

DOI: 10.7667/PSPC170290

# 超短期风电功率爬坡事件检测和统计分析

杨茂<sup>1</sup>, 马剑<sup>1</sup>, 李大勇<sup>2</sup>, 刘红柳<sup>1</sup>, 孙涌<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司通化供电公司, 吉林 通化 132022; 3. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 随着风电渗透率的逐渐增加, 超短期风电功率爬坡事件对电力系统的影响愈来愈显著。当前国内对爬坡事件没有明确定义, 且缺少相应的检测方法和统计分析。阐述了爬坡事件的定义, 提出了一种超短期风电功率爬坡事件检测方法, 并从爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个方面对上爬坡和下爬坡两种爬坡类型进行了统计。最后分析了超短期风电功率爬坡事件的日、月分布规律。实例证明, 所提出的检测方法可以快速准确地检测出风电功率爬坡事件及其特征值。统计结果表明, 上爬坡事件和下爬坡事件的爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个爬坡特征具有较高对称性, 但两类爬坡事件高发在一天之中不同的时段, 也表现出明显的日、月分布特征。

**关键词:** 超短期; 风电功率; 爬坡事件; 检测; 统计分析

## Ultra-short-term wind power climbing event detection and statistical analysis

YANG Mao<sup>1</sup>, MA Jian<sup>1</sup>, LI Dayong<sup>2</sup>, LIU Hongliu<sup>1</sup>, SUN Yong<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;  
2. Tonghua Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Corporation, Tonghua 132022, China;  
3. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** With the increase of wind power penetration, the ultra-short-term wind power climbing events exert more and more significant influence on power system. The domestic definition of climbing event is not yet clear at present, and lack of the corresponding detection methods and statistical analysis. This paper expounds the definition of climbing events, proposes a ultra-short-term wind power climbing event detection method, and makes a statistic in terms of ramp duration, rate, and swing for up-ramps and down-ramps. Finally, it analyzes the ultra-short-term wind power climbing events distribution regularity in the form of daily cycles and yearly cycles. Instances prove that the proposed detection method can rapidly and accurately detect the wind power climbing event and its characteristic value. Statistical calculation shows that the ramp duration, rate, and swing of the up-ramps and down-ramps have high symmetry, but the high incidence of the two types of climbing events happen in different period of the day, they also show an obvious daily and monthly distribution characteristics.

This work is supported by National Major Basic Research Program (973 Program) (No. 2013CB228201) and National Natural Science Foundation of China (No. 51307017).

**Key words:** ultra-short-term; wind power; climbing event; detection; statistical analysis

## 0 引言

随着风电场规模的不断增大, 风电功率爬坡事件给电力系统造成的影响也愈来愈显著<sup>[1-2]</sup>。尤其在极端气象条件下, 风电功率输出会出现陡升和陡降

现象, 形成高风险的爬坡事件, 对电力系统的电源和负荷平衡造成严重影响<sup>[3-4]</sup>。

对超短期风电功率历史时间序列进行爬坡事件检测和统计分析, 有益于保证系统运行的可靠性, 对未来电网的优化配置和合理调度同样至关重要<sup>[5-13]</sup>。目前国内外对爬坡事件主要集中在对预测方法的研究。如文献[14]对爬坡事件提出了一种基于原子稀疏分解和 BP 神经网络的风电功率爬坡事

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2013CB228201); 国家自然科学基金项目(51307017)

件预测方法; 文献[15]介绍了一种风电功率爬坡预测系统, 来预测未来 0~6 h 的风电功率爬坡事件; 文献[16]介绍了丹麦 Weprog 公司开发的多方案综合预测系统(MSEPS); 文献[17]通过统计风电功率历史数据来对爬坡事件进行分析, 得到发生严重程度爬坡事件的分布及不同时段下爬坡事件发生的频率; 文献[18]提出应用指数平滑法和自回归滑动平均法, 基于预测点前 1 h 的信息来预测未来 1 min 的风电功率爬坡变化率。

