

DOI: 10.7667/PSPC151188

# 基于纵横维度的光伏阵列群体类比状态评估方法研究

王景丹, 龚晓伟, 霍富强, 牛高远, 葛琪, 王留送, 苏战辉

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对光伏阵列状态评估中指标选取维度较窄, 异常状态及原因判定误差较大的问题, 提出一种基于纵横维度的光伏阵列群体类比状态评估方法。将光伏阵列状态评估特征参量按照递阶层次结构划分, 定义时间序列节点和光伏阵列监测点。从横向角度构造基于正负理想点评估法的光伏阵列运行状态评估模型, 得出某项评估指标在不同光伏阵列单元中的最佳距离度。从纵向角度利用高斯曲线拟合法构造最佳距离度与评估指标的时间函数关系, 得出光伏阵列群体运行状态曲线。从而准确识别异常阵列及对应异常指标, 并及时给出预警, 为光伏阵列运维提供决策依据。结合实际工程的光伏数据验证该方法, 结果表明, 该方法能够准确反映光伏阵列的实时运行状态, 具有一定的应用价值。

**关键词:** 光伏阵列; 纵横维度; 状态评估; 时间序列; 投影矩阵

## Research on group analogy state evaluation method of photovoltaic array based on the vertical and horizontal dimensions

WANG Jingdan, GONG Xiaowei, HUO Fuqiang, NIU Gaoyuan, GE Qi, WANG Liusong, SU Zhanhui

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In photovoltaic array state estimation, the dimensionality of indicator selected is narrow and will lead to big error in the judgment of abnormal state and reason, therefore, this paper proposes one kind of state evaluation method for PV arrays based on the vertical and horizontal dimensions. The method divides the characteristics parameters of PV array in accordance with hierarchy structure and defines time sequence nodes and monitoring points of PV array. From the horizontal angle, it constructs evaluation model of running status of PV array based on the evaluation scheme of positive and negative ideal point, and then obtains the best distance degrees of an indicator in different PV array unit. Afterwards, it uses the Gauss curve fitting to structure the function relations of time between the best distance degrees and evaluation index from the vertical angle, and then acquires the group of running state curve of PV arrays. Thereby, it effectively identifies the abnormal array and relevant indicators, gives warning timely, and provides decision basis for operation and maintenance of PV array. It verifies the assessment method combined with solar data of practical engineering, experimental results show that the method can accurately reflect the actual running condition of PV array, and has a certain application value.

**Key words:** photovoltaic array; vertical and horizontal dimensions; state evaluation; time sequence; projection matrix

## 0 引言

光伏阵列是为了能达到一定直流电能输出而由多路光伏组件串联或串并联组成的整体模块, 光伏阵列作为光伏发电系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 组件质量及光伏阵列状态直接影响整个光伏发电系统的发电效率及使用寿命, 而在光伏阵列的长期运行过程中, 会出现组件效率衰减、老化、积尘、损坏等问题<sup>[2]</sup>, 为保障长期处于无人值守的太阳能光伏电站

长时间高效率发电水平, 因此, 对光伏阵列进行实时有效状态监测与评估显得十分重要。

目前, 针对光伏阵列状态检测与评估的研究主要以故障状态检测为主, 一般包括热斑检测、短路、断路、老化。有学者提出基于参数辨识的径向基神经网络仿真模型, 其输入量是光伏组件的光生电流、二极管反向饱和电流、二极管理想品质因素和等效串并联电阻, 输出量是故障状态, 包括正常、组件短路、等效串联电阻异常老化和等效并联电阻异常

老化<sup>[3]</sup>, 该方法中参数在实际环境中较难获得, 不仅需要增设量测设备, 同时获取的局部数据不能代表整个光伏阵列; 另外, 红外图像检测法也是常见的光伏阵列状态识别方法, 但它存在检测设备费用较高, 精度低, 实时性差等缺点; 针对处于不同工作状态下的光伏阵列的输出电流和输出电压存在明显差异这一特征, 有研究人员提出采用基于证据理论的多传感器数据融合技术来实现光伏阵列故障状态的检测, 为了降低检测误差, 综合考虑环境温度、光照强度和风速等因素影响<sup>[4]</sup>, 但该方法改变了光伏阵列的结构, 增加了制造成本, 更不适用于已投运电站。

