

综合考虑供用电双方需求的 优质电力用户分类方法

栾乐, 马智远, 莫文雄, 许中, 周凯, 郭倩雯

(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420)

摘要:售电侧开放形成的竞争性售电市场使用户拥有选择权, 用户可选择除电网公司以外的售电公司提供电能及相应服务, 这将导致电网公司客源流失、市场份额降低。与此同时, 随着现代高新技术产业的持续发展, 电能质量扰动对用户造成的损失与影响不断增加。因此, 电网公司亟需提供满足用户需求的优质电力服务来为有效吸引客源、提升市场竞争力。然而, 目前缺乏考虑供用双方需求的用户分类方法, 导致优质电力服务的开展进程受阻。通过考虑用户终身价值与电能质量需求, 兼顾电网公司与用户综合需求, 提出一套新的优质电力用户分类指标体系; 同时, 基于模糊理论实现数据规范化处理, 提出改进 k -means 聚类算法对海量用户指标数据进行分类, 并利用基于熵权的模糊层次分析法实现指标权重计算。最后, 通过实例验证该文所提方法所包含的评价信息覆盖较为全面, 弱化一般分类方法的主观性, 使得优质电力用户分类结果更为客观合理。

关键词:电能质量; 电压暂降; 终身价值; 电能质量需求; 用户分类

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.021 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2021)06-0171-11

A premium user classification method considering the demand of both power company and electricity user

LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, XU Zhong, ZHOU Kai, GUO Qianwen

(Electric Power Test Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: Due to the opening of the electricity retailing market, the competitive electricity retailing market allows users choose any electricity company to provide electricity and corresponding services, which will cause the loss of customers and reduce market share of power utilities. At the same time, with the sustainable development of the modern high-technology industries, the loss and impact of the power quality disturbance of users are continuous increasing. Therefore, power companies have necessary to provide high-quality service that meets customer's requirements to effectively attract customers and improve market competitiveness. However, there is a lack of customer classification method considering the demand of both power company and electricity user, which hinders the development of high-quality power service. In this paper, a new classification index system of premium users is proposed by considering the lifetime value and power quality demand of users, which combining the comprehensive demand of power grid

收稿日期:2019-12-26; 修回日期:2020-08-21

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20170141)

通信作者:栾乐(1983-),女,硕士,高级工程师,主要从事设备状态监测与评价研究;E-mail:Yazhui869396@163.com

companies and users. Then, the fuzzy theory is adopted to achieve data standardization, an improved k-means clustering algorithm is proposed to classify the massive user index data, and the fuzzy AHP based on entropy weight is used to calculate the index weight. Finally, the numerical results show that the evaluation information contained in this method is more comprehensive, which weakens the subjectivity of the general method, and make the result classification results of high-quality user more objective and reasonable.

Key words: power quality; voltage sag; lifetime value; power quality demand; power user classification

2015年3月15日,中共中央、国务院发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[1],标志着中国新一轮电力改革的开始。新一轮电改在售电侧引入竞争机制,各类售电公司得以成立并进入市场,使得用户与售电公司一样拥有自主选择交易对象的权利。2018年5月,国家能源局发布《用户“获得电力”优质服务情况重点综合监管工作方案》,旨在深入贯彻落实党中央、国务院关于优化营商环境,提高“获得电力”指标的重要指示要求,增强企业用户对优质供电服务的获得感。因此,电网公司必须正确合理地进行用户分类,才能够有针对性地提供相应差异化优质供电服务,以有效吸引客源,抓住优质电力核心客户,提高用户用电满意度,优化电力营商环境,达到利益最大化^[2]。

目前,电力用户分类主要针对用户分类评价指标和用户分类方法等方面进行研究。前者通常利用基于电力营销管理的各类客户价值评价指标,建立电力用户细分体系,如:从客户当前价值与潜在价值^[3-5]、区域贡献价值^[6]、信用状况^[7]等方面构建指标体系。还有研究从客户用电的贡献、规范性、合作等3个维度建立分类指标^[8]。但这些分类指标体系通常区别在所筛选的子指标略有不同,或子指标覆盖范围不够全面,同时均仅考虑客户价值层面,以售电公司的利益最大化为出发点,而没有考虑到用户对电能质量的实际优质电力需求。后者通常利用各种聚类分析和评价方法对用户进行分类,包括集成粗糙集和支持向量机^[9]、模糊层次分析法和 k -均值聚类^[3]、模糊层次分析法^[4]、熵权法和 k -均值法^[6]、改进模糊物元法^[10]以及加权FCM聚类算法^[11]等。这些方法都为电力用户分类做出了巨大贡献,但也存在一些不足之处,例如:支持向量机某些参数的选取需借用经验并进行大量试验,模糊层次分析法考虑的主观因素较多,而熵权法仅从客观角度考虑, k -

