

# 多时间尺度的光伏出力波动特性研究

吴振威<sup>1</sup>, 蒋小平<sup>1</sup>, 马会萌<sup>2</sup>, 马速良<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

## Study on Fluctuations Characteristics of Photovoltaic Power Output in Different Time Scales

WU Zhenwei<sup>1</sup>, JIANG Xiaoping<sup>1</sup>, MA Huimeng<sup>2</sup>, MA Suliang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**摘 要:** 光伏出力的波动性是影响光伏发电发展的重要因素, 通过对光伏电站的历史运行数据进行统计分析, 研究了不同时间尺度下光伏出力的波动特性。文章简要概述了光伏并网发电的出力波动对电网的影响, 定量分析了光伏出力的波动水平, 通过对不同时间尺度的光伏出力波动数据进行 3 种分布函数的概率密度拟合并比较结果, 得出不同时间尺度下光伏出力的波动性应选择不同的概率分布模型来描述的结论。

**关键词:** 光伏发电; 出力波动; 时间尺度; 波动水平; 随机分布

**Abstract:** The fluctuations of PV power output is a significant factor that affects the development of PV power generation. In this paper, the fluctuation characteristics of PV power output in different time scales is studied through statistical calculating and analyzing of historical operation data of a PV power plant. The impact of the output fluctuations of grid-connected PV power generation on power grid is discussed briefly, and the fluctuation level of the PV power output is analyzed quantitatively. Then the fluctuation data of PV generation output in different time scales show fitted with probability density of 3 kinds of distribution functions, and the results show that the fluctuation characteristics of PV generation output in different time scales should be described by choosing different distribution models of probability density.

**Keywords:** photovoltaic power generation; output fluctuations; time scale; fluctuation level; random distribution

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050203); 国家自然科学基金项目(51277157)

## 0 引 言

光伏出力具有一定的波动性, 随着并网光伏装机容量的不断增大, 光伏电源发电功率波动性对电力系统的经济、安全和可靠运行产生的负面影响也日渐突出, 这也使得对光伏出力波动性的研究变得尤为重要, 但是, 目前国内外针对光伏出力波动性的研究还较少。

光伏出力受天气影响严重<sup>[1]</sup>, 在多云或阴天天气时, 光伏出力会出现剧烈波动。文献 [2-5] 指出光伏出力的波动性对电网的安全、稳定运行带来的不利影响。文献 [6-8] 提出利用储能设备, 通过一定的控制策略来平滑光伏或风电的出力波动。文献 [9] 通过对美国加利福尼亚州圣迭戈县的 100 个光伏发电系统数据、卫星辐照度数据及气象站的数据进行统计分析, 得出在 1h 时间尺度下, 光伏出力出现大爬坡率时辐照度曲线更贴近光伏出力曲线的结论。文献 [10] 对比并分析了国内外光伏并网标准中电能质量相关规定。文献 [11] 指出可以用带移位因子和伸缩系数的 t 分布(t location-scale)描述风电功率波动特性的概率分布。文献 [12] 指出用混合高斯分布模型来对风电功率变化率进行概率密度拟合具有较好的效果。文献 [13] 定量分析了风电功率波动在不同时间、空间尺度上的分布特性。

本文在利用 matlab 软件对光伏电站的历史运行数据进行了大量统计计算的基础上, 对光伏出力的波动性进行了深入地分析。定量分析了光伏出力

的波动水平，通过对不同时间尺度下光伏出力的波动数据进行多种分布函数的概率密度拟合，并比较拟合效果，研究光伏出力波动的随机分布特性。

### 1 并网光伏发电的出力波动对电网的影响

光伏的波动性是影响光伏发展的一个重要原因，并网光伏发电的出力波动对电网的影响主要体现在以下几个方面：

① 对电能质量的影响。光伏出力波动到达一定程度时，会造成明显的电网电压波动，对电网的频率也会产生一定影响，光伏出力变小时，并网逆变器输出轻载，电流谐波增大。

② 对电网规划的影响。光伏出力具有波动性，且其波动是随机的，无法满足电网对供电稳定性、连续性和可靠性的要求，需要电网留有足够的旋转备用进行调节，同时光伏出力的波动性会造成一定程度的输配电设备容量浪费，给电网的合理规划带来了挑战。

