

风电功率状态的时域概率特性研究

韩杏宁¹, 黎嘉明¹, 文劲宇¹, 谢海莲², 岳程燕²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;
2. ABB(中国)有限公司研究中心, 北京 100016)

摘要: 随着大规模风电的并网, 深入认识风电功率的随机特性将有利于更好地预测和利用风电。目前, 对于风电功率波动特性的研究较多, 对风电功率状态的时域概率特性的研究更侧重于对风电状态转移概率特性的描述。基于风电功率状态的定义, 深入研究了风电功率状态持续时间的概率分布描述函数和状态转移概率矩阵。基于多座风电场/群的大量实测功率数据的研究发现: 风电功率在某个特定状态可能持续几个小时甚至更长时间, 逆高斯分布较适用于描述风电功率状态持续时间的概率分布, 可为系统运行调度风电提供参考信息; 风电功率状态转移概率矩阵量化了风电场功率状态的跳变程度, 风电功率状态的跳变呈现山脊特性。

关键词: 风电功率状态; 概率特性; 持续时间; 逆高斯分布; 转移概率矩阵

Research on the time domain probabilistic characteristics of wind power state

HAN Xingning¹, LI Jiaming¹, WEN Jinyu¹, XIE Hailian², YUE Chengyan²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
2. Research Center, ABB (China) Co., Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: With the large scale integration of wind power, having a deep understanding about the stochastic characteristics can lead to more precise forecasting and better utilization on wind power. Wind power fluctuation has received well attention while the probabilistic characteristics regarding wind power states are still under progress. This paper first presents the definition of wind power states, and then studies the probabilistic descriptions of the duration time within one power state and transition between different power states employing massive measured wind power data. The duration time within one wind power state is revealed to follow inverse Gaussian distribution, which is useful for power system operation. The matrix of the transition probability between wind power states quantifies the degree of transition and shows a ridge pattern. The gradient of the ridge is related to the time scale of interest.

This work is supported by National Basic Research Program of China (No. 2012CB215106) and ABB Co., Ltd. Research Project.

Key words: wind power state; probabilistic characteristics; duration time; inverse Gaussian distribution; transition probability matrix

0 引言

大规模风电并网后, 其随机性将给电力系统的规划和运行带来重大影响, 这就需要对风电的随机特性进行深入和全面的分析研究^[1-13]。

研究者较早关注了风电功率波动特性的概率描述。文献[6]采用了 Laplace 分布拟合风电功率的波

动特性, 而文献[7]针对多时间尺度的风电功率波动特性进行分析, 认为偏斜 Laplace 分布具有更好的拟合效果。文献[8]全面分析了不同容量、不同风机类型的风电场在不同相邻时间间隔内的平均功率变化, 认为 t location-scale 分布较适合描述分钟级的风电功率波动概率特性。总体来看, 风电功率波动特性的研究已取得了较好的研究进展。

研究与风电功率状态相关的统计特性同样具有重要意义。文献[9]中将风电功率的可能出力范围均匀等分, 定义每个子区间代表风电功率的一个状态;

文献[10-11]基于此研究了描述风电功率状态转移特性的离散马尔科夫模型；文献[12]以明尼苏达州风电场的风电功率序列为例，分析了不同转移间隔下的风电功率状态的转移特性。关于风电功率状态的时域概率特性的研究主要涉及功率状态转移特性的描述，对风电功率状态持续时间的概率特性描述研究将丰富对风电功率时域概率特性的刻画，使得风电功率的随机特性更进一步被认识和掌握，从而能更好地被利用和控制。

为此，本文基于风电功率状态的定义，研究功率状态的时域概率特性，提出了风电功率状态持续时间的概率分布描述和状态转移概率矩阵，并对多座风电场/群的实测功率序列进行统计分析和定量描述，希望能有助于更加全面和客观地描述风电的随机特性。

需要说明的是，本文主要研究风电场功率序列在时域上的中长期统计特征。所提出的相关统计信息可以用于生成长时间的风电序列^[13]，为电力系统进行风电优化规划提供数据。本文并不涉及风电功率预测的相关内容^[14-15]，因为风电功率预测主要基于历史实时数据推演未来的实时数据，并力求预测准确性，以便电力系统在优化运行调度时能够更好地利用风电，与本文研究不属于相同的时间尺度。

1 风电功率状态的定义

图 1 为美国德克萨斯州装机容量为 160 MW 的 Brazos 风电场一段典型功率输出序列，序列的采样间隔为 1 min。在第 3 000 ~ 3 600 min 这 10 个小时内，该风电场的有功输出基本维持在 150 MW 附近。风电功率虽然表现出较强的波动性，但并非任何时刻均发生大幅度波动。风电功率的平稳输出将缓解系统运行调度的压力，有利于维持系统的实时功率平衡。

