### 基于比恩法的风电场风速-功率曲线建模误差分析

杨 茂,代博祉

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

摘要:以预测风速为输入进行风电功率预测时,风电场风速-功率曲线的建模精度至关重要。提出一种基于 比恩法的风电场风速-功率曲线建模方法,并分析不同风速区间下各建模误差的变化情况。分析结果表明, 忽略风速-功率传变特性差异导致风速较小时建模曲线偏高,风速较大时建模曲线偏低,而忽略风速空间分 散性对建模曲线的影响则相反,因此两者对建模精度的影响有明显的抵消现象,且各建模误差的变化情况与 风速大小密切相关。

DOI:10.16081/j.epae.202011003

#### 0 引言

风能具有明显的波动性和间歇性,导致风力发 电有极强的不确定性<sup>[1-2]</sup>。大规模风电并网运行将 会对电网造成诸多不良影响,严重时可能危及电网 自身安全<sup>[3]</sup>。如果能对风电功率进行准确预测,电 力调度部门便可以根据其预测结果提前安排调度计 划,这将有效降低风电不确定性带来的负面影响<sup>[4]</sup>。 根据风速-功率转换模型将预测风速转换为预测功 率时,转换模型的建模精度至关重要。风速-功率曲 线是最基础、有效的线性转换模型,是非线性转换模 型比较的基础<sup>[5]</sup>。

现有风速-功率曲线的研究大多是针对风电机 组。文献[6]对常见的风速-功率曲线建模方法进行 比较,并指出比恩法建模效果最佳。文献[7]利用单 调回归法建立保持单调性的风电机组风速-功率曲 线。文献[8]利用神经网络、模糊C均值聚类和数据 挖掘等算法,对风速-功率曲线建立非参数模型。

在风电场并网分析中,若对各风电机组分别建 模将极大增加工作量<sup>[9]</sup>,若对样板机组进行建模再 等效到风电场,则不能充分利用各风电机组实测信 息,且受样板机组的影响较大。文献[10]根据风电 场风速差异对风电机组进行聚类,得到风电场风速-功率曲线。文献[11]利用比恩法进行风电场风速-功率曲线建模,并分析其不确定性。

利用风速--功率曲线将风速转换为功率时还会 产生一定的建模误差<sup>[12-13]</sup>。文献[14]通过神经网络 对风电功率曲线偏差进行分析。文献[15]指出风电 机组实测风速差异也是风速--功率曲线建模误差的 重要来源。对风电功率预测误差的规律进行分析有

收稿日期:2020-02-03;修回日期:2020-08-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904200) Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904200) 助于风电并网工作的进行<sup>[16]</sup>。相较于风速预测误 差,风速-功率曲线建模误差的研究较为缺乏。在进 行电力系统并网分析时,风电场发电功率的可预测 性是主要参考指标之一,因此风电场等效建模的研 究工作不可忽视。风电场风速-功率曲线的建模误 差可视为风速预测完全准确时风电场发电功率的预 测误差。对风电场风速-功率曲线建模误差进行研 究,可为风电场发电功率的可预测性提供参考,有利 于风电场并网工作的进行。

本文提出一种基于比恩法的风电场风速-功率 曲线建模方法,并对不同风速区间下各建模误差的 变化情况进行详细分析。研究发现,忽略风速-功率 传变特性差异在风速较小时导致功率转换结果偏 高,在风速较大时导致功率转换结果偏低,而忽略风 速空间分散性对转换结果的影响恰恰相反,因此两 者产生的建模误差有着明显的抵消现象,且抵消概 率与风速大小相关。同时分析表明,建模误差的数 值大小与波动程度随风速的增大呈现规律性变化。

#### 1 风速-功率曲线

#### 1.1 风电机组风速-功率曲线

风电机组工作的本质是将作用在叶轮上的风能转化为电能。单位时间内一定面积下的风能大小主要取决于风速大小,而发电功率是衡量单位时间内转化的电能大小。因此,若将风速作为输入、功率作为输出,则描述风电机组输入、输出关系的是风电机组风速-功率传变特性。根据流体力学,风电机组输出机械功率P<sub>M</sub>与风速v的对应关系为<sup>[17]</sup>:

$$P_{\rm M} = \begin{cases} 0 & v < v_{\rm in}, v \ge v_{\rm out} \\ \frac{1}{2} C_{\rm P} \rho S v^3 & v_{\rm in} \le v < v_{\rm n} \\ P & v \le v \le v \end{cases}$$
(1)