上述研究主要侧重于故障状态的检测, 检测参数以光伏阵列电压、电流等定量指标为主<sup>[5]</sup>, 对外部因素的影响关注较少, 光伏阵列运行状态对光伏系统发电效率的影响方面的研究较少, 为了更全面地表征光伏阵列状态, 并为光伏系统级状态监测与评估提供依据<sup>[6]</sup>, 本文提出一种基于纵横维度的光伏阵列群体类比状态评估方法, 从系统角度出发, 深入分析影响光伏阵列状态的特征参数, 引入时间序列节点、光伏阵列监测点, 建立基于纵横维度的参量模型, 构造基于正负理想点评估方案的光伏阵列运行状态评估模型; 采用高斯曲线拟合法, 建立状态评估结果集与各个纵横参量的时间函数关系, 再结合阵列  $I-V$  曲线与辐照度-温度曲线, 实现对实时监测下的光伏阵列的状态评估, 一则可实现光伏阵列的横向效率对比分析, 二则可通过纵向的光伏阵列运行状态发现异常, 定位故障, 及时决策。

## 1 光伏阵列状态特征

### 1.1 状态评估参量

在全面评估一个对象时, 要着眼于所有的影响因素, 本文结合多种、多个光伏电站的实际运行情况分析影响光伏阵列状态的特征参数。

对于光伏阵列状态评估来说, 其影响因素较多, 从横向维度看, 包括组件失配、组件功率衰减、组件故障等, 从纵向维度看, 包括太阳辐照度、环境温度、电池背板温度、阴影、灰尘等因素的连续变化等<sup>[7-8]</sup>。这些因素共同作用, 影响着光伏阵列的电流-功率输出特性曲线、电流-电压输出特性曲线<sup>[9]</sup>。将各个特征参数按隶属或相关关系分组, 形成递阶层次结构<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。

光伏阵列发生故障或其他状态变化时, 其主要参数也会发生变化, 即可以根据这些异变的数据评估光伏阵列的状态特征<sup>[11]</sup>, 光伏阵列的状态模式如表 1 所示。

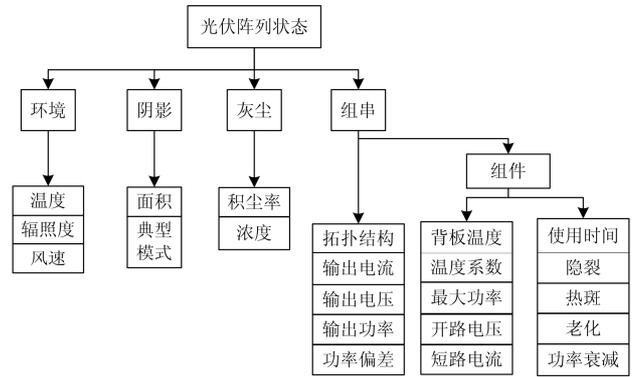


图 1 状态评估参量递阶层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of state evaluation parameter

表 1 光伏阵列状态模式

Table 1 State model of photovoltaic array

编号	状态	描述
1	正常	光伏阵列无阴影、无积尘、组串效率曲线正常, 则阵列运行正常
2	阴影	光伏阵列部分组串效率陡降, 后趋于平稳, 可考虑存在阴影遮挡
3	积尘	均匀光照下, 光伏阵列各组串效率走势一致, 且呈缓慢持续降低, 可考虑积尘增加
4	故障	光伏阵列下某组串效率陡降, 后持续降低, 且组件无老化现象, 则可考虑光伏阵列出现故障
5	老化	无阴影、无积尘、光照均匀, 但效率曲线呈持续降低趋势, 可考虑组件是否出现老化现象

光伏组件表面出现阴影遮挡, 一则会造组件接收的太阳辐射量减少, 二则会使阴影下的部分电池内部能量损耗增大, 甚至成为负载, 其直接结果就是总输出功率减少。此外, 由于阴影状态具有不规则性, 考虑将局部阴影的多种分布方式简化为几种典型的阴影分布模型, 其给光伏阵列输出特性带来的影响主要体现为功率-电压输出特性的多极值性、最大输出功率的降低和最大功率点电压的偏移<sup>[12-13]</sup>。假设同一型号组件的能量转换效率一致, 则组件的短路电流与受光照区域面积成正比。

灰尘积累在光伏组件封装材料表面, 一则通过遮挡光照影响阵列的发电量, 二则因与组件导热性差异, 影响组件表面散热, 从而影响光伏阵列的光电转换效率, 三则灰尘的长时间积聚增加光照的漫反射, 降低了组件透光率, 透光率的下降会导致组件的输出性能下降, 且灰尘积累浓度越高, 组件输出性能下降越大, 继而影响光伏阵列的运行状态与性能<sup>[14]</sup>。

