

DOI: 10.7667/PSPC151425

基于 K 均值聚类的光伏电站运行状态模式识别研究

杨大勇, 葛琪, 董永超, 唐云龙, 贺衬心

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 在阐述光伏电站运行状态模式识别意义的基础上, 提取了表征光伏电站运行状态的相关特征参量。基于 K-means 聚类原理, 对广东佛山某光伏电站的实际运行数据进行相关数据处理得到相应的特征矩阵。利用 K 均值算法进行聚类分析, 结果表明 K 均值聚类算法在光伏电站运行状态的模式识别上具有良好的聚类综合能力, 可有效解决光伏电站运行状态模式分类处理的复杂性问题, 具有重要的理论和应用价值。

关键词: 光伏电站; K-means; 特征聚类; 模式识别

Research on operation state pattern recognition of PV station based on the principle of K-means clustering

YANG Dayong, GE Qi, DONG Yongchao, TANG Yunlong, HE Chenxin

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on expounding the PV power plant state recognition, this paper extracts the relevant characteristics of the operating state of the PV station. Based on the principle of K-means clustering, through the actual operation data processing of a PV station in the city of Foshan, Guangdong Province, the corresponding feature matrix is obtained. Using K-means clustering analysis, the results show that it has important theoretical and applied value not only because the K-means clustering algorithm has a good effective on the pattern recognition of the PV station, but also can effectively solve the complexity problem of the PV station operation mode classification.

Key words: PV station; K-means; feature clustering; pattern recognition

0 引言

为了应对气候变化、保障能源安全、促进经济发展,近年来在全球范围内进行一轮新的能源变革。光伏发电是可再生能源最重要的利用形式之一,在优化能源结构、提高能源效率、促进节能降耗,打造低碳模式,最终实现可持续发展的绿色能源使命中发挥重要作用^[1-4]。由于光伏发电系统不同的运行状态直接关系到光伏电站发电收益和健康运行水平,因此如何准确地进行光伏电站运行状态模式识别十分重要。

相比于光伏发电系统可靠性评估方面的研究进展,光伏电站运行状态的模式识别方法研究缺乏更深入的探索,文献[5]考虑了光伏发电站运行特性的评估指标,以改进的 AHP 主观赋权法和客观熵值法计算各权重系数,并将主观权重和客观权重进行线性加权,得到各指标的组合权重系数。但仅考虑了整个电站的并网运行特性,缺少电站内部各种

设备故障状态对电站运行特征的影响分析;文献[6-8]均在系统层面建立了光伏电站多种运行状态模型,但主要用来判断光伏电站运行的可靠性,对所有运行状态的模式识别未进行深入研究,文献[9-11]探讨了光伏电站个别部件故障状态对电站的运行影响,但应用范围具有一定的局限性;文献[12]针对多个三相不平衡网络,研究了电压偏差和不同位置接入分布式光伏最大渗透率评估;文献[13]将ACM-PSO算法作为一种系统状态扫描及分类工具筛选出对发电可靠性指标有贡献的系统故障状态集,分别从负荷侧和电源侧求解并网光伏发电置信容量,但是问题的研究集中于故障状态集对光伏发电置信容量的评估上。

本文在国内外已有研究基础上,首先详细分析了光伏发电系统出力特点,继而进行了表征光伏电站运行状态的数据相关性分析,提取相关特征量,进行聚类算法建模,最后用实际系统算例验证了模型的正确性和实用性。

1 相关性分析及特征提取

光伏发电系统的运行状态不仅与系统内部部件的工作状态有关，而且与环境参数的变化有关。表征光伏电站运行状态的相关特征量之间又存在较大的相关性，本文从以下两个方面来进行光伏发电系统的特点分析，提取影响光伏发电系统运行状态的相关特征参数。

1.1 数据相关性分析

光伏发电系统效率表示系统方阵由于方阵温度、辐照的不完全利用、系统部件失效或故障引起方阵额定输出损失而引起的综合影响，反映记录时段 τ 内从电池组件到箱式变输入侧的整个 PV 系统各设备的整体运行情况，其计算方法为

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = \frac{E_{AC}/P_0}{H_T/G_{STC}} = \frac{E_{AC}}{H_T \cdot P_0} \quad (1)$$

