

工商业用户负荷中断速率及中断容量特性分析

徐青山¹,吕亚娟¹,杨 斌²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210096;2. 国网江苏省电力公司,南京 210028)

Analysis on characteristics of interruption rate and interruption capacity of industrial and commercial users load

XU Qingshan¹, LV Yajuan¹, YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210028, China)

摘要:为了精细化分析工商业用户负荷的最大中断速率及最大中断容量特性,采用二次分类模型对工商业用户的日负荷数据进行聚类分析。每次聚类均采用模糊C均值聚类法,第一次聚类分离出常规用电数据与参与中断响应的数据,第二次聚类获得精细化的中断响应模式,进而从时间维度和行业维度分析中断速率特性和中断容量特性。结果表明二次分类模型能够有效地挖掘用户的最大中断响应速率及最大中断容量。

关键词:可中断负荷;模糊C均值聚类法;二次聚类模型;中断速率;中断容量

Abstract: In order to analyze the maximal interrupting rate and maximal interrupting capacity of industrial and commercial consumers load finely, the twice classification model is adopted to deal with the consumers' daily load data. The fuzzy C-means clustering method is chosen for each classification. The first classification is used to separate the interruption response data from the conventional data. The second classification is used to obtain the refined interruption patterns. The interrupting rate and interrupting capacity are analyzed from the time dimension and industry dimension. The results show that the twice classification model can effectively excavate the users' maximal response rate and maximal interrupting capacity.

Key words: interruptible load; fuzzy C-means clustering method; twice classification model; interrupting rate; interrupting capacity

中图分类号:TM714 文献标志码:A

0 引言

《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》提出稳步推进售电侧改革,向社会资本有序放开售电业务,为需求响应(demand response, DR)的发展提供了新机遇。一方面,需求响应为满足用电需求提供了除增加装机容量以外的一种解决方式^[1];另一方面,大量可再生能源以分布式电源形式接入电网,必须依靠需求响应进行协调优化以应对其出力的波动性和间歇性^[2-3],实现电力系统安全稳定运行^[4]。

需求响应可分为价格型和激励型^[5]。可中断负荷作为激励型需求响应的一种重要形式,具有响应速度快、灵活等特点,适用于大型工业或商业用户。通过与电力公司签订合同,可中断负荷可参与削峰填谷^[6],还可用于可再生能源的消纳^[7]、快速负荷响应^[8]等业务。目前关于可中断负荷的研究大多集中在调度模型优化^[9]或电力市场机制建立^[10]。这些研究都是在用户的可中断特性已知的条件下进行的,

而在电力系统实际运行过程中,用户是否具有可中断性质以及其中断容量、响应速率等参数信息必须通过大量负荷数据挖掘分析才能得到。

国内外已有较多关于电力系统负荷特性的研究。文献[11]提出了基于改进灰靶-前景理论的负荷调控潜力量化方法,对用户综合调控潜力进行量化。文献[12]运用模糊C均值聚类和模式识别原理,基于日负荷曲线,对用户所属用电行业进行分类与综合。文献[13]利用模糊C均值聚类法对重要企业用户的用电负荷进行聚类,得出用户可提供的中断负荷类型。以上研究都涉及到了负荷特性,但并没有具体研究用户的中断响应特性。文献[14]提出了一个评估需求响应计划对消费者偏好绩效敏感度的框架,进而判断用户的需求响应潜力。文献[15]将用户典型日响应曲线作为基于频谱聚类的数据集,根据每个类别的聚类中心划分用户的响应水平。文献[14]和文献[15]是在自由竞争的电力市场环境下进行的研究,用户的响应特性会受到经济层面的约束。本文分析历史负荷数据,得到用户在物理约束及现有价格、激励政策约束下的中断响应特性。

收稿日期:2019-01-11;修回日期:2019-02-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901100)

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0901100)

本文采用模糊C均值聚类法(fuzzy C-means clustering method, FCM)对单个用户的历史负荷数据进行聚类分析,并提出二次分类模型,研究用户的中断容量和中断响应速率特性,并分析行业因素与季节因素对大用户中断特性的影响。