③ 对电网运行、调度的影响。为确保电网运行的稳定性和电能质量，需要抑制光伏出力波动，对电网的运行控制提出了更高的要求。光伏出力波动给负荷预测造成一定困难，加大了电网的调度难度。

为减少光伏出力波动对电网的影响，要对并网光伏功率波动设定严格的要求，表 1 和表 2 分别是针对并网光伏功率波动的国家标准和国家电网公司企业标准。

表 1 国家标准中对并网光伏功率波动的技术规定<sup>[14]</sup>

光伏发电站装机容量/MW	10min 有功功率变化最大限值/MW	1min 有功功率变化最大限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

表 2 国家电网公司企业标准对并网光伏功率波动的技术规定<sup>[15]</sup>

电站类型	10min 有功功率变化最大限值/MW	1min 有功功率变化最大限值/MW
小型	装机容量	0.2
中型	装机容量	装机容量/5
大型	装机容量/3	装机容量/10

表 2 中电站类型根据光伏电站接入电网的电压

等级进行划分，小、中、大型光伏电站分别为通过 380V、10kV~35kV、66kV 及以上电压等级接入电网的光伏电站。从表 1 和表 2 可以看出国家标准相对国家电网公司企业标准对光伏功率波动的技术规定更加严苛。

### 2 光伏出力的波动水平

本文选用某 40MW<sub>p</sub> 光伏电站全年输出有功功率数据作样本进行分析。由于光伏只在昼间出力、夜间不出力，所以需要对其出力数据进行截取。截取每日 5:30~19:30 有光照时段的光伏出力数据进行分析。

图 1 为光伏电站某日的出力曲线图，从图中可以看出，光伏出力具有明显的波动性，在短时间内波动量可超过装机容量的 50%。

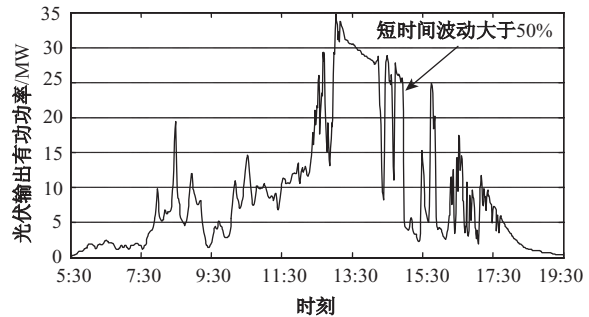


图 1 光伏电站某日出力曲线

图 2 为晴天、多云、阴天、雨雪 4 种不同天气类型下光伏电站的单日出力曲线，可以看出天气对光伏出力的波动水平有显著的影响，晴天时光伏出力平稳，多云和阴天时，受云层遮挡影响，光伏出力波动较大，短时间内波动量可超过装机容量的 50%，雨雪天气时，光伏整体出力水平很低，出力波动较多云和阴天天气时小。

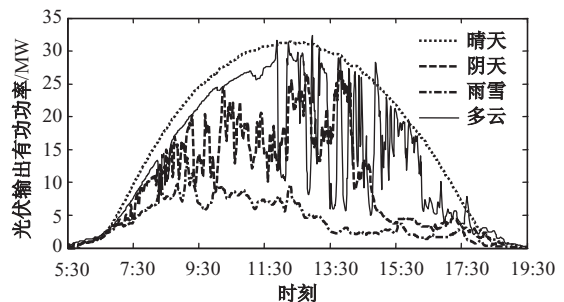


图 2 不同天气类型下光伏出力曲线

表 3 统计了 1min、10min、60min 3 个时间尺

度下光伏出力的最大波动量。可以看出随着时间尺度的增大,光伏出力的最大波动量也随之增大。1min和10min时间尺度的光伏出力波动最大值严重超出国家标准对并网光伏输出有功功率变化的规定范围。