均值法结果容易依赖于人为指定的聚类个数和初始中心点等。这些问题的存在会影响用户分类结果的准确度,使售电公司难以真正为用户提供差异化优质服务。

随着高科技产业与高端制造业的不断发展,相关行业电力用户对电能质量的需求越来越强烈。目前,优质电力服务更多时候还停留在纸上谈兵的阶段,这是因为优质电力服务能够顺利开展需要同时满足供用双方的需求,而非仅考虑单一方的需求。因此,如何在考虑电网公司利益需求的基础上,同时考虑用户电能质量需求,进而对用户进行准确合理的分类,是售电侧开放与优化电力营商环境背景下电网公司发展的新形势与新要求。

该文基于现有分类指标体系,提出一套新的优质电力用户分类指标体系,该指标体系进一步考虑用户终身价值与电能质量需求,能够同时兼顾电网公司与用户综合需求。同时,基于模糊理论实现数据规范化处理,在此基础上,提出改进 k -means聚类算法,对海量用户指标数据进行分类,并利用基于熵权的模糊层次分析法实现指标权重计算,弱化层次分析法的主观性,使评价过程更为客观。然后,将用户分类的定量结果定性化呈现,使得优质电力用户分类结果更为直观和清晰,为电网公司把握关键客户、发展差异化增值服务提供科学、合理的决策依据。最后,在仿真平台构建若干电力用户数据进行实例分析,验证所提方法的合理性和有效性。

1 优质电力用户分类指标体系

该文通过考虑电网公司需求,提出用户终身价值指标,同时为满足用户电能质量需求,提出用户电压暂降、谐波等电能质量相关指标,最终形成一种新的优质电力用户分类指标体系,该指标体系不仅仅

从电网公司角度出发,以评估客户能够带给企业的价值,而是同时兼顾电网公司与用户综合需求,如图1所示。

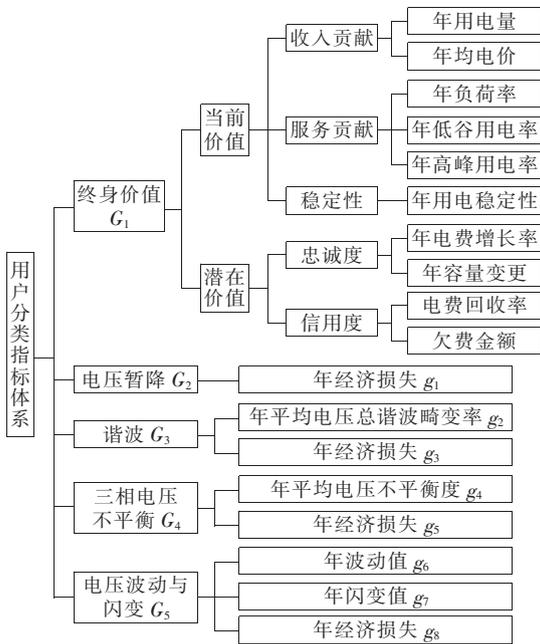


图1 优质电力用户分类指标体系

Figure 1 Premium user classification index system

1.1 用户终身价值指标(G_1)

客户价值(customer value, CV)定义:从企业角度看,客户能够带给企业的价值,可用客户为企业带来收益的货币贡献表示。这种意义下的客户价值称为客户终身价值(customer lifetime value, CLV),即企业从客户的整个生命周期内获得现金流的净现值和^[12]。针对电网企业当前拥有的用户,传统CLV由2个层面构成:①当前价值,即用户一直保持现有购电行为,以后将会为电网公司创造的客户价值;②潜在价值,即电网公司利用合理的销售手段,增加用户扩大购买或向他人推荐购买的可能性,以后将会为电网公司创造的客户价值。