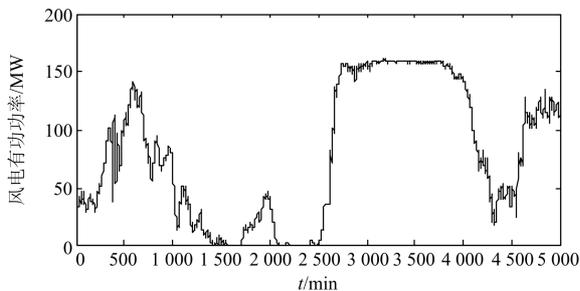


图 1 Brazos 风电场有功功率序列

Fig. 1 Active power of Brazos wind farm

为了分析风电功率持续特性，首先定义风电功率的状态。将风电功率的可能取值范围(即从 0 到风

电场的额定装机容量)离散化为若干个功率区间，每个功率区间记为风电功率的一个状态。对应的数学描述如下：

记风电场的额定装机容量为 P_E ，拟划分的状态总数为 N ，则第 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 个状态代表的功率区间范围为 $(P_{\text{lower}}^n, P_{\text{upper}}^n]$ 。其中，区间上限为 $P_{\text{upper}}^n = nP_E/N$ ，下限为 $P_{\text{lower}}^n = (n-1)P_E/N$ 。根据风电功率状态的定义，风电功率实测序列中的每一个出力情况均可对应于一个风电功率状态。

对于风电功率状态的划分，有两种情况需要特别说明：

1) 零出力情况可能由无风、小风、事故脱网等因素导致，为了不失一般性，零出力情况被单独定义为一个状态，即 0 状态，以避免风电功率的第 1 状态的数据量过于庞大。若无特殊说明，本文统一用“0 状态”描述风电场/群零出力的情况。

2) 虽然可能存在风电功率超过额定容量的情况，但由于收集到的实测数据没有出现相应的现象，本文仍采用风电场的额定装机容量作为风电功率可能取值的上限。

2 风电功率状态持续时间的概率特性

2.1 风电功率状态持续时间的定义

风电功率状态 n 的持续时间定义为风电功率 $P(t)$ 维持在状态 n 的连续时间长度 Δt ，即：

$$\Delta t = t_2 - t_1, P(t) \in (P_{\text{lower}}^n, P_{\text{upper}}^n], t_1 \leq t \leq t_2, \forall t \quad (1)$$

根据第 1 节的定义划分风电功率第 n 个状态的出力区间。通过遍历实测风电功率序列，统计风电功率 $P(t)$ 在状态 n 的持续时间 Δt 。设置起始标识为风电功率从任意状态 $m(m \neq n)$ 进入状态 n ，停止标识为风电功率从状态 n 跳出进入任意状态 $k(k \neq n)$ ，记录起始与停止标识之间对应的时间序列的时间长度 Δt ，完成一次统计。将 Δt 的统计结果按照从小到大进行排序，并统计出现的次数，整理得到风电功率保持在状态 n 内的时间长度集合。

按照上述方法，将 Brazos 风电场的风电功率划分为 11 个状态(其中 0 状态单独记录，其他状态按照等间隔选取出力区间)，则 Brazos 风电场 11 个功率状态的持续时间的统计结果如图 2 所示。

图 2 中的每一条连线代表一个风电功率状态；横轴表示持续时间长度 Δt (按照从小到大的顺序排列)，纵轴表示风电功率在某个状态下连续保持时长 Δt 的次数。图 2 描述了风电场不同功率状态的持续时间的频次曲线，若对各条曲线做归一化处理，

可以得到各状态下持续时间的概率直方图。直观来看, 各条曲线在走势上大致一致, 因此可以认为风电功率各状态持续时间的统计特性大致相同。

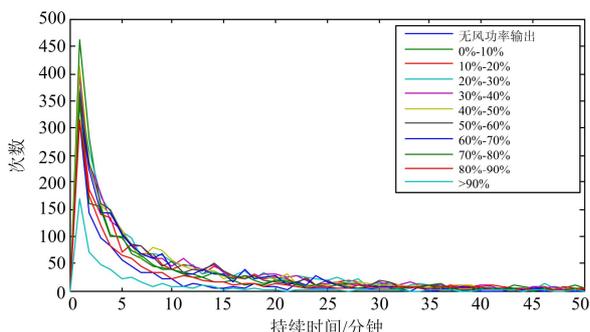


图 2 风电功率状态的持续时间统计结果

Fig. 2 Statistics of wind power states' duration time

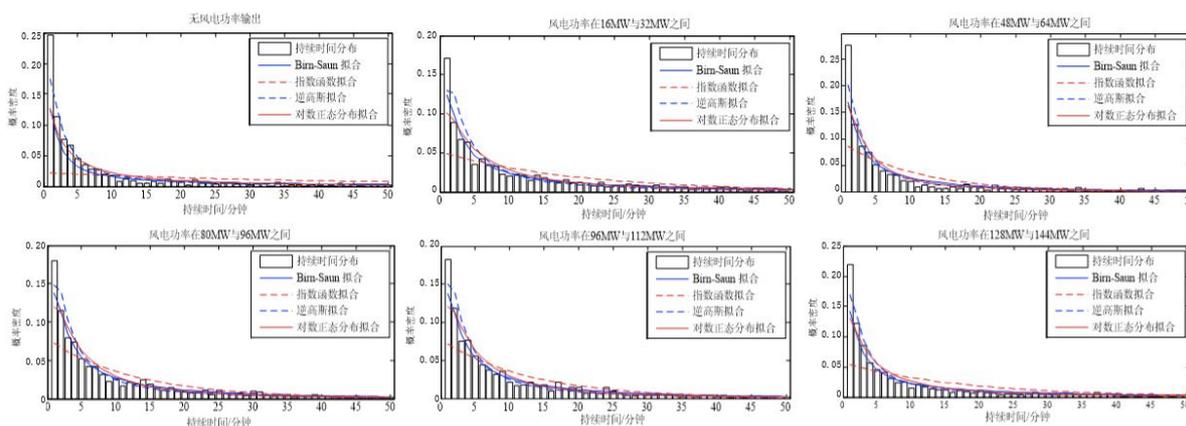


图 3 风电功率状态持续时间的概率拟合效果(部分状态)

