

# 风电场出力的纵向时刻概率分布特性

吕晓祿, 梁 军, 负志皓, 马庆法, 王洪涛, 张 峰

(山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

**摘要:** 提出一种新的纵向时间序列分析法, 基于实测历史数据, 统计 365 d 或更长天数内每天同一时刻的风电出力, 得到 96 个不同时刻的概率分布结果, 并通过函数拟合归纳出由分段函数表达的风电出力概率特征, 在此基础上实现对风功率预测值的预评估。算例分析表明, 经该方法得到的各时刻概率分布分段函数对不同年份数据有较好的适用效果, 对不同置信水平下的预测值预评估效果较好, 进一步说明纵向时刻概率分布特性是风电出力的固有属性。

**关键词:** 风电场; 风电; 纵向时刻; 波动; 概率分布; 函数拟合; 预评估

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.006

## 0 引言

风电具有波动性、间歇性、不确定性等特性, 这些特性给电网的调峰调频、电压稳定、安全运行、调度管理等方面带来诸多影响<sup>[1]</sup>。

目前, 针对风电波动特性的分析主要建立在连续时间轴上有功出力统计的基础上, 即横向时间序列分析。文献[2]采用概率统计和时间序列分析的方法对大规模风电并网后有功功率的波动特性进行了分析; 文献[3]分析了酒泉地区风电出力的波动性、随机性、相关性和互补性等特点; 文献[4]介绍了日、季节等不同时间尺度下的风电波动特性及地域相关性等特点; 文献[5]采用频域分析法对风功率的波动特性进行了分析; 文献[6]量化分析了风电功率在不同时间尺度、不同空间尺度上的分布特性; 文献[7]采用带移位因子与伸缩系数的  $t$  分布的方法来拟合风电功率变化率, 并对不同风电场及有功功率在不同时间尺度下的波动特性进行了分析。

上述文献通过横向时间序列分析可获得风电在连续时间轴上的波动规律及其概率分布, 但现有风功率预测方法<sup>[8-13]</sup>给出的是确定的时间点预测, 横向时间序列分析无法给出这些时间点处的风功率波动规律, 无法获得预测值可能出现的范围等信息, 因此有必要进行纵向时间序列分析。所谓纵向时间序列, 是指在 1 a(或更长)的时间范围内, 由每天同一时刻所组成的时间序列, 对应于每个时刻, 该时间

序列都由 365(或更多)个值组成。风电出力的纵向时间序列分析, 又称纵向时刻分析, 指对 365 d 或更长天数范围内每天同一时刻有功出力的波动情况分析。根据时间分辨率的不同, 1 d 中可分析的纵向时刻数也不相同。现有的风功率预测方法误差较大<sup>[14-15]</sup>, 因此有必要在真实值出现之前对预测值进行预评估, 以减小预测误差的影响。由纵向时刻概率分布结果, 可提前获知各时刻预测值出现的概率及实际值可能出现的范围, 根据不同置信水平对应的置信区间内外的预测效果的不同, 对预测值进行预评估。此外, 对调度计划制定、旋转容量配置等方面也有参考意义。

关于风电出力的纵向时刻分析, 目前缺乏相应研究。本文提出一种分析风电出力波动特性的新方法, 即纵向时刻概率分布特性分析。基于实测数据, 对风电场在 1 a 内每天的特定时刻有功出力进行统计, 得到对应时刻的有功出力概率分布结果。为描述这种分布结果进而提炼各时刻有功出力的规律及其本质属性, 对分布结果进行函数拟合, 得到纵向时刻概率分布分段函数, 并验证了分段函数误差较小, 具有适用性。最后, 用时间序列法进行风功率预测, 根据概率分布分段函数对预测值进行了预评估。

## 1 原理及方法

### 1.1 时间分辨率的确定

目前, 我国风电场的调度规范规定要对风电场进行日前风电功率预测和超短期风电功率预测。日前风电功率预测是指风电场次日全天的输出功率预测, 时间分辨率为 15 min; 超短期风电功率预测是指风电场未来 15 min~4 h 的输出功率预测, 时间分辨率也为 15 min。风电场根据超短期风电功率预测结果, 通过风电场集中监控系统, 每 15 min 自动向调度机构滚动申报未来 15 min~4 h 的风电功率预测曲线。值班调度员可根据风电功率超短期预测结果和