式中： Y_F 为 PV 系统等价发电时间，单位 h； Y_R 为 PV 标准等价发电时间，单位 h； E_{AC} 为 PV 系统日输出总能量，即箱变高压侧日累计电度量，单位 kWh； H_T 为 PV 方阵电池组件单位面积所接收的辐射量，单位 kWh/m²； P_0 表示 PV 系统峰瓦功率，为各电池组件峰瓦功率之和，单位 kW； G_{STC} 为电池组件标准辐射强度，1·kW/m²。

由式(1)可看出，系统效率的大小与 PV 系统等价发电时间成正比，与 PV 标准等价发电时间成反比。

(1) 其中，PV 标准等价发电时间 Y_R 仅与时段 τ 内电池组件表面辐射量有关，辐射量大小与天气环境相关。

不同的天气情况会对光伏发电系统的出力造成影响，如阴雨、多云或者沙尘暴等天气条件下，光伏发电系统的出力会急剧下降，这给光伏发电系统的出力带来了很大的不确定性。(如图 1 所示，为

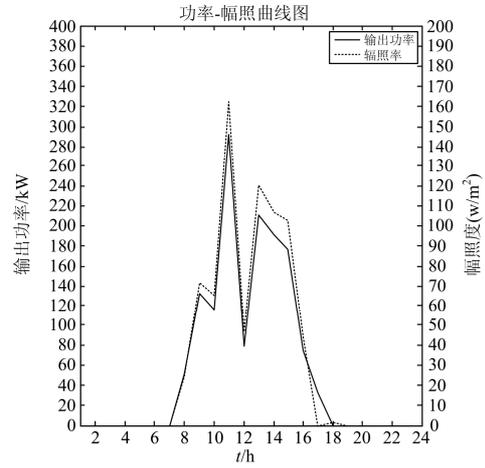
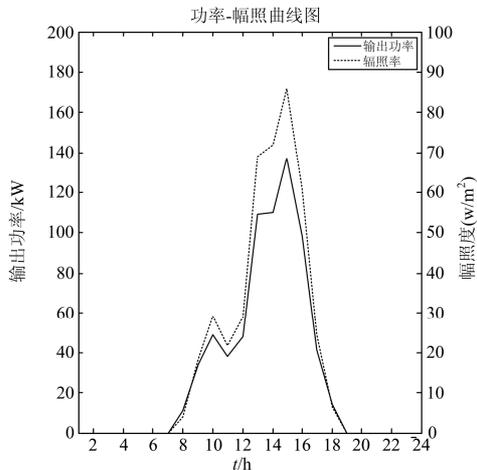


图 1 功率辐照曲线图

Fig. 1 Curve of power and radiation

广东佛山某光伏电站为 500 kW 逆变器的日输出功率与辐照度拟合曲线)

(2) PV 系统等价发电时间则与并网侧输出总能量有关，影响光伏发电系统出力的主要环节包括：方阵环节、逆变环节、箱变损耗、交直流线损。本文从以下几个方面进行探讨。

1) PV 方阵平均转换效率

PV 方阵转换效率主要反映光伏阵列经连线损失、低辐射损失、遮挡损失、电池板表面污损、角度损失、MPPT 跟踪损失、辐射量测量错误、频谱损失等损失后输送到逆变器的能量转换效率，主要反映 PV 方阵运行状态，与 PV 方阵的日等价发电时间有很强的相关性。

PV 方阵在物理层覆盖范围涉及组件、汇流箱、直流电缆，对于已投运的光伏电站来讲，不可改变的因素是组件角度、天气环境；直流线损变化范围较小，对系统效率变化影响较小；对 PV 方阵平均转换效率的因素影响较大的有组件故障、组件积灰严重、MPPT 跟踪损失、汇流箱支路断路故障。

在记录时段 τ 内，方阵平均效率定义为

$$\eta_{Amean} = E_A / (A \times H_T) \quad (2)$$

$$E_A = \sum_{day} (P_{in} \times \tau_r) \quad (3)$$

其中： E_A 为 τ 时段内 PV 方阵的输出能量，单位 kWh；符号 \sum_{day} 表示按日求和； $P_{in} \times \tau_r$ 表示记录间隔内 PV 方阵中电池组件输出的直流电量，忽略电池组件到逆变器的线损， P_{in} 为监测到的逆变器参数中的“PV 输入功率”； A 为 PV 方阵的有效面积，单位 m²； H_T 为 τ 时段 PV 方阵倾斜面辐射量，单位 kWh/m²。