其中, $C_{\rm P}$ 为风能利用系数; $v_{\rm in}$ 为机组切入风速; $v_{\rm n}$ 为 机组额定风速; $v_{\rm out}$ 为机组切出风速; $\rho$ 为空气密度;S 为叶轮扫掠面积;P\_为风电机组额定功率。

风电机组标准风速-功率曲线是依据 GB/T 18451.2—2012《风力发电机组功率特性测试标准》 绘制的,一般以 0.5 m/s为一区间,求取区间内风速 和功率的平均值点,拟合出风速-功率曲线。附录 A 中图 A1为某型号风电机组标准风速-功率曲线。该 曲线能够展示风电机组的发电性能及衡量风电机组 的运行状态,但在建模过程中没有考虑风速的实际 波动情况以及风电机组安装地点的环境情况,因此 标准风速-功率曲线并不适用于风电场并网分析中 的等效建模工作。

本文利用比恩法基于实测风速-功率散点进行 风速-功率曲线建模。将风速以0.5 m/s为间隔进 行区间划分,称为风速比恩。求取各风速比恩中风 速与功率的均值,得到对应的比恩点,再利用三次样 条插值法将各比恩点拟合为风速-功率曲线。附录 A中图A2给出了某风电机组实测风速-功率散点及 其拟合风速-功率曲线。

对于风电机组实际风速-功率传变特性而言,风 速与功率之间呈现多值对应关系(散点分布),是与 历史值密切相关的动态关系。而风速-功率曲线为 单值对应关系(单调曲线),所反映的风速-功率传变 特性与风速的历史值无关,是一种纯静态关系。因 此在利用风速-功率曲线进行功率转换时忽略了不 同风速变化趋势下的风速-功率传变特性差异。

#### 1.2 风电场风速-功率曲线

相较于风电机组风速-功率曲线,基于风电场平 均风速与整场发电功率散点拟合出的风电场风速-功率曲线能更好地代表整场风电机组的运行状态。 图1给出了某风电场风速-功率曲线(图中功率为标 幺值,后同)。



图1 风电场风速-功率曲线

Fig.1 Wind speed-power curve of wind farm

利用风电场风速--功率曲线进行功率转换时,忽略了不同风速变化趋势以及不同风电机组的风速--功率传变特性差异。此外,如果使用某一风速代表 风电场风速,则忽略了风电场风速的空间分散性。

#### 2 风速-功率传变特性差异

风电机组轮毂及其连接叶片质量较大,具有较

大的惯性,轮毂转速的变化往往滞后于风速的变 化<sup>[18]</sup>。因此同一风电机组在不同风速变化趋势下的 风速与功率之间呈现多值对应关系,导致风电机组 自身风速-功率传变特性有所差异。

图 2 为某风电机组不同风速变化趋势下的风速--功率散点图,图 3 为相同阈值下区分风速变化 趋势的风电场风速--功率散点图。从图中可明显看出,风速变化趋势是影响风速--功率传变特性的重要 因素。但由于汇聚效应的影响,相较于风电机组,风 电场风速--功率传变特性受风速变化趋势的影响 较小。









Fig.3 Scatter diagram of wind speed-power for wind farm under different wind speed variation trends

风向也是导致风电机组风速-功率传变特性差 异的主要因素,同一风电机组在不同风向下面临的 尾流效应不同。但对于风电场整体而言,风向对风 速-功率传变特性的影响程度远不及风速。温度、气 压等气象条件也可造成风速-功率散点的分散性,但 风速-功率曲线建模不宜采用较长时间的历史数据, 而该类气象条件短期内变化程度不大,对风速-功率 传变特性的影响也较小。此外,电气损耗、器件磨损 程度、机组位置等因素,导致同一风电场内各机组风 速-功率传变特性也有所不同。

#### 3 风速空间分散性

风电场覆盖面积大,区域空间内风能分布很难 达到一致。风电机组叶轮所受风能受到机组安装地 形、机组排列方式、机组间尾流效应等众多因素的干 扰,因此同一时刻下风电场各机组实测风速会有一 定差异。故风电场风速存在空间分散性。

与风电场运行状态相关的风速有多种,如各台 机组实测风速、风电场平均风速、测风塔实测风速、数 值天气预报提供的预测风速等。为了更好地阐述风 电场风速空间分散性,本文将各台机组实测风速平 均值作为风电场平均风速。若t时刻风电机组i实测 风速为v<sub>i</sub>(t),则t时刻对应的风电场平均风速*ī*(t)为:

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i(t)$$
 (2)

其中,n为风电场机组总数。

定义各台机组实测风速与风电场平均风速的差 值为各台机组实测风速的空间偏差量 $\Delta v_i(t)$ :

$$\Delta v_i(t) = v_i(t) - \bar{v}(t) \tag{3}$$

虽然任意时刻各台机组实测风速的空间偏差量 之和为0,但以风电场平均风速替代各机组实测风 速代入风速-功率曲线中所得功率仍存在一定误差, 这部分误差就是由风电场风速存在的空间分散性导 致的。

利用*t*时刻风电场内*n*台机组的实测风速标准 差来度量风电场风速空间分散性的强度,记为:

$$S^{v}(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (v_{i}(t) - \bar{v}(t))^{2}}$$
(4)

图4给出了2012年8月某风电场风速标准差波动曲线,该月风电场风速标准差均值为1.05 m/s, 说明该风电场风速空间分散性较为显著。



图4 风速标准差波动曲线

Fig.4 Standard deviation fluctuation curve of wind speed

#### 4 风电场风速-功率曲线建模及其误差分析

#### 4.1 风电场风速-功率曲线建模

风电场发电功率是由各机组发电功率累加得到的。若已知*t*时刻各机组实测风速,则此时风电场发电功率实测值*P*<sup>real</sup>(*t*)为:

$$P^{\text{real}}(t) = \sum_{i=1}^{n} f_{i}^{\text{real}}(v_{i}(t))$$
(5)

其中, f<sub>i</sub><sup>real</sup>表示各机组实测风速-功率散点的映射关系。由于各机组实测风速--功率散点的传变特性具有多值性,因此式(5)只能用来表示*t*时刻风电场发电功率的构成关系,并不能根据该公式进行风电场发电功率的计算。

利用各机组实测风速-功率曲线firans计算各机

组发电功率,将其累加求和可得到风电场发电功率:

$$P^{v_i - f_i}(t) = \sum_{i=1}^n f_i^{\text{trans}}(v_i(t))$$
 (6)

 $P^{\text{real}} 与 P^{v_i - f_i}$ 之间的偏差反映了实测风速-功率 散点  $f_i^{\text{real}}$ 偏离其拟合曲线  $f_i^{\text{trans}}$ 的程度:

$$\varepsilon_{i}^{\text{real-trans}}(v_{i}(t)) = f_{i}^{\text{real}}(v_{i}(t)) - f_{i}^{\text{trans}}(v_{i}(t))$$
(7)

若将各机组实测风速代入风电场风速-功率曲 线 *f*<sub>i</sub><sup>trans</sup>中,除以机组总数再累加求和,也可得到风电 场发电功率:

$$P^{v_i - f}(t) = \sum_{i=1}^{n} f^{\text{trans}}(v_i(t))/n$$
(8)

 $P^{v_i - f_i} = P^{v_i - f_i}$ 之间的偏差是由风电场风速-功率 曲线  $f^{\text{trans}}$ 代替各机组实测风速-功率曲线  $f_i^{\text{trans}}$ 所产 生的,记为:

$$e^{f_i - f}(t) = \sum_{i=1}^n \left( f_i^{\text{trans}}(v_i(t)) - f^{\text{trans}}(v_i(t)) \right)$$
(9)

在进行风电场发电功率预测时,往往只预测风 电场平均风速。本文利用风电场平均风速与风电场 风速-功率曲线计算风电场发电功率:

$$P^{\bar{v}-f}(t) = f^{\text{trans}}(\bar{v}(t)) \tag{10}$$

*P<sup>i-f</sup>与P<sup>i,-f</sup>*之间的偏差是由风电场平均风速*v* 替代各机组实测风速*v*<sub>i</sub>导致的,记为:

$$\varepsilon^{v_i - \bar{v}}(t) = \sum_{i=1}^n f^{\text{trans}}(v_i(t)) - n f^{\text{trans}}(\bar{v}(t)) \qquad (11)$$

#### 4.2 风电场风速-功率曲线建模误差分析

利用风速-功率曲线进行功率转换时忽略了风速-功率散点与风速-功率曲线的传变特性差异,风电机组机械惯性是导致误差 $\varepsilon_i^{real-trans}$ 产生的主要原因。风速较小时为下降风的概率较大,风速-功率散点分布偏高,建模曲线也相应偏高,导致 $\varepsilon_i^{real-trans}$ 多为负值。同理,风速较大时为上升风的概率较大,风速-功率散点分布偏低,建模曲线也相应偏低,导致 $\varepsilon_i^{real-trans}$ 多为正值。