Fig. 3 Probabilistic characteristics of duration time under partial wind power states

为了量化拟合曲线与原始概率直方图的接近程度, 采用残差平方和指标 (Residual Sum of Squares, RSS) 计算各拟合函数与直方图的误差

$$RSS = \sum (f(x_i) - pr(x_i))^2 \quad (2)$$

式中: x_i 为随机变量历史数据的取值; $f(x_i)$ 为对应的函数值; $pr(x_i)$ 为变量原始分布中 x_i 对应的概率值。RSS 计算值越小, 说明拟合曲线越接近概率直方图。

上述四种概率分布函数的 RSS 指标计算结果如表 1 所示, 定量结果进一步验证了逆高斯分布的拟合效果最好的结论。因此, 基于所研究的典型风电场, 本文提出逆高斯分布比其他分布更适合于描述风电功率持续时间的概率分布。下面基于逆高斯分布进行分析。

2.2.2 基于逆高斯分布的统计分析

逆高斯分布的表达式^[20-21]如式(3), 其中 x 为大

2.2 概率特性描述和分析

2.2.1 概率分布函数的选取

为了描述风电功率状态持续时间的概率特性, 首先对图 2 的连线图进行归一化, 得到反映其概率特性的直方图; 然后选择四种常见的概率分布函数对其进行拟合, 最后将拟合效果较好的函数选为风电功率状态持续时间的概率描述函数。

本文采用的概率函数包括 Birnbaum-Saunders 分布^[16]、指数分布^[17]、对数正态分布^[18]、逆高斯分布^[19], Brazos 风电场部分功率状态的拟合效果如图 3 所示。其中, 指数函数拟合曲线在持续时间较短的区域与原始分布相差较多, 而另外三种分布函数的拟合效果比较类似。

于零的随机变量, $\mu > 0$ 为均值, $\lambda > 0$ 为形状参数。

表 1 四种概率密度函数的 RSS 指标(单位: 10^{-3})

Table 1 RSS of fitting PDFs for all wind power states

状态编号	Birn-Saun	指数分布	逆高斯分布	对数正态分布
0	12.90	43.70	7.00	14.30
1	7.40	36.70	4.30	11.00
2	3.00	16.00	5.60	6.40
3	1.70	13.60	2.90	4.50
4	2.40	15.10	3.90	5.70
5	3.20	17.20	4.20	6.50
6	2.20	13.50	3.20	5.00
7	2.40	13.60	3.40	5.20
8	4.50	19.50	5.30	7.70
9	6.00	29.40	3.90	9.10
10	16.20	50.50	9.10	17.70
均值	5.60	24.40	4.80	8.50
均值相对误差	16.67%	408.33%	/	77.08%

注: 以逆高斯分布的 RSS 为基准计算相对误差

$$f(x; \mu, \lambda) = \left(\frac{\lambda}{2\pi x^3} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-\lambda(x - \mu)}{2\mu^2 x} \right) \quad (3)$$

典型参数的逆高斯分布曲线如图 4 所示。当 λ 取值相同, μ 越大, 分布的尖峰越低。当 λ 趋近于无穷时, 逆高斯分布逐渐趋近于正态分布。采用逆高斯分布拟合 Brazos 风电场功率状态持续时间, 基于极大似然法^[14]获取分布参数, 结果如表 2 所示。

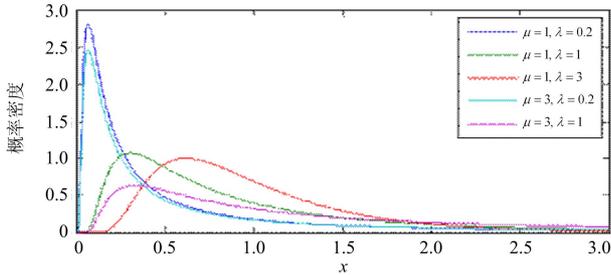


图 4 典型参数逆高斯分布曲线

Fig. 4 Inverse Gaussian distribution curves

表 2 风电功率状态持续时间的统计特性参数

Table 2 Parameters of the duration time characteristics

状态编号	出力范围/MW	μ	λ	最长持续时间/min
0	0	45.32	2.788	2 336
1	0~16	30.94	3.239	3 261
2	16~32	19.46	4.040	1 145
3	32~48	14.28	4.101	465
4	48~64	14.22	3.943	1 271
5	64~80	13.31	3.804	414
6	80~96	12.84	3.940	601
7	96~112	13.06	3.883	1 160
8	112~128	17.01	3.482	4 259
9	128~144	17.71	3.244	400
10	144~160	46.18	2.680	1 247