环境因素主要包括光照、环境温度、太阳辐射角度等, 直接影响光伏组件的平均温度和温差。同一光伏阵列所处环境不同, 其温差也会有较大差异,

因此, 环境因素对光伏阵列状态评估的准确性具有很大的影响<sup>[15-16]</sup>。

组件自身影响输出功率的因素有组件配置、功率衰减、温度系数、隐裂、热斑等。例如, 光伏组件个体特性的差异会引起阵列组合效率的损失, 组件的损坏、老化等, 隐裂电池片会降低组件的功率, 而且在带负载运作的过程中隐裂组件可能会持续发热, 形成热斑, 严重可能导致组件烧毁, 影响组件寿命, 继而影响光伏阵列正常运行状态。

光伏阵列拓扑结构一般包括串并联结构 SP、桥式结构 BL、网状结构 TCT 三种。SP 结构尤适用于光照均匀无阴影的情况, TCT 结构使用较少, 其在阴影出现时能够减少被遮挡组件中的电流, 使其工作在正向偏压区并输出一部分功率, 该结构的缺点是电缆铺设量大, 电能损耗相应增加, BL 结构使用较少的互连网络, 结构与 TCT 近似, 其发电效率处于 SP 与 TCT 之间<sup>[17]</sup>。准确评估光伏阵列运行状态有利于进一步评估或重构光伏阵列的拓扑结构。

## 1.2 特征参量矩阵

以往的状态评估更多的是以状态参量为数据基础, 状态参量是指参数在某一时刻的属性, 即是瞬态值, 无法体现参数的动态特性, 也即无法准确判断设备或系统运行状态; 而过程参量表征随时间变化而出现连续的物理波动过程, 体现了参数的动态性、连续性, 蕴含着参数的趋势信息, 参数表现形式一般为波动曲线, 即是函数型数据。电流、电压是反映光伏阵列运行状态最直接的主要参数<sup>[18]</sup>, 而连续记录参数变化的过程直接反映了光伏阵列的真实状态。可知, 利用过程参数来检测或评估设备或系统运行状态比状态参数全面可靠得多。

对于定性的特征参数利用三角模糊数表示法将其转换成定量的参数, 如表 2 所示, 并进行无量纲化处理, 以得到标准化的特征参数。

表 2 特征参量指标值与三角模糊数转化关系

Table 2 Conversion relation between parameter index and triangular fuzzy number

特征参量指标值	三角模糊数
优	(0.8, 0.9, 1.0)
良	(0.6, 0.7, 0.8)
中	(0.4, 0.5, 0.6)
差	(0.2, 0.3, 0.4)
特差	(0.0, 0.1, 0.2)

从横向、纵向两个维度建立参量模型, 横向角度可以类比在同一时刻具有不同特征参量的不同光伏阵列的状态, 还可以评估某特征参量对光伏阵列状态的影响程度; 纵向角度可以类比同一光伏阵列

沿着时间轴的状态变化, 实现对光伏阵列状态的实时监测与评估<sup>[19]</sup>。引入时间序列节点、光伏阵列监测点, 构建特征参量矩阵为

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1(n-1)} & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2(n-1)} & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ R_{(m-1)1} & R_{(m-1)2} & \cdots & R_{(m-1)(n-1)} & R_{(m-1)n} \\ R_{m1} & R_{m2} & \cdots & R_{m(n-1)} & R_{mn} \end{bmatrix}$$

其中:

$$R_{ij} = [R_{ij1} \quad R_{ij2} \quad \cdots \quad R_{ijk}]$$

上述矩阵中各参数说明如下:

**R**: 纵横维度特征参量矩阵, 代表  $m \times n$  个待评估方案;

**m**: 选择的时间序列节点个数;

**n**: 选择的光伏阵列监测点个数;

**R<sub>ij</sub>**: 监测点  $j$  在时间节点  $i$  时的特征参量集, 代表一个待评估方案;

**R<sub>ijk</sub>**: 第  $j$  个光伏阵列在  $i$  个时间节点处的第  $k$  个特征参量;

**i**: 第  $i$  个时间序列节点;

**j**: 第  $j$  个光伏阵列监测点;

**k**: 特征参量的个数。

选定某一时刻, 则不同光伏阵列状态待评估矩阵为

$$X_{n \times k} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1(k-1)} & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2(k-1)} & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ X_{(n-1)1} & X_{(n-1)2} & \cdots & X_{(n-1)(k-1)} & X_{(n-1)k} \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{n(k-1)} & X_{nk} \end{bmatrix}$$