利用风电场风速-功率曲线替代各机组风速-功率曲线所产生的建模误差 e<sup>f,-f</sup>是由忽略各机组间 风速-功率传变特性差异引起的。图5给出了某风 电场各机组风速-功率曲线,并将风电场风速-功率 曲线缩小为原来的1/n与其对比。由图中可见,风电 场风速-功率曲线的传变特性均衡了各机组风速-





功率曲线的传变特性。因此由风电场风速--功率曲 线替代各机组风速--功率曲线不仅降低了建模工作 量,而且所引起的误差*ε<sup>fi-f</sup>较*小。

由式(1)可知,风速的三次方与功率呈一定的正 比关系,因此在风速较小时利用平均风速替代各机 组实测风速往往导致转换功率偏小,误差 $\varepsilon^{v_i-\tilde{v}}$ 多为 正值。但当风速大于额定风速时,机组出力不再受 风速大小影响,利用平均风速替代各机组实测风速 得到的转换功率往往偏大,误差 $\varepsilon^{v_i-\tilde{v}}$ 多为负值。

将 $\varepsilon_i^{\text{real-trans}}$ 与 $\varepsilon_i^{f_i - f}$ 统一归为忽略风速–功率传变特性差异引起的建模误差,简称传变特性误差, 记为:

$$\varepsilon^{\text{trans}}(t) = \sum_{a=1}^{n} \varepsilon_{a}^{\text{real-trans}}(v_{a}(t)) + \varepsilon^{f_{i}-f}(t) = P^{\text{real}}(t) - P^{v_{i}-f}(t)$$
(12)

平均风速替代各机组实测风速所产生的误差 *ε*<sup>\*;-\*</sup>,就是忽略风电场风速空间分散性所引起的建 模误差,简称空间分散性误差,记为:

$$\varepsilon^{\operatorname{dis}}(t) = \varepsilon^{v_i - \bar{v}}(t) = P^{v_i - f}(t) - P^{\bar{v} - f}(t)$$
(13)

由式(5)与式(10)可求出风电场风速--功率曲线 建模总误差:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{total}}(t) = P^{\text{real}}(t) - P^{\bar{v} - f}(t) \tag{14}$$

由式(12)--(14)可知,在任意时刻有:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{total}}(t) = \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{trans}}(t) + \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{dis}}(t)$$
(15)

若某时刻传变特性误差和空间分散性误差相加 抵消,则该时刻各误差之间的关系为:

$$\left| \varepsilon^{\text{total}}(t) \right| < \left| \varepsilon^{\text{trans}}(t) \right| + \left| \varepsilon^{\text{dis}}(t) \right|$$
(16)

若某时刻传变特性误差和空间分散性误差相加加强,则该时刻各误差之间的关系为:

$$\left| \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{total}}(t) \right| > \left| \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{trans}}(t) \right| + \left| \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{dis}}(t) \right|$$
(17)

此外,若传变特性误差或空间分散性误差为0,则两者相加无关,该时刻各误差之间的关系为:

$$\left|\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{total}}(t)\right| = \left|\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{trans}}(t)\right| + \left|\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{dis}}(t)\right| \qquad (18)$$

上述各建模误差能够很好地衡量风电机组风 速-功率传变特性差异与风电场风速空间分散性对 风电场风速-功率曲线建模精度的影响程度。

#### 5 算例分析

#### 5.1 数据来源

以吉林省某风电场为例,该风电场整场装机容量为265.5 MW,占地面积约为100 km<sup>2</sup>,共有1.5 MW 风电机组177台。机组切入风速为3 m/s,额定风速为10.5 m/s,切出风速为25 m/s。采样数据为2012年6月1日至8月30日风电场内各台机组的实测风速及发电功率,时间间隔为15 min。

#### 5.2 风电场发电功率转换结果

为验证利用风电场风速--功率曲线替代各机组 风速--功率曲线的合理性,本文根据各机组实测风速 的灰色关联度,逐步增加风电机组数量进行风电场 风速--功率曲线建模。表1为2012年6月至8月不同 规模下的风电场发电功率转换结果。附录B中图 B1给出了2012年8月17日风电场发电功率实测值 与各转换值的对比情况。