表中除 0 状态和 10 状态外, 其他功率状态持续时间的逆高斯分布形状参数 λ 集中在 4 左右, 进一步验证了不同功率状态持续时间的概率分布特性类似的结论。均值参数 μ 随着状态编号的增大呈现先减小后增大的编号趋势, 表明了风电功率更容易在出力较低或较高的水平保持不变, 在中等出力水平时的平均持续时间较短, 体现了更强的波动性。对最长持续时间的统计可以看出, 风电功率在任意状态下, 均有可能持续较长时间。

3 风电功率状态转移的概率特性

3.1 状态转移概率矩阵

第 2 节提出了采用逆高斯分布描述风电功率

$P(t)$ 持续保持在状态 n 下的时间的概率特性, 与之相对的是风电功率 $P(t)$ 的状态跳变情况, 即研究经过时间间隔 T 从状态 n 转移到任意状态 $m(m \neq n)$ 的概率有多大。本文引入了状态转移概率矩阵描述风电功率状态转移的概率特性。

假设转移间隔为 T , 风电功率状态转移概率矩阵为 $\mathbf{TR}_{N \times N}(T) = \{tr_{nm}\}$, N 为风电功率的状态数。元素 tr_{nm} 表示风电功率经过时间 T 后从状态 n 转移到状态 m 的概率, 即:

$$tr_{nm} = pr(P(t+T) = m | P(t) = n) \quad (4)$$

式(4)表示, 风电功率经过时间间隔 T 后处于状态 m 的概率仅与当前状态 n 相关, 与之前的一系列风电功率状态都没有关系, 属于马尔科夫过程。文献[22]中给出了高阶马尔科夫链描述的高维状态转移概率矩阵的定义, 但考虑到高维状态转移概率矩阵的数据规模庞大, 且很难直观地体现参数间的关系, 所以, 本文只分析一阶马尔科夫链描述的风电功率状态转移的概率特性。

一定长度、采样间隔为 τ 的风电功率序列的状态转移概率矩阵的生成方法如下:

(1) 根据风电场的装机容量确定风电功率的状态数 N , 进而确定每个状态对应的出力范围。

(2) 设置状态转移间隔 T ($T \geq \tau$)。

(3) 建立矩阵 $\mathbf{S}_{N \times N}$ 记录各功率状态之间的转移次数, 矩阵的行/列分别表示转移前/后的状态。假设风电功率序列的当前出力对应于状态 n , 经过 T 后的出力对应于状态 m , 则元素 s_{nm} 加 1; 完成遍历后, s_{nm} 记录了风电功率从状态 n 跳变到状态 m 的总次数。

(4) 根据式(5)计算风电功率从状态 n 跳变到状态 m 的概率 tr_{nm} :

$$tr_{nm} = s_{nm} / \sum_{m=1}^N s_{nm} \quad (5)$$

其中, $\sum_{m=1}^N s_{nm}$ 由矩阵 \mathbf{S} 第 n 行所有元素数值相加得到, 表示风电功率从状态 n 跳变到其他任一状态的总次数。

(5) 用概率值 tr_{nm} 替换矩阵 \mathbf{S} 的对应元素, 即可获得风电功率状态的转移概率矩阵 \mathbf{TR} 。

选取不同的转移间隔 T , 可生成不同的风电功率状态转移概率矩阵 $\mathbf{TR}(T)$, 根据状态转移矩阵可以大致确定下一转移间隔风电出力的大致范围。

3.2 概率特性分析

设置转移间隔为 15 min, 表 3 给出了 Brazos

风电场的风电功率状态转移概率矩阵, 其中矩阵的行、列分别代表当前时刻和 15 min 后的功率状态, 表中数值是状态转移的概率。

从表 3 可以看出, 风电功率在 15 min 后会发向其他状态转移的情况, 其中, 向相邻两个状态转移的概率最大, 而向相距较远的状态转移的概率非常小, 呈现出“山脊”特性。

以状态转移概率矩阵的第四行为例, 该行的各

元素表示 Brazos 风电场出力由状态 3(出力在 20% 到 30%装机容量之间)向其他状态转移的概率。15 min 后出力降为零(转移到状态 0)的概率仅为 0.1%, 而 15 min 后出力升至装机容量的 50%以上(转移到状态 6~10)的总概率也不超过 1%。由此, 可以认为 Brazos 风电场在 15 min 间隔下的出力变化幅度约为风电场额定装机容量的 $\pm 20\%$ 。

表 3 Brazos 风电场的风电功率状态转移概率矩阵(转移间隔为 15 min)

Table 3 Transition probability matrix of Brazos wind farm by 15-min-interval

当前状态 后一状态	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.897	0.097	0.002	0.001	0	0	0	0	0	0	0
1	0.081	0.829	0.078	0.007	0.003	0	0	0	0	0	0
2	0.003	0.138	0.695	0.144	0.011	0.004	0.002	0.001	0	0	0
3	0.001	0.012	0.191	0.600	0.171	0.018	0.005	0.002	0.001	0	0
4	0.002	0.004	0.017	0.177	0.602	0.169	0.021	0.004	0.002	0	0.001
5	0	0.002	0.005	0.022	0.193	0.582	0.173	0.020	0.003	0.001	0
6	0	0.001	0.003	0.004	0.023	0.198	0.582	0.165	0.019	0.004	0
7	0	0	0.002	0.003	0.005	0.022	0.177	0.607	0.164	0.171	0.002
8	0	0	0	0	0.001	0.004	0.017	0.148	0.703	0.116	0.009
9	0	0	0	0	0.002	0.001	0.003	0.011	0.146	0.729	0.106
10	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.004	0.097	0.895