本文针对超短期风电功率爬坡事件的检测和统计两个方面进行研究。首先阐述了其研究背景及对超短期风电功率爬坡事件的定义; 其次提出了一种超短期风电功率爬坡事件检测方法; 然后利用实例从爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个方面分别对上爬坡事件和下爬坡事件进行了统计。最后分析了超短期风电功率爬坡事件在日、月中发生频率的分布规律。

实例表明, 本文提出的检测方法可以快速准确地检测出风电功率爬坡事件及其特征值。统计结果表明, 上爬坡事件和下爬坡事件的爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个爬坡特征具有较高对称性, 但两类爬坡事件高发在一天之中不同的时段, 也表现出显著的日、月分布特征。

## 1 风电功率爬坡事件定义

幅值、方向、爬坡率、起止时间和持续时间是风电功率爬坡事件的 5 个显著特征, 如图 1 所示。幅值通常以额定功率的百分比定义, 方向用幅值的正负表示: 正代表上升爬坡, 负代表下降爬坡。爬坡事件往往具有高幅值、短持续时间的显著特点, 爬坡幅值愈大, 持续时间愈短, 则爬坡事件越严重。

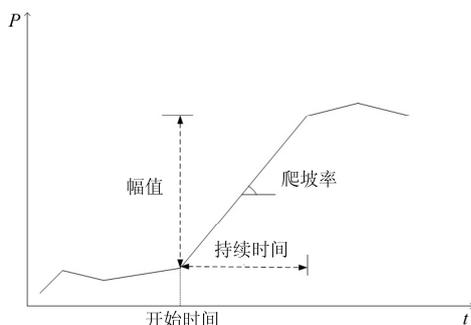


图 1 爬坡事件特征图

Fig. 1 Climbing event feature maps

文献[19]介绍了 5 种爬坡事件的定义, 本文采用其中一种, 分析爬坡事件对风电功率实时预测误差的影响。定义如下: 如果在时段  $\Delta t$  内, 风电功率

信号最大与最小值之差大于所设功率阈值  $P_{thr}$ , 即有不等式:

$$\max_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i) - \min_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i) > P_{thr} \quad (1)$$

成立, 则认为该时段发生风电功率爬坡事件。其中:

$\max_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i) - \min_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i)$  为爬坡幅值;  $\Delta t$  为与爬坡事

件持续时间相关的一个时段参数, 一般设定为 15 min、30 min 或 60 min;  $P_{thr}$  为功率阈值, 发生上升爬坡事件时通常取风电机组额定装机容量的 20%, 发生下降爬坡事件时通常取风电机组额定装机容量的 15%。

通过定义可直观地看出风电功率爬坡事件的类型: 当  $\max_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i) > \min_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i)$  时, 为下降爬坡事件;

当  $\max_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i) < \min_{i \in [t, t+\Delta t]} P(i)$  时, 为上升爬坡事件。

## 2 超短期风电功率爬坡事件检测原理流程

根据不同的爬坡事件定义分别进行风电功率爬坡事件检测, 结果可能不同。目前, 尚未有满足所有定义的超短期风电功率爬坡检测方法。本文根据第一部分对风电功率爬坡事件的定义设计检测方案。设最终检测出来的风电功率爬坡事件持续时间为  $T$ 。为准确检测出持续时间  $T$ , 基于风电功率实测时间序列数据, 采用一相对固定宽度的小时窗(窗口宽度为  $\Delta t$ )进行滑动式动态扫描<sup>[20]</sup>, 如图 2 所示。由不断扫描出的相关信息, 判定风电功率爬坡事件过程的起始时间、持续时间和结束时间。

