大量数据样本进行验证。本文的研究由于受数据样本约束，所给出的结论仅能说明该方法在文中所述场景下具有良好的效果。后续课题组会根据数据样本的丰富度对本文方法的可靠性进行验证。

5 总结

尾流效应对风电场的风速时空分布特性产生影响，在进行风电场风速预测时有必要考虑相关影响。本文提出了考虑尾流效应的风电场风速预测方法，根据风向、风速、风力机的排布情况计算修正系数，修正下游风力机的预测风速。结合我国西北某风电场的实际数据开展算例分析，通过与 BP 神经网络预测法比较，本文提出的方法预测精度更好，但方法的适用性和可靠性还有待进一步验证。

参考文献

[1] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风

- 电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.
- XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [2] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
- CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [3] 苏永新, 段斌, 朱广辉, 等. 海上风电场疲劳分布与有功功率统一控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 190-198.
- SU Yongxin, DUAN Bin, ZHU Guanghui, et al. Distribution and active power combined control in offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 190-198.
- [4] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于小波变换的风电场短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 112-120.
- TIAN Zhongda, LI Shujiang, WANG Yanhong, et al. Short-term wind speed combined prediction for wind farms based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 112-120.
- [5] 柳玉, 白恺, 崔正湃, 等. 风电场短期功率预测水平提升举措措施研究与实例分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 77-82.
- LIU Yu, BAI Kai, CUI Zhengpai, et al. Study and case analysis of optimization measures of short-term wind power forecast[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 77-82.
- [6] 张程飞, 黄俊辉, 谢珍建, 等. 电网风电接纳能力评估方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 99-105.
- ZHANG Chengfei, HUANG Junhui, XIE Zhenjian, et al. A review on evaluation methods of power grid's wind power accommodation capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 99-105.
- [7] 徐创学, 刘鲁清, 谢云明, 等. 基于实时数据的风力发电机组性能在线评价[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 88-91.
- XU Chuangxue, LIU Luqing, XIE Yunming, et al. Real-time data based on online evaluation of output[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 88-91.
- [8] 汤奕, 王琦, 陈宁, 等. 采用功率预测信息的风电场有功优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 1-8.
- TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning, et al. An optimal active power control method of wind farm based on wind power forecasting information[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 1-8.
- [9] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 68-72.
- CAO Na, ZHAO Haixiang, REN Puchun, et al. Establish and application of wind speed model in wind farm dynamic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 68-72.
- [10] 李少华, 岳巍澎, 匡青峰, 等. 双机组风力机尾流互扰及阵列的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 101-107.
- LI Shaohua, YUE Weipeng, KUANG Qingfeng, et al. Numerical simulation of wake interaction and array of double wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 101-107.
- [11] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Review on equivalent modeling of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [12] 许昌, 杨建川, 李辰奇, 等. 复杂地形风电场微观选址优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 58-64, 7.
- XU Chang, YANG Jianchuan, LI Shengqi, et al. Optimization of wind farm layout in complex terrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 58-64, 7.
- [13] KIM C, GUI Y, CHUANG C C, et al. A model-free method for wind power plant control with variable wind[C] // PES General Meeting Conference & Exposition, National Harbor, MD, 2014: 1-5.
- [14] GEBRAD P M O, FLEMING P A, VAN WINGERDEN J W. Comparison of actuation methods for wake control in wind plants[C] // American Control Conference (ACC), Chicago, IL, 2015: 1695-1701.
- [15] YILDIRIM N, UZUNOGLU B. Spatial clustering for temporal power ramp balance and wind power estimation[C] // Green Technologies Conference, 2015 Seventh Annual IEEE, New Orleans, LA, 2015: 214-220.
- [16] HE M, YANG L, ZHANG J, et al. A spatio-temporal analysis approach for short-term forecast of wind farm generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1611-1622.
- [17] SANANDAJI B M, TASICIKARAOGLU A, POOLLA K, et al. Low-dimensional models in spatio-temporal wind speed forecasting[C] // American Control Conference (ACC), Chicago, IL, 2015: 4485-4490.
- [18] DOWELL J, PINSON P. Very-short-term probabilistic

- wind power forecasts by sparse vector autoregression[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 763-770.
- [19] 陈宁, 谢杨, 汤奕, 等. 考虑预测功率变化趋势的风电有功分群控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2752-2758.
CHEN Ning, XIE Yang, TANG Yi, et al. Strategy for active power control of wind farm in cluster considering variation trend of forecasting power[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2752-2758.
- [20] 刘爱国, 薛云涛, 胡江鹭, 等. 基于GA优化SVM的风电功率的超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 90-95.
LIU Aiguo, XUE Yuntao, HU Jianglu, et al. GA-based ultra-short-term forecasting of wind power optimized SVM[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 90-95.
- [21] 梁沛, 卢继平, 钟璐, 等. 非迭代与分时段最优的风电功率短期预测[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2766-2771.
LIANG Pei, LU Jiping, ZHONG Lu, et al. Short-term wind power forecasting based on non-iterative algorithm and divided period optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2766-2771.
- [22] 李霄, 王昕, 郑益慧, 等. 基于改进最小二乘支持向量和预测误差校正的短期风电负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 63-69.
LI Xiao, WANG Jing, ZHENG Yihui, et al. Improved prediction based on least squares support vector machine prediction error correction and short-term wind load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 63-69.
- [23] QIAN H, HONGKUN C, YUBO T, et al. Wind speed spatio-temporal forecasting of wind farms based on universal kriging and Bayesian dynamic model[C] // Power System Technology (POWERCON), Chengdu, 2014: 2897-2902.
- [24] 张建忠, 程明. 风力发电随机风速时间序列生成方法分析与评价[J]. 风能, 2012(1): 58-61.
ZHANG Jianzhong, CHENG Ming. Analysis and evaluation of method on random wind speed time series generation of wind power[J]. Wind Energy, 2012(1): 58-61.
- [25] 孙辉, 徐箭, 孙元章, 等. 考虑风速时空分布及风机运行状态的风电场功率计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 30-38, 60.
SUN Hui, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. A method for wind power calculation considering wind speed spatial and temporal distribution and wind turbine operation status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 30-38, 60.
- [26] 孙辉, 吴姝雯, 王超. 尾流效应对风电场功率输出的影响分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 55-60.
SUN Hui, WU Shuwen, WANG Chao. Impact analysis of wake effect on wind farm output[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2015, 42(2): 55-60.

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-05-26

作者简介:

叶燕飞(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术, 电力系统;

王琦(1975-), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统、电力电子、新能源发电技术等; E-mail: mzxj_njnu@163.com

陈宁(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为风力发电系统接入及控制方法研究。

(编辑 葛艳娜)