1 中断速率与中断容量

可中断负荷的本质是在电力系统需要的时候中断用电,以满足电力系统的安全运行要求或其他业务要求。大用户在切除负荷时,需要一定的响应时间,中断响应速率越大、负荷切除越快,对系统运行越有利。不同用户在不同时刻提供的可中断容量也不相同,可中断容量越大则对系统中断需求的贡献越大。因此从物理层面上分析,系统在选取可中断负荷时,主要考虑大用户的最大中断速率以及各时刻可提供的最大中断容量。

为了挖掘用户的最大中断速率,首先需要从已有的用电数据中辨识出参与了中断响应的部分数据,然后在中断响应数据中找出负荷下降最快的速率,即最大中断速率;对于最大中断容量,同样需要将常规用电数据与参与了中断响应后的数据分离,通过比较常规负荷曲线与中断响应后的负荷曲线,确定最大中断容量。由于用户的用电数据量较大,无法对其逐一比较分析,故采用适合处理海量数据的聚类分析方法来提取用户典型用电模式。

2 聚类分析原理

聚类是将原始对象分成多个簇,同一簇中对象相似,不同簇中对象相异,目前已有多种成熟有效的聚类算法^[16]。本文采用FCM法进行聚类分析,并引入聚类有效性函数以确定最佳分类数目。

2.1 FCM法

在FCM法中,每一个样本点以一定的隶属度属于某一类^[17]。FCM的基本思想是不断迭代调整 (U, V) ,使得目标函数 J 最小。其中 U 为用户的隶属度矩阵, V 为聚类中心矩阵。具体的优化模型如下

$$\min J(U, c) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^2 d_{ij}^2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \\ d_{ij} = \|x_j - v_i\| \\ u_{ij} \in [0, 1] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ij} 为用户 j 属于第 i 类的隶属度; d_{ij} 为用户 j 到第 i 个聚类中心的距离; n 为用户数; c 为聚类数。

2.2 聚类有效性函数

在聚类分析中,采用FCM法不能确定原始数据的聚类数目,确定聚类数 c 的值以及分析方法的合理性属于聚类有效性问题。

本文选用聚类有效性函数 F_c 来确定聚类数。 F_c 的定义如下

$$F_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^2 \quad (2)$$

F_c 的值越接近于1,聚类的模糊性越小,聚类效果就越好。计算所有可能的分类数目对应的聚类有效性函数值,选取 F_c 最接近于1时对应的分类数 c 作为原始数据集的聚类数。

3 二次分类模型

为评估工商业用户的最大中断速率与最大中断容量,本文采用二次分类模型进行特性挖掘。该模型共进行2次聚类分析,其中第一次聚类用以分离出大用户常规用电负荷和进行中断响应后的负荷,故第一次聚类数目为2;第二次聚类是对中断响应后的负荷数据再次进行聚类分析,得到该用户的几种典型的中断响应后的曲线,通过有效性函数确定聚类数目。结合第一次聚类得到的常规用电曲线,分析该用户的中断速率与中断容量。

3.1 二次分类

收集关键大用户在中断响应较为频繁的一段时间内的日负荷曲线作为原始数据集。原始数据中的日负荷曲线一部分是常规运行状态下的负荷曲线,一部分是该用户进行了中断响应后的负荷曲线(用户在周末休息减产也视为进行了中断响应)。在常规运行状态时,工商业用户的用电规律性较强,且日用电量大于中断响应后的日用电量。因此可以通过FCM法将原始数据分为常规运行数据和中断响应后的数据。以用户96点日负荷数据为特征向量,对原始数据集进行聚类分析,获得最终的隶属度矩阵 U 和聚类中心矩阵 V 。

经过第一次聚类,将用户常规用电数据与参与中断响应后的用电数据从原始数据中分离出来。由于用户的中断方式多样,为了精细化分析其可中断特性,对第一次聚类得到的中断响应后的数据再次进行聚类分析,采用聚类有效性函数确定最佳聚类数目,可得到该用户中断响应的多种典型模式。