收稿日期: 2013-06-14; 修回日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177091, 51307101); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A-101); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM055); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金计划资助项目(BS2013NJ011)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177091, 51307101), the National High-Tech Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A101), the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2010EM055) and the Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of Shandong Province(BS2013NJ011)

实际运行情况对日发电调度计划曲线做适当调整<sup>[14]</sup>。为方便地对调度计划给予参考,本文以 15 min 为时间分辨率,对风电功率的纵向时刻规律进行分析。

### 1.2 概率分布的求取

以 00:00 为例,统计 365 d 中每天 00:00 的有功出力,得到 365 个有功出力值。以风电场额定容量的 10% 为功率间隔,统计每个功率间隔范围内有功出力的出现次数,则 00:00 各功率段的有功出力概率为:

$$\varphi_i = \frac{N_i}{n} \quad i=0,1,\dots,10 \quad (1)$$

其中, $\varphi_i$  为概率; $n$  为分析周期内的天数,一般取  $n=365$ ;  $i$  为功率段。根据  $i$  不同,分 2 种情况:

a. 当  $i=0$  时, $N_i$  为有功出力  $P=0$  出现的次数;

b. 当  $i$  取其他值时, $N_i$  为有功出力  $P \in \{\Delta P(i-1), \Delta P i\}$  范围内出现的次数,其中  $\Delta P$  为功率间隔,一般取  $\Delta P = 0.1 P_{\text{total}}$ ,  $P_{\text{total}}$  为风电场的额定容量。

依此方法,每隔一个时间段,便可以求得一个时刻的有功出力的概率分布,直至求取完当天 24 h 内各个时刻的概率分布结果。

### 1.3 函数拟合及校验

风电出力的纵向时刻概率分布以离散的数值形式表示,为了表征各时刻波动的统计规律及各时刻有功出力的本质属性,需要用函数表达式来描述这种关系。通常采用函数拟合的方法对统计结果进行拟合。概率密度函数  $f(x)$  只对连续型随机变量而言,其数值不能直接表示概率值大小。但当区间很小时, $f(x)$  可反映随机变量在  $x$  附近取值的概率大小,故当  $\Delta x$  很小时<sup>[16]</sup>:

$$\varphi(x \leq X \leq x + \Delta x) = \int_x^{x+\Delta x} f(t) dt \approx f(x) \Delta x \quad (2)$$

由式(1)知, $x=0$  时  $\Delta x=0$ ,  $x \neq 0$  时  $\Delta x \neq 0$ ,因此, $x=0$  的部分不能进行概率密度函数的拟合。故最终的概率分布结果可采用式(3)的分段函数表示:

$$\begin{cases} \varphi(x=0) = p_0 \\ f(x) = \frac{\varphi(x-\Delta x < X \leq x)}{\Delta x} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $x$  为有功出力比例; $p_0$  表示出力为 0 的概率; $f(x)$  是出力不为 0 时的概率密度函数。

由式(3)可知,在概率密度函数拟合之前,需将前期已求取的出力不为 0 时的概率值均除以  $\Delta x$ ,此处取 0.1。

各时刻的概率分布分段函数对于当年的数据拟合效果最优,但是否可以表征更长时间范围内相应时刻的风电出力的波动规律,需要进行校验:选取同一风电场不同年份的数据,统计各时刻的有功出力概率分布,与各时刻对应的分段函数进行对比和误差分析,获得校验结果。若各时刻的校验误差均在允许范围内,说明函数具有不变性和适用性。

综上所述,风电出力的纵向时刻概率分布特性的分析流程如图 1 所示。

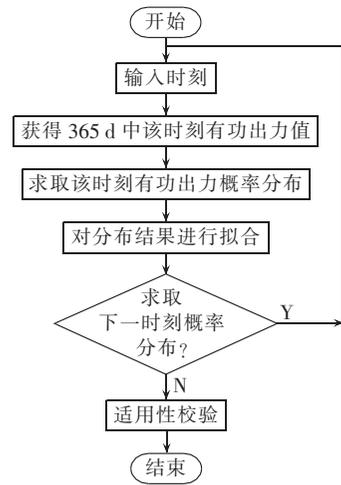


图 1 纵向时刻概率分布特性分析流程图  
Fig.1 Characteristic analysis of longitudinal instant probability distribution