1) 当前价值。

用户当前价值主要体现在收入贡献、服务成本、稳定性等方面。收入贡献是衡量用户当前可为电网公司提供价值的基本准则,由年用电量和年均电价共同表征;服务成本是电网公司为不同用户提供服务所需的不同成本,可由年负荷率、年高峰用电率、年低谷用电率共同表征。用户年用电稳定性:

$$I_s = 1 - \frac{|t_n - t_1|}{t_1} \quad (1)$$

式中 t_n 为本年度用电量增长率; t_1 为上一年度用电量增长率。

2) 潜在价值。

用户潜在价值主要体现在忠诚度、信用度等方面。对于电网公司,用户的忠诚度指标可选取年用电量增长率和年容量变更,信用度指标可选取电费回收率和欠费金额。

3) 终身价值。

终身价值由当前价值与潜在价值综合而成。其中除欠费金额为成本型指标外,其他均为效益型指标。在对价值指标进行百分制处理并用熵权法计算权重后,根据各价值指标之间的相关性,该文提出一种终身价值指标模型:信用度价值采用加权乘法模型,强调信用度内任何一个指标都对总分有较大影响;其他指标采用算术平均法模型,意在允许用户不同价值特性上的取长补短。具体模型为

$$G_1 = A_G + B_G = \sum Q_\alpha \omega_\alpha + \sum C_\beta \omega_\beta + \frac{H}{\sum \omega_\gamma} \quad (2)$$

式中 A_G 为当前价值; B_G 为潜在价值; Q_α 为当前价值内各指标的值; ω_α 为与之对应的权重; C_β 为忠诚度内各项指标的价值; ω_β 为与之对应的权重; H 为电力用户信用度指标的价值,且有

$$H = H_1^{\omega_1}, H_2^{\omega_2}, \dots, H_\gamma^{\omega_\gamma} \quad (3)$$

式中 H_γ 为电力用户信用度内各项指标的价值; ω_γ 为与之相应的权重。

1.2 电压暂降指标(G_2)

电压暂降和短时中断作为最重要的电能质量扰动现象之一,由它所造成的经济损失在用户电能质量损失中占比最高^[13],因此,经济损失(g_1)可作为反映用户电能质量需求的一项指标。

1.3 谐波指标(G_3)

随着电网中电弧炉、电焊机等冲击性谐波源负荷的增加,谐波对用户造成的影响与危害也在不断增加,其中,包括用户配电线路和变压器上因谐波而产生的经济损失^[14]。因此,考虑选取用户期望的年平均电压总谐波畸变率(g_2)、目前供电水平下谐波畸变导致的年经济损失(g_3)作为分类子指标。

1.4 三相电压不平衡指标(G_4)

三相电压不平衡的发生容易造成电机附加发热

从而加速设备的绝缘老化,增加电量损耗,降低效率或产生次品等^[15]。因此,考虑选取用户期望的年平均电压不平衡度(g_4)、目前供电水平下三相不平衡导致的年经济损失(g_5)作为分类子指标。依据《GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡》中规定的电压负序不平衡度限值与测算方法确定 g_4 。

1.5 电压波动与闪变指标(G_5)

电压波动会影响敏感负荷的正常运行,严重时危害电气设备或者造成巨大的经济损失。电压闪变是电压波动的一种特殊反映,也是评定电能质量的重要指标^[16]。对于电压波动与闪变,选取用户期望的年波动值(g_6)和年闪变值(g_7)、目前供电水平下电压波动与闪变导致的年经济损失(g_8)作为分类子指标。依据《GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动与闪变》中规定的电压波动值和长时间闪变值的限值与测算方法确定 g_6 和 g_7 。

2 优质电力用户分类

在建立优质电力用户分类指标体系后,需要对优质电力用户指标数据进行预处理和分类,并对不同指标的权重进行确定,从而得到用户最终分值,建立优质电力用户等级划分模型。

2.1 数据处理

该文引入模糊理论的思想,基于用户不同指标最优区间建立不同分类指标的隶属函数,再根据用户实际数据计算隶属函数的值,即得到归一化后的数据,以使用户各项指标的量化结果更客观。最优区间的设定依据国家标准、文献[13,17-18],同时考虑实际情况,如表 1 所示。隶属函数的通常形式^[19]为

$$\mu_E = \begin{cases} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x < x_2 \\ 1, & x_2 \leq x < x_3 \\ \frac{x_3 - x}{x_4 - x_3}, & x_3 \leq x < x_4 \end{cases} \quad (4)$$

如表 2 所示,经过隶属函数处理后,数据的取值都处在 $[0, 1]$ 的区间内,使所有用户的分类特征数据由物理系统数值变成相对值关系数据,达到缩小和统一量纲的目的,方便后续数据处理及分析,保证程序运行时收敛加快使聚类结果更有意义和可比性。

