

基于自适应的动态三次指数平滑法的风电场风速预测

王国权¹, 王 森², 刘华勇¹, 薛永端², 周 平¹

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401121; 2. 中国石油大学(华东)信控学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 随着风力发电的快速发展, 对风电场的风速实现较准确的预测也逐步成为风电领域研究的热点。为了提高风速的预测精度, 综合考虑风速历史时间序列的影响, 在传统的三次指数平滑方法的基础上, 提出了一种自适应的动态三次指数平滑方法来进行风速预测。该方法利用了地毯式搜索方法, 根据误差平方和最小的原则及时调整并获得最佳的平滑系数, 然后进行后续的一步或多步风速预测。通过与传统的三次指数平滑法、灰色模型预测法比较, 验证了自适应的动态三次指数平滑法在风电场风速预测中的准确性和高效性。

关键词: 自适应; 指数平滑法; 风速预测; 风力发电; 平滑系数

Self-adaptive and dynamic cubic ES method for wind speed forecasting

WANG Guo-quan¹, WANG Sen², LIU Hua-yong¹, XUE Yong-duan², ZHOU Ping¹

(1. Economic & Technology Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401121, China;

2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: With the rapid development of wind power in recent years, to achieve more accurate predictions of wind speed on wind farm has gradually become an hot issue in research. To improve the wind speed forecasting accuracy for wind farm, a new self-adaptive and dynamic forecasting method is presented, which is based on the wind speed time series and traditional cubic exponential smoothing (ES) method. According to the principle of minimum error sum of squares, the smoothing factor is chosen with blanket search method and changed in time. Then one-step or multistep wind speed forecasting can be done with the new method. By comparing with the traditional cubic exponential smoothing method and gray model forecasting method, it can be proved that the self-adaptive and dynamic forecasting method in wind speed forecasting is accurate and efficient.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077090) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050213).

Key words: self-adaptive; exponential smoothing method; wind speed forecasting; wind power; smoothing factor

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0117-06

0 引言

从近几年的分布式电源发展情况来看, 风电由于其技术的成熟和发电成本的降低无疑成为最有发展前景的可再生能源。《风电场接入电力系统技术规定》明确指出系统应具有 0~48 h 短期风电功率预测以及 15 min~4 h 超短期风电功率预测功能, 而风电机组的出力在很大程度上是由风速决定的。因此, 有必要对风速进行短期预测研究, 这不仅方便于调

度部门及时调整调度计划, 减少旋转备用容量, 进而降低系统的运行成本, 而且为电网后续的规划提供一些参考依据。

随着风电项目的大力发展, 对风电场的风速进行预测已成为风电领域的研究热点。目前, 国内外一些专家学者在这方面做了很多深入的研究工作, 并且已经提出了很多种风速预测方法, 诸如基于混沌相空间重构理论的预测方法、人工神经网络法、小波变换法、基于时间序列分析的自回归滑动平均 (ARMA) 建模法、灰色模型预测等^[1-5]。另外一些方法都是基于传统方法进行改进或者综合, 建模所需数据量比较大, 相对比较复杂, 比如基于神经网络和其他方法相组合的预测方法^[6-9]、基于 RVM 与

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51077090); 国家 863 高技术基金项目 (2012AA050213); 国网重庆市电力公司电力科学研究院规划评审中心 KJ〔2013〕94 号项目资助

ARMA 模型的短期风速预测^[10]等。

以上方法在一些特定的领域有很好的应用,但都没考虑不同时间段的历史数据对预测结果的影响大小,预测效果也有待提高。为此,本文综合考虑历史数据对预测结果的影响大小,提出了一种基于自适应的动态三次指数平滑方法对风速进行滚动预测,并与传统的三次指数平滑预测方法^[11-12]和灰色预测方法的预测结果进行对比,充分证明所提方法具有更高的预测精度。

1 三次指数平滑法预测模型

指数平滑法相比于移动平均法,它是一种特殊的加权平均方法。简单移动平均法用的是算术平均数,近期数据对预测值的影响比远期数据要大一些,而且越近的数据影响越大。指数平滑法正是考虑了这一点,并将其权值按指数递减的规律进行分配,越接近当前的数据,权重越大;反之,远离当前的数据,其权重越小。指数平滑法按照平滑的次数,一般可分为一次指数平滑法、二次指数平滑法和三次指数平滑法等。然而一次指数平滑法适用于无趋势效应、呈平滑趋势的时间序列的预测和分析,二次指数平滑法多适用于呈线性变化的时间序列预测。由于风速变化的无规则性,呈非线性变化趋势,所以比较适合用三次指数平滑法来预测。