2) 逆变效率

逆变器作为光伏电站的核心设备, 逆变效率主要反映逆变器直流到交流的转换能力^[4]。该参数是评价逆变器的运行状态是否良好的重要指标, 逆变效率由 MPPT 及转换效率两部分组成。

MPPT 效率的数学表达式为

$$\eta_{\text{mppt}} = \frac{\int_0^{\tau} P_{\text{dc}} dt}{\int_0^{\tau} P_{\text{mppt}} dt} \quad (4)$$

其中: $P_{\text{dc}}(t)$ 表示逆变器从太阳能电池获得的实时功率; $P_{\text{mppt}}(t)$ 表示太阳能电池理论提供的实时的最大功率点功率。

转换效率 η_{conv} 是指, 一段时间 τ 内逆变器交流输出端输出的电能与直流输入端输入的电能之比。其数学表达式为

$$\eta_{\text{conv}} = \frac{\int_0^{\tau} P_{\text{ac}} dt}{\int_0^{\tau} P_{\text{dc}} dt} \quad (5)$$

其中: $P_{\text{ac}}(t)$ 表示逆变器 AC 输出端子输出的实时功率; $P_{\text{dc}}(t)$ 表示逆变器 DC 输入端子输入的实时功率。

总效率 η_{inv} 表示, 一段时间 τ 内逆变器交流输出端输出的电能与理论上太阳能电池组件工作在最大功率点在该时间段输出的电能的比值, 从定义可知:

$$\eta_{\text{inv}} = \eta_{\text{conv}} \cdot \eta_{\text{mppt}} \quad (6)$$

因此 PV 方阵能量的输出与逆变器 MPPT 跟踪状态直接相关, 逆变效率的变化会连带影响方阵效率以及等价发电时间的变化, 与其他参数具有很强的相关性。

3) 箱变日平均运行效率

箱变运行效率是指变压器在某时间区间内的综合效率, 箱变运行效率更能反映箱变整体运行状态, 为计算方便, 可按照输出与输入电能量的比值来计算, 则箱变日平均运行效率为

$$\eta_{\text{AC}} = \frac{E_{\text{AC}}}{E_{\text{out}}} \quad (7)$$

式中: E_{AC} 为 PV 系统日输出总能量, 即箱变高压侧日累计电度量, 单位 kWh; E_{out} 为逆变器日发电量, 单位 kWh。

因此, 箱变日平均运行效率与 PV 系统日等价发电时间成正相关。

4) 交流线损

光伏场内交流线损往往较小且比较稳定, 对光伏发电运行状态几乎没有影响, 在本文研究过程中

忽略交流线损对光伏发电系统运行状态的影响。

1.2 特征量提取

根据以上数据相关性分析, 提取以下5种特征量进行分析, 在一般情况下可得出如表1结论。

表 1 特征参数表

Table 1 Characteristic parameter table

	PV方阵 日平均 转换效 率	逆变 日平 均运 行效 率	箱变 日平 均运 行效 率	PV方阵 日等价 发电时 间	系统 日等 价发 电时 间
正常运行	正常	正常	正常	正常	正常
组件积灰、阴影、损坏、汇流箱断路	降低	正常	正常	正常	降低
逆变器部件损坏、老化、逆变环境过热等	降低	降低	正常	降低	降低
箱变局部放电、过热等	正常	正常	降低	正常	降低
低辐射	正常	正常	正常	降低	降低

光伏发电系统的运行状态可分为健康运行状态、方阵低效运行状态、逆变低效运行状态、箱变低效运行状态、低辐射运行状态5种运行状态。

2 基于 Huffman 树的 K 均值聚类建模

2.1 建立特征矩阵

常规光伏电站多以 1 MW 为一个发电单元, 本文以 1 MW 在 n 天运行过程产生的相关特征量构成样本。

$$\dot{u} = \{\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3, \dots, \dot{u}_n\} \quad (8)$$