表 1 分类指标(含子指标)最优区间

Table 1 Optimal interval for classification indices (including sub-indices)

序号	分类指标	最优区间	序号	分类指标	最优区间
1	G_1	[65, 100]	6	g_5	[5, ∞]
2	g_1	[80, ∞]	7	g_6	[0, 1]
3	g_2	[0, 2]	8	g_7	[0, 0.4]
4	g_3	[5, ∞]	9	g_8	[5, ∞]
5	g_4	[0, 0.2]			

注: g_1, g_3, g_5, g_8 单位为万元, g_2, g_4, g_6, g_7 单位为%

表 2 分类指标(含子指标)及其隶属函数

Table 2 Classification indices(including sub-indices) and their membership functions

序号	分类指标	隶属函数
1	G_1	$\mu_v = \begin{cases} (x - 65) / 35, & 65 \leq x < 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases}$
2	g_1	$\mu_{11} = \begin{cases} x/80, & 0 \leq x < 80 \\ 1, & x \geq 80 \end{cases}$
3	g_2	$\mu_{THD} = \begin{cases} (5 - x) / 3, & 2 < x \leq 5 \\ 1, & x \leq 2 \end{cases}$
4	g_3	$\mu_{12} = \begin{cases} x/5, & 0 \leq x < 5 \\ 1, & x \geq 5 \end{cases}$
5	g_4	$\mu_B = \begin{cases} (1.3 - x) / 1.1, & 0.2 < x \leq 1.3 \\ 1, & x \leq 0.2 \end{cases}$
6	g_5	$\mu_{13} = \begin{cases} x/5, & 0 \leq x < 5 \\ 1, & x \geq 5 \end{cases}$
7	g_6	$\mu_W = \begin{cases} (4 - x) / 3, & 1 < x \leq 4 \\ 1, & x \leq 1 \end{cases}$
8	g_7	$\mu_F = \begin{cases} (1 - x) / 0.6, & 0.4 < x \leq 1 \\ 1, & x \leq 0.4 \end{cases}$
9	g_8	$\mu_{14} = \begin{cases} x/5, & 0 \leq x < 5 \\ 1, & x \geq 5 \end{cases}$

注: g_1, g_3, g_5, g_8 单位为万元, g_2, g_4, g_6, g_7 单位为%

2.2 改进 k-means 聚类

k -means 算法使用距离指标对样本之间的相似性和差异性进行评价,在实际应用中存在一定的缺点,如:事先不能自行选择 k 值、对初始聚类中心选择有依赖性等^[20]。因此,该文对算法进行改进,并将其应用到电力用户分类,使得分类结果更为合理。

针对 k -means 聚类算法不能自行选择 k 值的缺点,该文算法先设定 k 值范围,然后通过变换 k

值,使之自动在各 k 值下进行聚类,并计算聚类有效性指标,从中选取聚类有效性指标评价最好的 k 值作为最终聚类参数 k 。 k 值范围可根据经验设定, k 值过小,无法有效区分用户特征; k 值过大,具有相同特征的用户将分为不同类别,从而降低分类准确性。因此,参照文献[3]并基于该文所用案例涉及用户数量,设定 k 范围为 2~10。同时,该文选用类内距离指标(mean index adequacy, MIA)和类间距离指标(mean of distance between curves, MDC)^[20]对聚类效果进行综合评价^[21],综合考虑类内和类间距离,确定出最终的聚类参数 k 。

针对 k -means 聚类对初始聚类中心选择有依赖性的问题,该文改进算法先在全样本中随机选取一个样本对象,然后计算与先前选出的样本点距离之和最大的点为初始聚类中心,重复上一步,直到选出所需的 k 个聚类中心,停止选择。

具体的改进 k -means 聚类算法执行过程如下。

1)输入聚类参数 k 以及作为样本集的各用户分类指标数据,每个用户的 $G_1, g_1, g_2, \dots, g_8$ 指标数据作为一个样本点。

2)利用该文改进的初始聚类中心选择方法,选取 k 个样本点作为初始聚类中心,记为 C_1, C_2, \dots, C_k 。

3)根据距离最小原则,将样本分配到离其最近的聚类中心所代表的 k 类 C_j 中,各类所包含的样本数为 B_j 。距离最小原则为

$$d = \sum_{i=1}^B \min_{j \in \{1, 2, \dots, k\}} \|x_i - C_j\|^2 \quad (5)$$

式中 d 为样本与聚类中心距离的最小值之和; x_i 为第 i 个样本。

4)计算各类重心,令为新聚类中心,即

$$C_j = \frac{1}{B_j} \sum_{x_i \in C_j} x_i, j = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