三次指数平滑模型是在二次指数平滑模型的基础上再进行一次指数平滑预测。三次指数平滑公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} S_t^{(1)} = \alpha X_t + (1-\alpha)S_{t-1}^{(1)} \\ S_t^{(2)} = \alpha S_t^{(1)} + (1-\alpha)S_{t-1}^{(2)} \\ S_t^{(3)} = \alpha S_t^{(2)} + (1-\alpha)S_{t-1}^{(3)} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $t=2,3,\dots$; $S_t^{(1)}$ 为第 t 期风速的一次指数平滑值; $S_t^{(2)}$ 为第 t 期风速的二次指数平滑值; $S_t^{(3)}$ 为第 t 期风速的三次指数平滑值; X_t 为风速时间序列 $\{X_t\}$ 的第 t 期实际数据; α 为静态平滑系数,且 $\alpha \in (0,1)$ 。

第 $t+m$ 期的预测值为

$$\hat{X}_{t+m} = a_t + b_t m + c_t m^2 \quad (2)$$

式中: m 为预测步长,即需要预测的期数与当前期数的间隔数,取正整数 $1, 2, 3, \dots$ 如 $m=1$ 即为一步预测; 另外记 $\hat{X}_1 = X_1$, $\hat{X}_2 = X_2$ 。其中预测参数为

$$a_t = 3S_t^{(1)} - 3S_t^{(2)} + S_t^{(3)}$$

$$b_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} [(6-5\alpha)S_t^{(1)} - (10-8\alpha)S_t^{(2)} + (4-3\alpha)S_t^{(3)}]$$

$$c_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} (S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)})$$

(3)

三次指数平滑法有两个问题需要解决,即平滑初值 $S_1^{(1)}$ 、 $S_1^{(2)}$ 、 $S_1^{(3)}$ 的确定和平滑系数 α 的确定。

通常平滑初始值的确定有下面两种方法:

1) 当数据量比较多时,初始值对预测值的影响很小,可以取 $S_1^{(1)} = S_1^{(2)} = S_1^{(3)} = X_1$;

2) 当数据量比较少时,初始值对预测值的影响比较大,考虑采取平滑初值等于前面若干数据的简单算术平均数,如: $S_1^{(1)} = S_1^{(2)} = S_1^{(3)} = (X_1 + X_2 + X_3)/3$ 等。

平滑系数 α 反映了不同时期历史数据在指数平滑值中所占的比重,即指数平滑方法根据过去的观测数据对预测值的影响大小,对历史观测数据分配了不同的权重。越接近当前要预测的数据,其权重越大;离当前要预测的数据越久远的数据,其所占的权重越小,即“厚近薄远”的原则。其中, α 取值越大,离预测值越近的历史数据对当前的预测值影响就越大,权重下降得越快;反过来, α 取值越小,权重变化就越慢,预测值越接近算术平均值。因此,指数平滑预测模型的预测精度很大程度上依赖于平滑系数 α 的取值,而选取合适的平滑系数也即是建立指数平滑模型的关键。预测的最佳效果通常是使预测值与实测值间的误差最小。误差越小,说明效果越好。基于此原则,根据经验法则选取 α ,并计算误差平方和,取误差平方和最小时的 α 作为平滑系数。

式(4)为求取最小误差平方和的公式。

$$f = \min \sum_{t=1}^N (\hat{X}_t - X_t)^2 \quad (4)$$

式中: N 表示建模所用的风速期数; \hat{X}_t 为风速时间序列 $\{X_t\}$ 的第 t 期预测数据; X_t 为风速时间序列 $\{X_t\}$ 的第 t 期实际数据。

2 自适应的动态三次指数平滑法模型

在传统的三次指数平滑模型中,由于平滑系数 α 一旦确定即是一个常量,使得平滑模型难以跟踪时间序列自身的变化,对后期的平滑预测也不一定合适。因此,可以考虑针对这个问题对其进行改进。