## 2 算例分析

### 2.1 风电出力的纵向时刻波动特性

本文选取山东电力调度通信中心能量管理系统(EMS)统计的威海地区某风电场 2010-01-01T00-00-00—2011-12-31T24-00-00 的风电运行数据,采样间隔为 5 min,总有效数据为 210 240 个。

利用第 1.2 节中介绍的方法,统计特定时刻在 2010 年的 365 d 内的有功出力,得到该时刻的风电出力波动图。00:00—23:45 时段内,时间分辨率为 15 min,共计 96 个时刻。限于篇幅,本文只给出 00:00 时刻的波动图,见图 2。

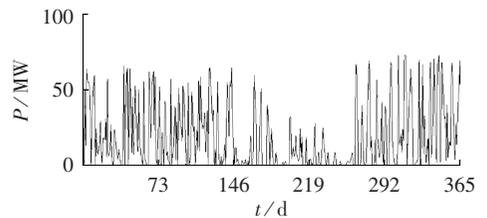


图 2 00:00 时刻的风电出力波动图  
Fig.2 Fluctuation of 00:00-instant wind power output

由图 2 可以看出,00:00 时刻在 1 a 时间内的风功率波动明显,最大值与最小值之间波动剧烈,因此统计出其波动的概率分布有助于掌握该时刻的风电出力波动特性。

### 2.2 风电出力的纵向时刻概率分布

此处以 00:00、06:00、12:00、18:00 这 4 个时刻的风电出力概率分布为例研究其波动规律。为便于比较和分析,将风电场的有功出力标准化:

$$\rho = P/P_{\text{total}} \quad (4)$$

其中, $\rho$  为有功出力比例; $P$  为有功出力; $P_{\text{total}}$  为风电

场的额定容量,取 100 MW。

由式(1)和式(4),各典型时刻的概率分布见图 3。

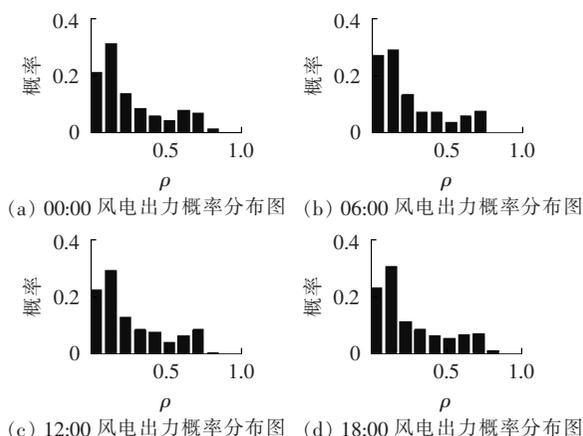


图 3 典型时刻风电出力概率分布

Fig.3 Typical instant probability distribution of wind power output

由图 3 可以看出,各时刻的风电出力波动规律具有相似性,即  $\rho \leq 10\%$  的概率在 50% 以上,  $\rho > 80\%$  的概率为 0,说明该风电场的出力整体偏小。

图 4 给出了纵向时刻概率分布的三维图,每 2 个时刻点间隔 15 min,共 96 个时刻点,可直观体现各时刻在各有功出力段的概率分布情况。由该图可以看出,各时刻的概率分布整体趋势一致,出力较小的概率较大,反之较小,规律性较强。