5)根据新的聚类中心重新进行样本分配,不断重复步骤 3、4 至分类结果不再改变,并计算聚类有效性指标 MIA 与 MDC。

6)令 $k = k + 1$,循环步骤 1~5,直至 k 值达到所设范围最大值,输出所有 k 值下的聚类结果以及最终聚类结果。最终聚类结果为聚类有效性指标评价最好的 k 值对应的分类结果。

2.3 指标权重确定

传统的层次分析法采用简单的 1~9 的离散标度,但仅用一个确定的数无法体现决策者主观判断与偏好的模糊不确定性,因此需引入三角模糊数解决此问题。同时,为弥补层次分析法主观因素对评价结果造成的偏差,加入熵权使结果更具客观性,从而形成了基于熵权的模糊层次分析法^[19]。该方法可将主观评价分析与客观量化结果相结合,同时考虑决策者的风险偏好和决策的置信程度,使得决策结果更可靠有效。

该文的指标权重计算使用基于熵权的模糊层次分析法。首先建立层次结构模型,包括目标层、准则层和方案层,如图 2 所示。在该文提出建立的层次结构中,目标层表示决策的目标为确定优质电力用户,准则层为文 1 中建立的五大分类依据指标($G_1 \sim G_5$),方案层为电网公司依据分类指标准则要选择的类别用户。

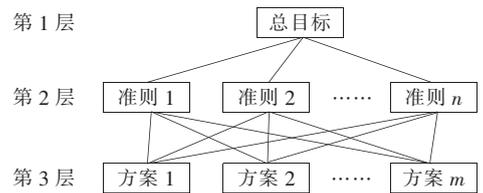


图 2 层次结构模型

Figure 2 Hierarchy structure

获得层次结构后使用三角模糊数与区间算法表示并计算模糊判断矩阵,再利用熵权法计算熵权。

$$\begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{s_1} & \frac{a_{12}}{s_1} & \dots & \frac{a_{1n}}{s_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{s_n} & \frac{a_{n2}}{s_n} & \dots & \frac{a_{nm}}{s_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \log_2 f_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中, $s_k = \sum a_{kj}, k = 1, 2, \dots, n$ 。由模糊判断矩阵去模糊化可得式(7)中矩阵元素,根据式(7)、(8)可计算出熵值 E ,再进行归一化即可求出熵权 w ,即

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

2.4 电力用户分级

在确定五大指标权重后,由于经济损失是用户最直接感知到的电能质量影响^[18],因此,选用终身价值指标与其他 4 个指标的经济损失指标,并为其分配文 2.3 中计算所得权重,计算得到用户综合指标分值。根据电力用户分类指标所反映的用户经济价值与社会影响力、用电稳定性与停电敏感度、欠费风险与用电安全隐患、电能质量需求所处的高、中、低 3 个层次,该文将电力用户定性定量划分为 3 个对应等级,即 I、II、III 级电力用户。其中,针对各级电力用户的具体定性分析如下。

1) I 级电力用户。

该类用户对社会的经济价值与影响力很高,用电稳定性和停电敏感度也很高,存在较低的欠费风险与用电安全隐患,具有较高的电能质量需求,出现电能质量扰动将造成重要用电设备受损或产生大量废品,难以立即恢复生产或正常运行,例如高端制造业、半导体产业、医院等。

2) II 级电力用户。

该类用户对社会的具有一定的经济价值与影响力,用电稳定性和停电敏感度也较高,存在一定的欠费风险与用电安全隐患,具有中等电能质量需求,出现电能质量扰动将造成重要用电单位工作受影响、公共场所秩序混乱以及带来相应经济损失。

3) III 级电力用户。

该类用户对社会的经济价值与影响力较低,用电稳定性与停电敏感度也较低,可能存在较高的欠费风险与用电安全隐患,具有较低电能质量需求,电能质量扰动导致的经济损失较低。此类用户对各电能质量指标无严格要求,只需处在国标限制范围以内,并且仅当出现长时间持续断电或电压偏差过大时才会受到影响。