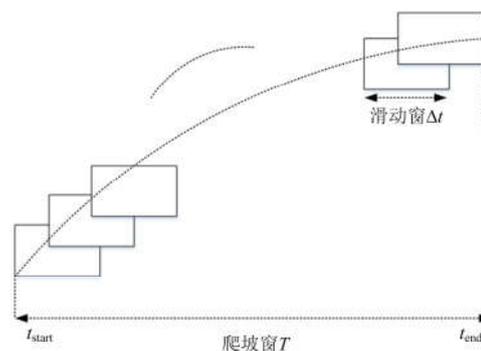


图 2 滑动窗动态扫描图

Fig. 2 Sliding window dynamic scan figure

检测流程分为两步: 爬坡事件检测和爬坡事件合并, 检测与合并流程同时进行。图 3 为爬坡事件检测流程, 本文设定时段长度  $\Delta t = 15 \text{ min}$ 、功率阈值  $P_{thr} = 20\% \times \text{装机容量}$ 。图中,  $t_i$  为数据采样时间点, 其采样时间间隔为 1 min。为使采样数据得到充分利用, 本文采用滑动平移时间窗口技术逐点检测爬坡事件, 窗口每滑动一次就会得到 1 个时间上

重叠的爬坡序列，因此还需要一个爬坡合并流程对此进行合并处理，最终获得  $M$  个时间上没有重叠的爬坡序列。

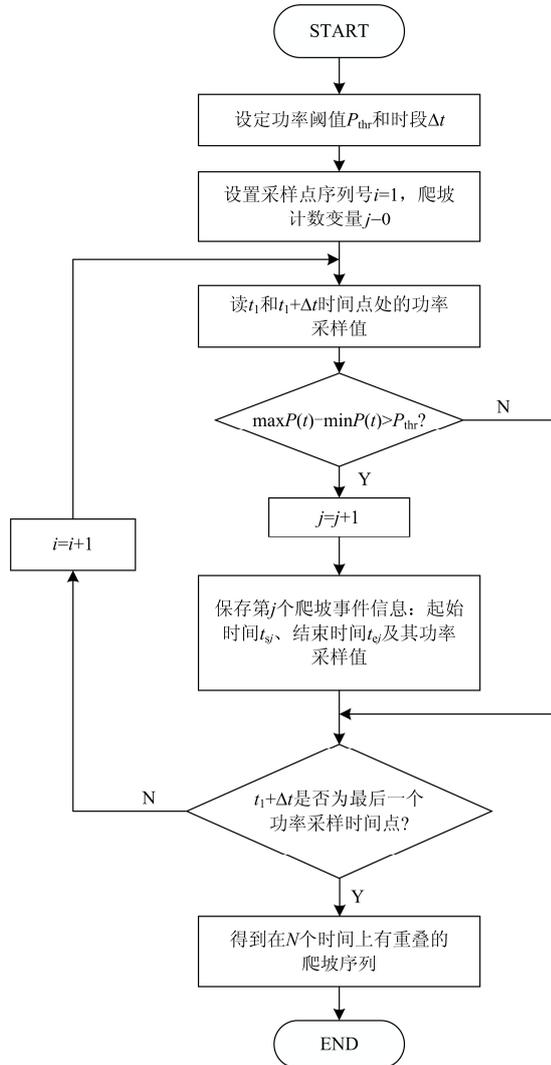


图3 爬坡事件检测流程图

Fig. 3 Climbing event detection flow chart

图4为爬坡事件合并流程图，其步骤如下：

1) 置合并前后的爬坡计数变量分别为  $j=1$  和  $m=0$ ;

2) 当检测到两个爬坡时，后一个的起始时间与前一个的结束时间间隔小于或等于  $\tau$  时，则将它们合并为一个持续时间更长的新爬坡，重复该合并过程，直到检测到后一个爬坡起始时间与前一个爬坡的结束时间大于  $\tau$  为止，并记录第  $j$  个爬坡的开始时间作为新爬坡事件的开始时间，第  $j+k-1$  个爬坡的结束时间作为结束时间；