下面提出一种带有动态平滑系数的指数平滑模型, 不仅可以提高风速的预测精度, 还能增强风速预测的可靠性, 比传统的三次指数平滑模型的预测效果更好。

将传统的三次指数平滑模型的各项系数进行归一化处理, 并做出适当的扩展, 即可得到

$$\phi_{k,t} = \frac{\alpha_k}{1 - (1 - \alpha_k)^t} \quad (5)$$

式中, k 为预测的次数, 取正整数。将第 k 次的自适应平滑系数记为 α_k , $\alpha_k \in (0, 1)$, 当 $t > 1$ 时, $\phi_{k,t} \in (0, 1)$, 满足平滑系数的条件。显然 $\phi_{k,t}$ 是关于时间 t 的函数, 因此, 可以认为 $\phi_{k,t}$ 是动态的平滑系数。

令 $X_{k,t} = X_{k+t-1}$, $t = 1, 2, \dots, N$, N 为每次预测时选取的历史数据的期数。以三次指数平滑法为原形, 由于 α_k , $\phi_{k,t}$ 能根据预测的次数进行自适应的调整, 则基于自适应的动态三次指数平滑法的风速预测模型如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} S_{k,t}^{(1)} = \phi_{k,t} X_{k,t} + (1 - \phi_{k,t}) S_{k,t-1}^{(1)} \\ S_{k,t}^{(2)} = \phi_{k,t} S_{k,t}^{(1)} + (1 - \phi_{k,t}) S_{k,t-1}^{(2)} \\ S_{k,t}^{(3)} = \phi_{k,t} S_{k,t}^{(2)} + (1 - \phi_{k,t}) S_{k,t-1}^{(3)} \end{cases} \quad (6)$$

新的预测公式为

$$\hat{X}_{k,t+m} = a_{k,t} + b_{k,t}m + c_{k,t}m^2, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式 (7) 的结果即是第 k 次的 m 步预测结果。式中 $t = 2, 3, \dots, N$; m 为需要预测的期数与当前期数的间隔数, 取正整数。其中预测参数为

$$\begin{aligned} a_{k,t} &= 3S_{k,t}^{(1)} - 3S_{k,t}^{(2)} + S_{k,t}^{(3)} \\ b_{k,t} &= \frac{\phi_{k,t}}{2(1 - \phi_{k,t})^2} \cdot \\ &\quad \left[(6 - 5\phi_{k,t})S_{k,t}^{(1)} - (10 - 8\phi_{k,t})S_{k,t}^{(2)} + (4 - 3\phi_{k,t})S_{k,t}^{(3)} \right] \\ c_{k,t} &= \frac{\phi_{k,t}^2}{2(1 - \phi_{k,t})^2} (S_{k,t}^{(1)} - 2S_{k,t}^{(2)} + S_{k,t}^{(3)}) \end{aligned} \quad (8)$$

另外, 当 $t = 1, 2$ 时, 每一次都令预测值等于所选取的 N 期数据的初始值, 即 $\hat{X}_{k,1} = X_{k,1} = X_k$, $\hat{X}_{k,2} = X_{k,2} = X_{k+1}$ 。

在每一次确定平滑系数 α_k 的过程中, 都可以采

用地毯式遍历搜索^[8]的方法, 求出对应的误差平方和 f 的值, 误差平方和 f 最小的时候对应的 α_k 即是当次的平滑系数, 后续的平滑系数寻优与此类似。为了得到更好的预测效果和更高的预测精度, 每次都可以选取比较小的步长, 比如 0.001。

式 (9) 为每一次确定自适应的平滑系数 α_k 的公式。

$$f_k = \min \sum_{t=k}^{k+N-1} (\hat{X}_{k,t} - X_{k,t})^2 \rightarrow \alpha_k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots; N = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

用前 N 期数据根据上述公式确定出平滑系数 α_k , 然后运用动态的三次指数平滑法进行预测第 $k+N+m-1$ 期的数据。

将 N 替换 t , 代入式 (7) 式 (8) 即可得到最终的预测公式为

$$\hat{X}_{N+k+m-1} = \hat{X}_{k,N+m} = a_{k,N} + b_{k,N}m + c_{k,N}m^2$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

在实际应用过程中, 为了让平滑系数能更好地跟踪风速的变化, 可以按如下步骤进行 (以一步预测为例):