注: 已将小于 0.1% 的概率值直接取为零, 因此表格各行的概率值之和并不严格地等于 1。

4 风电场/群有功功率的时域概率特性

4.1 数据说明

选取全球范围内 7 座不同装机规模的风电场/群数据进行较全面的统计分析。本文所选取的风电场/群基本信息如表 4 所示。

表 4 风电场/群的基本信息

Table 4 Information of aggregated wind farms

编号	风电场/群	容量/MW	国家	采样间隔	时间段
1	Delaware	28.5	美国	1 min	2008 年 1~9 月
2	Woolnorth	137	澳大利亚	5 min	2011 年 7 月
3	Brazos	160	美国	1 min	2008 年 1~9 月
4	Capridge	364	美国	1 min	2008 年 1~9 月
5	Ireland	1 474	爱尔兰	15 min	2011 年
6	UK	4 631	英国	5 min	2011-5-27~2012-12-2
7	TenneT	9 090	德国	5 min	2011 年

4.2 风电功率的状态持续时间

将表 4 列出的 7 座风电场/群的功率序列按照 5 个状态划分, 功率状态为 1、3、4 时风电功率的持续时间概率分布拟合效果如图 5 所示。

对比图 5 和图 3, 将 Brazos 风电场按照 5 个状态划分所得的持续时间概率分布特性与按照 10 个状态划分得到的统计结果类似。

对比图 5 中不同地区风电场/群的统计结果, 认为采用逆高斯分布描述风电功率状态持续时间的概率分布特性具有一定的普适性。但大规模风电场群的出力受到空间相关性和平滑效应的影响, 其功率状态持续时间的概率统计规律并没有单一风电场强。例如, 德国 TenneT 辖区风电场群的总装机容量达到 9 090 MW, 而 0.6~0.8 p.u. 功率状态的持续时间并不严格服从逆高斯分布。

4.3 风电功率的状态转移概率

按照 3.1 节介绍的方法, 首先将 7 座风电场/群的有功功率按照 11 个状态(含 0 状态)进行划分, 然后计算状态转移间隔分别为 15 min、30 min 和 60 min 的状态转移概率矩阵, 并采用柱形图来直观表现风电功率状态转移的概率特性。

图 6 中所有三维图的横轴代表当前功率状态, 纵轴代表经过转移间隔后的下一功率状态, 竖轴记录状态转移的概率值, 代表状态跳变可能性的大小。

对比图 6 的各列可以看出, 在较短的转移间隔下, 风电功率状态转移概率矩阵的“山脊”特性较为明显, 即短时间内保持原状态不变的概率最大; 而随着转移间隔的增加, 对角线元素值逐渐减小, 两侧的值逐渐增加, 风电功率保持原状态的概率逐步减小, 向其他状态转移的概率逐步增加。