表3 不同时间尺度下光伏出力的最大波动量

时间尺度/min	最大波动量/MW
1	16.10
10	29.74
60	34.54

### 3 光伏出力波动的随机分布特性

光伏出力的波动情况可以用光伏输出有功功率的1阶差分来刻画,1阶差分即相邻采样点的输出功率差值。本文采用概率密度函数来描述光伏出力波动的随机性。对不同时间尺度的光伏出力波动数据进行3种分布函数的概率密度拟合,并比较分析。式(1)~(3)分别给出了正态分布、t location-scale分布和logistic分布的概率密度表达式。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (1)$$

式中:  $u_1$  为均值;  $\sigma_1$  为方差。

$$f(x) = \frac{\Gamma(\nu+1/2)}{\sigma_2 \sqrt{\nu\pi} \Gamma(\nu/2)} \left[ \frac{\nu + (x-u_2/\sigma_2)^2}{\nu} \right]^{-\nu+1/2} \quad (2)$$

式中:  $u_2$  为位置参数;  $\sigma_2$  为尺度参数;  $\nu$  为形状参数。

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x-u_3}{\sigma_3}}}{\sigma_3 (1 + e^{-\frac{x-u_3}{\sigma_3}})^2} \quad (3)$$

式中:  $u_3$  为位置参数;  $\sigma_3$  为尺度参数。

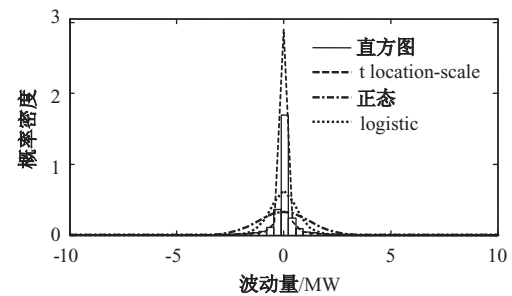
图3分别为对1min、10min、60min时间尺度的光伏出力波动数据用正态分布、t location-scale分布和logistic分布拟合的光伏出力波动的概率密度曲线。

为了衡量概率密度的拟合效果,定义了合理的评价指标,其表达式为

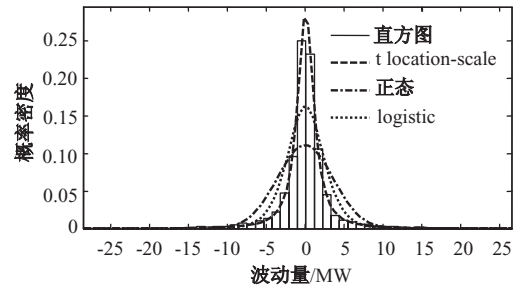
$$I = d^2 \sum_{i=1}^n (y_i - m_i)^2 \quad (4)$$

式中:  $d$  为频率分布直方图的组距;  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为直方图的分组数;  $y_i$  为第  $i$  个直方柱中心位置的拟合概率密度值;  $m_i$  表示数据频率分布直方图第  $i$  个直方柱的高度。指标  $I$  越小,表示效果越好。

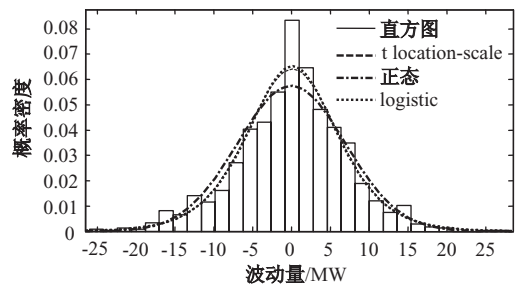
表4、图4统计了在不同的时间尺度下正态分



(a) 1min时间尺度



(b) 10min时间尺度



(c) 60min时间尺度

图3 不同时间尺度下光伏出力波动的概率密度拟合对比  
布、t location-scale分布和logistic分布对光伏出力波动的概率密度拟合的拟合指标对比。

表4 不同时间尺度下光伏出力波动在不同概率密度函数下的拟合指标对比

时间尺度/min	t location-scale	正态	logistic
1	0.119 7	0.160 1	0.071 1
2	0.037 2	0.103 0	0.043 7
5	0.013 0	0.079 6	0.039 2
10	0.003 5	0.024 6	0.012 0
20	0.002 7	0.014 9	0.005 2
30	0.002 1	0.010 4	0.005 0
40	0.002 5	0.004 6	0.002 8
50	0.001 9	0.003 7	0.002 1
60	0.003 2	0.003 4	0.001 5
90	0.003 7	0.003 9	0.001 9