选定某一光伏阵列, 则该光伏阵列沿时间轴运行的状态待评估矩阵为

$$Y_{m \times k} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1(k-1)} & Y_{1k} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2(k-1)} & Y_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{(m-1)1} & Y_{(m-1)2} & \cdots & Y_{(m-1)(k-1)} & Y_{(m-1)k} \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{m(k-1)} & Y_{mk} \end{bmatrix}$$

## 2 状态评估策略

一个光伏场内光伏阵列的覆盖面积较大, 为了简化光伏阵列状态评估工作, 采用类比评估法对整个光伏电站的光伏阵列进行群体评估。即是将光伏阵列类比为—光伏组件, 从光伏阵列群体中选取具有典型特征的光伏阵列作为样本, 通过纵、横向参量的有机结合进行群体类比状态评估, 则基于纵横

维度的光伏阵列状态评估流程如图 2 所示。

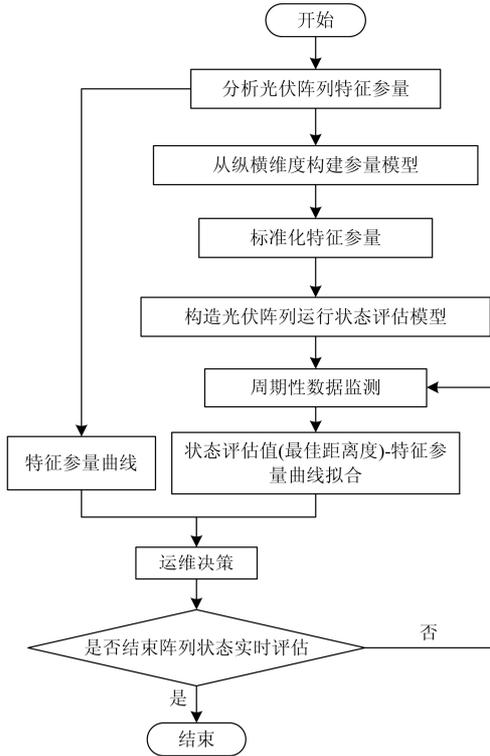


图 2 基于纵横维度的光伏阵列状态评估流程

Fig. 2 State evaluation flow of photovoltaic array based on the vertical and horizontal dimensions

针对不同光伏阵列状态的待评估矩阵  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  分别增加正负理想评估方案，正理想评估方案指各特征参量能达到的最佳值，负理想评估方案指各特征参量能达到的最差值。此外，要考虑特征参量是属于效益性指标，还是成本型指标，或是适中型指标，将矩阵  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  转化为增广矩阵，同时进行规范化处理，则构造的正理想点状态评估矩阵为  $\mathbf{X}^{\pm} = (\mathbf{X}_{ij})_{(n+1) \times k}$ ，其中， $i = 0, 1, \dots, n$ ； $j = 1, 2, \dots, k$ 。构造的负理想点状态评估矩阵是  $\mathbf{Y}^{\pm} = (\mathbf{Y}_{ij})_{(m+1) \times k}$ ，其中， $i = 0, 1, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, k$ 。

在理想点矩阵中，以  $\mathbf{X}^{\pm}$  为例，第一行数据列  $\mathbf{X}_{0j} = (\mathbf{X}_{01}, \mathbf{X}_{02}, \dots, \mathbf{X}_{0k})$  为参考序列，而数据列  $\mathbf{X}_{1j}$ 、 $\mathbf{X}_{2j}$ 、 $\dots$ 、 $\mathbf{X}_{nj}$  均是比较序列。通常，各方案在某指标下的评估差异越大，该指标对评估结果的贡献越大，反之，亦然。基于此，各指标的权值可用贡献值  $w_j$  表示，以待评估矩阵  $\mathbf{X}$  为例，其各特征参量的贡献值计算公式如式 1 所示。

$$w_j = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{i_2=1}^m |\mathbf{X}_{i,j} - \mathbf{X}_{i_2,j}|}{\sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{i_2=1}^m |\mathbf{X}_{i,j} - \mathbf{X}_{i_2,j}| \right)} \quad (1)$$