基于定性分析,建立电力用户等级划分模型,如表 3 所示。依据不同等级电力用户定义等具体定性分析,基于二八定律^[22],可将 0.5 作为优质电力用户第 1 分界线,将 0.8 作为优质电力用户第 2 分界线,进行定量划分。因此,该文选取参数 $a = 0.5$ 、 $b = 0.8$ 。

综上所述,该文提出的综合考虑供用电双方需求的优质电力用户分类方法步骤如图 3 所示。

表 3 电力用户等级划分

Table 3 Power users classification

电力用户等级	综合指标分值
I 级	$(b, 1.0]$
II 级	$(a, b]$
III 级	$[0.0, a]$

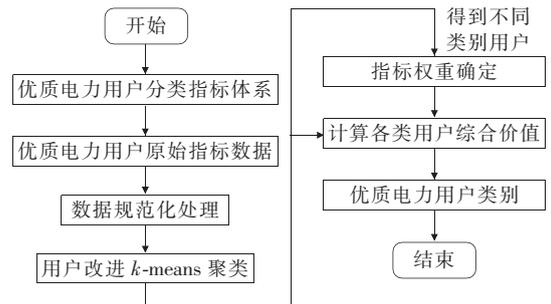


图 3 优质电力用户分类方法步骤

Figure 3 Procedures of premium user classification method

3 案例分析

在该案例中,广州供电局需要对其 300 名用户进行电力用户分类及评定,以匹配差异化增值服务。此 300 名电力用户涉及行业包括半导体产业、钢铁、造纸、玻璃、塑料和纺织行业,不同行业用户所占比例如图 4 所示。

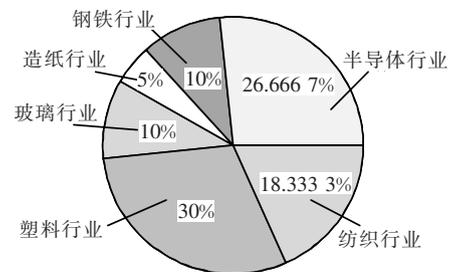


图 4 不同行业用户占比

Figure 4 Proportion of users in different industries

所有用户指标数据服从正态分布,利用已有用户报装容量等数据^[5]得到不同行业用户终身价值指标分布参数;同时,依据文献^[17, 23]中不同行业单次电压暂降经济损失范围及比例,以及典型行业用户年暂降经济损失,得到所需不同行业用户电压暂降年经济损失,进而根据已有电能质量扰动现象经

济损失相对比例^[13],得到用户不同电能质量扰动损失指标分布参数。其他电能质量指标分布参数具体确定依据国家标准。该文采用 Matlab 软件平台进行数据处理与后续案例分析。

首先,对经过处理的用户指标数据进行改进 k -means 聚类。图 5 所示为聚类得到的 7 类用户,其中 G 类用户数量最多,B 类用户数量最少,可以看出各类用户指标曲线差异性特征明显,并且同类具有明显的相似性。

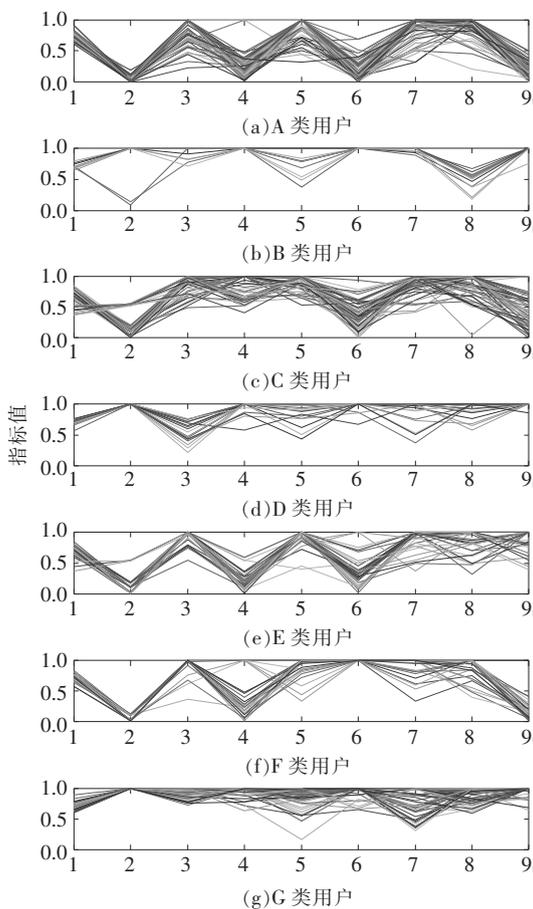


图 5 用户指标数据聚类结果

Figure 5 User index data clustering results

A 类用户主要包括玻璃、纺织和塑料行业,C、E 类用户主要包括玻璃、塑料、造纸和纺织行业,F 类用户则仅由塑料与纺织行业用户构成,用户种类具有相似性,因此部分指标特征具有相似性,如:A、E、F 类用户的 G_1 与 $g_1 \sim g_3$ 指标;B 类用户由半导体产业用户与少量钢铁、塑料行业用户组成;D、G 类用户均由半导体产业与钢铁行业用户组成,虽然用户行业类别相同,但因指标特征的差异性而分为不同的类别。