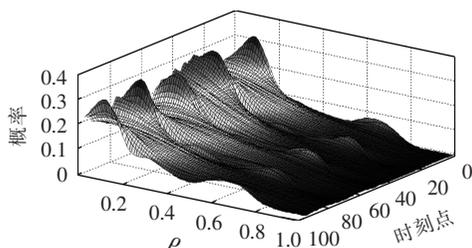


图 4 纵向时刻概率分布三维图

Fig.4 Three-dimensional diagram of longitudinal instant probability distribution

### 2.3 纵向时刻概率分布分段函数

采用函数拟合的方法对出力非 0 部分的结果进行拟合,对出力为 0 的部分直接求取其概率结果,最终得到形如式(3)的概率分布表达式。

选取多种不同函数分别对 1 d 时间内 96 个时刻的风电出力非 0 部分的概率进行分析和拟合,经过多种尝试与比较,综合选取其中拟合指标相对较好的式(5)—(7) 3 种函数作为备选函数。

Gaussian3:

$$f(x) = a_1 e^{-[(x-b_1)/c_1]^2} + a_2 e^{-[(x-b_2)/c_2]^2} + a_3 e^{-[(x-b_3)/c_3]^2} \quad (5)$$

Polynomial3:  $f(x) = k_1 x^3 + k_2 x^2 + k_3 x + k_4 \quad (6)$

Rational33:  $f(x) = \frac{p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x + p_4}{x^3 + q_1 x^2 + q_2 x + q_3} \quad (7)$

其中,  $x$  表示有功出力比例;  $f(x)$  表示概率密度函数;

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, p_3, p_4, q_1, q_2, q_3$  为各函数中的待求参数。

以 00:00 时刻为例,根据式(3),将有功出力不为 0 部分的概率除以 0.1,用式(5)—(7) 3 个备选函数对上述结果进行拟合,拟合效果如图 5 所示。

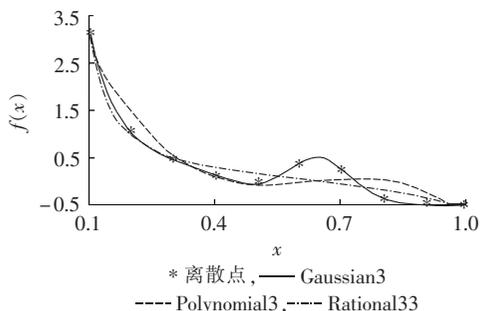


图 5 00:00 时刻概率分布拟合结果

Fig.5 Fitting result of 00:00-instant probability distribution

在将离散数值拟合为连续函数的过程中,需对拟合效果进行评判,由图 5 可直观分析出 Gaussian3 函数对实际数据的吻合度较高。但由图形所做的定性分析还需更可靠的度量方式和判据来进行定量分析,因此定义拟合效果的度量规则,见式(8)、式(9):

$$e_{SSE} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (8)$$

$$R_{square} = \sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (y_i - \bar{y})^2] \quad (9)$$

其中,  $\hat{y}_i$  为拟合值;  $y_i$  为实际值;  $e_{SSE}$  表征实际值与拟合值的误差平方和,其值越接近于 0,说明函数的误差成分越小,拟合效果越好;  $\bar{y}$  为实际值的平均值;  $R_{square}$  为衡量各变量之间相关程度的复相关系数,其值越接近于 1,说明变量之间的相关程度越密切,拟合效果越好。用式(8)、式(9)的拟合指标对 3 种函数的拟合结果进行评价,评价结果见表 1。

表 1 00:00 时刻概率分布拟合指标

Tab.1 Fitting indexes of 00:00-instant probability distribution

函数	$e_{SSE}$	$R_{square}$
Gaussian3	$1.4852 \times 10^{-4}$	1.0000
Polynomial3	0.5815	0.9255
Rational33	0.2696	0.9655

由表 1 可知,函数 Gaussian3 的各项指标更优,拟合效果更好,因此选取 Gaussian3 函数作为 00:00 时刻风电出力非 0 部分的概率密度函数。

同样方法,依次对 96 个时刻的概率分布结果进行拟合,经比较,各备选函数中, Gaussian3 函数的拟合效果最优,因此, Gaussian3 函数作为各时刻的概率密度函数。限于篇幅,本文只给出其中 12 个典型时刻的拟合结果及评价指标,如表 2 所示。

表 2 中,各时刻有功出力的概率分布表示形式参

表 2 典型时刻拟合结果及拟合指标  
Tab.2 Fitting results and fitting indexes of typical instant probability distribution