每个样本数据涵盖各个特征量

$$\dot{u}_i = [u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, u_{i4}, u_{i5}] \quad (9)$$

其中, u_{i1} , u_{i2} , u_{i3} , u_{i4} , u_{i5} 分别代表光伏发电系统的 5 个特征向量。

2.2 基于 Huffman 树的初始聚类中心选取

K均值聚类算法思想简单易行, 时间复杂性接近线性, 对于大规模数据的挖掘具有高效性和伸缩性, 但随机选取初始中心点会导致聚类结果不稳定, 容易陷入局部最优而非全局最优的不良结果, 因此本文采用基于 Huffman 树构造的思想, 提出一种选取 K-均值聚类初始中心点的方法。

以 2.1 节建立的特征矩阵为例, 向量个数为 n , 样本集维数为 5, 拟聚类种类为 5, 初始中心点选取具体步骤如下。

第一步: 计算两两向量之间的欧氏距离。

$$d(u_i, u_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^5 (u_{ik} - u_{jk})^2} \quad (10)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, n$; 且 $i \neq j$ 。
得到相异度矩阵, 矩阵如式(11)。

$$d = \begin{vmatrix} 0 & & & & \\ d_{21} & 0 & & & \\ \vdots & \dots & 0 & & \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (11)$$

第二步: 找到矩阵中最小值 d_{ij} , 计算 u_i, u_j 两个向量平均值, 得到向量 V_1 。

第三步: 从原特征矩阵中删除 u_i, u_j 两个向量, 并加入向量 V_1 , 得到新的特征矩阵。

第四步: 重复步骤一、步骤二、步骤三, 直到特征矩阵中仅剩一个向量。迭代过程中构造树的过程如图2所示。

第五步: 将数据聚为5类, 如图2所示, 从顶点 J_m 起依次将节点从树中减掉, 减掉个数为4个, 构成5个树, 如图3所示。

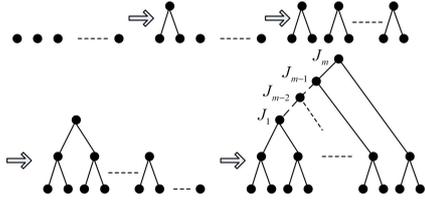


图2 Huffman树的构造过程

Fig. 2 Construction process of Huffman tree

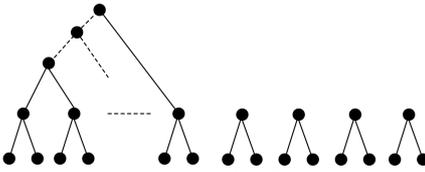


图3 Huffman树的聚类过程

Fig. 3 Clustering process of Huffman tree

第六步, 分别求取5个树最底层的节点向量的平均值, 得到向量 $u_a^{(0)}, u_b^{(0)}, u_c^{(0)}, u_d^{(0)}, u_e^{(0)}$, 即为初始聚类中心。

2.3 K均值聚类建模

按照欧式距离求取各样本数据到5个初始聚类中心 $u_a^{(0)}, u_b^{(0)}, u_c^{(0)}, u_d^{(0)}, u_e^{(0)}$ 的距离为

$$d(u_i, u_j^{(0)}) = \sqrt{\sum_{k=1}^5 (u_{ik} - u_{jk})^2} \quad (12)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$; $j=a, b, c, d, e$, 按照最小距离原则, 即如果存在如下关系:

$d(u_i, u_j^{(0)}) = \min[d_{ij}^{(k)}]$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$; $j=a, b, c, d, e$, 则 u_i 属于以 u_j 为核心的类别, 依此类推, 将各样本数分划到5类簇中, 即 $w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, w_3^{(0)}, w_4^{(0)}, w_5^{(0)}$, 计算初始类心下平均误差准则函数

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in X_i} \|p - u_i^{(0)}\|^2 \quad (13)$$