3) 当检测流程中未出现重叠爬坡序列，则跳到后一个爬坡事件检测，直到  $N$  个爬坡事件检测完毕

时流程结束。

合并流程可以看作是寻找爬坡事件结束点的过程，当出现连续  $\tau$  分钟不满足爬坡定义即判定爬坡结束，否则认为爬坡事件一直在持续。

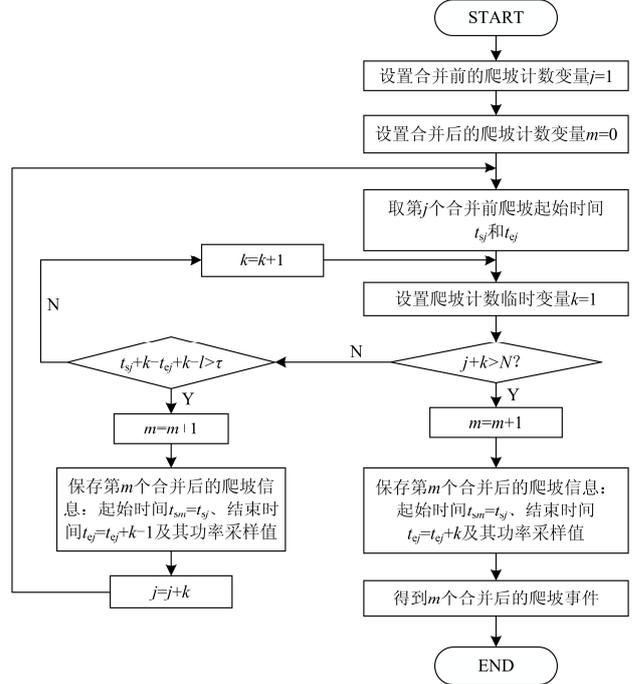


图4 爬坡事件合并流程图

Fig. 4 Climbing event combined flow chart

### 3 实际风电场风电功率爬坡事件检测与统计计算例分析

#### 3.1 超短期风电功率爬坡事件检测

以吉林省风电场1为例，该风电场装机容量为265.5 MW。数据采样的时间段为2012年8月1日至2012年8月31日，采样数据为风电场总功率，本文采用的是经过处理的间隔为1 min的数据，共44 640个点。首先取2012年8月1日0时至2012年8月7日6时的600个点作为数据样本进行爬坡事件检测。本算例爬坡检测流程设置爬坡时间窗  $\Delta t=15$  min，风电功率阈值  $P_{thr}=20\% \times$  风电机组额定装机容量。检测结果如图5所示。图中实线为原始风电功率时间序列，带有方形标记的虚线段表示发生上爬坡事件，方块标记了上爬坡事件的起始和结束时间；带有三角形标记的虚线段表示发生了下爬坡事件，三角标记了上爬坡事件的起始和结束时间。可以清楚地得到上爬坡事件和下爬坡事件发生的起始时间、持续时间和幅值等特征信息，说明本文检测方法可以有效地检测到超短期风电功率历史数据中的爬坡事件。

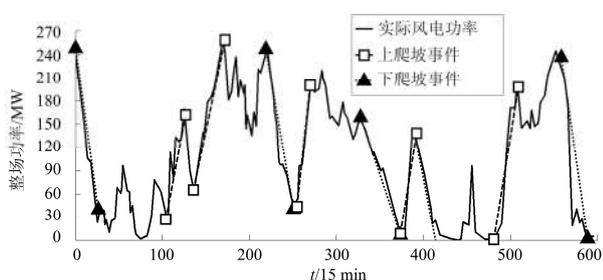


图 5 风电功率时间序列和爬坡事件检测结果图

Fig. 5 Wind power time series with detected wind ramps

再利用 2012 年一整年的数据, 采用两种检测方法: 传统方法和本文检测流程, 进行爬坡事件检测, 检测结果如表 1 所示。传统检测方法参照文献[21], 采用定义: 风电功率时间序列  $P(t)$  在时间段  $\Delta t$  起止点的功率变化幅度超过了阈值  $P_{thr}$ , 即有不等式  $|P(t + \Delta t) - P(t)| > P_{thr}$  成立, 则认为该时段发生风电功率爬坡事件。传统检测方法没有采用滑动窗技术且没有合并流程, 容易漏检和错检。