由表1可知, P<sup>e<sub>i</sub>-f<sub>i</sub></sup>与P<sup>e<sub>i</sub>-f</sup>的均方根误差(RMSE) 与平均绝对误差(MAE)间的差值随着风电场规模的 增大逐渐接近于0.01%,因此利用风电场风速--功率 曲线替代各机组风速--功率曲线不仅能降低模型复 杂程度,同时能保证风电功率转换精度。

随着风电场规模增大,各建模方法转换精度均 有所提高。其中 P<sup>i-f</sup>的转换精度一直高于 P<sup>i-fi</sup>与 P<sup>i-f</sup>,风电场规模越大,P<sup>i-f</sup>的转换效果越显著,最终 RMSE降低了0.59%,MAE降低了0.44%。本文所提 风电场风速-功率曲线建模方法可有效提升风速-功率转换精度,但转换误差的存在说明忽略风速-功 率传变特性差异和风速空间分散性会导致风电场风 速-功率曲线建模出现偏差。

#### 5.3 风电场风速-功率曲线建模误差分析

图6给出了2012年7月1日至7月10日该风电 场风速-功率曲线建模误差的波动情况(图中误差为 标幺值,后同)。从图中可以看出,传变特性误差与空 间分散性误差的正负规律相反,这说明忽略风速-功

表1 风电场风速-功率曲线建模误差

| Table 1 Modeling errors of wind speed-power curve for wind farm |               |         |             |         |                 |         |  |  |
|---|---------------|---------|-------------|---------|-----------------|---------|--|--|
| 风电场容量 / MW  | $P^{v_i-f_i}$ |         | $P^{v_i-f}$ |         | $P^{\bar{v}-f}$ |         |  |  |
|   | RMSE / %      | MAE / % | RMSE / %    | MAE / % | RMSE / %        | MAE / % |  |  |
| 30.0  | 4.41          | 2.17    | 4.45        | 2.22    | 4.35            | 2.03    |  |  |
| 60.0  | 4.00          | 1.96    | 4.03        | 2.01    | 3.79            | 1.80    |  |  |
| 90.0  | 3.65          | 1.84    | 3.67        | 1.87    | 3.29            | 1.66    |  |  |
| 120.0   | 3.33          | 1.81    | 3.34        | 1.84    | 2.81            | 1.49    |  |  |
| 150.0   | 3.04          | 1.77    | 3.05        | 1.80    | 2.42            | 1.33    |  |  |
| 180.0   | 2.71          | 1.72    | 2.70        | 1.73    | 2.17            | 1.28    |  |  |
| 210.0   | 2.59          | 1.70    | 2.58        | 1.70    | 2.02            | 1.23    |  |  |
| 240.0   | 2.48          | 1.66    | 2.47        | 1.66    | 1.89            | 1.20    |  |  |
| 265.5   | 2.41          | 1.63    | 2.39        | 1.62    | 1.82            | 1.19    |  |  |

率传变特性差异与风速空间分散性对风电场风速--功率曲线建模精度的影响存在明显的抵消现象。



图6 各建模误差波动曲线

Fig.6 Fluctuation curves of each modeling error

图7为该风电场风速-功率散点图。从图中可 明显看出,误差抵消点远远多于加强点与无关点,且 加强点在不同风速区间下分布位置明显不同。这说 明传变特性误差与空间分散性误差间的关系与风速 大小息息相关。



wind farm

为了进一步探究传变特性误差与空间分散性误差间的关系,将风速以0.5 m/s为间隔进行区间划分。当 $0 < \overline{v}(t) < 2 \text{ m/s}$ 时,各机组实测风速普遍小于切入风速,风电场发电功率大概率为0,建模误差 几乎为0,各建模误差间关系并不显著。此外本文算例所用数据中大风样本较少,且大风样本弃风现 象较多,为避免偶然性,本文主要研究 $2 \text{ m/s} < \overline{v}(t) < 12 \text{ m/s时各建模误差间的关系}.$ 

图8为不同风速区间下各建模误差箱线图。由 图中可知:当风速较小时,传变特性误差大概率小于 0,空间分散性误差大概率大于0,因此误差相加抵 消概率较高(90%左右);随着风速增大,传变特性 误差由负逐渐变为正,空间分散性误差由正逐渐变 为负,因此误差相加抵消概率逐渐下降(80%左右); 随着风速继续增大,传变特性误差大概率大于0,空 间分散性误差大概率小于0,因此误差相加抵消概 率又逐渐增大(90%左右)。

