

基于模糊聚类的园区配网峰谷特性和潜力分析研究

张琳, 许可, 黄耀, 廖恒, 汪龙

(三峡电能重庆两江综合能源服务有限公司, 重庆 401121)

摘要: [目的] 为了挖掘园区配网用户负荷大数据的潜在物理意义, 从而为园区经营主体提供优化决策依据, 对配网峰谷特性和潜力进行研究。[方法] 基于对于分时电价划分方法的研究, 应用模糊数学理论, 利用隶属度函数、构建模糊相似矩阵, 对具有移峰填谷潜力的用户负荷曲线进行峰平谷时段划分。[结果] 经对比验证, 划分结果与实际情况高度一致, 证明此种方法的有效性, 并在此基础上对园区配网的峰谷特性和移峰填谷潜力进行分析研究。[结论] 研究结论对园区配网制定安全、经济、可靠的运行策略具有理论意义和实际价值。

关键词: 大数据; 峰谷特性; 分时电价; 模糊聚类

中图分类号: TM7; TM715

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0027-06

Analysis of Potential Shifting and Filling Potential of Campus Distribution Network Based on Fuzzy Clustering

ZHANG Lin, XU Ke, HUANG Yao, LIAO Heng, WANG Long

(Chongqing Liangjiang Integrated Energy Service Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to excavate the potential physical significance of the large load data of distribution network users in the park, and provide the basis for optimizing the decision-making of the park operators, the characteristics and potential of peak and valley of distribution network are studied in this paper. [Method] Based on the research of time-sharing tariff division method, this paper used the theory of fuzzy mathematics, used membership function and constructed a fuzzy similarity matrix to divide the peak-to-valley period of user load curve with the potential of peak shifting and valley filling. [Result] Through comparison and verification, the result of partition is highly consistent with the actual situation, which proves the effectiveness of this method. On this basis, the peak-valley characteristics and the potential of peak-valley shifting and valley filling of the park distribution network are analyzed and studied. [Conclusion] The research conclusion has theoretical significance and practical value for making safe, economic and reliable operation strategies of the park distribution network.

Key words: big data; peak-valley characteristics; time-of-use electricity price; fuzzy clustering

在我国进一步深化电力体制改革的大背景下, 电力市场化交易已在大多数省市开展, 且电力现货交易时代的到来也给峰谷分时电价理论研究及实践应用提出了更高的要求。通过查阅文献, 国内外关于峰谷分时电价的理论研究集中在峰谷时段划分与峰谷分时电价的制定两方面。而分时电价的基础之一就是峰谷时段的划分方法, 因为只有适当的峰谷时段划分才能有相适应的分时电价, 才能起到较好的削峰填谷效果。故本文重点研究峰谷时段划分的

方法, 为制定峰谷分时电价打下基础, 并计划在后续研究中继续深入挖掘电力用户的需求响应能力, 从而彻底挖掘出园区配网的移峰填谷潜力。

1 园区配网峰谷特性分析方法

1.1 分析方法

峰谷分时电价的施行效果依赖于峰谷时段的合理划分: 合理的峰谷时段划分才能制定相应合理的峰谷分时电价, 才能起到较好的削峰填谷效果。因此, 如何科学地划分峰谷时段是制定分时电价首先要解决的问题。

和峰谷时段划分相关的负荷聚类方法研究, 随着电网改革的推进和机器学习的兴起更加深入。大

收稿日期: 2019-11-20 修回日期: 2020-02-14

基金项目: 中国电机工程学会 2016 - 2018 年度“青年人才托举工程”项目“基于大数据的配电网运营和服务内容分析研究”(CSEE-YESS-2016005)