表 1 所示为不同检测方法的爬坡事件检测结果。由表 1 可以看出, 相较于传统方法, 本文的检测流程具有更高的准确率, 证明了本文所提检测流程的有效性。由表 1 的检测结果也可以看出, 该风电场一年内发生上爬坡事件 562 次, 发生下爬坡事件 537 次, 平均每天发生 1~2 次上下爬坡事件。虽然爬坡事件数目整体占比很小, 但其在短时间内发生大的功率变化, 对电力系统的危害不容忽视。

表 1 爬坡事件检测结果

Table 1 Climbing events detection result table

爬坡类型	实际值	传统检测方法	本文检测方法
上爬坡事件数目/个	562	319	558
下爬坡事件数目/个	537	382	526

### 3.2 上爬坡事件和下爬坡事件的爬坡率、持续时间和爬坡幅值经验分布

本节仍然采用上面算例的原始数据进行分析。采用经验概率密度函数统计分析爬坡事件的持续时间、爬坡率和幅值。

经验概率密度利用数据直方图的平滑样条计算得到, 详见文献[22], 本文不再详述。计算结果见图 6。

由图 6 可以看出:

1) 上爬坡事件和下爬坡事件对于爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个特征的统计结果曲线(虚线和实线)高度相似, 即具有很高的对称性;

2) 两种爬坡类型的平均爬坡持续时间均为

2.5 h, 最短持续时间为 30 min, 95%的爬坡事件持续时间低于 5.6 h, 爬坡事件的持续时间集中在均值附近, 持续时间很长的爬坡事件出现概率极小;

3) 两种爬坡类型的平均爬坡率为 9.6 MW/h, 50%的爬坡事件爬坡率在 5.6~12 MW/h, 爬坡率高于 11.2 MW/h 的爬坡事件不到 5%;

4) 平均爬坡幅值为 97.6 MW, 最小幅值为 53 MW(等于阈值  $P_{thr} = 20\% \times$  装机容量), 最大幅值为 250 MW(对应于装机容量), 50%的爬坡幅值集中在 80~110 MW(均值附近), 95%的爬坡事件爬坡幅值低于 180 MW。

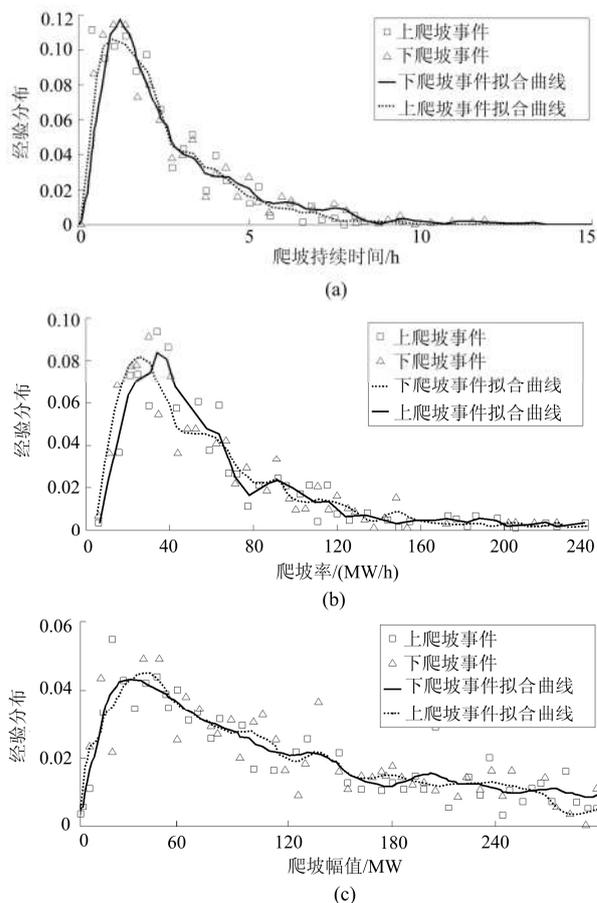


图 6 爬坡事件持续时间、爬坡率和爬坡幅值经验分布图  
Fig. 6 Empirical distributions for ramp duration, rate, and swing