其次,选取聚类得到的 7 类用户的聚类中心作为典型用户,在此基础上,采用基于熵权的模糊层次分析法确定指标权重,所建立的层次模型如图 6 所示,该层次结构由目标层、指标层与用户类别层组成,对应图 2 中目标层、准则层与方案层。

对于风险中性决策者,取截集 $\alpha = 0.8$,乐观指数 $\lambda = 0.5$,基于各典型用户指标值,利用模糊层次分析法建立模糊判断矩阵并去模糊化,根据熵权法计算五大分类指标各自的权重,即 $w = [0.134 2, 0.184 1, 0.241 1, 0.244 8, 0.195 8]$,最终得出各类用户最终分值,如表 4 所示。

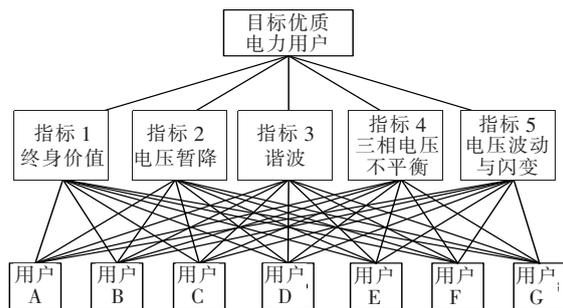


图 6 电力用户分级层次模型

Figure 6 Structure model of power user classification

表 4 电力用户综合分值

Table 4 Comprehensive score for power user

用户	评分	用户	评分	用户	评分	用户	评分
A	0.257	C	0.517	E	0.439	G	0.944
B	0.932	D	0.943	F	0.507		

当考虑不同的截集与乐观程度指数时,即 $\alpha = 0, 0.05, 0.1, \dots, 1, \lambda = 0.5, 0, 1$ (分别对应 3 种情况^[24]:决策者完全乐观、完全悲观、处于中性)时,各类用户综合分值如图 7~9 所示。

由图 7~9 可以看出,利用基于熵权的模糊层次分析法计算所得权重与最终结果随不同决策置信水平截集 α 与决策者乐观程度指数 λ 的变化而变化。这说明基于熵权的模糊层次分析法确实反映了与决策者主观判断有关的不确定性,同时受到客观指标数据中包含信息重要程度的制约。仿真结果表明,在以上所有情况下 7 类用户所属的用户等级仍保持不变,故该文可将 $\alpha = 0.8$ 和 $\lambda = 0.5$ 下仿真得到的用户分类结果作为最终分类结果。

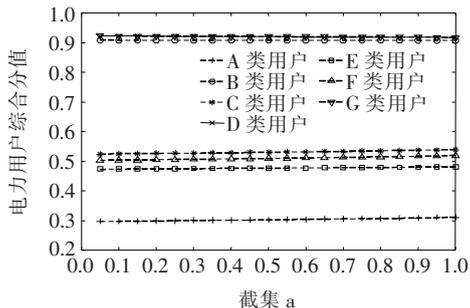


图 7 决策者中性($\lambda=0.5$)时所有截集 α 下用户综合分值

Figure 7 Users' comprehensive scores under all α -cuts for moderate decision maker($\lambda=0.5$)

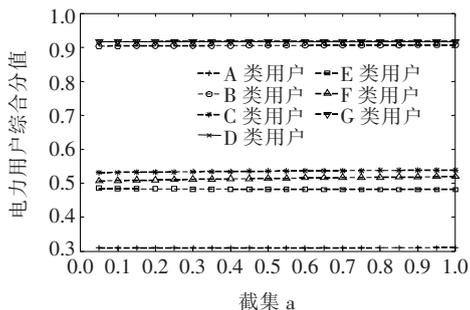


图 8 决策者最悲观($\lambda=0$)时所有截集 α 下用户综合分值

Figure 8 Users' comprehensive scores under all α -cuts for pessimistic decision maker($\lambda=0$)