数据时代通过负荷模式聚类可以更加精细化用户群,更加了解用户,增加电网和用户的互动,构建更加清晰的用户用电模型。综合国内外的用户负荷曲线聚类研究现状,现有研究工作大概可以分为两种。第一类直接使用原始负荷数据进行聚类分析,主要的算法有 k -均值(k -means)算法,模糊 C 均值(FCM),自组织映射(SOM)层次聚类等算法。因为使用的是用户的原始日负荷数据,该类聚类分析的缺点是数据维度高,运算量大,容易陷入维度灾难,对于计算量和存储也是一种考验。第二类方法为间接负荷聚类分析,这种该方法使用中间算法对日负荷曲线进行预处理,大致分为两种处理方法,一种为负荷降维,常用的降维方法都可应用,如奇异值分解(Singular Value Decomposition)(fls)等;还有一种为基于负荷的时间序列特性进行频域和时域上的处理,如离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform)等,另有一种基于时间序列的形态特征度量方法进行聚类,这三种方法都可以减小负荷数据维度,减小运算量。

其中,本文采取的 K -means的模糊聚类方法快速易实现且效果良好,广泛用于变电站用户负荷分类之中,与园区峰谷特性划分需求较为吻合。该方法从模糊数学的角度出发,根据负荷曲线上负荷最高峰点和最低谷点肯定处于峰时段和谷时段,利用隶属度函数,探讨负荷曲线上其余各点分别处于峰时段和谷时段的可能性,从而对峰谷时段进行初步划分^[1-3]。

1.2 分析步骤

如图1所示,本论文首先研究模糊隶属度函数,以明确不同隶属度函数的模型和适用范围。然后进行统计指标选取、数据标准化处理,运用模糊聚类分析方法构造相应的模型,同时利用MATLAB软件采用模糊等价关系的传递闭包法进行动态聚类,逐步确定阈值得到峰、平、谷时段划分方法。最后,以某类用户的负荷聚类中心曲线为例,利用MATLAB软件进行峰谷时段划分,并根据实际情况分析划分结果是否合理。

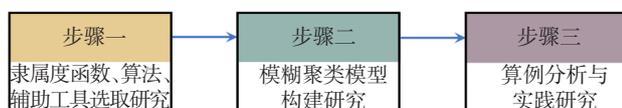


图1 峰谷时段划分步骤

Fig. 1 Steps of peak and valley time division

2 基于模糊聚类的峰谷划分模型

2.1 模糊聚类分析

对于峰谷时段划分,属于一个模糊数学问题。我们可以精确判断出负荷曲线上哪点是峰负荷和哪点是谷负荷,但无法直观判断出峰谷负荷周边的点属于峰、平、谷那个时段。基于此,本文采用模糊数学理论,运用模糊聚类分析方法来划分峰平谷时段。

聚类分析是用数学方法定量地确定样本的亲疏关系,当聚类涉及事物之间的模糊界限时,需运用模糊聚类分析方法。

模糊聚类分析根据算法的不同有两种典型方法:逐步聚类法和系统聚类法。逐步聚类法是一种基于模糊划分的模糊聚类分析法。它是预先确定好待分类的样本应该分成几类,然后按照最优化原则进行再分类,经多次迭代直到分类比较合理为止。系统聚类法是基于模糊等价关系的模糊聚类分析法。开始时把每个样本作为一类,然后把最靠近的样本(即距离最小的样本)首先聚为小类,再将已聚合的小类按其类间距离再合并,不断继续下去,最后把一切子类都聚合到一个大类^[4-5]。

本章主要基于负荷曲线特性来进行峰平谷时段的划分,考虑到数据特性,主要采用基于模糊等价关系的传递闭包方法,即系统聚类法。模糊等价关系的传递闭包方法是以各个时刻点的负荷数据为分类对象,各时刻的峰、谷隶属度为统计指标,构建峰谷隶属度矩阵,然后进行数据标准化处理,进而构造模糊相似矩阵,再采用模糊传递闭包的方法进行动态聚类,最后通过逐步确定阈值 λ ,来得到峰、平、谷时段划分结果^[5-6]。