从图3、图4及表4中可以看出,在数据时间尺度为最小的1min时,3种分布函数对光伏出力波动的概率密度拟合效果均较差,logistic分布拟

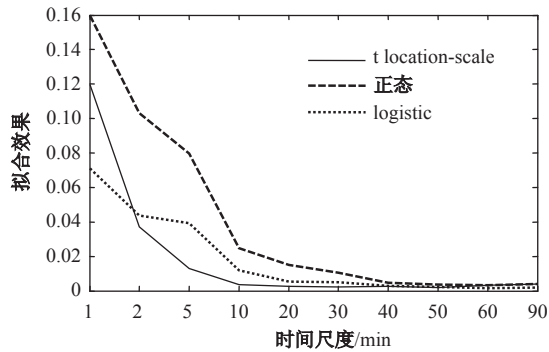


图 4 不同时间尺度下光伏出力波动在不同概率密度函数下的拟合指标对比

合效果相对较好，在 2~60min 时间尺度内，随着数据时间尺度的增大，3 种分布函数的拟合效果均变好并趋于稳定，其中 t location-scale 分布的拟合效果最好，在时间尺度  $\geq 60$ min 时，logistic 分布的拟合效果略好于其他两种分布函数。正态分布的拟合效果在各时间尺度下均比另外两种拟合的效果差，但是随时间尺度的增大，其拟合效果逐渐变好，即随时间尺度的增大，光伏出力波动的概率分布是趋近正态分布的。

## 4 结束语

本文基于光伏电站的历史运行数据，分析了不同时间尺度的光伏出力波动特性。定量地分析了光伏出力的波动水平，并采用概率密度拟合的方法研究光伏出力波动的随机分布特性，并得出以下结论：

①随着时间尺度的增大，光伏出力的最大波动量也随之增大。

②1min 时间尺度时，3 种分布函数对光伏出力波动的概率密度拟合效果均较差，logistic 分布拟合效果相对较好。

③2~60min 时间尺度内，t location-scale 分布对光伏出力波动的概率密度的拟合效果最好。

④在时间尺度  $\geq 60$ min 时，logistic 分布对光伏出力波动的概率密度的拟合效果略好于其他两种分布函数。

## 参 考 文 献

[1] Rikos E, Tselepis S, Hoyer-Klick C, et al. Stability and power quality issues in microgrids under weather disturbances [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(3): 170-179.

- [2] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [3] 艾欣, 韩晓男, 孙英云. 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望 [J]. 现代电力, 2013, 30(1): 1-7.
- [4] 张兴科. 光伏并网发电功率波动与对策 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(6): 55-60.
- [5] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2013, 33(2): 26-32.
- [6] 靳文涛, 马会萌, 谢志佳. 电池储能系统平滑风电功率控制策略 [J]. 电力建设, 2012, 33(7): 7-11.
- [7] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 王皓怀. 风光储能联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标 [J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128.
- [8] 李国杰, 唐志伟, 聂宏展, 等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119.
- [9] Jamaly M, Bosch J L, Kleissl J, et al. Performance Analysis of Power Output of Photovoltaic Systems in San Diego County [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2012: 1-7.
- [10] 刘燕华, 张楠, 赵冬梅. 国内外光伏并网标准中电能质量相关规范对比与分析 [J]. 现代电力, 2011, 28(6): 77-81.
- [11] 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.
- [12] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 7-13.
- [13] 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.
- [14] GB/T 19964-2011. 光伏发电站接入电力系统技术规范 [S].
- [15] Q/GDW 617-2011. 光伏电站接入电网技术规范 [S].

收稿日期：2013-04-10

作者简介：

吴振威(1988—)，男，硕士研究生，研究方向为可再生能源发电及其控制技术，E-mail: wei66882006@126.com;

蒋小平(1966—)，男，副教授，硕士生导师，研究方向为自动控制理论及应用，E-mail: jxp315@163.com.

(责任编辑：林海文)