时刻	$p_0$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$	$e_{SSE}$	$R_{square}$
00:00	0.2137	216.7	-0.480900	0.27180	0.9458	0.16750	0.3131	0.7937	0.6501	0.10390	$1.4852 \times 10^{-4}$	1.0000
02:00	0.2301	$1.077 \times 10^{13}$	-2.106000	0.40760	1.4490	-0.15150	0.5790	0.5877	0.6712	0.09784	0.1885	0.9767
04:00	0.2548	4.880	0.135000	0.03705	1.2090	-0.02589	0.4615	0.4318	0.6261	0.17070	0.1239	0.9837
06:00	0.2712	4.437	0.135200	0.05142	0.7641	0.34400	0.1823	0.9994	0.6613	0.06788	$8.6365 \times 10^{-4}$	0.9999
08:00	0.2986	$7.418 \times 10^{14}$	-0.413400	0.08850	31.0400	-1.97700	1.1700	0.8609	0.6640	0.06013	0.0556	0.9927
10:00	0.2603	2.161	0.103800	0.06588	0.9776	0.19600	0.3076	0.4551	0.6376	0.12510	0.0016	0.9998
12:00	0.2219	3.137	0.123500	0.06558	0.8901	0.33980	0.1785	1.0210	0.6645	0.07894	$2.2295 \times 10^{-7}$	1.0000
14:00	0.1699	1474	-1.670000	0.70650	0.4291	0.42050	0.2512	3.0090	0.6517	0.04011	0.0112	0.9983
16:00	0.1945	$8.163 \times 10^{13}$	-3.397000	0.62160	1.9380	-0.20940	0.5636	0.6459	0.6367	0.12560	0.0769	0.9884
18:00	0.2301	$1.578 \times 10^{14}$	-3.238000	0.59190	0.7983	0.25630	0.3289	0.6845	0.6628	0.09063	0.0031	0.9996
20:00	0.2192	4.053	0.006552	0.17330	0.5529	0.35470	0.1909	0.7784	0.6691	0.10980	$9.2724 \times 10^{-5}$	1.0000
22:00	0.2110	$3.713 \times 10^4$	-1.292000	0.44580	0.8883	0.18640	0.3340	0.8232	0.6950	0.08647	$2.9187 \times 10^{-4}$	1.0000

考式(3),有功出力为 0 的概率  $p_0$  单列,出力不为 0 时的概率密度函数用式(5)中参数表示。由表 2 可知,各时刻拟合概率密度函数的误差平方和均小于 0.2,复相关系数均大于 0.95,说明这些函数对实测数据的拟合效果较好,可作为各时刻的概率密度函数。

2.4 适用性校验

已求取的各时刻的概率分布分段函数是否可作为各时刻的特征属性,即是否对其他年份也具有适用性,需进行校验。取同一风电场 2011 年的实测数据进行校验,以 00:00 时刻为例,有功出力为 0 部分的概率为 0.2301,出力非 0 部分的对比结果见图 6。

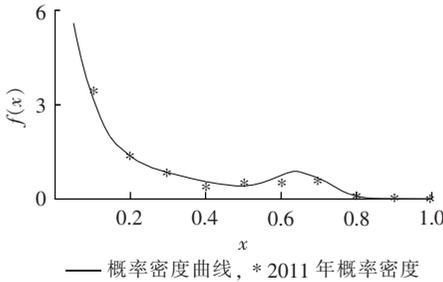


图 6 00:00 时刻的概率分布校验结果

Fig.6 Verification result of 00:00-instant probability distribution

由图 6 可直观看出非 0 部分的概率密度函数与 2011 年的数据吻合度较高。与 2.3 节中的拟合效果评价相似,除了图形的定性分析,仍需可靠的定量数值判据作为适用性校验结果的评判标准。常用式(10)、式(11)的误差评价指标<sup>[17]</sup>判定拟合函数的适用性,用式(12)判定  $p_0$  对其他年份数据的适用性。

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (10)$$

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (11)$$

$$E_0 = |p_0 - \hat{p}_0| \quad (12)$$

其中,  $E_{RMSE}$  为均方根误差;  $E_{MAE}$  为平均绝对误差;  $\hat{y}_i$  为拟合值;  $y_i$  为实际值;  $n$  为数据个数;  $E_0$  为绝对误差,