1) 首先应采用一段时间的历史数据, 假定采用了 N 期数据 (即第 1 期实测数据到第 N 期实测数据 $[X_{1,1}, X_{1,2}, \dots, X_{1,N}] = [X_1, X_2, \dots, X_N]$), 在动态的三次指数平滑模型的基础上, 根据误差平方和 f 最小的原则, 由式 (7)~式 (9) 确定出平滑系数 α_1 ;

2) 然后运用自适应的动态三次指数平滑法进行预测, 即可通过式 (10) 得到第 1 次的第 $N+1$ 期的预测值, 即第 $N+1$ 期的风速 \hat{X}_{N+1} ;

3) 紧接着去掉最早的那个数, 采集第 $N+1$ 期的实测数据, 再次运用动态的三次指数平滑模型, 根据误差平方和 f 最小的原则, 由式 (7)~式 (9) 确定出新的平滑系数 α_2 ;

4) 进一步可以利用新的 N 期风速时间序列 (即第 2 期实测数据到第 $N+1$ 期实测数据 $[X_{2,1}, X_{2,2}, \dots, X_{2,N}] = [X_2, X_3, \dots, X_{N+1}]$) 预测第 2 次的第 $N+1$ 期的预测值, 即第 $N+2$ 期的风速 \hat{X}_{N+2} ;

5) 依此类推, 更新风速时间序列 $[X_{k,1}, X_{k,2}, \dots, X_{k,N}] = [X_k, X_{k+1}, \dots, X_{k+N-1}]$, 由式 (7)~式 (9) 得到新的平滑系数 α_k , 继续进行后期的风速预测 \hat{X}_{N+k} , 直到规定的时刻为止。

同样地, 也可以改变预测的间隔步数 m , 进行

二步、三步等多步预测。

自适应的动态三次指数平滑法的预测流程图如图 1 所示。

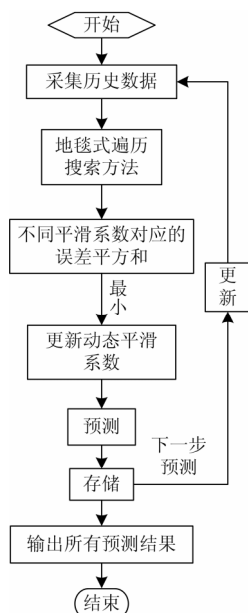
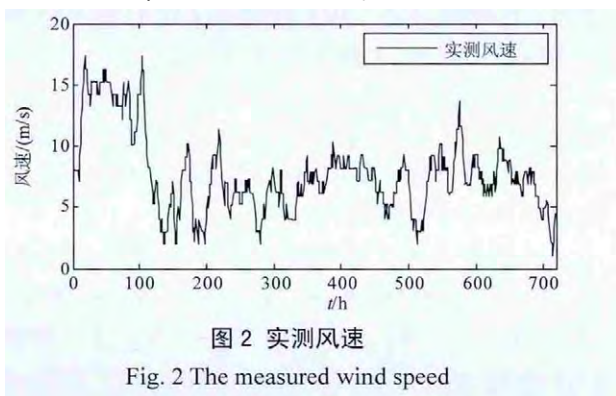


图 1 自适应的动态三次指数平滑预测流程图

Fig. 1 Flow chart of self-adaptive and dynamic forecasting method

3 实例计算及精度分析

采用某风电场 1 个月的实测历史风速数据（每小时采样一点）作为样本数据序列，如图 2 所示。从历史风速可以看出，选取的风速时间序列呈非线性变化趋势，没有明显的特点。



本文在 Matlab 试验平台上，采用自适应的动态三次指数平滑模型，编制了通用化程序，对风速样本时间序列按照下述情况处理。

在该风电场每小时间隔的风速数据基础上，以该风电场在前 1~24 h 总共 24 个风速数据作为历史数据序列（即 $N=24$ ），对风电场采用自适应的动态三次指数平滑模型进行一步预测，即可得到第 25 h

的风速预测值。然后，跟踪风速的实时采集数据不断更新历史风速序列，即去掉最早的那个风速数据，保留最新采集的数据，继续进行后续的一步风速预测，即用第 2~25 h 的实测风速数据预测第 26 h 的风速，用第 3~26 h 的实测风速数据预测第 27 h 的风速数据，依次类推，实现一步滚动预测。在这个过程中，平滑系数也将随着风速时间序列的更新而进行自适应的调整。

