

DOI: 10.7667/PSPC160513

基于聚类法的工业用户需求侧管理(DSM)方案分析与研究

陈明照¹, 毛坚², 杜宗林¹, 刘军志¹

(1. 国网湖南省电力公司技术技能培训中心, 湖南 长沙 410131; 2. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为了解决只是按照电价对用户负荷特性进行分析带来的问题, 达到需求侧管理的有序用电, 提出了基于聚类法的负荷特性分析方法。以工业企业 DSM 方案为背景, 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。利用基于可能性分布的聚类有效性函数指标作为分类依据, 对某公司的负荷特性进行精细挖掘, 对聚类结果进行了详细分析。分析结果显示, 负荷峰值时段, 其在需求响应事件中, 可提供气候敏感负荷中断容量和生产负荷中断容量两种类型, 并得出了其对应适合的需求响应类型。

关键词: 需求侧管理; 聚类分析; 有序用电

Analysis on demand side management scheme of industrial enterprise based on clustering method

CHEN Mingzhao¹, MAO Jian², DU Zonglin¹, LIU Junzhi¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Technical Training Center, Changsha 410131, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to solve the problems caused by analyzing users' load characteristics only and to achieve orderly power utility of demand side management, the load characteristic analysis method based on clustering method is proposed. In the view of the background of industrial enterprises DSM scheme, the fuzzy C means clustering method is applied, and the power load of the important enterprise users are clustered. The clustering validity function index based on probability distribution is chosen as the classification basis, and the load characteristics of a certain automobile manufacturing company are analyzed in detail, so does the clustering results. Analysis results show that, during the peak load period, a preliminary estimate of the demand response to events can provide weather sensitive load interruption of production capacity and load interruption capacity, and get the corresponding demand response types which suites to the needs.

This work is supported by Science and Technology Program of Hunan Province (No. 2012WK3036).

Key words: demand side management; clustering analysis; orderly power utility

0 引言

电力行业的健康和稳定发展, 需要从两方面着手: 一是电网自身的发展, 即提高电力系统的可靠性; 二是要走一条经济的、可持续发展的道路, 充分利用可再生能源, 做到高效节能环保。需求侧管理在这样的背景下应运而生。需求侧管理(Demand Side Management, DSM)是指电力供需双方共同协作, 在政府的各种政策引导下, 采取各种措施以改变用户用电方式, 达到减少用电消耗、降低系统负荷峰谷差、提高供电可靠性的目的, 最终实现参与方的利益而进行的管理活动^[1]。

电网的自动化、智能化是人类科技进步的标志, 也是电网发展的必然趋势^[2], 智能电网的 DSM 不仅能提高能源的利用效率, 而且可以保证供电的可靠性, 达到环境友好的要求。近年来该方面的研究被广泛关注^[3-6]。

目前智能电网 DSM 的主要内容包括有序用电和需求侧响应两个方面^[7]。

本文以工业企业 DSM 方案为背景, 讨论有序用电特征发掘的必要性, 通过采用模糊 C 均值聚类法对典型工业用户的有序用电特征进行挖掘, 探讨其适合的定价类型、可中断负荷管理等。

1 有序用电特征发掘必要性

现阶段我国的 DSM 偏向于以行政手段为主的

有序用电。随着坚强智能电网的不断建设和发展, 客户管理系统、智能负荷控制以及智能电表等一批先进的智能设备将得到普及使用, 为 DSM 由以行政手段为主的强制性有序用电向以经济手段为主的需求响应过渡创造了良好的条件, 并实现最小能源消耗、最少成本及最低排放条件下的电力供应。

传统的有序用电是通过强制限电拉闸来保证电力系统安全运行, 而需求响应与其做法不同, 需求响应力争在对工业生产和居民舒适度的影响降到最低的前提下, 对负荷进行有效地控制, 并通过采用一些适当补偿措施来激励用户, 使其积极主动响应需求控制策略^[8]。智能电网的发展推动了需求响应的实施, 使其具有更宽更广的受众面, 面向中小用户甚至扩展到某些用电设备的需求响应将是未来智能电网发展过程中一个重要方向, 也为吸纳可再生能源提供了机遇^[9-10]。