2.2 峰谷隶属度矩阵构建

1) 隶属度函数选择

通过模糊聚类的方法对24个时间点进行峰平谷时段的划分。对于其他非最值点(最大值和最小值),采用隶属度函数的方法进行确定。式(1)、式(2)分别为偏大型和偏小型半梯形的隶属度计算公式^[4]。

$$U(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (1)$$

$$U(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (2)$$

2) 峰谷隶属度矩阵建立

假设日负荷曲线上时间点 $T=[T_1, T_2, L, T_{24}]$, 采用以点盖段的思想, 对应的负荷值 $q_1=[q_{1(1)}, q_{1(2)}, L, q_{1(24)}]$, 采用偏小型半梯度隶属度和偏大梯形隶属度函数计算各时间点 $T_i (i=1, 2, L, 24)$ 的峰时段隶属度 u_{fi} 和谷时段隶属度 u_{gi} 。

$$\begin{cases} u_{fi} = \frac{q_{1(T_i)} - \min(q_1)}{\max(q_1) - \min(q_1)} \\ u_{gi} = \frac{\max(q_1) - q_{1(T_i)}}{\max(q_1) - \min(q_1)} \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 可得各时刻点的峰谷隶属度为:

$$u_i = (u_{fi}, u_{gi}) \quad (4)$$

从而可得到各个时间点的峰谷隶属度矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} u_{f1} & u_{g1} \\ u_{f2} & u_{g2} \\ \vdots & \vdots \\ u_{f24} & u_{g24} \end{bmatrix} \quad (5)$$

选取可将模糊矩阵标准化的平移 - 极差变换, 将其压缩在区间 $[0, 1]$ 上。具体变换形式如式 (6):

$$u_{ki} = \frac{u_{ki} - \min(u_{ki})}{\max(u_{ki}) - \min(u_{ki})}, (i = 1, 2, \dots, 24; k = f, g) \quad (6)$$

2.3 模糊相似矩阵构建

建立模糊相似矩阵, 即建立 u_i 与 u_j 的相似关系: 依照传统聚类方法确定相似系数, 建立模糊相似矩阵, u_i 与 u_j 的相似程度 $r_{ij} = R(u_{ki}, u_{kj})$ 。考虑到数据特性及算法实现难易程度, 本章选取直接海明距离法构造模糊相似矩阵, 具体方法如下^[4]:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } i = j \\ 1 - c \sum |u'_{ki} - u'_{kj}| & \text{当 } i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

$$c = \min_{i \neq j} \left(\frac{1}{1 + \sum |u'_{ki} - u'_{kj}|} \right) \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 24; j = 1, 2, \dots, 24; k = f, g$;

为保证 $0 \leq r_{ij} \leq 1$, 在聚类过程中把 c 作为约束变量, 得到模糊相似矩阵 $(r_{ij})^{24 \times 24}$:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 - c(|u'_{f24} - u'_{f1}| + |u'_{g24} - u'_{g1}|) \\ 1 - c(|u'_{f1} - u'_{f2}| + |u'_{g1} - u'_{g2}|) & \dots & 1 - c(|u'_{f24} - u'_{f2}| + |u'_{g24} - u'_{g2}|) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ 1 - c(|u'_{f1} - u'_{f24}| + |u'_{g1} - u'_{g24}|) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 动态聚类图和确定阈值

1) 求传递闭包

通过上述方法所求得的模糊矩阵, 只是模糊相似矩阵 R , 为了进行分类, 还需将 R 转化成模糊等价矩阵 R^* 。本研究分析中采用二次方法求取 R 的传递闭包 $t(R)$, $t(R)$ 就是所求的模糊等价矩阵 R^* , 即 $t(R) = R^*$ 。模糊传递闭包的算法如下:

从模糊相似矩阵 R 出发, 依次求二次方 (此处为模糊矩阵的合成运算), 当第一次出现 $R^{2^n} = R^n \cdot R^n = R^n$ 时 (表明 R^n 具有传递性), R^n 就是所求的传递闭包 $t(R)$, 有:

$$R^* = (t_{ij})^{24 \times 24} \quad (9)$$

式中: $0 \leq t_{ij} \leq 1, i, j = 1, 2, \dots, 24$ 。

$$R_{(ij)}^2 = \max(\min(R_{(i,l)}, R_{(l,j)}, R_{(i,j)}) \quad (10)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, 24$ 。