多步预测与一步预测方法类似，只是改变了预测的间隔步数。例如以前 1~24 h 总共 24 个风速数据作为历史数据序列（即 $N=24$ ），对风电场采用自适应的动态三次指数平滑模型进行二步预测，即可得到第 26 h 的风速预测值，依此类推。

为了评价预测方法的优劣，由于没有出现风速为 0 的情况，所以可以采用比较相对误差和绝对误差的大小等指标来判断。

预测误差记为

$$\begin{cases} e_r = \frac{\hat{X}_{N+k+m-1} - X_{N+k+m-1}}{X_{N+k+m-1}} \times 100\% \\ e = \hat{X}_{N+k+m-1} - X_{N+k+m-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\hat{X}_{N+k+m-1}$ 是第 $N+k+m-1$ 个小时的预测风速； $X_{N+k+m-1}$ 是第 $N+k+m-1$ 个小时的实测风速； e_r 为相对误差； e 为绝对误差。一步预测和二步预测的误差如表 1 所示，预测效果如图 3、图 4 所示（为了方便预测效果对比，在 25~720 h 时间段任意截取一部分进行展示）。由于对预测方法的评价只关心误差的大小，所以表 1 中的预测结果都是对式（11）取绝对值后计算的结果。

传统的风速预测方法误差在 25%~40% 左右^[13-15]，通过表 1 和图 3、图 4 可以发现，三种预测方法的平均相对误差都小于 25%，均满足此风电场风速预测的要求；再比较一步预测和二步预测的相对误差可以发现，三种方法的一步预测的平均相对误差和最大误差等各项指标都比二步预测的小，说明一步预测具有更好的预测效果；此外，对比最大相对误差和标准差，还可以发现预测过程中存在突变点，说明此时风速变化剧烈，规律性很弱，本文所提预测方法对突变点也没能很好地进行预测，但总体上预测效果还是比灰色模型要好。最重要的是，通过对三种方法的预测结果相互对比，不难发现本文所提出的基于自适应的动态三次指数平滑法具有更好的预测效果，不管是一步预测效果，还是二步预测的效果，都优于传统的三次指数平滑法和灰色预测方法，实现了预测结果的高准确性。

表 1 预测误差对照表
Table 1 Forecasting error

	本文方法		传统的三次指数平滑法		灰色预测	
	一步预测 α 动态变化	二步预测 α 动态变化	一步预测 ($\alpha = 0.585$)	二步预测 ($\alpha = 0.546$)	一步预测	二步预测
相对误差均值/%	11.88	19.19	12.42	21.25	20.75	24.20
最大相对误差/%	88.14	156.08	86.33	126.34	217.14	234.80
相对误差标准差/%	12.26	19.24	12.53	20.17	23.45	27.48
最大绝对误差/(m/s)	3.61	5.50	4.58	4.85	6.18	7.09

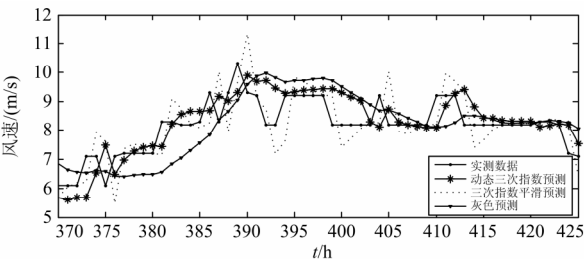


图 3 一步风速预测

Fig. 3 One-step wind speed forecasting

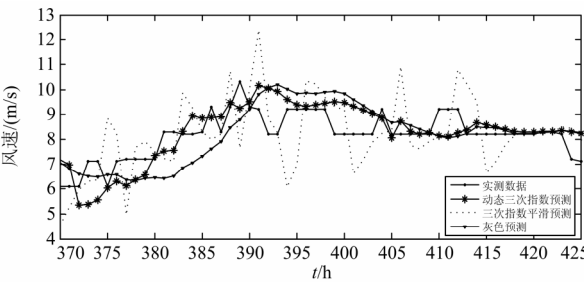


图 4 二步风速预测

Fig. 4 Two-step wind speed forecasting

根据上述方法产生的风速预测模型，对比模型的优劣，并结合风力发电的输出特性，可以进一步建立风力发电机的出力预测模型。

4 结论

本文详细地介绍了三次指数平滑预测方法，并在此基础上提出了自适应的动态三次指数平滑预测方法进行风速滚动预测，实时更新平滑系数，确定最优的预测值。实验证明本文所提的预测方法是行之有效的，满足当前风速预测的要求，且一步预测比二步预测具有更好的预测效果；此外，相比于传统的三次指数平滑预测方法和灰色模型预测方法，更是提高了预测精度。通过对风速预测方法的研究，不仅可以更好地服务于风电场并网运行控制，还可以为调度部门调整调度计划和风电场的规划布局提