需求侧响应需要足够多的市场参与者, 对负荷的响应特性进行较为细致的分类与分析, 才能聚集到有效的需求侧管理所需要的数据。在需求常规分类中, 用户按电价分为居民用电和工商业用电。用户的日负荷曲线含有反映负荷构成特性的丰富信息。同一行业的用户的负荷特性可能存在较大的差别, 不同行业的用户的负荷特性也可能存在着相似的特征。如果仅仅按照电价对用户的负荷特性进行分类也是不够科学和严谨的, 因为不同类别的某些用户的电价响应率可能存在着一定的相似性^[11]。

从以上分析可以看出, 针对用户的负荷特性和用电需求对用户的用电特征进行精细挖掘, 是实施行之有效的需求响应措施的基础和前提。

2 模糊 C 均值聚类法

面对群体日益庞大的电力用户, 没有必要且不可能为实施需求响应对每个用户逐个进行建模分析, 可以通过数学方法将用户分类, 通过与典型用户类别的比较, 分析推算出其它与之具有相同特征的用户综合负荷特性。

模糊 C 均值聚类算法是在 1981 年由 Ruspini 和 Bezdek 提出的。本文采用模糊 C 均值聚类法相结合的聚类算法对用户进行精细化用电特征分类, 所选取的特征向量有两组:

- ① 同一企业一年某些月日负荷点;
- ② 不同企业某日负荷点。

其思路是将从用电信息采集系统获得的众多用户日负荷曲线, 按照需求响应措施的需要, 提取特征向量后, 按照某一类特征向量进行分类, 所得每

类的用户将具有某一相似的负荷特性。

1) 模糊 C 均值聚类法原理^[12-14]

设集合 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 所谓的模糊聚类就把集合 X 划分为 C 类, C 取值为 $[2, n]$, 其中每个元素都包含了 S 个属性, 集合 $v = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_c\}$ 中的各个元素为 C 个聚类中心。之所以称其为模糊聚类, 是因为样本点是以一定的关系密切相似程度划分属于为某一类的, 并不是严格地分类的。

设变量 u_{ij} 表示第 j 个样本属于第 i 类的隶属度, 本文所应用的模糊 C 均值算法就是在满足式(1)的前提下, 对目标函数 J 的最小值的求解。

$$u_{ij} \in [0, 1], 1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq c, \sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \quad (1)$$

式(2)为目标函数 J 的表达式, d_{ij} 表示了样本点 x_j 与聚类中心 v_i 之间的距离用参数, $d_{ij} = \|x_j - v_i\|$ 。

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

根据拉格朗日乘法法已求得目标函数 J 的极值和最佳。

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial u_{ij}} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial v_i} = 0 \\ \sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

方程组(3)的解 (U, V) 即为式(2)中目标函数 J 的极值点。由式(3)得到隶属度和聚类中心的迭代公式如(4)所示。

$$I_j = \{1 \leq i \leq c, d_{ij} = 0\} \quad \bar{I} = \{1, 2, \dots, C\} - I_j \quad (4)$$

当 $I_j = \emptyset$ 时,

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}^2}{d_{kj}^2}\right)^{1/m-1}} \quad (5a)$$

当 $I_j \neq \emptyset$ 时, $\forall i \in I_j, u_{ij} = 0$ 且 $\sum_{i=I} u_{ij} = 1$

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m} \quad (5b)$$

2) 求解步骤

模糊 C 均值聚类算法的核心解题思路是, 通过不断的迭代计算方程组(3)的解 (U, V) , 使得目标函

数取值最小。故求解的实现步骤如下:

(1) 确定相应的 C , m 以及初始聚类中心 v_0^L ,

此时迭代步数 $L=0$ 。

(2) 根据公式计算隶属度矩阵 U^L

参考式(4)、式(5a)及式(5b)。

(3) 用 U^L 计算 v^{L+1}

$$v_i^{L+1} = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij}^L)^m x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij}^L)^m} \quad (6)$$

(4) 对给定的阈值 ε , 如果计算结果满足 $\|U^{L+1} - U^L\| < \varepsilon$, 则终止该计算过程; 否则, 令 $L=L+1$, 转向步骤(2), 继续迭代求解。

3) 聚类有效性函数

在模糊 C 均值聚类算法中, 无论数据结构如何, 实际数据的分类通常是未知的, 一般都需要给定一个特定的聚类数 C 将数据集分成 C 类, 聚类有效性问题就是指如何确定聚类数 C 以及聚类方法是否合理的问题。

本文在分析前人文献研究的基础上^[15-17], 对比考虑了几种常见的有效性指标, 通过对比相应的分类数据和程序实现的难易程度以及准确性, 选择了基于可能性分布的聚类有效性函数指标作为分类依据。

基于可能性分布的聚类有效性函数指标, 是根据模糊集理论中的可能性分布概念, 结合模糊划分系数 $F(U;c)$ 的定义, 引入了可能性划分系数 $P(U;c)$ 。

对每一个样本 x_i , $F(U;c)$ 也可写成

$$F(U;c) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^c \mu_{ij}^2 / \sum_{i=1}^c \mu_{ij} \right) \quad (7)$$

系数 $F(U;c)$ 的定义从可能性分布的角度可以理解: 每一个可能性分布对应一个样本点, 模糊划分系数 $F(U;c)$ 是所有可能性分布描述因子的平均值。

对每一个聚类中心, 所有各样本点的隶属度也构成一个可能性分布。其定义如下:

(1) 对于确定的聚类数 c 和隶属度矩阵 U , 可能性划分系数定义为

$$P(U;c) = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \left(\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^2 / \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \right) \quad (8)$$

(2) 对于确定的聚类数 c 和隶属度矩阵 U , 聚类

有效性函数定义为

$$FP(U;c) = F(U;c) - P(U;c) \quad (9)$$

对于 $U \in M_{fc}$ 的“最优”集合, 如果存在 $(U^*; c^*)$ 满足

$$FP(U^*; c^*) = \min_c \{ \min_{\Omega_c} FP(U;c) \} \quad (10)$$

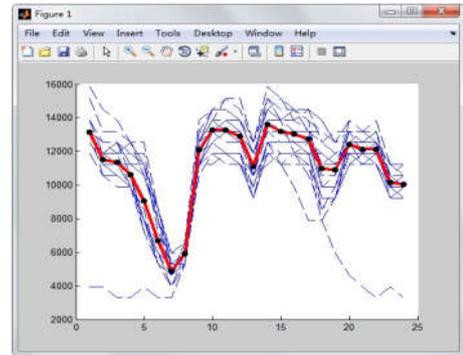
则认为 $(U^*; c^*)$ 是“最优”的有效性聚类。

目前的研究人员对如何选取最大可能的分类数的问题还没有形成统一适用的结论, 因为该数值的选取与问题所给出的相应的数据结构有关。国外学者Bezdek指出^[18], 可以用关系式 $c_{\max} \leq \sqrt{n}$ 来限制分类数 C 的最大值。当数据中 n 的取值较大时, 考虑到计算速度等方面的因素, 常取 $c_{\max} \leq 2 \ln n$ 作为分类数目的最大值。