2) 求取传递闭包的 λ - 截矩阵

系统聚类法不事先估计样本应分为几类, 当模糊等价矩阵 (传递闭包) 求出后, 让 λ 的值由大变小, 形成动态聚类图。求传递闭包截矩阵的方法如下:

$$R_\lambda^* = (t_{ij}(\lambda))^{24 \times 24} \quad (11)$$

$$t_{ij}(\lambda) = \begin{cases} 1 & t_{ij} \geq \lambda \\ 0 & t_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda \in [0, 1]; i = 1, 2, \dots, 24; j = 1, 2, \dots, 24$ 。

3) 阈值确定

模糊聚类分析中需要进行阈值 $\lambda \in [0, 1]$ 进行设置, 来获取分类。若根据实际情况将负荷曲线分为峰、平、谷三类时段, 那么阈值 λ 可以取值到动态聚类数为 3 的时候。

3 基于模糊聚类的峰谷划分算例

选取某类用户的聚类中心负荷曲线做算例分析。利用上文所构建的基于模糊聚类算法的峰谷时段划分模型和 MATLAB 软件工具进行算例分析。

3.1 数据采集整理

此处的算例分析以某类用户为例，直接将其聚类中心数据导出 R ，得到一个该类用户的平均负荷曲线原始数据(该数据已进行归一化处理)(如图 2 所示)。

序号	平均负荷	序号	平均负荷
1	0.129 845 2	13	0.921 861 9
2	0.113 102 7	14	0.862 756 4
3	0.105 539 6	15	0.892 002 7
4	0.096 202 16	16	0.827 673 2
5	0.102 554 1	17	0.820 763 4
6	0.094 219 15	18	0.762 064 7
7	0.107 096 9	19	0.584 967 8
8	0.131 400 2	20	0.479 746 9
9	0.277 379 8	21	0.404 146 7
10	0.700 432 3	22	0.271 225 2
11	0.834 264 6	23	0.213 475 7
12	0.923 243 6	24	0.161 240 4

图 2 该类用户平均负荷曲线数据

Fig. 2 Average load curve data of this kind of users

3.2 模糊动态聚类分析

根据导入的数据，构造峰谷隶属度矩阵，采用平移-极差变换构造隶属度矩阵，可得到各时刻点对应的峰谷隶属度矩阵 u 如图 3 所示：

0.403 0	0.957 0	0.998 3	0.001 7
0.022 8	0.977 2	0.927 0	0.073 0
0.013 7	0.986 3	0.962 3	0.037 7
0.002 4	0.997 6	0.884 7	0.115 3
0.010 1	0.989 9	0.876 4	0.123 6
0.000 0	1.000 0	0.805 6	0.194 4
0.015 5	0.984 5	0.592 0	0.408 0
0.044 8	0.955 2	0.465 0	0.535 0
0.220 9	0.779 1	0.373 8	0.626 2
0.731 2	0.268 8	0.213 5	0.786 5
0.892 7	0.107 3	0.143 9	0.856 1
1.000 0	0.000 0	0.080 8	0.919 2

(a) 时间点 1~12 峰谷隶属度 (b) 时间点 12~24 峰谷隶属度

图 3 峰谷隶属度矩阵 u

Fig. 3 Peak valley membership matrix u

图 3 峰谷隶属度矩阵 u 中，第 1 行从左到右分别代表时间点 1 的峰谷隶属度，第 2 行从左到右分别代表时间点 2 的峰谷隶属度，以此类推。接下来在峰谷隶属度矩阵基础上构造模糊相似矩阵。

考虑到数据特性和算法实现难易程度，按照模

糊数学的方法，此处采用直线海明距离(也称为绝对值减数法)求模糊相似矩阵。

利用模糊传递闭包方法进行动态聚类分析，首先要找出传递闭包(模糊等价矩阵)，具体方法是依次求模糊相似矩阵 R 的二次平方， R^2 表示模糊相似矩阵 R 与 R 的合成运算，合成运算方法如下：