且式(12)中的  $\hat{y}_i$  取其他年份  $p_0$  值,  $y_i$  取当年  $p_0$  值。3 种误差指标的数值越接近于 0,说明概率分布分段函数的适用性越好。

由图 6 可知,00:00 时刻的概率密度函数对其他年份的数据吻合度较高,用式(10)、式(11)进一步计算拟合误差,得到相应的  $E_{RMSE}$ 、 $E_{MAE}$  值。同理,对 96 个时刻的概率分布分段函数分别进行校验。此处仍选取 12 个典型时刻,其误差评价结果如表 3 所示。

表 3 2011 年的校验结果  
Tab.3 Verification results of 2011

时刻	$E_0$	$E_{RMSE}$	$E_{MAE}$
00:00	0.0164	0.1109	0.0788
02:00	0.0137	0.1048	0.0756
04:00	0.0137	0.1857	0.1617
06:00	0.0521	0.1823	0.1293
08:00	0.0274	0.2296	0.1762
10:00	0.0575	0.2200	0.1627
12:00	0.1455	0.1041	0.0219
14:00	0.0192	0.1967	0.1453
16:00	0.0247	0.1733	0.1302
18:00	0.0219	0.0991	0.0720
20:00	0	0.1505	0.1104
22:00	0.0055	0.1027	0.0857

由表 3 可见,各时刻概率密度函数的均方根误差最大值为 0.2296,平均绝对误差最大值为 0.1762,各误差结果均小于 0.5,说明概率密度函数的适用效果较好;此外,有功出力为 0 的概率值绝对误差最大值为 0.1455,小于 0.15,亦可适用于其他年份。

3 风功率预测值的预评估

风电场出力的纵向时刻概率分布是由统计规律提炼出的该时刻有功出力的本质规律及固有属性,可表征该时刻所有可能的风电出力值及其出现的概率,准确反映该时刻有功出力的波动范围等信息,特定风电场特定时刻的有功出力具有特定的概率分布规律。因此,概率分布分段函数可以对风电场风功率预报系统输出的预测值进行预评估。

仍以 00:00 时刻为例,采用时间序列模型中的自回归-滑动平均模型(ARMA 模型)进行风功率预测<sup>[18]</sup>,根据当天的风功率数据,预测第二天 00:00 时刻的风功率,如此滚动预测得到 365 d 的 00:00 时刻的风功率,真实值与预测值的对比结果见图 7(为便于比较,图 7 只给出前 100 个点的对比图)。

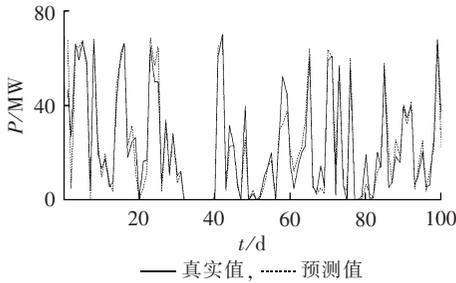


图 7 00:00 时刻预测结果

Fig.7 Prediction results for 00:00

设置不同置信水平  $\alpha$ ,由表 2 的 00:00 时刻的概率分布分段函数可获得对应的单侧置信区间<sup>[16]</sup>,由此可将预测值分为置信区间内、外的两部分。对预测值的预评估建立在置信区间内外的预测效果对比的基础上,包括 2 种评价标准:一是置信区间内外的预测平均误差对比,如式(13)所示,平均误差越小说明预测效果越好;二是置信区间内外预测值与真实值之间的相关系数对比,如式(14)所示,相关系数越接近于 1 说明预测效果越好。

$$E = \frac{\sum_{k=1}^N |P_i(k) - P_j(k)|}{P_{\text{total}}} \quad (13)$$

$$r = \frac{\sum_{k=1}^N |P_i(k) - \bar{P}_i| |P_j(k) - \bar{P}_j|}{\sqrt{\sum_{k=1}^N |P_i(k) - \bar{P}_i|^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N |P_j(k) - \bar{P}_j|^2}} \quad (14)$$