### 3.3 爬坡事件季节性

本节依然采用上面算例的原始数据进行分析。统计日周期和月周期情况下的上爬坡事件和下爬坡事件的发生频率。其结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出:

1) 上爬坡事件和下爬坡事件高发在一天中的不同时间段。上爬坡事件在中午和下午时间段比较高发, 下爬坡事件在晚上和深夜时间段比较高发。

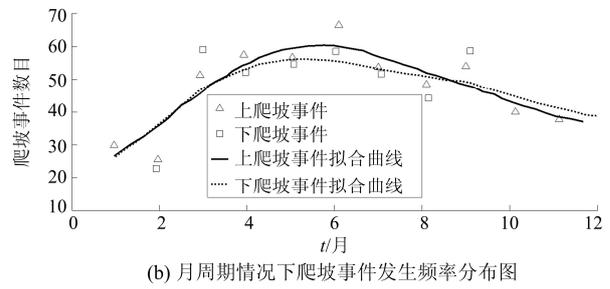
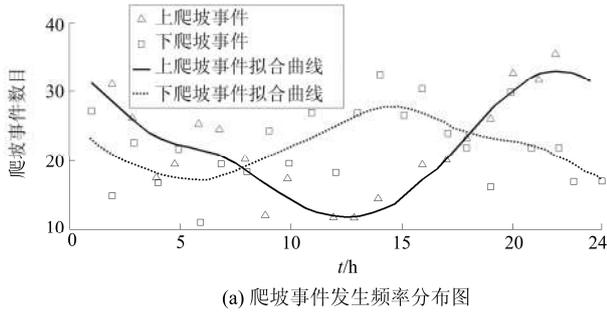


图 7 爬坡事件季节性

Fig. 7 Seasonality of ramp events

2) 春夏季比秋冬季的爬坡事件发生频率高, 这可以为电网在考虑备用容量的时候提供帮助。

表 2 为超短期风电功率爬坡事件月度分布情况

表。由表 2 可知, 6 月份爬坡事件最多, 3、4、5、6、7、8 这六个月份发生爬坡事件偏多, 说明该风电场春夏季为爬坡事件高发季节。

表 2 超短期风电功率爬坡事件月度分布情况

Table 2 Monthly distribution of the ultra-short-term wind power climbing events

爬坡类型	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上爬坡事件	爬坡/个	30	26	51	57	56	67	53	49	60	40	38	31
下爬坡事件	爬坡/个	30	23	59	51	53	58	52	45	55	40	37	33

### 3.4 算例二

以吉林省风电场 2 为例, 该风电场装机容量为 225 MW。数据采样的时间段为 2012 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日, 采样数据为风电场总功率。本文采用的是经过处理的间隔为 1 min 的数据, 共 44 640 个点, 取 2012 年整年的数据作为数据样本进行爬坡事件检测。本算例中爬坡检测流程设置爬坡时间窗  $\Delta t=15 \text{ min}$ , 风电功率阈值  $P_{\text{thr}}=20\% \times \text{风电机组额定装机容量}$ 。检测结果如图 8 所示。