归一化特征参数的权重向量为  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ ，且

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (2)$$

定义第  $i$  个待评估方案的第  $j$  个特征参量投影到参考序列的第  $j$  个特征参量的投影系数为

$$e_{ij} = \frac{\min_i \min_j |\mathbf{X}_{0j} - \mathbf{X}_{ij}| + \frac{1}{2} \max_i \max_j |\mathbf{X}_{0j} - \mathbf{X}_{ij}|}{|\mathbf{X}_{0j} - \mathbf{X}_{ij}| + \frac{1}{2} \max_i \max_j |\mathbf{X}_{0j} - \mathbf{X}_{ij}|} \quad (3)$$

其中， $i = 0, 1, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, n$ 。对  $\mathbf{X}^{\pm}$ 、 $\mathbf{Y}^{\pm}$  的所有行向量分别相对于正、负理想点状态评估序列求取投影系数，得到正负投影矩阵。将权重乘以投影矩阵，即得到权化投影矩阵  $\mathbf{E}^{\pm}_{(m+1) \times n}$ 。

然后，计算各方案在正负理想点上的最佳距离度  $D_i$ 。

$$D_i = \frac{P_i^+}{P_i^+ + P_i^-} \quad (4)$$

$$P_i^{\pm} = \frac{\sum_{j=1}^k \mathbf{E}_{ij} \mathbf{E}_j^{\pm}}{\sqrt{\sum_{j=1}^k (\mathbf{E}_j^{\pm})^2}} \quad (5)$$

按照最佳距离度  $D_i$  即可有效评估某单一指标或多个指标组合下各方案并实现方案优劣排序。

建立状态评估方案与各个纵横参量的时间函数关系。曲线拟合是选择适当的曲线类型来实现监测对象的曲线拟合<sup>[20]</sup>，并用拟合的曲线方程分析两变量  $(x_i, y_i)$  间的关系。根据最小二乘法原理，采用拟合度较高的高斯拟合方法，其表达式是：

$$y_i = y_{\max} * e^{-\frac{(x_i - x_{\max})^2}{S^2}} \quad (6)$$

式中，待估参数  $y_{\max}$ 、 $x_{\max}$ 、 $S$  所代表的物理意义分别是高斯曲线的峰值、峰值位置、半宽度信息。

通过曲线拟合，纵向分析可对比评估各阵列不同时间段的运行状态，横向分析可对比评估同一时间段不同阵列的运行状态，分析差异原因，有利于光伏阵列的实时运维。

### 3 状态评估实例

本文结合某实际光伏电站的光伏阵列状态评估情况，选取八项指标，即辐照度、环境温度、组件背板温度、不平衡率(即组件失配率，可用电流的方差值表示)、阴影率(含云遮挡)、积尘率、老化率(即功率衰减率)、故障率，该指标体系涉及了影响光伏阵列的各个方面，能够较全面的为光伏阵列群体状

态评估提供准确可靠的结果。

首先选择新疆某一大型地面光伏电站为例, 已知其经纬度为东经 79°, 北纬 36°, 以 1 MW 为一个光伏阵列, 对比一个 5 MW 的光伏场区的 5 个光伏阵列, 选定某一时刻, 通过现场采集、计算, 结合专家经验, 得到表 3, 最后两列为同一时刻光伏阵列最佳和最差状态下的参量值。

表 3 光伏阵列群体类比状态评估参量值表  
Table 3 Group analogy on state evaluation parameter value of photovoltaic array

阵列	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV+	PV-
辐照度	769	756	760	780	775	800	720
环境温度	36.4	35.8	37.2	36.9	36.1	35	38
组件背板温度	49.2	50.5	52.3	53.1	53.9	50	52
不平衡率	0.13	0.03	0.05	0.06	0.18	0	1
阴影率	0.52	0.14	0.01	0.05	0.02	0	1
积尘率	0.12	0.12	0.12	0.01	0.01	0	1
老化率	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0	1
故障率	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0	1

考虑到辐照度属于效益型指标, 环境温度和组件背板温度为适中型指标, 其他指标均为成本型指标, 然后对五组阵列的参量值进行无量纲化处理, 适中型指标采用中心化处理, 效益型和成本型指标采用极差化处理, 得到待评估初始矩阵 $X$ 为

$$X = \begin{bmatrix} 0.61 & 0.03 & 0.50 & 0.13 & 0.52 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.45 & 0.23 & 0.23 & 0.03 & 0.14 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.5 & 0.24 & 0.16 & 0.05 & 0.01 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.75 & 0.14 & 0.33 & 0.06 & 0.05 & 0.01 & 0.03 & 0.05 \\ 0.69 & 0.13 & 0.49 & 0.18 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.09 \end{bmatrix}$$