3.2 精细化分析

通过两次聚类可获得该单个用户的典型负荷曲线,常规电力负荷减去中断响应后的负荷曲线,可得该用户的典型可中断曲线,比较几类可中断曲线,选取每个时刻对应的最大中断容量,得到用户最大中断容量曲线;比较中断响应后的负荷曲线波

功率,可得该用户的最大中断响应速率。具体挖掘过程如图1所示。图1(a)中负荷1表示该用户的常规负荷曲线,负荷2.1—负荷2.3表示该用户参与3种典型中断响应后的负荷曲线。

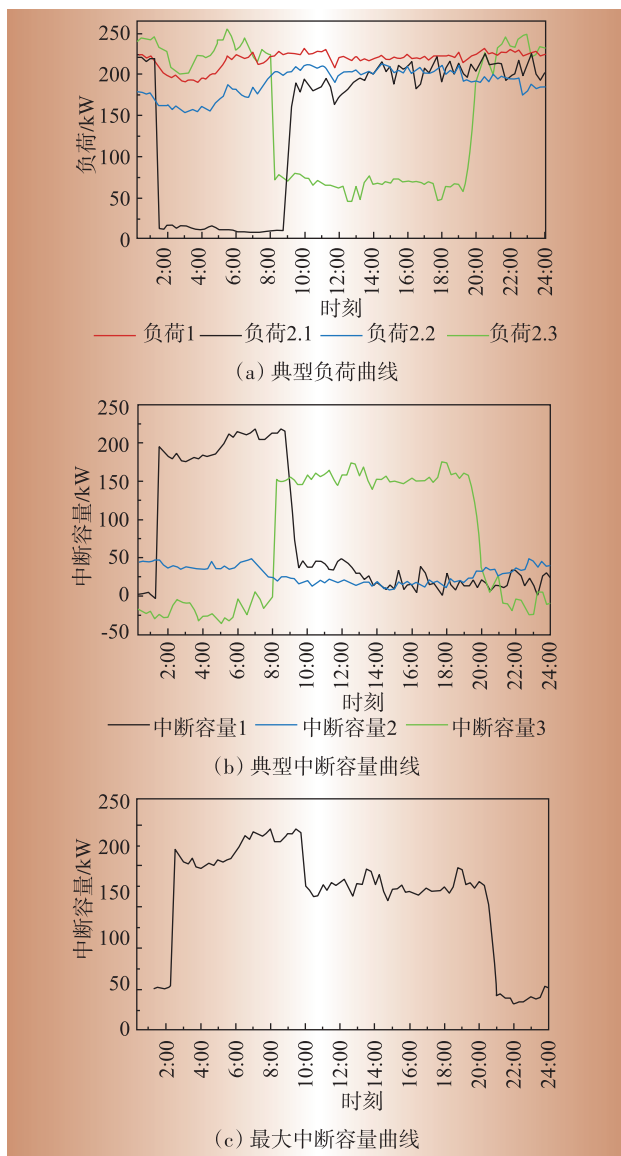


图1 大用户可中断特性挖掘过程
Fig. 1 The digging process of big customer's interruptible features

4 算例分析

研究江苏省某市6户用户的可中断特性,用户1、用户2与用户3属于棉、化纤纺织及印染精加工行业,用户4、用户5和用户6属于不锈钢及类似日用金属制品制造行业。因夏季与冬季为一年中的用电高峰期,用户进行中断响应的概率较大,故选取用户7月份和12月份的96点日负荷数据进行分析。

4.1 中断速率

各用户的最大中断速率如表1所示。

表1 最大中断速率
Tab. 1 Maximal interrupting rate

	kW/min					
用户	1	2	3	4	5	6
7月份	6.18	51.45	12.96	0.61	1.65	12.87
12月份	23.10	21.81	13.54	0.50	1.45	5.73
最大值	23.10	51.45	13.54	0.61	1.65	12.87