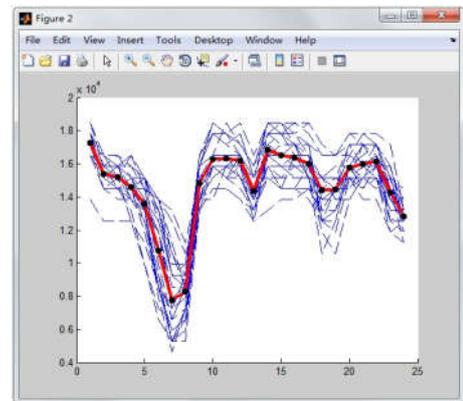
3 典型工业用户有序用电特征挖掘分析实例

本课题选取某地区的汽车生产公司为例, 以其 24 点负荷曲线进行分析研究。

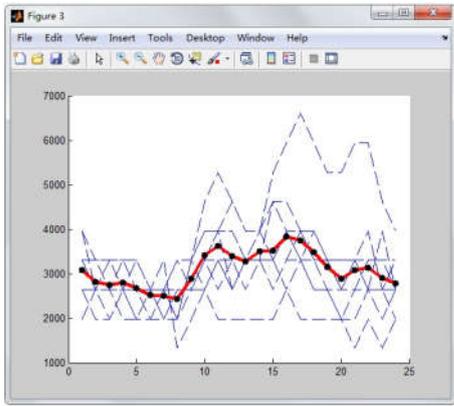
选取该汽车厂 2015 年 4 月及 6~8 月的每日 24 点负荷数据作为聚类的特征向量, 共分为 7 类。分类结果如图 1 所示, 表 1 为该汽车厂负荷聚类在统计月所占的天数和比例。