构造正理想点状态评估矩阵为

$$X^+ = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.24 & 0.50 & 0.03 & 0.01 & 0.01 & 0.03 & 0.05 \\ 0.61 & 0.03 & 0.50 & 0.13 & 0.52 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.45 & 0.23 & 0.23 & 0.03 & 0.14 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.5 & 0.24 & 0.16 & 0.05 & 0.01 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.75 & 0.14 & 0.33 & 0.06 & 0.05 & 0.01 & 0.03 & 0.05 \\ 0.69 & 0.13 & 0.49 & 0.18 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.09 \end{bmatrix}$$

负理想点状态评估矩阵为

$$X^- = \begin{bmatrix} 0.45 & 0.03 & 0.16 & 0.18 & 0.52 & 0.12 & 0.05 & 0.09 \\ 0.61 & 0.03 & 0.50 & 0.13 & 0.52 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.45 & 0.23 & 0.23 & 0.03 & 0.14 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.5 & 0.24 & 0.16 & 0.05 & 0.01 & 0.12 & 0.03 & 0.05 \\ 0.75 & 0.14 & 0.33 & 0.06 & 0.05 & 0.01 & 0.03 & 0.05 \\ 0.69 & 0.13 & 0.49 & 0.18 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.09 \end{bmatrix}$$

根据公式(1)计算各特征参量的权重为(0.189, 0.125, 0.213, 0.091, 0.273, 0.079, 0.01, 0.02),

各权重值相加之和为1。

根据公式(2)可得:

(a) 相对于正理想点:

$$\min \min |X_{0j} - X_{ij}| = 0$$

$$\max \max |X_{0j} - X_{ij}| = 0.41$$

则, 正投影矩阵为

$$e^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.594 & 0.684 & 1 & 0.888 & 0.615 & 0.881 & 1 & 1 \\ 0.406 & 0.978 & 0.628 & 1 & 0.862 & 0.881 & 1 & 1 \\ 0.451 & 1 & 0.572 & 0.975 & 1 & 0.881 & 1 & 1 \\ 1 & 0.820 & 0.728 & 0.964 & 0.953 & 1 & 1 & 1 \\ 0.774 & 0.805 & 0.979 & 0.841 & 0.988 & 1 & 0.979 & 0.959 \end{bmatrix}$$

(b) 相对于负理想点:

$$\min \min |X_{0j} - X_{ij}| = 0$$

$$\max \max |X_{0j} - X_{ij}| = 0.51$$

则, 负投影矩阵为

$$e^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.614 & 1 & 0.602 & 0.912 & 1 & 1 & 0.983 & 0.967 \\ 1 & 0.604 & 0.880 & 0.774 & 0.629 & 1 & 0.983 & 0.967 \\ 0.836 & 0.592 & 1 & 0.798 & 0.558 & 1 & 0.983 & 0.967 \\ 0.459 & 0.735 & 0.752 & 0.811 & 0.578 & 0.913 & 0.983 & 0.967 \\ 0.515 & 0.753 & 0.609 & 1 & 0.563 & 0.913 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

将权重乘以投影矩阵, 可得:

权化的正投影矩阵为

$$E^+ = \begin{bmatrix} 0.189 & 0.125 & 0.213 & 0.091 & 0.273 & 0.079 & 0.01 & 0.02 \\ 0.112 & 0.086 & 0.213 & 0.081 & 0.128 & 0.07 & 0.01 & 0.02 \\ 0.077 & 0.122 & 0.134 & 0.091 & 0.235 & 0.07 & 0.01 & 0.02 \\ 0.085 & 0.125 & 0.122 & 0.089 & 0.273 & 0.07 & 0.01 & 0.02 \\ 0.189 & 0.102 & 0.155 & 0.088 & 0.260 & 0.079 & 0.01 & 0.02 \\ 0.146 & 0.101 & 0.208 & 0.077 & 0.270 & 0.079 & 0.009 & 0.019 \end{bmatrix}$$