从行业维度观察表1,用户1、用户2与用户3的响应速率均大于用户4、用户5和用户6的响应速率。整体来看,棉、化纤纺织及印染精加工行业的中断速率大于不锈钢及类似日用金属制品制造行业。对棉、化纤纺织及印染精加工行业而言,用户2的中断响应速率值最大,用户1的值次之,用户3的值最小,可以看出三者的最大中断响应速率并不接近;对不锈钢及类似日用金属制品制造行业而言,最大的中断响应速率是用户6的12.87 kW/min,最小的中断响应速率是用户4的0.61 kW/min,同样差距较大。由此可以发现用户的最大中断响应速率与所属行业有一定关联,但行业因素不能决定用户的中断速率,同一行业下的用户中断速率可能相差很大。

从时间维度观察表1,对棉、化纤纺织及印染精加工行业的用户而言,用户1的7月份最大中断速率小于12月份的最大中断速率,用户2的7月份中断速率大于12月份中断速率,而用户3的7月份中断速率与12月份中断速率接近。在时间维度上,该行业用户的中断速率变化不一致;对不锈钢及类似日用金属制品制造行业来说,7月份的最大中断速率普遍大于12月份的最大中断速率。季节变换对该行业用户的中断速率的影响基本一致。

4.2 中断容量

用户最大中断容量结果如图2所示。

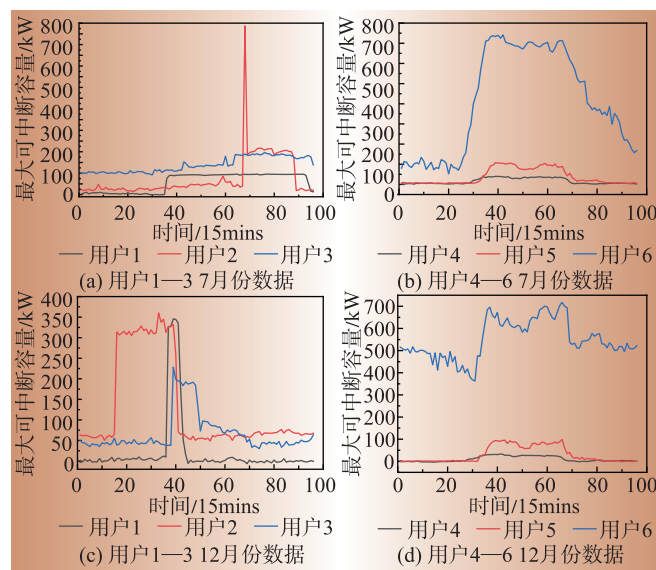


图2 最大中断容量曲线
Fig. 2 Maximal interruptible capacity curves

从行业维度观察图2可知,棉、化纤纺织及印染精加工行业的可中断负荷灵活多样,而不锈钢及类似日用金属制品制造行业各用户的最大中断容量具有一定的相似性,用户的最大中断容量与其所属行业具有一定关系。棉、化纤纺织及印染精加工行业的3种用户的最大可中断负荷曲线各不相同,说明该行业的生产活动较为灵活,具体的生产计划可由用户自行安排,不受行业本身限制,这也是该行业用户中断响应速率较大的部分原因。而对不锈钢及类似日用金属制品制造行业来说,用户的高峰时段集中在9:00~14:00,说明该行业的生产规律性较强,用户的生产计划比较固定,这同样解释了该行业用户的中断速率较小的原因。

从时间维度观察图2可知,对用户1、用户2及用户3来说,7月份与12月份的最大可中断负荷曲线差别较大,最大可中断负荷高峰值与可中断高峰时段均不相同,说明季节变化使得用户的生产计划发生改变,从而影响了可中断负荷性质;而用户4、用户5和用户6在7月份和12月份的中断高峰时段均在9:00~16:00之间,其中用户4和用户5的7月份与12月份的最大可中断负荷曲线基本相同,说明季节变化对其生产活动影响较小;而用户6在12月份的可中断负荷高峰值较之7月份的高峰值有所减小,但在非高峰时段,12月份的最大可中断负荷值远大于7月份的值,表明季节变换对该用户的最大中断容量值产生了一定影响。