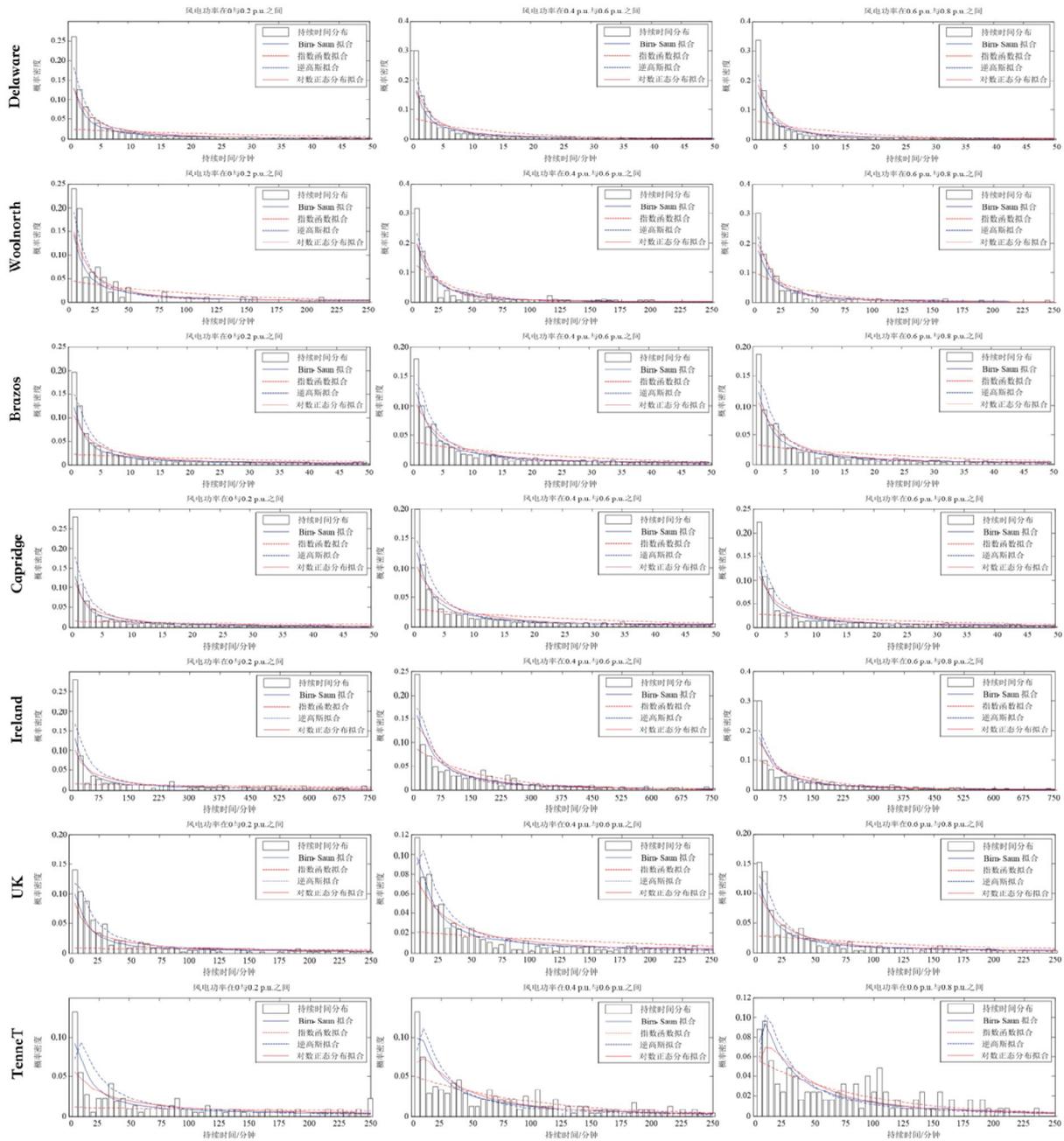


图 5 风电场/群风电功率状态持续时间的概率特性

Fig. 5 Probabilistic characteristics of duration time for different (aggregated) wind farms

7 座风电场/群的状态转移的概率特性大致相近, 均呈现一定的“山脊”特性, 且有功率保持本状态出力不变的概率值(矩阵的对角线元素)随转移间隔的增加而降低, 但降低速度并不完全相同。例如 Brazos 风电场和 Delaware 风电场的对角线元素值下降速度较快, 而 Ireland 风电场群与 UK 风电场群对角线元素值下降速度较慢。这是因为后两个风电场群的额定装机容量较大, 计及相关性后集群

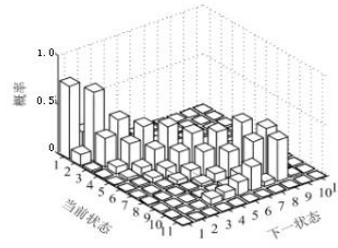
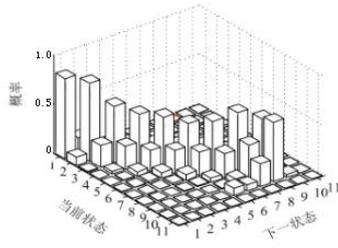
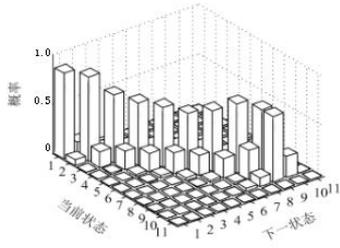
出力较单风电场来说更加平缓, 削弱了波动性, 导致整体输出风功率保持在某个状态不变的概率变高。

此外, 状态转移概率矩阵还能够清楚地描述风电场有功率未曾达到的出力状态, 此时状态转移概率矩阵的对应行、列上的所有元素均为 0。例如在实测数据所描绘的时间段内, Delaware 风电场的出力不曾超过风电场装机容量的 90%, 而 Ireland 风电场群则从未出现过有功输出为零的情况。

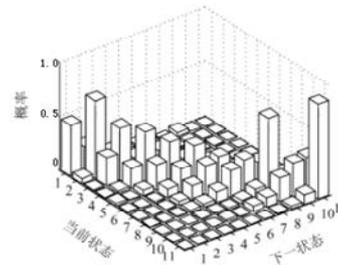
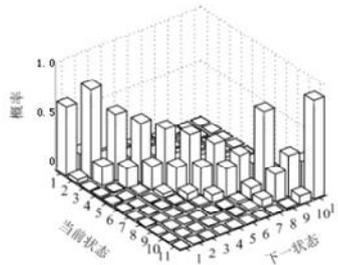
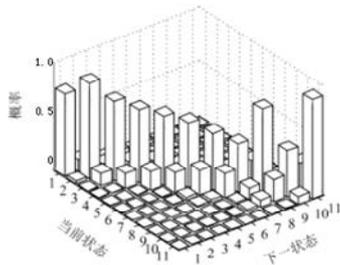
15 min 转移间隔

30 min 转移间隔

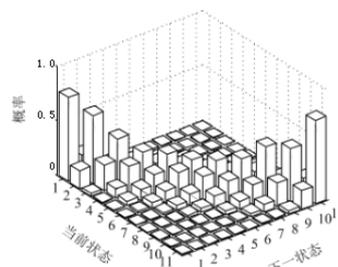
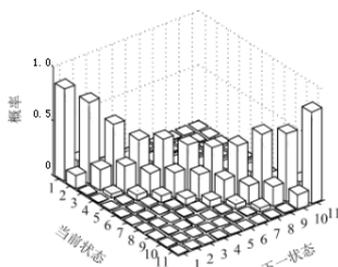
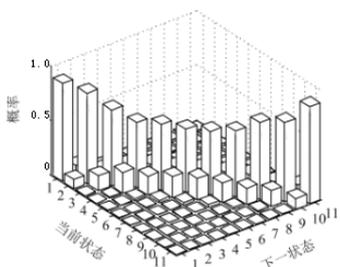
60 min 转移间隔