权化的负投影矩阵为

$$E^- = \begin{bmatrix} 0.189 & 0.125 & 0.213 & 0.091 & 0.273 & 0.079 & 0.01 & 0.02 \\ 0.116 & 0.125 & 0.128 & 0.083 & 0.273 & 0.079 & 0.009 & 0.019 \\ 0.189 & 0.075 & 0.188 & 0.070 & 0.172 & 0.079 & 0.009 & 0.019 \\ 0.158 & 0.074 & 0.213 & 0.073 & 0.152 & 0.079 & 0.009 & 0.019 \\ 0.087 & 0.092 & 0.160 & 0.074 & 0.158 & 0.072 & 0.009 & 0.019 \\ 0.097 & 0.094 & 0.130 & 0.091 & 0.154 & 0.072 & 0.01 & 0.02 \end{bmatrix}$$

根据式(3)、式(4)计算, 可得五组光伏阵列的最佳距离度分别为:  $D_1=0.476$ ,  $D_2=0.479$ ,  $D_3=0.5$ ,  $D_4=0.578$ ,  $D_5=0.471$ 。则:  $D_5 < D_1 < D_2 < D_3 < D_4$ 。

根据最佳距离度结果值, 结合实际测量输出功率值(628, 667, 692, 725, 585)保持一致, 可见, 纵横维度的光伏阵列群体类比状态评估方法能够有效判断光伏阵列状态。在此研究基础上, 可进一步实现单一指标或多个组合指标对光伏阵列的影响程度评估, 包括建立状态评估结果与各个纵横参量的时间函数关系, 包括辐照度-状态评估值曲线、组件背板温度-状态评估值曲线、组件失配率-状态评估值曲线、积尘率-状态评估值曲线等。

通过建立时间函数关系,可纵向对比同一阵列不同时间段的运行状态,横向对比同一时间段不同阵列的运行状态。纵向角度,结合光伏阵列  $I-V$  曲线和辐照度曲线,可用最佳距离度表示某光伏阵列在同一时间段内的运行状态曲线,进而分析异常原因,提供运维决策。当光伏阵列处于均匀光照下时,其状态评估值较低(即低于一个设定值),光伏阵列各组串  $I-V$  曲线走势一致,即各组串  $I-V$  曲线满足的函数关系相同,且时间序列下功率曲线呈缓慢持续降低的走势,则可判断光伏阵列积尘增加,同时给出“该光伏阵列亟需清洗”的运维建议。

横向角度,可类比同一时间段不同阵列的运行状态。以光伏阵列 A 和 B 为例,当光伏阵列 A 和 B 的最佳距离度分别为 0.832、0.576,而光伏阵列 A 和 B 在同一时段的  $I-V$  曲线和辐照度曲线基本相同,对比其特征参数,如果 B 的组件背板温度高于 A 的组件背板温度,然后分为两种情况:如果 A 的投入运行时间  $t_A$  大于 B 的投入运行时间  $t_B$ ,则 B 出现局部热斑现象,需及时排查;如果  $t_A < t_B$ ,则可判断 B 存在组件老化情况。

#### 4 结论

本文介绍了一种基于纵横维度的光伏阵列群体类比状态评估方法,该方法利用递阶层次结构将特征参数分类,引入时间序列节点、光伏阵列监测点,从横向、纵向两个维度建立参量模型,从纵横两个角度准确评估光伏阵列现时状态,避免了单一指标评估方法的偏差,能够有效提高光伏阵列状态评估的准确性,为光伏阵列实时运维提供决策依据。并且采用高斯曲线拟合法,建立状态评估结果集与各个纵横参量的时间函数关系,考虑到了过程参量的连续性,能够较为全面、准确地反映光伏阵列群体类比状态,该状态评估方法为光伏阵列的故障诊断及决策提供了参考依据,也为提高光伏阵列群体的发电效率和寻求更优 MPPT 算法奠定良好基础,具有较强的应用价值。