4.3 二次分类有效性验证

本文通过建立二次分类模型来挖掘大用户中断速率与中断容量特性,为验证该模型的有效性,以3.1节6个用户的7月份数据为例,将二次分类模型挖掘出的可中断特性与传统聚类模型挖掘出的可中断特性进行比较,最大中断速率结果如表2所示。

表2 最大中断速率对比

Tab. 2 Comparison of maximal interrupting rates

kW/min

用户	1	2	3	4	5	6
二次分类	6.18	51.45	12.96	0.61	1.65	12.87
传统模型	2.69	2.90	1.05	0.32	0.34	5.41

由表2可知,对选取的6个用户而言,利用二次分类模型所挖掘出的可中断负荷响应速率比传统聚类模型挖掘出的响应速率大。其中用户2通过2种模型挖掘出的值差距最大;而用户4通过2种模型挖掘出的值差距较小,但使用二次分类挖掘出的结果仍然比使用传统聚类得到的结果更优。因此,相较于传统聚类模型,二次分类模型能够更加充分的挖掘出用户的中断响应特性。

用户最大中断容量挖掘结果如图3所示。

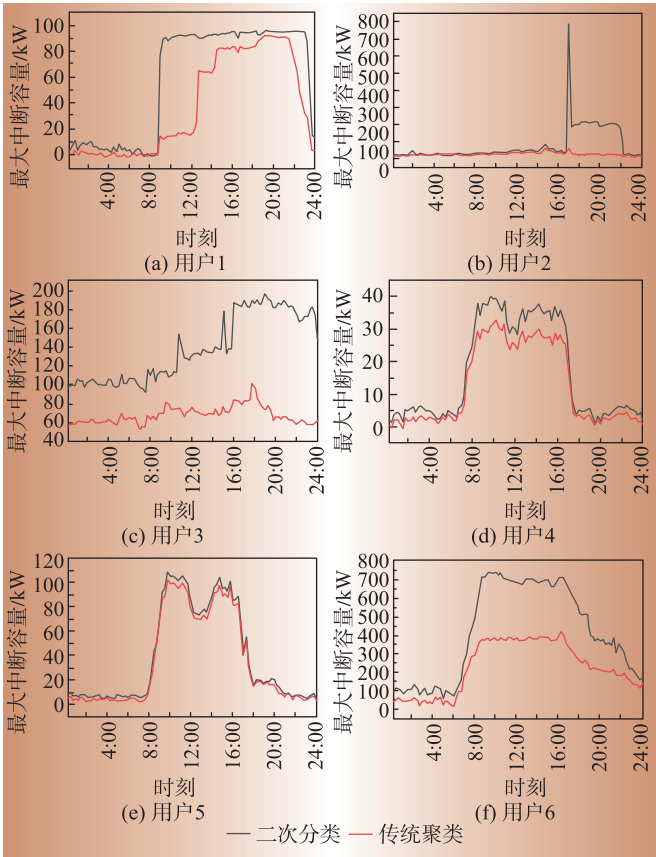


图3 最大可中断容量对比

Fig. 3 Comparison of maximal interruptible capacity

图3中,红色、黑色曲线分别代表使用传统聚类模型、二次分类模型得到的最大中断容量。可以看出,用户1—用户6的黑色曲线都在红色曲线之上,其中,在高峰时段用户1、用户2与用户6的黑色曲线与红色曲线差距较大,而用户3在一天中所有时段的黑色曲线与红色曲线差距都比较大,说明二次分类能更充分的挖掘出用户的最大中断容量性质。用户4与用户5的两条曲线较为接近,这表明用户4与用户5本身的最大中断容量有限,不能挖掘出更多的潜力。