供有力的技术支持。

参考文献

[1] 吕涛, 唐巍, 所丽. 基于混沌相空间重构理论的风电场短期风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 113-117.
Lü Tao, TANG Wei, SUO Li. Prediction of short-term wind speed in wind farm based on chaotic phase space reconstruction theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 113-117.

[2] 刘烨, 卢小芬, 方瑞明, 等. 风力发电系统中风速预测方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 62-66.
LIU Ye, LU Xiao-fen, FANG Rui-ming, et al. A review on wind speed forecast methods in wind power system[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 62-66.

[3] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
SUN Yuan-zhang, WU Jun, LI Guo-jie. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.

[4] 邵璠, 孙育河, 梁岚珍. 基于 ARMA 模型的风电场风速短期预测[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(7): 52-55.
SHAO Fan, SUN Yu-he, LIANG Lan-zhen. Wind speed short-term forecast for wind farms based on ARMA model[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(7): 52-55.

[5] 李俊芳, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于灰色模型的风速-风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 151-159.

- LI Jun-fang, ZHANG Bu-han, XIE Guang-long, et al. Grey predictor models for wind speed-wind power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 151-159.
- [6] 戴浪, 黄守道, 黄科元, 等. 风电场风速的神经网络组合预测模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(4): 27-31.
- DAI Lang, HUANG Shou-dao, HUANG Ke-yuan, et al. Combination forecasting model based on neural networks for wind speed in wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(4): 27-31.
- [7] 杨江平. 基于神经网络组合预测的风电场风速及发电功率短期预测[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- YANG Jiang-ping. Short-term wind speed and power forecasting in wind farm based on ANN combination forecasting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [8] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
- YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5.
- [9] 王韶, 杨江平, 李逢兵, 等. 基于经验模式分解和神经网络的短期风速组合预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 6-12.
- WANG Shao, YANG Jiang-ping, LI Feng-bing, et al. Short-term wind speed forecasting based on EMD and ANN[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 6-12.
- [10] 孙国强, 卫志农, 翟玮星. 基于RVM与ARMA误差校正的短期风速预测[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 187-193.
- SUN Guo-qiang, WEI Zhi-nong, ZHAI Wei-xing. Short term wind speed forecasting based on RVM and ARMA error correcting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 187-193.
- [11] 齐雪雯, 谢开贵, 胡博. 风速分布预测的指数平滑模型及其在配电网可靠性中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 1-6.
- QI Xue-wen, XIE Kai-gui, HU Bo. Exponential smoothing model for wind speed distribution forecast and its application in electrical distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 1-6.
- [12] 李颖. 时间序列指数平滑算法的改进研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
- LI Ying. Improvement research of time series exponential smoothing[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.
- [13] 张宁宇, 高山, 赵欣. 一种考虑风电随机性的机组组合模型及其算法[J]. 电工技术学报, 2012, 37(7): 50-53.
- ZHANG Ning-yu, GAO Shan, ZHAO Xin. A unit commitment model and algorithm with randomness of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 37(7): 50-53.
- [14] 罗文, 王莉娜. 风电场短期风速预测研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 68-74.
- LUO Wen, WANG Li-na. Short-term wind speed forecasting for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 68-74.
- [15] 刘永前, 韩爽, 胡永生. 风电场出力短期预报研究综述[J]. 现代电力, 2007, 24(5): 6-11.
- LIU Yong-qian, HAN Shuang, HU Yong-sheng. Review on short-term wind power prediction[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(5): 6-11.

收稿日期: 2013-10-28; 修回日期: 2013-12-27

作者简介:

王国权(1979-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、配电网规划、新能源发电与并网研究;

王森(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、新能源发电。E-mail: 763283853@qq.com