其中: $k=5$, 代表所划分簇的个数; $u_i^{(0)}$ 代表5个簇的中心, 计算新的聚类中心

$$u_a^{(1)} = \frac{1}{N_1} \sum_{u_i \in w_1^{(0)}} u_i \quad (14)$$

$$u_b^{(1)} = \frac{1}{N_2} \sum_{u_i \in w_2^{(0)}} u_i \quad (15)$$

$$u_c^{(1)} = \frac{1}{N_3} \sum_{u_i \in w_3^{(0)}} u_i \quad (16)$$

$$u_d^{(1)} = \frac{1}{N_4} \sum_{u_i \in w_4^{(0)}} u_i \quad (17)$$

$$u_e^{(1)} = \frac{1}{N_5} \sum_{u_i \in w_5^{(0)}} u_i \quad (18)$$

其中, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 分别表示属于 $w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, w_3^{(0)}, w_4^{(0)}, w_5^{(0)}$ 的元素个数且 $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = n$, n 表示样本数据总量。

重复上述步骤, 直至满足如下关系

$u_a^{(s)} = u_a^{(s+1)}, u_b^{(s)} = u_b^{(s+1)}, u_c^{(s)} = u_c^{(s+1)}, u_d^{(s)} = u_d^{(s+1)}, u_e^{(s)} = u_e^{(s+1)}$, 若 $E^{(s+1)} \leq E^{(s)}$, 说明经过 s 次聚类迭代后, 平均误差准则函数呈现收敛状态, 且簇中心不再发生变化, 停止迭代, 至此聚类结果完成。

3 算例分析

本文采用广东佛山某光伏电站实际运行数据作为样本, 计算相应特征量, 并进行数据分析。如下矩阵 U 为该光伏电站实际运行数据经过相关运算而构成的特征参数矩阵, 即待聚类元素。其中, 第1-5列依次为方阵日平均转换效率、逆变日平均运行效率、箱变日平均运行效率、系统日等价发电时间、标准日等价发电时间。

按照第2节的聚类方法对该电站特征参数构成的矩阵 U 进行聚类, 初始聚类中心分别利用随机选取法和基于 Huffman 树构造的思想选取法进行确定, 利用欧式距离法求取样本数据到初始聚类中心的聚类, 经过反复迭代后, 利用最小距离原则及平均误差准则函数判断聚类的收敛性和电站运行状态归属类别。

(1) 随机选取初始聚类中心, 得到聚类结果及矩阵中心表达式

$$k_1 = \{\dot{u}_2, \dot{u}_5, \dot{u}_7, \dot{u}_8, \dot{u}_{11}, \dot{u}_{23}, \dot{u}_{24}, \dot{u}_{30}, \dot{u}_{31}\}$$

$$k_2 = \{\dot{u}_{12}, \dot{u}_{25}, \dot{u}_{26}, \dot{u}_{27}\}$$

$$k_3 = \{\dot{u}_1, \dot{u}_3, \dot{u}_4, \dot{u}_{13}, \dot{u}_{16}, \dot{u}_{17}, \dot{u}_{28}\}$$

$$k_4 = \{\dot{u}_{14}, \dot{u}_{15}, \dot{u}_{18}, \dot{u}_{19}, \dot{u}_{20}, \dot{u}_{21}\}$$

$$k_5 = \{\dot{u}_6, \dot{u}_9, \dot{u}_{10}, \dot{u}_{22}, \dot{u}_{29}\}$$

聚类中心矩阵表达式为

$$\dot{u}_{cen} = \begin{bmatrix} 0.158735 & 0.912672 & 0.920009 & 2.007743 & 2.546098 \\ 0.154361 & 0.855927 & 0.767691 & 3.285295 & 4.487927 \\ 0.14842 & 0.903403 & 0.922508 & 2.710806 & 3.645683 \\ 0.167303 & 0.911675 & 0.930921 & 0.738304 & 0.916169 \\ 0.143238 & 0.789183 & 0.912824 & 1.275712 & 1.860593 \end{bmatrix}$$