#### 参考文献

- [1] 冯丽娜,陈阿莲,杜春水,等. 光伏阵列组态优化控制策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 101-107.  
FENG Lina, CHEN Alian, DU Chunshui, et al. Analysis of control strategy for optimizing the configuration of photovoltaic array[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 101-107.
- [2] 李继川,王则杰,王洪霞. 利用自然法则实现光伏组件智能管理[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 77-81.  
LI Jichuan, WANG Zejie, WANG Hongxia. Intelligent management of PV modules using law of nature[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 77-81.
- [3] 韩伟,王宏华,王成亮,等. 基于参数辨识的光伏组件故障诊断模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1198-1204.  
HAN Wei, WANG Honghua, WANG Chengliang, et al. Parameter identification based fault diagnosis model of photovoltaic modules[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1198-1204.
- [4] 唐佳能. 太阳能光伏阵列故障检测及仿真分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
TANG Jianeng. The fault detection and simulation research of solar array[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [5] 孙航,杜海江,季迎旭,等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.  
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [6] 徐长宝,庄晨,蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.  
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [7] 刘宝柱,颜洪正,王立国. 一种用于计算光伏组件温度的多元非线性函数拟合与修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 44-49.  
LIU Baozhu, YAN Hongzheng, WANG Ligu. A multivariate nonlinear function fitting and modified method for calculating the temperature of PV modules[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 44-49.
- [8] 贾言争,李凤婷,朱贺,等. 阴影对串联光伏阵列输出特性的影响[J]. 电源技术, 2014, 38(5): 844-846.  
JIA Yanzheng, LI Fengting, ZHU He, et al. Effects of shadow on output characteristics of series PV array[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(5): 844-846.
- [9] 胡蓓,隆霞,胡超,等. 改进脉冲耦合神经网络及二维 Otsu 算法的光伏阵列阴影检测[J]. 应用科学学报,

- 2013, 31(6): 613-618.  
HU Bei, LONG Xia, HU Chao, et al. Shadow detection for PV array using improved PCNN and two-dimensional Otsu algorithm[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(6): 613-618.
- [10] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.  
HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [11] 王元章, 吴春华, 周笛青. 基于 BP 神经网络的光伏阵列故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 108-114.  
WANG Yuanzhang, WU Chunhua, ZHOU Diqing. A survey of fault diagnosis for PV array based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 108-114.
- [12] 李锐华, 闫宇星, 胡波. 阴影遮蔽条件下光伏阵列的可重构优化配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 38-44.  
LI Ruihua, YAN Yuxing, HO Bo. Reconfigurable optimization arrangement method of photovoltaic arrays in partial shade condition[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(7): 38-44.
- [13] SANCHEZ REINOSO C R, MILONE D H, BUITRAGO R H, et al. Efficiency study of different photovoltaic plant connection schemes under dynamic shading[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5838-5843.
- [14] 臧建彬, 王亚伟, 王晓东. 灰尘沉积影响光伏发电的理论和试验研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(4): 624-629.  
ZANG Jianbin, WANG Yawei, WANG Xiaodong. computation model and experiment of dust deposition affecting transmittance of photovoltaic module[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(4): 624-629.
- [15] 廖志帆, 祁新梅, 郑寿森, 等. 光照强度快速变化时光伏系统稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 60-65.  
LIAO Zhifan, QI Xinmei, ZHENG Shousen, et al. Stability analysis of photovoltaic generation system under rapid change of light intensity[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 60-65.
- [16] 吴小进, 魏学业, 于蓉蓉, 等. 复杂光照环境下光伏阵列输出特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊1): 162-168.  
WU Xiaojin, WEI Xueye, YU Rongrong, et al. Study of output characteristics of PV array under complicated illumination environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 162-168.
- [17] 刘艳莉, 庞志超, 程泽. 基于遮荫度模型的光伏阵列自适应重构系统[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 48-50.  
LIU Yanli, PANG Zhichao, CHENG Ze. An adaptive reconfiguration system of photovoltaic array based on shading degree model[J]. Power Electronics, 2010, 44(6): 48-50.
- [18] 高金辉, 唐静, 贾利锋. 太阳能电池参数求解新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 133-136.  
GAO Jinhui, TANG Jing, JIA Lifeng. A novel parameter extraction method for solar cells[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 133-136.
- [19] 马静, 彭明法, 李益楠, 等. 基于时变状态矩阵的故障系统稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 9-14.  
MA Jing, PENG Mingfa, LI Yinan, et al. Stability analysis of fault system based on time-varying state matrix[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 9-14.
- [20] 徐瑞东, 陈昊, 胡义华, 等. 基于高斯过程的光伏阵列故障定位[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 249-256.  
XU Ruidong, CHEN Hao, HU Yihua, et al. Fault location of photovoltaic array based on Gaussian process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 249-256.

收稿日期: 2015-07-10; 修回日期: 2015-11-23

作者简介:

王景丹(1987-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为光伏系统运行控制、故障运维及电力大数据应用技术; E-mail: wjd719@yeah.net

龚晓伟(1987-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统柔性输电及新能源发电;

霍富强(1984-), 男, 工程师, 研究方向为光伏发电系统故障诊断。

(编辑 张爱琴)