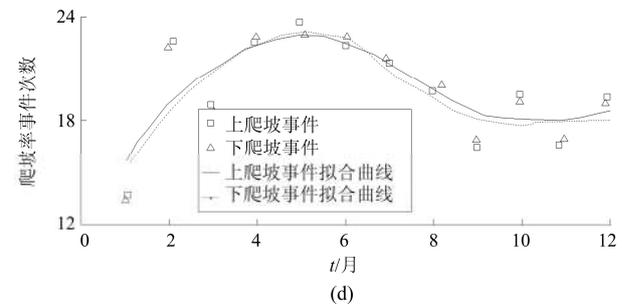
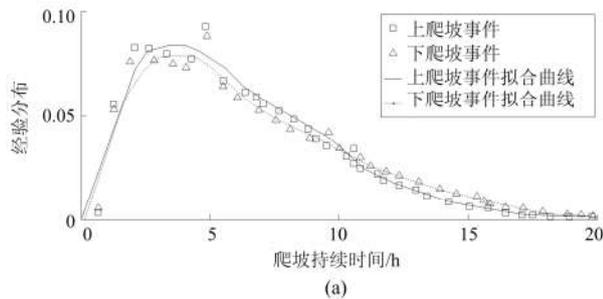
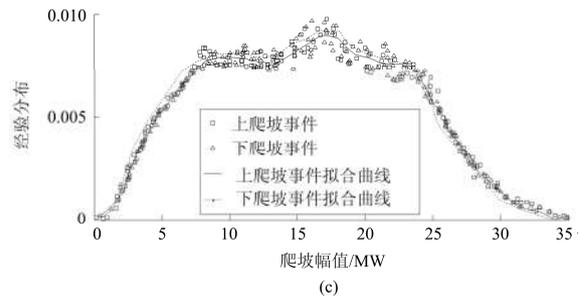
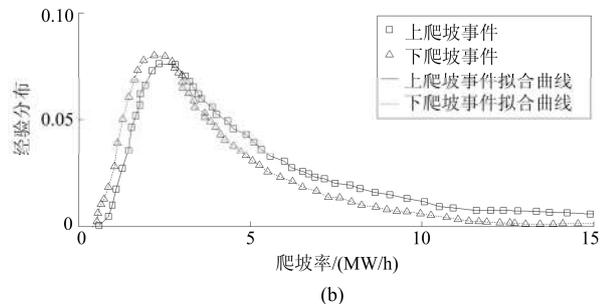


图 8 爬坡事件持续时间、爬坡率、爬坡幅值经验分布和爬坡月份计数图

Fig. 8 Empirical distributions for ramp duration and rate for up-ramps and down-ramps, as well as monthly ramp counts

由图 8 可以看出, 结果跟算例一的结论是一致的: 上爬坡事件和下爬坡事件, 对于爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个特征的统计结果具有很高的相似性; 春夏季比秋冬季爬坡事件发生频率高。再次证明了统计结论和本文超短期风电功率爬坡事



件检测方法的有效性。

#### 4 结论

本文给出了超短期风电功率爬坡事件的定义, 设计了超短期风电功率爬坡事件检测流程, 提出了采用滑动窗技术实现超短期风电功率爬坡事件检测的方法。实例证明应用该方法可以快速准确地检测出风电功率爬坡事件, 并得到相关特征值。将上述方法应用在吉林省某风电场 2012 年的风电功率爬坡事件检测中, 根据检测结果统计了上爬坡事件和下爬坡事件的爬坡幅值、持续时间及爬坡变化率等特征, 以及它们之间的关系, 并统计分析出了上爬坡事件和下爬坡事件的日、月发生的频率规律。

1) 上爬坡事件和下爬坡事件的爬坡持续时间、爬坡变化率和爬坡幅值三个爬坡特征统计结果具有较高对称性。超过 50% 的爬坡事件特征值集中在均值附近, 极端爬坡事件发生概率低于 5%。

2) 算例风电场平均每天发生一到两次爬坡事件, 爬坡事件数目整体占比很小, 属于小概率事件, 但在短时间内发生大的功率变化, 对电力系统的危害不容忽视。

3) 上爬坡事件和下爬坡事件高发在一天中的不同时间段, 上爬坡事件在中午和下午时间段高发, 下爬坡事件则在晚上和深夜时间段高发。春夏季比秋冬季节爬坡事件的发生频率高。这个结果可以为电网备用容量的设计提供帮助。