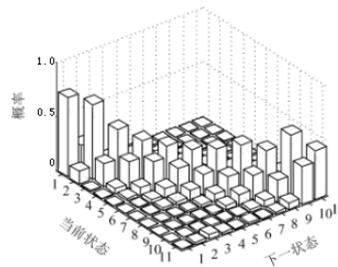
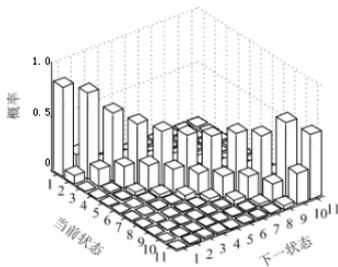
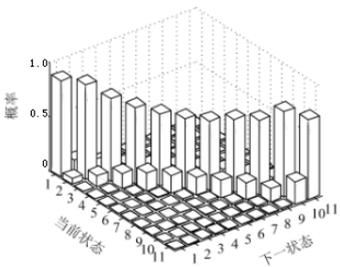
(a) Delaware 风电场



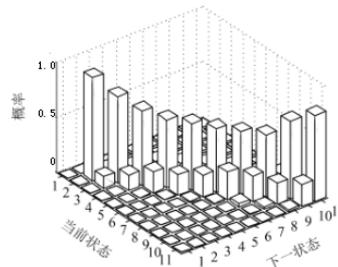
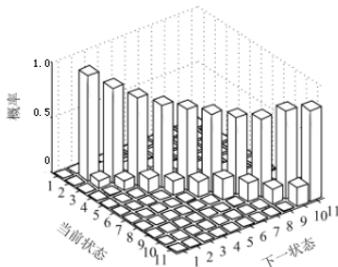
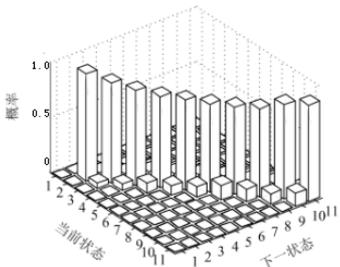
(b) Woolnorth 风电场



(c) Brazos 风电场



(d) Capridge 风电场



(e) Ireland 风电场群

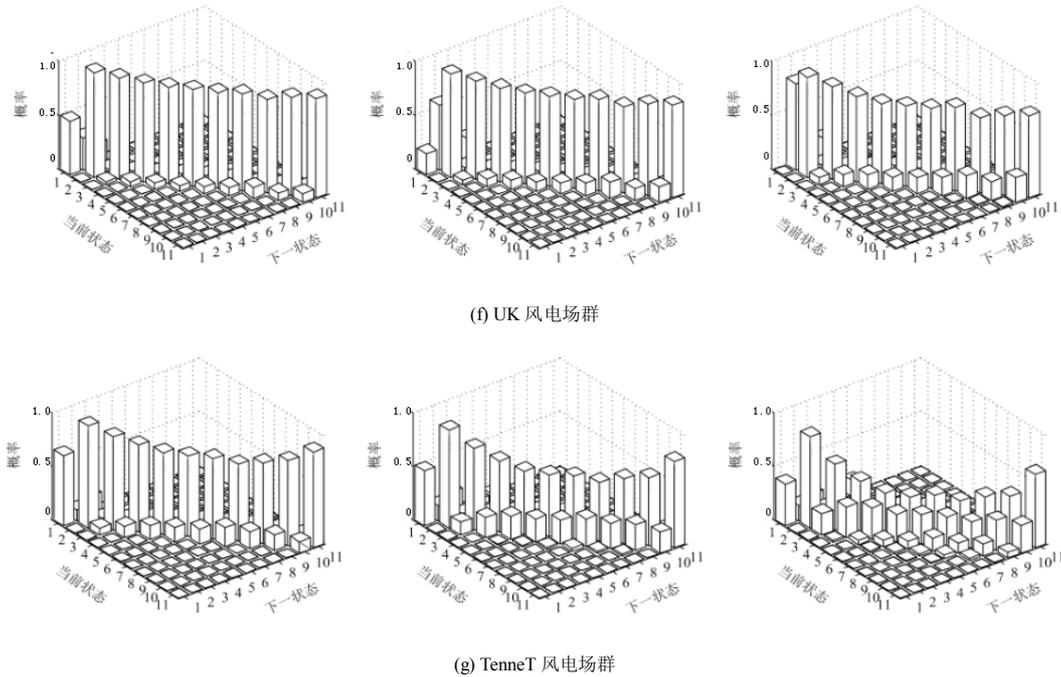


图 6 15 min、30 min、60 min 转移间隔下，风电场/群的功率状态转移概率特性

Fig. 6 Transition probability matrix of multiple wind farms by intervals of 15-min, 30-min and 60-min

5 结论

为了更加全面和客观地描述风电功率的时域概率特性，以补充对风电功率波动特性的分析。本文提出了风电功率状态的定义，并基于此研究风电功率状态持续时间和状态转移的概率特性，得到了以下结论：