其中,  $P_i$  为预测值;  $P_j$  为真实值;  $\bar{P}_i$  为预测值的平均值;  $\bar{P}_j$  为真实值的平均值;  $N=365$ 。

定义平均误差小于 3.5%、相关系数大于 0.9 的可信度为相应置信水平。对比结果如表 4 所示。表 4 中,  $\alpha$  表示置信水平;  $E_{\text{in}}$  表示置信区间内的平均误差;  $E_{\text{out}}$  表示置信区间外的平均误差;  $r_{\text{in}}$  表示置信区间内相关系数;  $r_{\text{out}}$  表示置信区间外的相关系数。由表 4 可知,预测值位于置信区间内,其预测误差均小于 3.5%,相关系数均高于 0.9,说明预测效果较好,可信度分别为 95% 和 80%;反之,预测值位于置信区间外,误差均高于 4.5%,相关系数均低于 0.85,说

表 4 不同置信水平的预测结果

Tab.4 Prediction results for different confidence levels

$\alpha$	置信区间	$E_{\text{in}}$	$E_{\text{out}}$	$r_{\text{in}}$	$r_{\text{out}}$
95%	[0,0.6540]	3.05%	5.31%	0.9653	0.4203
80%	[0,0.3930]	2.80%	4.70%	0.9058	0.8418

明预测效果较差,可信度分别为 5% 和 20%。显然,在置信区间内的预测效果更好,预测结果更可信。

因此,可根据需要设置合适的置信水平,得到下一时刻的预测值之后,判断其是否位于对应的置信区间内,若位于置信区间内则可信度为对应置信水平。由此,在真实值出现之前实现对预测值的预评估。

由于风电的随机性很强,且受天气等因素的影响较大,因此如果风电场的风功率预报系统可以及时获得下一时刻的天气预报信息,可在整体上提高预测精度<sup>[19]</sup>。此外,根据历史风速-风功率信息,可求取对应不同风速下的风功率概率分布结果。由天气预报提供的下一时刻风速预报值可知其对应的概率分布,结合文中求取的该时刻概率分布,可在上述预测值预评估的基础上实现对预评估结果的修正。

## 4 结论

a. 本文首次提出了纵向时刻分析的概念,对 365 d 内同一时刻的风电出力概率分布进行了分析,提出了风电出力波动特性分析的新方法。

b. 对威海地区某风电场的实测数据进行了分析,得出了风电出力的纵向时刻概率分布图及概率分布分段函数。

c. 对概率分布分段函数进行了适用性校验,结果表明这些函数对不同年份的纵向时刻概率分布结果误差较小,适用性较高。

d. 本文所采用的方法可为其他风电场的波动特性分析提供参考,并可对风功率预测值进行预评估。此外,对调度计划的制定与修正、旋转容量的配置等方面也具有现实意义。

## 参考文献:

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):84-89.  
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(8):84-89.
- [2] 侯佑华,房大中,齐军,等. 大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真[J]. 电网技术,2010,34(5):60-66.  
HOU Youhua,FANG Dazhong,QI Jun,et al. Analysis on active power fluctuation characteristics of large-scale grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid [J]. Power System Technology,2010,34(5):60-66.
- [3] 肖创英,汪宁渤,渺晶,等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.  
XIAO Chuangying,WANG Ningbo,ZHI Jing,et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):64-67.
- [4] 宋曙光. 风电功率波动特性及其与储能协调策略的研究[D]. 济南:山东大学,2011.  
SONG Shuguang. Study on wind power fluctuation profile and