(2) 基于 Huffman 树构造的思想选取聚类中心, 得到聚类结果及表达式。

$$U = \begin{bmatrix} 0.147758 & 0.96 & 0.98 & 2.649635 & 3.29 \\ 0.152182 & 0.93 & 0.96 & 1.888457 & 2.41 \\ 0.138835 & 0.82 & 0.94 & 2.783552 & 3.67 \\ 0.142071 & 0.98 & 0.98 & 2.431042 & 3.55 \\ 0.169245 & 0.80 & 0.97 & 1.791409 & 2.40 \\ 0.158486 & 0.95 & 0.96 & 1.319499 & 1.59 \\ 0.170967 & 0.85 & 0.95 & 1.910753 & 2.44 \\ 0.162268 & 0.96 & 0.68 & 2.230734 & 2.61 \\ 0.15593 & 0.94 & 0.97 & 1.70267 & 2.08 \\ 0.160169 & 0.94 & 0.96 & 1.71045 & 2.03 \\ 0.166058 & 0.94 & 0.98 & 1.968844 & 2.31 \\ 0.134283 & 0.96 & 0.65 & 3.570878 & 4.92 \\ 0.147688 & 0.94 & 0.95 & 2.992187 & 3.91 \\ 0.174049 & 0.86 & 0.93 & 0.721568 & 0.92 \\ 0.170175 & 0.94 & 0.92 & 1.040838 & 1.25 \\ 0.146543 & 0.94 & 0.92 & 2.549967 & 3.46 \\ 0.154776 & 0.94 & 0.68 & 3.009542 & 3.67 \\ 0.176212 & 0.90 & 0.94 & 0.843676 & 1 \\ 0.167619 & 0.89 & 0.94 & 0.429663 & 0.54 \\ 0.170505 & 0.91 & 0.95 & 0.587538 & 0.70 \\ 0.166802 & 0.89 & 0.96 & 0.643727 & 0.79 \\ 0.137053 & 0.65 & 0.98 & 1.289723 & 1.54 \\ 0.150708 & 0.94 & 0.97 & 1.931313 & 2.43 \\ 0.144302 & 0.96 & 0.96 & 2.259297 & 2.92 \\ 0.148101 & 0.98 & 0.64 & 3.094098 & 4.14 \\ 0.149292 & 0.93 & 0.90 & 3.185852 & 4.40 \\ 0.140085 & 0.98 & 0.88 & 3.153292 & 4.60 \\ 0.139307 & 0.98 & 0.93 & 2.397177 & 3.22 \\ 0.107515 & 0.34 & 0.92 & 0.723375 & 1.88 \\ 0.171543 & 0.90 & 0.94 & 1.785195 & 2.19 \\ 0.148674 & 0.89 & 0.94 & 2.070777 & 2.88 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \{\dot{u}_2, \dot{u}_7, \dot{u}_8, \dot{u}_9, \dot{u}_{10}, \dot{u}_{11}, \dot{u}_{24}, \dot{u}_{26}, \dot{u}_{27}, \dot{u}_{30}, \dot{u}_{31}\}$$

$$k_2 = \{\dot{u}_5, \dot{u}_{12}, \dot{u}_{17}, \dot{u}_{25}\}$$

$$k_3 = \{\dot{u}_1, \dot{u}_3, \dot{u}_4, \dot{u}_{13}, \dot{u}_{16}, \dot{u}_{28}\}$$

$$k_4 = \{\dot{u}_{14}, \dot{u}_{15}, \dot{u}_{18}, \dot{u}_{19}, \dot{u}_{20}, \dot{u}_{21}, \dot{u}_{23}\}$$

$$k_5 = \{\dot{u}_6, \dot{u}_{22}, \dot{u}_{29}\}$$

聚类中心矩阵表达式为

$$\dot{u}_{cen} = \begin{bmatrix} 0.158642 & 0.912589 & 0.920027 & 2.007721 & 2.546089 \\ 0.154423 & 0.855903 & 0.767712 & 3.285289 & 4.487913 \\ 0.148395 & 0.903301 & 0.922497 & 2.710798 & 3.645679 \\ 0.167409 & 0.911724 & 0.930918 & 0.738301 & 0.916172 \\ 0.143541 & 0.789099 & 0.912732 & 1.275709 & 1.860589 \end{bmatrix}$$

讨论分析:

(1) 基于 K-means 的聚类可有效地将样本数据聚为 5 类, 由聚类中心矩阵分析可知: k_1 代表光伏电站正常运行模式, k_2 代表箱变低效运行模式, k_3 代表方阵低效运行模式, k_4 代表低辐射运行模式, k_5 代表逆变低效运行模式。