综上,不论是用户最大中断速率特性还是最大中断容量特性,使用二次分类模型都能比传统直接进行聚类分析的模型挖掘出更充分的信息,从而证明二次分类模型的有效性。

5 结束语

本文采用FCM法进行聚类分析,通过二次分类模型有效地挖掘出单个大用户的最大中断速率特性和最大中断容量特性,并从行业维度和时间维度研究了大用户的可中断负荷特性,讨论了行业属性和时间因素对负荷中断特性的影响。但本文的研究仍存在一些不足之处,算例中采用的是96点日负荷数据,即每隔15 min采样一次,而这样的数据会导致计算的负荷中断响应速率结果精度较低,在后续研究

中可对此加以改进。D

参考文献:

- [1] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3 654-3 663.
WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3 654-3 663.
- [2] 李文启, 李朝晖, 杨海晶, 等. 需求响应下分布式储能协调运行策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(3): 11-14.
LI Wenqi, LI Zhaohui, YANG Haijing, et al. Research on coordinated strategy of distributed battery energy storage in demand response [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3): 11-14.
- [3] SAMADI P, WONG V W S, SCHOBBER R. Load scheduling and power trading in systems with high penetration of renewable energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1 802-1 812.
- [4] ZIADI Z, TAIRA S, OSHIRO M, et al. Optimal power scheduling for smart grids considering controllable loads and high penetration of photovoltaic generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2 350-2 359.
- [5] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [6] 朱兰, 周雪莹, 唐陇军, 等. 计及可中断负荷的微电网多目标优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1 847-1 854.
ZHU Lan, ZHOU Xueying, TANG Longjun, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1 847-1 854.
- [7] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1 079-1 088.
LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1 079-1 088.
- [8] 程雄, 程春田, 刘冀, 等. 快速响应负荷需求的大规模水电站群超短期调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1 016-1 025.
CHENG Xiong, CHENG Chuntian, LIU Ji, et al. Rapidly response load demand of large-scale hydropower plants ultra-short term scheduling model [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1 016-1 025.
- [9] 张峰, 李新家. 源网荷互动终端可中断负荷选择与接入调试方法探讨[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(6): 33-36.
ZHANG Feng, LI Xinjia. The discussion of the methods about selecting and inputting for testing interruptible load mechanism in power grid interactive terminal facilities [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 33-36.
- [10] 黄海涛, 胡学英, 李翔, 等. 实用化的激励性可中断负荷最优补偿定价模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2 149-2 154.
HUANG Haitao, HU Xueying, LI Xiang, et al. A practicable optimal compensation pricing model for incentive interruptible load contract [J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2 149-2 154.
- [11] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6 791-6 800.
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6 791-6 800.
- [12] 李欣然, 姜学蛟, 钱军, 等. 基于用户日负荷曲线的用电行业分类与综合方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 56-61.
LI Xinran, JIANG Xuejiao, QIAN Jun, et al. A classifying and synthesizing method of power consumer industry based on the daily load profile [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 56-61.
- [13] 陈明照, 毛坚, 杜宗林, 等. 基于聚类法的工业用户需求侧管理(DSM)方案分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 84-89.
CHEN Mingzhao, MAO Jian, DU Zonglin, et al. Analysis on demand side management scheme of industrial enterprise based on clustering method [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 84-89.
- [14] AZARI D, TORBAGHAN S S, CAPPON H, et al. Assessing the flexibility potential of the residential load in smart electricity grids—a data-driven approach [C]// International Conference on the European Energy Market, 2017: 1-6.
- [15] SUN Y, GAO Y, YANG W, et al. Research on user optimal aggregation based on demand response potential spectrum clustering analysis [J]. The Journal of Engineering, 2017 (13): 2 152-2 157.
- [16] 廖天明, 傅晓飞, 李肇卿, 等. 基于改进灰色聚类的配电网基建改造项目综合评估方法研究[J]. 供用电, 2017, 34(5): 50-56.
LIAO Tianming, FU Xiaofei, LI Zhaoqing, et al. Research on comprehensive evaluation method for infrastructure reconstruction project of distribution network based on improved gray clustering [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 50-56.

(下转第31页)