- coordination strategy of wind power and energy storage[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [5] 袁越,李强,李群,等. 风电功率特性分析及其不确定性解决方案[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(1):67-72.  
YUAN Yue,LI Qiang,LI Qun,et al. Wind power characteristics analysis and its uncertainty solution[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(1):67-72.
- [6] 崔杨,穆钢,刘玉,等. 风电功率波动的时空分布特性[J]. 电网技术,2011,35(2):110-114.  
CUI Yang,MU Gang,LIU Yu,et al. Spatiotemporal distribution characteristic of wind power fluctuation[J]. Power System Technology,2011,35(2):110-114.
- [7] 林卫星,文劲宇,艾小猛,等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):38-47.  
LIN Weixing,WEN Jinyu,AI Xiaomeng,et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(1):38-47.
- [8] 王丽婕,廖晓钟,高阳,等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):118-121.  
WANG Lijie,LIAO Xiaozhong,GAO Yang,et al. Summarization of modeling and prediction of wind power generation[J]. Power System Protection and Control,2009,37(13):118-121.
- [9] 洪翠,温步瀛,林维明. 基于改进 OLS-RBF 神经网络模型的短期风电场处理预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):40-44.  
HONG Cui,WEN Buying,LIN Weiming. Short-term forecasting of wind power output based on improved OLS-RBF ANN model[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):40-44.
- [10] SOMAN S S,HAMIDREZA Z. A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons[C]// North American Power Symposium(NAPS). Arlington,TX,United States:[s.n.],2010:1-8.
- [11] 彭春华,刘刚,孙慧娟. 基于小波分解和微分进化支持向量机的风电场风速预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):9-13.  
PENG Chunhua,LIU Gang,SUN Huijuan. Wind speed for forecasting based on wavelet decomposition and differential evolution-support vector machine for wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):9-13.
- [12] LARS L,WATSON S J. Short-term prediction of local wind conditions[J]. Boundary-layer Meteorology,1994,70(1-2):171-195.
- [13] 凌武能,杭乃善,李如琦. 基于云支持向量机模型的短期风功率预测[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):34-38.  
LING Wuneng,HANG Naishan,LI Ruqi. Short-term wind power forecasting based on cloud SVM model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):34-38.
- [14] 裴哲义,刘纯,董存,等. Q/GDW432—2010 风电调度运行管理规范[S]. 北京:国家电网公司,2010.
- [15] 徐曼,乔颖,鲁宗相. 短期风电功率预测误差综合评价方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(12):20-26.  
XU Man,QIAO Ying,LU Zongxiang. A comprehensive error evaluation method for short-term wind power prediction[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(12):20-26.
- [16] 陈魁. 应用概率统计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [17] 王金翠. 基于实测数据的风电场风速和风功率短期预测研究[D]. 吉林:东北电力大学,2010.  
WANG Jincui. Study on forecasting the wind speed and wind power based on the measured data of a wind farm[D]. Jilin: Northeast Dianli University,2010.
- [18] 韩路跃,杜行检. 基于 MATLAB 的时间序列建模与预测[J]. 计算机仿真,2005,22(4):105-108.  
HAN Luyue,DU Xingjian. Modeling and prediction of time series based on MATLAB[J]. Computer Simulation,2005,22(4):105-108.
- [19] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等. 风电场功率预测物理方法研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(2):1-6.  
FENG Shuanglei,WANG Weisheng,LIU Chun,et al. Study on the physical approach to wind power prediction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(2):1-6.

#### 作者简介:



吕晓禄

吕晓禄(1988-),女,山东莱芜人,硕士研究生,主要研究方向为风力发电的控制及其对电力系统的影响(E-mail: xiaolu\_lv@126.com);

梁军(1956-),男,山东龙口人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制;

贡志皓(1973-),男,山东聊城人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制。

## Longitudinal instant probability distribution of wind farm output power

LÜ Xiaolu,LIANG Jun,YUN Zhihao,MA Qingfa,WANG Hongtao,ZHANG Feng

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control,Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**Abstract:** A method of longitudinal time sequence analysis is proposed for studying the fluctuation of wind power output. The wind power outputs of the same instant for 365 or more days are analyzed based on the actual historic data and the probability distributions of wind power output for 96 different instants are thus obtained. The probabilistic characteristics of wind power output are piecewise expressed by function fitting, based on which the wind power output prediction is pre-evaluated. Case analysis shows that, the piecewise functions of probability distribution for different instants are suitable for the wind power output prediction based on the data of different years and has better effect of pre-evaluation based on the predictions of different confidence levels, which further illustrates that the characteristic of longitudinal instant probability distribution is the inherent property of wind power output.

**Key words:** wind farms; wind power; longitudinal time; fluctuation; probabilistic distribution; function fitting; pre-evaluation