例：设 $A = (a_{ij})_{m \times s}$ ， $B = (b_{ij})_{s \times n}$ ，则模糊矩阵 $A \cdot B = (c_{ij})_{m \times n}$ 为矩阵 A 与 B 的合成，其中 $c_{ij} = \bigvee_{k=1}^s (a_{ik} \wedge b_{kj})$ (具体算法与矩阵乘法运算类似，规则为先取小再取大)。

经过 n 次二次平方合成运算后，当首次出现 $R^{2^n} = R^n \cdot R^n = R^n$ 时， R^n 即为传递闭包 $t(R)$ 。

得到相应的模糊动态聚类图如图 4 所示。

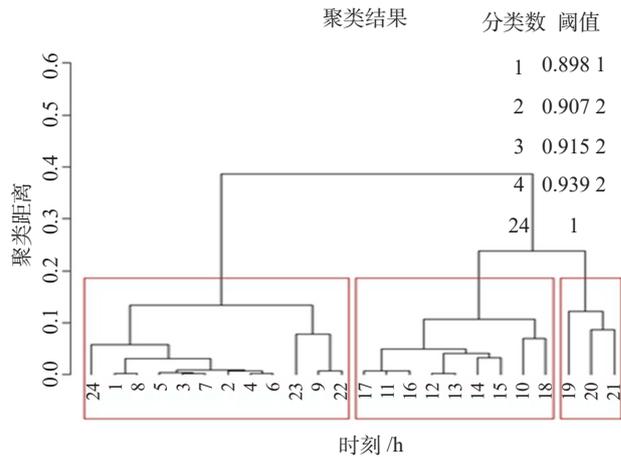


图 4 模糊动态聚类图

Fig. 4 Fuzzy dynamic clustering graph

由模糊动态聚类图 4 可以看出，当阈值 λ 为 0.915 3 时，负荷曲线被聚类为第三类：

- 1) 19 时、20 时、21 时为一类，记第一类。
- 2) 17 时、11 时、16 时、12 时、13 时、14 时、15 时、10 时、18 时为一类，记第二类。
- 3) 24 时、1 时、8 时、5 时、3 时、7 时、2 时、4 时、6 时、23 时、9 时、22 时为一类，记第三类。

将上述聚类结果与此类负荷曲线进行对比，可以看出，第一类(19 时、20 时、21 时)处于平时段；第二类(10 时、11 时、12 时、13 时、14 时、15 时、16 时、17 时、18 时)处于峰时段；第三类(1 时、2 时、3 时、4 时、5 时、6 时、7 时、8 时、9 时、22 时、23 时、24 时)处于谷时段。聚类的效果与实际情况契合度较高，基本符合对此类负荷曲线的

峰谷平时段划分。峰谷时段的准确划分对分时电价的制定相当重要^[7-9]。

4 园区配网峰谷特性和潜力分析

本文将从控制决策变量的角度对分时电价、电力用户移峰填谷潜力、电力用户弹性三个方面的问题进行相应的分析,并建立基础模型^[10]。客户后期可基于此模型,根据实际情况进行具体问题分析。

4.1 分时电价制定

前文以某类用户平均负荷曲线为例,通过模糊聚类分析得到该类用户峰平谷时段分别是峰时段:10:00~18:00,9个小时;平时段:19:00~21:00,3个小时;谷时段:1:00~9:00,22:00~24:00,12个小时。

利用K-means聚类分析得到该类用户所包含的所有用户,求出该类用户典型日各个时点的平均负荷,再结合所得到的峰平谷时段,我们可以得到分时电价前该类用户的峰负荷为280.35 kW、谷负荷为43.47 kW,日平均负荷为147.98 kW,负荷率为52.78%(负荷率=平均负荷/峰负荷×100%),峰谷差率为84.49%(峰谷差率=(峰负荷-谷负荷)/峰负荷×100%)。可得分时电价前峰时段用电量为2.279 27 MWh,平时段用电量为483.58 kWh,谷时段的用电量为788.71 kWh,总用电量为3.551 56 MWh。峰占比为64.18%(峰占比=一日中峰时段消耗的电量/一日负荷消耗的总电量×100%)。