#### 参考文献

- [1] 叶林, 刘鹏. 基于经验模态分解和支持向量机的短期风电功率组合预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 102-108.  
YE Lin, LIU Peng. Combined model based on EMD-SVM for short-term wind power prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 102-108.
- [2] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7-13.  
LIU Bo, HE Zhijia, JIN Hao. Wind power status and development trends[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(2): 7-13.
- [3] 杨茂, 季本明. 基于局域一阶加权法的风电功率超短期预测研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(5): 6-10.  
YANG Mao, JI Benming. The ultra-short-term forecasting of wind power based on local one-order weighted method[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(5): 6-10.
- [4] 杨茂, 孙涌, 孙兆键, 等. 风电场大规模数据管理系统设计与研发[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(2): 27-31.  
YANG Mao, SUN Yong, SUN Zhaojian, et al. Design and development of large-scale data management system of wind farm[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, 34(2): 27-31.
- [5] 叶林, 任成, 赵永宁, 等. 超短期风电功率预测误差数值特性分层分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 692-700.  
YE Lin, REN Cheng, ZHAO Yongning, et al. Stratification analysis approach of numerical characteristics for ultra-short-term wind power forecasting error[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 692-700.
- [6] 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. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [7] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.  
QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [8] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.  
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [9] 杨德友, 蔡国伟. 基于因散经验模式分解与最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(3): 44-49.  
YANG Deyou, CAI Guowei. The short-term wind speed forecasting for wind farm based on EEMD and LS\_SVM[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(3): 44-49.
- [10] 刘红柳, 杨茂. 基于小波变换和支持向量机的风电功率爬坡事件识别与预测[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(6): 30-35.  
LIU Hongliu, YANG Mao. An approach for wind power climbing event identification and prediction based on wavelet and SVM[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(6): 30-35.
- [11] 杨茂, 吕天峰, 季本明. 混沌理论在电力系统负荷预测中应用综述[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(3): 18-21.

- YANG Mao, LÜ Tianfeng, JI Benming. A review of chaos theory in power system load prediction[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(3): 18-21.
- [12] 杨茂, 黄宾阳. 基于灰色缓冲算子-卡尔曼滤波双修正的风电功率实时预测研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(1): 101-109.
- YANG Mao, HUANG Binyang. Research on real time prediction of wind power based on Grey buffer operator and Kalman filter double correction[J]. Renewable Energy, 2017, 35(1): 101-109.
- [13] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [14] 崔明建, 孙元章, 柯德平. 基于原子稀疏分解和 BP 神经网络的风电功率爬坡事件预测[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 6-11.
- CUI Mingjian, SUN Yuanzhang, KE Deping. Short-term wind power forecasting based on atomic sparse decomposition theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 120-125.
- [15] ZACK JOHN W, YOUNG STEVE, COTE MATTEW, et al. Development and testing of an innovative short-term large wind ramp forecasting system[C] // Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, Warsaw, Poland: 2010.
- [16] JORGENSEN J. AESO wind power forecasting pilot project[R]. Calgary Canada: 2007.
- [17] KAMATH C. Understanding wind ramp events through analysis of historical data[J]. Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Expo, New Orleans, La, April, 2010, 13(4): 1-6.
- [18] HWANG M Y, JIN C H, LEE Y K. Prediction of wind power generation and power ramp rate with time series analysis[C] // Awareness Science and Technology (iCAST), 2011: 512-515.
- [19] 崔明建, 孙元章, 柯德平, 等. 考虑电网侧频率偏差的风电功率爬坡事件预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 8-13.
- CUI Mingjian, SUN Yuanzhang, KE Deping, et al. Prediction method for wind power ramp events considering frequency deviation of power grid side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 38(5): 8-13.
- [20] 任双雪. 风电功率陡坡特性与预测问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- REN Shuangxue. Research on wind power ramp characteristics and prediction[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [21] FERREIRA C, GAMA J, MATIAS L, et al. A survey on wind power RAMP forecasting[R]. Argonne National Laboratory (ANL), 2011.
- [22] ZAREIPOUR H, DONGLIANG H, ROSEHART W. Wind power ramp events classification and forecasting: a data mining approach[C] // Proc 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July, 2011: 1-3.

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-06-06

作者简介:

杨茂(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事风力发电技术方面的研究; E-mail: yangmao820@163.com

马剑(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与风力发电技术; E-mail: 1982759693@qq.com

李大勇(1971—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与风力发电技术。E-mail: lidy0101@sina.com

(编辑 魏小丽)