(2) 初始聚类中心随机选取法在处理 $\{\dot{u}_{17}\}$ 、 $\{\dot{u}_9, \dot{u}_{10}\}$ 、 $\{\dot{u}_{26}, \dot{u}_{27}\}$ 的分类上则有欠合理, 聚类有效性为 83.3%; 基于 Huffman 树构造思想的初始聚类中心选取法在处理 $\{\dot{u}_5, \dot{u}_{23}\}$ 的分类上有欠合理, 聚类有效性为 93.3%。

(3) K-means 聚类算法在处理光伏电站运行状态模式识别问题上具有较好的效果, 聚类结果容易受初始聚类中心的影响, 利用 Huffman 树构造的思想来确定初始聚类中心, 可有效弥补这一不足, 使聚类结果更有效。

4 结论

本文以光伏电站各环节日平均效率及等价发电时间为特征, 提出了 K-means 的聚类算法对光伏电站运行状态进行模式识别研究。结果表明在获得良好的聚类中心矩阵的同时, K 均值聚类算法具有良好的聚类综合能力, 聚类结果合理有效, 可有效解决光伏电站运行状态模式分类处理的复杂性问题, 利用基于 Huffman 结构树的思想来确定初始聚类中心可显著改善随机选取初始聚类中心造成局部最优的缺陷, 具有重要的理论和应用价值。

参考文献

- [1] 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.
AI Xin, HAN Xiaonan, SUN Yingyun. The development status and prospect of grid connected photovoltaic generation and its related technologies[J]. Modern

- Electric Power, 2013, 30(1): 1-7.
- [2] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13.
- [3] 赵爽, 刘飞, 孙建军, 等. 基于改进PR控制器的新能源并网检测平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 118-124.
ZHAO Shuang, LIU Fei, SUN Jianjun, et al. Parameter design of testing platform for new energy grid connected devices based on improved PR controller[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 118-124.
- [4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [5] 周念成, 池源, 王强, 等. 并网光伏电站在线监测及状态评估系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 6-11.
ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qiang, et al. On-line monitoring and state evaluation system for grid-connected PV generation station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 6-11.
- [6] 王敏, 宗炫君, 袁越, 等. 含光伏电站的发电系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 42-49.
WANG Min, ZONG Xuanjun, YUAN Yue, et al. Reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 42-49.
- [7] PARK J, LIANG W, CHO J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C] // Proceedings of Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-6.
- [8] CHA S T, JEON D H, BAE I S, et al. Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects[C] // Proceedings of the 8th International conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 12-16, 2004, Ames, IA, USA: 451-456.
- [9] COLLINS E, DVORACK M, MAHN J, et al. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system [C] // Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA: 2316-2321.
- [10] 王元章, 吴春华, 周笛青, 等. 基于BP神经网络的光伏阵列故障诊断研就[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 108-114.
WANG Yuanzhang, WU Chunhua, ZHOU Diqing, et al. A survey of fault diagnosis for PV array based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 108-114.
- [11] 钟小凤, 贺德强. 光伏发电系统故障诊断方法综述[J]. 装备制造技术, 2013(11): 46-49.
ZHONG Xiaofeng, HE Deqiang. A summary on fault diagnosis methods of photovoltaic power generation system[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(11): 46-49.
- [12] 黄巍, 吴俊勇, 鲁思棋, 等. 电压偏差和谐波约束下配网光伏最大渗透率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 49-55.
HUANG Wei, WU Junyong, LU Siqi, et al. Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 49-55.
- [13] 余志强, 王淳, 胡奕涛, 等. 并网光伏发电置信容量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 122-127.
YU Zhiqiang, WANG Chun, HU Yitao, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 122-127.
- [14] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/ EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2016-06-05

作者简介:

杨大勇(1968-), 男, 工程师, 主要研究方向为光伏发电系统可靠性分析; E-mail: yangdayong1227o@163.com

葛琪(1988-), 男, 工程师, 主要研究方向为光伏发电系统可靠性分析; E-mail: geqi881220@126.com

董永超(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为光伏发电系统可靠性分析. E-mail: dong_yong_chao@163.com

(编辑 葛艳娜)