通过对不同风速区间下传变特性误差与空间分 散性误差箱线图上下边缘的对比分析发现:当风速 较小时,传变特性误差上边缘与空间分散性误差下



边缘多交错于零线之上,两误差均大于0时相互加强,此时实测功率偏大;而当风速较大时,传变特性误差下边缘与空间分散性误差上边缘多交错于零线之下,两误差均小于0时相互加强,此时实测功率偏小。因此在图7中风速较小时误差加强点分布位置偏高,风速较大时误差加强点分布位置偏低。

由箱线图中位数的变化趋势可以看出,不同风 速区间下各建模误差的数值大小呈规律性变化。图 9给出了不同风速区间下各建模误差均方根波动曲 线。由图中可以看出,传变特性误差大于空间分散 性误差,因此总误差主要受传变特性误差的影响,两 者波动趋势相似。



图9 不同风速区间下各建模误差均方根波动曲线

Fig.9 Fluctuation curves of root mean square of each modeling error under different wind speed intervals

此外,由图8可以看出,各建模误差上下四分位 差值(箱高)受风速大小影响。为了更好地度量各建 模误差离散程度随风速的变化趋势,引入误差标 准差:

$$\sigma^{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon_i - \overline{\varepsilon})^2}$$
(19)

其中, $\varepsilon_i$ 为风电机组*i*建模误差; $\overline{\varepsilon}$ 为建模误差均值。

附录 B 中表 B1 给出了不同风速区间下各建模 误差标准差。由表中可知:传变特性误差波动程度 远大于空间分散性误差,且随风速增大振荡增强;空 间分散性误差波动程度在风速较小时变化不大,在 风速大于9 m / s 后随风速增大逐渐增强;由于总误 差受传变特性误差影响较大,因此其波动程度也随 风速增大振荡增强。这为风速--功率曲线建模的不确定性估计研究提供了一定参考。

#### 6 结论

本文提出一种基于比恩法的风电场风速-功率 曲线建模方法,并对其建模误差进行了细致分析。 利用某风电场实测数据进行算例验证,得到如下 结论。

(1)利用风电场风速-功率曲线进行功率转换, 不仅极大降低了建模工作量,同时也使转换精度得 到明显提升,且风电场规模越大,该方法的有效性越 明显。

(2)风电场风速--功率曲线的建模误差主要由忽略风速--功率传变特性及风速空间分散性引起。

(3)忽略风速--功率传变特性差异导致风速较小时功率转换结果偏高,风速较大时功率转换结果偏 低,而忽略风速空间分散性对转换结果的影响与其 相反。因此两者对风电场风速--功率曲线建模精度 的影响存在显著的抵消现象,且抵消概率与风速大 小相关。

(4)风速--功率传变特性误差与风速空间分散性 误差的概率密度分布与风速大小相关,且随着风速 增大,各建模误差大小及波动程度呈规律性变化。

本文研究结果为认知风电场风速-功率曲线建 模误差提供了新的思路与视角,对提升风电场风速-功率曲线建模精度有重要意义,为风速-功率转换模 型的不确定性分析提供了一定参考。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1]杨茂,张强.风电功率超短期预测误差的非参数估计分布研究 [J].东北电力大学学报,2018,38(1):15-20.

YANG Mao, ZHANG Qiang. The research of ultra short-term wind power prediction error distribution based on nonparametric estimation[J]. Journal of Northeast Electric Power University(Natural Science Edition), 2018, 38(1):15-20.

- [2]肖逸,李程煌,刘若平,等.基于风速局部爬坡误差校正的风电 功率优化预测[J].电力自动化设备,2019,39(3):182-188.
   XIAO Yi, LI Chenghuang, LIU Ruoping, et al. Optimal wind power prediction based on local ramp error correction of wind speed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):182-188.
- [3] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的 评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
   XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5029-5040.
- [4]杨茂,杨春霖,李大勇,等.基于局部极差变化率的风电功率波动定量刻画[J].电力自动化设备,2018,38(7):82-88.
   YANG Mao,YANG Chunlin,LI Dayong, et al. Quantitative description of wind power fluctuation based on local range change rate[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,

38(7):82-88.