考虑到弹性问题难以求解及准确性,此处我们不再研究弹性如何求解的问题,直接将弹性当作已知量,客户在后续可自己根据大量实际情况的历史数据得出弹性。此处我们仅考虑电量电价自弹性(即仅考虑各时段用电转移量对本时段电价的影响)情况下分时电价如何制定。具体模型如下:

对于单一时段用户,电力负荷运行周期内,用电量相对变化与价格相对变化的比为:

$$E = \frac{\Delta q/q}{\Delta p/p} \quad (13)$$

式中: E 为弹性系数; P 为电价; ΔP 为电价的改变值; q 为用户用电量; Δq 为用户用电量的改变值。

在分时电价制定中,假设条件为:(1)峰时段转移的电量全部转移到谷时段,并且沿谷时段时间轴平均分布,平时段的电价和用电量与分时电价前一致,保持不变;(2)为防止峰谷时段倒置,

峰时段转移的电量应不大于947.43 kWh(峰时段用电量-日平均用电量×峰时段小时数);(3)暂时只考虑自弹性;(4)电力用户在峰谷时段的电量电价弹性是一样的。

此时将弹性作为已知量,作为一个理性的消费者,当正常商品(此处电为正常商品)的价格上涨时,人们对这种商品的需求通常是下降的,所以弹性为负,此处将弹性的取值暂定为-20,且峰谷时段的弹性一致。我们根据客户想转移的峰时段电量,求解峰谷时段电价。考虑到峰时段的最大转移电量应不大于947.43 kWh,此处假设峰时段电量的转移量为200 kWh,根据弹性公式可得此时峰时段的电价应为0.6 833元/kWh。由于峰时段转移的电量全部转移到谷时段,所以谷时段用电量增加200 kWh,此时谷时段的电价为0.6 714元/kWh。从而得出当峰时段转移的电量为200 kWh时,峰时段电价为0.6 833元/kWh,平时段电价为0.68元/kWh,谷时段电价为0.6 714元/kWh。此时的峰占比为58.55%,峰占比从64.18%下降为58.55%,负荷曲线的平滑性变强。

配网运营商可根据实际配网用电结构及峰谷时段负荷情况,来确定相应的峰时段用电量转移量,从而制定出更符合实际分时电价策略。

4.2 移峰填谷潜力分析

为挖掘电力用户的移峰填谷潜力,此节所用的模型和假设条件与一致。首先,我们仍然将弹性固定,考虑到峰时段的最大转移电量应不大于947.43 kWh,将弹性暂定为-10。假设峰时段度电价格较分时电价前提高2分,即提高到0.7元/kWh,根据弹性公式计算出此时峰时段用电量的转移量为670.37 kWh,由于这部分电量全部转移到谷时段,从而可得出此时谷时段的电价为0.535 5元/kWh。当峰时段的电价提高2分时,峰时段转到谷时段的电量为670.37 kWh,此时的峰平谷电价分别为:峰时段电价为0.7元/kWh,平时段电价为0.68元/kWh,谷时段电价为0.5 355元/kWh。从结果中可以看出,峰时段电价提高2分,在弹性和转移电量(峰时段转移电量全部转到谷时段)一致的情况下,谷时段的电价改变量绝对值约为峰时段的7倍。峰占比由64.18%下降为54.74%,较分时电价前下降了近10%,这一方面可以说明负荷曲线变得更为平滑,另一方面说明电力客户对电价的敏感性很高,

当峰时段电价有小幅提高时,理性的电力用户都会减少峰时段的用电量来减少用电支出。

后续,配网客户可基于此模型研究当峰谷电价变动的绝对值相等且峰谷时段弹性一致时,电量由峰时段向谷时段转移和向平时段转移各为多少,再与实际情况比较来修正弹性,让模型适用性更强。