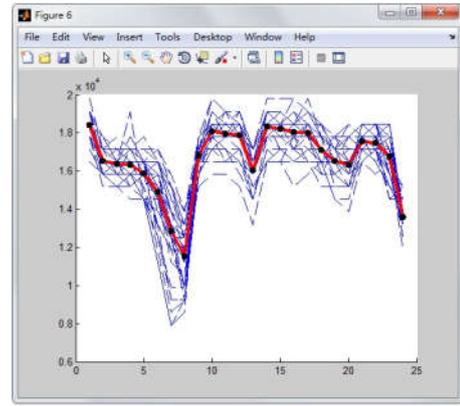
(a) 第 I 类



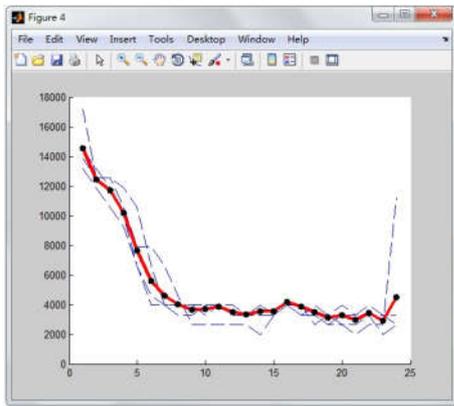
(b) 第 II 类



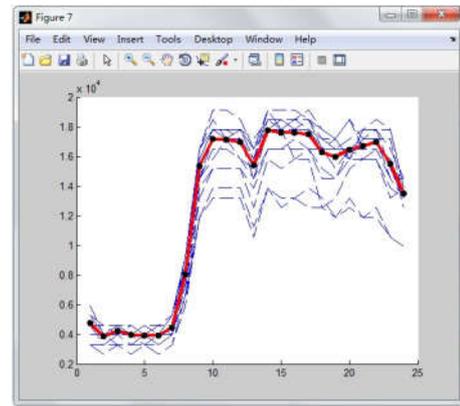
(c) 第 III 类



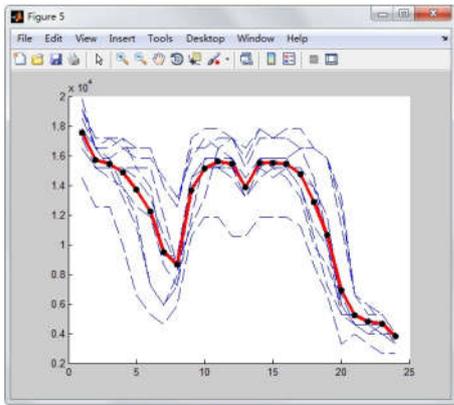
(f) 第 VI 类



(d) 第 IV 类



(g) 第 VII 类



(e) 第 V 类

图 1 某汽车公司的用电负荷聚类结果图

Fig. 1 Load clustering results chart of a certain automobile company

综合各类的负荷可以看出, 该汽车公司是三班制连续生产企业, 但在交接班和员工休息时会产生较大的负荷动荡, 说明一部分生产设备是不需要连续工作的, 在电网可靠性受到威胁时, 可以断电休停, 且响应速度会比较快, 初步估计这部分负荷在 2000~3000 kW。负荷曲线出现 4 个高峰值, 分别在 2:00、10:00~13:00、15:00~18:00 和 21:00~23:00, 有一部分为迎峰负荷。

表 1 某汽车公司的负荷聚类在统计月所占的天数和比例

Table 1 Number of days and proportion of load clustering of a certain automobile company

	4 月		6 月		7 月		8 月	
	天数	比例	天数	比例	天数	比例	天数	比例
第 I 类	21	70%	1	3.3%	0	0	0	0
第 II 类	1	3.3%	13	43.3%	14	45.2%	1	3.2%
第 III 类	4	13.3%	2	6.7%	2	6.4%	2	6.5%
第 IV 类	2	6.7%	1	3.3%	1	3.2%	0	0
第 V 类	0	0	4	13.3%	3	9.7%	3	9.7%
第 VI 类	0	0	5	16.7%	8	25.8%	21	67.7%
第 VII 类	2	6.7%	4	13.3%	3	9.7%	4	12.9%

从聚类结果可以看出,第 I、II 与 VI 类负荷曲线的形态类似,选取的样本共 122 天,这三类相加为 84 天,占总样本天数的 69%,其它四类的天数之和只占总样本天数的 31%,因此,第 I、II 与 VI 类负荷曲线比较具有代表性。从这三类所属日期比较可以看出,该汽车制造企业的用电负荷和温度季节有很大关系,第 II 和 VI 类属于夏季,第 I 类属于春季。大致计算可以得出该汽车制造企业的季节敏感性负荷最高达到 4000 kW 左右,这部分负荷在电网安全性受到威胁时,可以切除一部分或企业内部能量管理实现轮控。因此,直接负荷控制、尖峰电价、可中断负荷、紧急需求响应适合这类用户。

第 III 类负荷曲线整体水平较低,从分类所属日期看,应该不是由于限电的原因导致,可能是由于设备轮休、检修、员工集体放假等原因造成,负荷至少可以降下 14 000 kW。第 IV 类负荷夜间负荷水平较高,白天负荷水平较低,符合峰谷电价的规律。第 VII 类负荷占总样本天数的 11.5%,这类负荷夜间从 0:00~7:00 负荷水平较低,保持在 4000 kW 左右,而 7:00~24:00,负荷水平则保持在 17 000 kW 左右,可以通过分时电价加大激励措施,使企业愿意将一部分负荷转移到夜间,加大夜间的生产。该汽车制造公司精细用电特征挖掘分析如表 2 所示。

表 2 某汽车制造公司的精细用电特征挖掘分析

Table 2 Analysis of the fine power characteristics of a certain automobile company

负荷特征	换班时有较大的负荷动荡,有些天 0:00 至 7:00 负荷要比其他时段低很多	
峰值时刻	2:00	
	10:00~13:00	
	15:00~18:00	
	21:00~23:00	
气候敏感负荷中断容量	4000 kW	
生产负荷的中断容量	一级	2000~3000 kW
	二级	14 000 kW
适合需求响应类型	分时电价、尖峰电价、直接负荷控制、可中断负荷、紧急需求响应	

4 结论

本文以工业企业 DSM 方案为背景,讨论有序用电特征发掘的必要性,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,选取了两组特征向量,并在分析前人文献研究的基础上,通过对比相应的分类数据和程序实现的难易程度以及准