- [5] LYDIA M,KUMAR S S,SELVAKUMAR A I,et al. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30:452-460.
- [6]林鹏,赵书强,谢宇琪,等.基于实测数据的风电功率曲线建模 及不确定估计[J].电力自动化设备,2015,35(4):90-95.
  LIN Peng,ZHAO Shuqiang,XIE Yuqi,et al. Wind power curve modeling based on measured data and uncertainty estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 90-95.
- [7] MEHRJOO M, JAFARI JOZANI M, PAWLAK M. Wind turbine power curve modeling for reliable power prediction using monotonic regression [J]. Renewable Energy, 2020, 147: 214-222.
- [8] LYDIA M, SELVAKUMAR A I, KUMAR S S, et al. Advanced algorithms for wind turbine power curve modeling [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(3):827-835.
- [9]杨茂,杨琼琼.风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述
   [J].电力自动化设备,2018,38(2):34-43.
   YANG Mao,YANG Qiongqiong. Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):34-43.
- [10] 王钤,潘险险,陈迎,等.基于实测数据的风电场风速-功率模型的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(2):23-27.
  WANG Qian,PAN Xianxian,CHEN Ying,et al. Study of wind speed-active power model for wind farm based on measured data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 23-27.
- [11] 邵振国,刘懿萱,张嫣. 基于实测数据的风电场风速-功率特性 仿射建模方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):96-101. SHAO Zhenguo,LIU Yixuan,ZHANG Yan. Affine modelling method of wind speed-power characteristics in wind farm based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):96-101.
- [12] 王勃,冯双磊,刘纯.考虑预报风速与功率曲线因素的风电功率预测不确定性估计[J]. 电网技术,2014,38(2):463-468.
  WANG Bo,FENG Shuanglei,LIU Chun. Uncertainty evaluation of wind power prediction considering impacts of power curve and predicted wind speed[J]. Power System Technology,2014, 38(2):463-468.
- [13] CIULLA G, D'AMICO A, DI DIO V, et al. Modelling and analysis of real-world wind turbine power curves: assessing deviations from nominal curve by neural networks[J]. Renewable Energy, 2019, 140:477-492.
- [14] MU G, YANG M, WANG D, et al. Spatial dispersion of wind speeds and its influence on the forecasting error of wind power in a wind farm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2):265-274.
- [15] MARVUGLIA A, MESSINEO A. Monitoring of wind farms' power curves using machine learning techniques [J]. Applied Energy, 2012, 98:574-583.
- [16] 杨建,张利,王明强,等. 计及出力水平影响与自相关性的风电预测误差模拟方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):96-102.
  YANG Jian,ZHANG Li,WANG Mingqiang, et al. Wind-power forecasting error simulation considering output level and self-correlation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37 (9):96-102.
- [17] 李洪美,万秋兰,向昌明.考虑风速的风电场等值方法[J]. 电 力自动化设备,2013,33(1):121-123,159.

LI Hongmei, WAN Qiulan, XIANG Changming. Wind farm equivalence method considering wind speed [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):121-123, 159.

[18] 叶小岭,陈浩,郭晓杰,等. 基于风速升降特征的短期风电功率 预测[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):56-62.

YE Xiaoling, CHEN Hao, GUO Xiaojie, et al. Short-term wind power prediction based on the UP-DOWN-features of wind speed[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 56-62. 作者简介:



杨 茂(1982—),男,吉林吉林人,教 授,博士,主要研究方向为新能源并网及电 力系统稳定性分析(E-mail: yangmao820@ 163.com);

代博祉(1996—),男,吉林吉林人,硕 士研究生,主要研究方向为风电功率预测 (**E-mail**: daibozhi123@163.com)。

杨茂

(编辑 王锦秀)

# Modeling error analysis of wind speed-wind power curve for wind farm based on Bins method

YANG Mao, DAI Bozhi

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: When wind power is predicted with the predicted wind speed as the input, the modeling accuracy of wind speed-wind power curve for wind farm is vital important. A modeling method of wind speed-wind power curve for wind farm is proposed based on Bins method, and the variation condition of modeling error under different wind speed intervals is analyzed. The analysis results show that ignoring the difference of wind speed-wind power transmutation characteristics leads to higher modeling curves when wind speed is small and lower modeling curves when wind speed is large, while ignoring the spatial dispersion of wind speed has the opposite effect on modeling curves, so the influence of the two factors on modeling accuracy has obvious offset phenomenon, and the variation condition of each modeling error is closely related to wind speed.