5 结论

本文构建电力负荷特性分析模型,并基于模糊聚类分析方法将用户进行准确分类,为园区配网运营商后续实现精准化用电服务提供参考,并在此基础上制定了简易分时电价模型,便于园区运营商挖掘电力用户移峰填谷潜力。本文创新点在于运用智能算法对于负荷数据的潜在物理意义进行挖掘。研究成果对园区配网运营商制定安全、经济、可靠运行策略具有理论意义和实际价值。研究成果在负荷数据的挖掘深度上(如其他用户相关的负荷特性)还需要完善。

参考文献:

- [1] 蔡学文. 负荷特性多维度分析方法与典型用户筛选策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
CAI X W. Thesis for the master degree research on load characteristics multi-dimension analysis method and typical consumers screening strategy [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [2] 刘明. 基于数据挖掘的居民峰谷分时电价的定价策略研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
LIU M. Research on pricing strategy of residential peak and valley Time-sharing price based on data mining [D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [3] 郇嘉嘉, 左郑敏, 程鑫等. 省级电网负荷特性分析方法研究 [J]. 机电工程技术, 2018, 47 (2): 80-85.
HUAN J J, ZUO Z M, CHENG X, et al. A method of provincial power grids load characteristics analyzing [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47 (2): 80-85.
- [4] 刘青宝. 模糊、动态多维数据建模理论与方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
LIU Q B. Theory and methods of fuzzy, dynamic multi-dimensional data modeling [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [5] 沈吟东, 张全辉, 徐甲. 基于 K-means 聚类算法的公交运营时段分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14 (2): 87-93.
SHEN Y D, ZHANG T H, XU J. Homogeneous bus running time bands analysis based on K-means algorithms [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14 (2): 87-93.
- [6] 乔慧婷. 基于密度聚类的峰谷时段划分方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
QIAO H T. Research of peak and valley periods division based on density clustering [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2011.
- [7] 周博, 王博, 高松, 等. 基于用户响应的分时电价模型研究 [J]. 智能电网, 2016, 4 (3): 307-311.
ZHOU B, WANG B, GAO S, et al. Time-of-use price model based on customer response [J]. Smart Grid, 2016, 4 (3): 307-311.
- [8] 王若愚, 谢莹华. 深圳电网负荷分类及构成分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2 (3): 43-46.
WANG R Y, XIE Y H. Analysis on Shenzhen grid load classification and composition [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (3): 43-46.
- [9] 李娜, 王磊, 张文月, 等. 基于高维数据优化聚类的长周期峰谷时段划分模型研究 [J]. 现代电力, 2016, 33 (4): 67-71.
LI N, WANG L, ZHANG W Y, et al. Research on the partition model of long period peak and valley time based on high dimensional data clustering [J]. Modern Electric Power, 2016, 33 (4): 67-71.
- [10] 黄伟, 杨娟. 基于提升设备利用效益的配电网规划方案优选 [J]. 南方能源建设, 2018, 5 (3): 127-132+139.
HUANG W, YANG J. Research on optimal strategy of distribution network planning based on lifting the equipment utilization benefit [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5 (3): 127-132+139.

作者简介:



张琳

张琳

1987-, 男, 湖北荆州人, 工程师, 学士, 电气工程及自动化, 主要从事综合能源系统、电力市场方面的研究工作 (e-mail)49527583@qq.com。

许可 (通信作者)

1984-, 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 博士, 系统分析与集成, 主要从事电力系统规划, 综合能源系统分析方面的研究工作 (e-mail)hust1125@126.com。

黄耀

1983-, 男, 湖北恩施人, 工程师, 硕士, 电气工程及自动化, 主要从事配电系统、电力市场方面的研究工作 (e-mail) 65328842@qq.com。

廖恒

1982-, 男, 四川自贡人, 高级工程师, 学士, 电气工程及自动化, 主要从事配电系统、继电保护方面的研究工作 (e-mail) 763512861@qq.com。

汪龙

1988-, 男, 湖北宜昌人, 助理工程师, 学士, 可再生能源和能源管理, 主要从事新能源、电力市场方面的研究工作 (e-mail) 324783462@qq.com。

(责任编辑 郑文棠)