确性,选择了基于可能性分布的聚类有效性函数指标作为分类依据,利用第一组特征向量对某汽车制造公司的负荷特性进行了精细挖掘,对聚类结果进行了详细分析,从而得出其负荷峰值时段,初步估计其在需求响应事件中可提供气候敏感负荷中断容量和生产负荷的中断容量两种类型,并得出了其对应适合的需求响应类型。

参考文献

- [1] 蔡德华,陈柏熹,程乐峰,等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [2] 谭亲跃,王少荣,程时杰. 电力需求侧管理(PDSM)综述[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(17): 79-84.
TAN Qinyue, WANG Shaorong, CHENG Shijie. Survey on power demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(17): 79-84.
- [3] 赵慧颖,刘广一,贾宏杰,等. 基于精细化模型的需求侧响应策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 62-69.
ZHAO Huiying, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Analysis of demand response program based on refined models[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 62-69.
- [4] EDWAD L. International DSM and DSM program evaluation-an in deep assessment[J]. Energy, 1996, 21(10): 983-996.
- [5] ATIKOL U, GUVEN H. Feasibility of DSM-technology transfer to developing countries[J]. Applied Energy, 2003, 76: 197-210.
- [6] COVINO S. Demand side response 21st style[C] // Proceedings of IEEE PES General Meeting, Toronto, Canada, 2003, 4: 2280-2284.
- [7] 刘纯,吕振华,黄越辉,等. 长时间尺度风电出力时间序列建模新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 7-13.
LIU Chun, LÜ Zhenhua, HUANG Yuehui, et al. A new method to simulate wind power time series of large time scale[J]. Power System Protection and Control, 2013,

- 41(1): 7-13.
- [8] 牛东晓, 陈志强. 电力市场下的需求响应研究[J]. 华东电力, 2008, 36(9): 5-9.
NIU Dongxiao, CHEN Zhiqiang. Demand response in electricity markets[J]. East China Electric Power, 2008, 36(9): 5-9.
- [9] 王建华, 张国钢, 耿英三, 等. 智能电器最新技术研究及应用发展前景[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 2-11.
WANG Jian hua, ZHANG Guogang, GENG Yingsan, et al. The latest technology research and application prospects of the intelligent electrical apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 2-11.
- [10] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.
- [11] 朱建全, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于证据推理的电力负荷建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 89-95.
ZHU Jianquan, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Electric load modeling based on evidence reasoning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 89-95.
- [12] 白瑞祥, 李若岩, 宋辉. 模糊 C 均值聚类分析系统设计与实现[J]. 天津科技大学学报, 2005, 20(4): 52-55.
BAI Ruixiang, LI Ruoyan, SONG Hui. Design and realization of clustering analysis system based on fuzzy C-means[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2005, 20(4): 52-55.
- [13] 何清. 模糊聚类分析理论与应用研究发展[J]. 模糊系统与数学, 1998, 12(2): 21-24.
HE Qing. Fuzzy clustering analysis theory and application research development[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1998, 12(2): 21-24.
- [14] 汪可, 廖瑞金, 王季宇, 等. 局部放电 UHF 脉冲的时频特征提取与聚类分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 211-219.
WANG Ke, LIAO Ruijin, WANG Jiyu, et al. Time-frequency features extraction and clustering analysis of partial discharge uhf pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 211-219.
- [15] 于剑. 论模糊 C 均值算法的模糊指标[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 968-973.
YU Jian. On the fuzziness index of the FCM algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(8): 968-973.
- [16] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [17] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [18] PAL N R, BEZDEK J C. On duster validity for the fuzzy e-means model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1995, 3(3): 370-379.

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-07-06

作者简介:

陈明照(1982-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化技术; E-mail: cmz982@sina.com

毛坚(1983-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力营销、电力市场需求侧管理。

(编辑 张爱琴)