Key words: wind speed; wind power; modeling error; transmutation characteristics; spatial dispersion; Bins method

(上接第72页 continued from page 72)

## Photovoltaic consumption strategy across multiple transformer districts based on PET under cyber physical system

LIU Keyan<sup>1</sup>, SHENG Wanxing<sup>1</sup>, ZHAO Pengjie<sup>2</sup>, YE Xueshun<sup>1</sup>, WU Junyong<sup>2</sup>, SUN Anguo<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. Suzhou Headline Electric Technology Co., Ltd., Suzhou 215131, China)

Abstract: The access of high proportion of PV (PhotoVoltaic) to low voltage distribution network can easily lead to problems of power flow inversion and voltage out-of-limit. In the AC / DC distribution network based on PETs(Power Electronic Transformers), PV consumption can be realized through the mutual power between PETs, which can effectively reduce the probability of power flow inversion and voltage out-of-limit. How to coordinate the interactive power is the key problem. Centralized control of distribution network CPS (Cyber Physical System) can realize optimal allocation, but it is difficult to guarantee communication quality in the large-scale distribution network. Therefore, a DBAC (improved Droop characteristics-based Bi-mode Adaptive Control) method is proposed, which takes DC bus voltage as global variable and PET's port state of transformer district as local variable. The smooth switch between the sending and receiving power modes of PET port is realized by introducing the transfer factor. The unbalanced factor is introduced to realize the allocation of photovoltaic power among receiving transformer districts according to demand. Even if without communication across multiple transformer districts and centralized control, PET power coordination can be realized. The distribution network CPS simulation platform composed of advanced distribution network simulator, OPNET and distribution master station is built, and the cyber physical model of AC / DC distribution network based on PET is established to verify the correctness and effectiveness of the proposed strategy. The results of simulation example show that the proposed DBAC method can realize the high proportion of PV consumption across multiple transformer districts.

**Key words**: power electronic transformer; photovoltaic consumption; droop characteristics; mutual power; cyber physical system; AC / DC distribution network

附录 A:



Fig.A1 Standard wind speed-power curve of wind turbine



图 A2 风电机组风速-功率曲线

Fig.A2 Wind speed-power curve of wind turbine





Fig.B1 Comparison diagram of power conversion results of wind farm

#### 表 B1 不同风速区间下各建模误差标准差

| 风速区间/ (m•s <sup>-1</sup> ) | $oldsymbol{\mathcal{E}}^{	ext{total}}$ /% | $m{\mathcal{E}}^{	ext{trans}}$ /% | $oldsymbol{\mathcal{E}}^{ m dis}$ /% |
|----------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| [2.0, 2.5)                 | 0.3                                       | 0.5                               | 0.6                                  |
| [2.5, 3.0)                 | 0.6                                       | 0.6                               | 0.6                                  |
| [3.0, 3.5)                 | 0.9                                       | 1.1                               | 0.7                                  |
| [3.5, 4.0)                 | 1.2                                       | 1.5                               | 0.7                                  |
| [4.0, 4.5)                 | 1.1                                       | 1.4                               | 0.6                                  |
| [4.5, 5.0)                 | 1.0                                       | 1.2                               | 0.5                                  |
| [5.0, 5.5)                 | 1.3                                       | 1.4                               | 0.6                                  |
| [5.5, 6.0)                 | 1.3                                       | 1.3                               | 0.5                                  |
| [6.0, 6.5)                 | 1.7                                       | 1.7                               | 0.6                                  |
| [6.5, 7.0)                 | 2.1                                       | 2.1                               | 0.6                                  |
| [7.0, 7.5)                 | 1.9                                       | 2.0                               | 0.5                                  |
| [7.5, 8.0)                 | 2.2                                       | 2.3                               | 0.6                                  |
| [8.0, 8.5)                 | 2.3                                       | 2.4                               | 0.3                                  |
| [8.5, 9.0)                 | 2.5                                       | 2.5                               | 0.4                                  |
| [9.0, 9.5)                 | 2.9                                       | 3.1                               | 0.8                                  |
| [9.5, 10.0)                | 3.6                                       | 3.8                               | 0.7                                  |
| [10.0, 10.5]               | 4.8                                       | 4.8                               | 0.9                                  |
| [10.5, 11.0)               | 4.2                                       | 4.2                               | 1.0                                  |
| [11.0, 11.5)               | 4.3                                       | 4.5                               | 1.0                                  |
| [11.5, 12.0]               | 3.2                                       | 3.7                               | 1.2                                  |

Table B1 Standard deviations of modeling errors in different wind speed ranges