1) 风电功率状态的持续时间大致满足逆高斯分布，即各状态下持续较短时间的概率大于持续较长时间的概率，而且随着持续时间的增加，概率逐渐减小。风电场有可能长时间(数小时甚至数日)保持相同的出力状态，且在出力较低或较高的状态保持不变的平均时间要长于保持中等出力状态的平均时间。掌握风电功率状态持续时间的概率分布特性后，可估计风电功率持续保持某一出力水平的时间长度，为风电的运行和调度提供参考信息。

2) 风电功率的状态转移概率矩阵呈现“山脊”特性，表明短时间内风电功率保持原状态不变的概率远大于转移到其他状态的概率，且向越远状态转移的概率越小。根据状态转移概率矩阵可以推测转移间隔下风电场/群有功功率的变化幅度。风电功率状态转移概率特性量化了风电场功率状态的跳变，当以采样间隔作为转移间隔时，可根据当前时刻风电功率的状态推测下一个时刻风电功率的可能状

态，获得更准确的超短期风电功率预测；同时也从另一个方面反映了风电功率的波动特性。

需要说明的是，以上结论主要基于本文所研究的 7 座风电场/群的实测数据。

参考文献

[1] 夏添, 查晓明, 秦亮, 等. 风电功率短时骤降的极值统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 8-15.
XIA Tian, ZHA Xiaoming, QIN Liang, et al. Statistical analysis of extreme wind power ramp-down events[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 8-15.

[2] 张远实, 潘延林. 风电功率模拟生成模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 126-131.
ZHANG Yuanshi, PAN Yanlin. Studies on wind power curves simulation via a stochastic process[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 126-131.

[3] 陈昊, 万秋兰, 王玉荣. 基于厚尾均值广义自回归条件方差族模型的短期风电功率预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 91-98.
CHEN Hao, WAN Qiulan, WANG Yurong. Short-term wind power forecast based on fat-tailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 91-98.

[4] 杨茂, 齐玥, 孙勇, 等. 基于数字信号处理的风电功率日周期性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 107-112.

- YANG Mao, QI Yue, SUN Yong, et al. Study on day periodicity of wind farm output active power based on digital signal processing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 107-112.
- [5] 艾小猛, 韩杏宁, 文劲宇, 等. 考虑风电爬坡事件的鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 188-195. AI Xiaomeng, HAN Xingning, WEN Jinyu, et al. Robust unit commitment considering wind power ramp events[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 188-195.
- [6] LOUIE H. Evaluation of probabilistic models of wind plant power output characteristics[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2010, Singapore: 442-447.
- [7] NAZIE M S, BOUFFARD F. Intra-hour wind power characteristics for flexible operations[C] // Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, San Diego: 1-8.
- [8] 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): 38-46. LIN Weixing, WEN Jinyu, AI Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38-46.
- [9] PAPAETHYMIU G, KLOCKL B. MCMC for wind power simulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 234-240.
- [10] CHEN P, BERTHELSEN K K, BAK Jensen B, et al. Markov model of wind power time series using Bayesian inference of transition matrix[C] // Proceedings of the Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics, 2009, Porto: 627-632.
- [11] HOCAOGLU F O, GEREK O N, KURBAN M. The effect of Markov chain state size for synthetic wind speed generation[C] // Proceedings of the International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008, Rincon: 1-4.
- [12] WAN Y H. Wind power plant behaviors: analyses of long-term wind power data[R]. NREL Technical Report TP-500-36551, 2004.
- [13] 于鹏, 黎静华, 文劲宇, 等. 含风电功率时域特性的风电功率序列建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3715-3723. YU Peng, LI Jinghua, WEN Jinyu, et al. A wind power time series modeling method based on its time domain characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3715-3723.
- [14] 张颖超, 郭晓杰, 叶小岭, 等. 一种短期风电功率集成预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 90-95. ZHANG Yingchao, GUO Xiaojie, YE Xiaoling, et al. An integrated forecasting method of short-term wind power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 90-95.
- [15] 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 Jiangu, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on SVM optimized by GA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 90-95.
- [16] BIRNBAUM Z W, SAUNDERS S C. A new family of life distributions[J]. Journal of Applied Probability, 1969, 6(2): 319-327.
- [17] 刘次华, 万建平. 概率论与数理统计[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [18] STEELE C. Use of the lognormal distribution for the coefficients of friction and wear[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 93(10): 1574-2013.
- [19] FOLKS J L, CHHIKARA R S. The inverse Gaussian distribution and its statistical application - a review[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 1978, 40(3): 263-289.
- [20] EDGEMAN R L. Assessing the inverse Gaussian distribution assumption[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1990, 39(3): 352-355.
- [21] Inverse Gaussian Distribution[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_Gaussian_distribution.
- [22] SHAMSHAD A, BAWADI M A, WANHUSSIN W, et al. First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series[J]. Energy, 2005, 30(5): 693-708.

收稿日期: 2015-07-31; 修回日期: 2016-04-18

作者简介:

韩杏宁(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为储能容量优化配置、新能源并网优化规划; E-mail: xingning.han@gmail.com

黎嘉明(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为电网大面积故障恢复策略、新能源并网技术; E-mail: jiaming.Li-sgo@qq.com

文劲宇(1970-), 男, 教授, 通信作者, 博士生导师, 主要研究方向为大电网大机组安全稳定控制、储能与新能源并网等。E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)