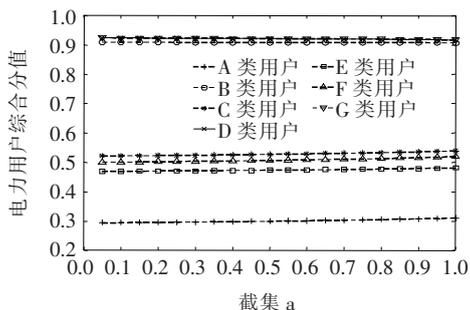


图 9 决策者最乐观($\lambda=1$)时所有截集 α 下用户综合分值

Figure 9 Users' comprehensive scores under all α -cuts for optimism decision maker($\lambda=1$)

因此,根据文 2 中给出的电力用户划分等级对应分值可以判定 B、D、G 类用户属于 I 级电力用户, C、F 类用户属于 II 级电力用户, A、E 类用户属于 III 级电力用户,并可为之配备对应优质供电差异化套餐。

通过与原始数据进行对比分析可得出,分类所

得到的 I 级电力用户(B、D、G 类用户)大部分为半导体产业与钢铁行业的用户,该类用户终身价值指标均大于 0.6,即对供电企业能带来较高的收益和发展前景,同时在各指标数据中,其电压暂降、谐波、三相不平衡等电能质量扰动现象造成的经济损失要明显高于其他行业用户,是具有强烈电能质量需求的用户,符合该文对 I 级优质电力用户的定义,属于电网公司可提供进一步优质供电增值服务的重要用户。因此,电网公司可为其提供优质供电信息服务、优质供电网络交易服务、电能质量治理方案设计与配置服务等,在满足用户电能质量需求的同时,实现双方利益最大化,以建立长期良好的合作关系,避免该类客户的流失。

II、III 级电力用户主要包括玻璃、塑料、纺织、造纸等行业的用户,虽然其终身价值指标较高,但其电压暂降损失等经济损失指标要低于前述 2 种行业的 I 级用户。

C、F 类用户除电压暂降经济损失指标较低、C 类用户三相不平衡经济损失指标与 F 类用户谐波经济损失指标较低以外,其他指标均较高,因此,该类用户发生包含电压暂降与谐波在内的电能质量扰动现象后造成的损失较 I 类用户低,但仍具有与 I 类用户相比处于中等程度的电能质量需求,符合该文对 II 级电力用户的定义,故电网公司可根据其实际需求,为其提供优质供电网络交易服务、电压暂降治理方案设计等优质供电增值服务。

A、E 类用户各项电能质量经济损失指标均较低,因此,该类用户发生包含电压暂降与谐波在内的电能质量扰动现象后造成的损失较 I、II 类用户更低,电能质量需求也较低,符合该文对 III 级电力用户的定义,其对供电质量的要求满足国标即可,这导致该类用户治理意愿相对较低,因此,电网公司可以不主动对其进行治理,只为其提供基本供电服务,并根据用户实际需求提供进一步优质供电服务。

为研究进一步提供优质供电服务的可实施性,基于此分类结果,在 I、II、III 每级用户中任选一名用户,分别为其提供 3 种类型的优质供电增值服务,即根据用户不同电能质量需求,提供不同类型的电能质量治理设备,具体包括:①服务方案 1 中 UPS、

自备发电机、动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR);②服务方案 2 中 UPS、自备发电机;③服务方案 3 中 UPS。

假设 DVR 能完全抑制用户电压暂降与短时中断,UPS 对计算机等设备提供保护,自备发电机应对非计划停电。不同用户相关信息与年电压暂降与短时中断损失如表 5 所示。

表 5 不同用户年电压暂降与短时中断损失

Table 5 Annual economic loss of voltage sag and interruption of customers in different industries

用户	序号	行业	年平均耗电量/ (万 kW·h)	年暂降损失/ 万元
I	125	半导体	20 000	146.28
II	16	玻璃	7 258	14.87
III	60	塑料	3 600	9.82

由于用户采取治理措施所需成本包括设备采购安装的初始成本和年运维成本^[17],考虑设备寿命周期为 15 a,并基于文献[14]中相关定价策略与文献[17]中所提供的各治理设备年均成本调查统计数据,则可以得到不同类型优质供电增值服务定价及所需成本,如表 6 所示。

表 6 不同优质供电增值服务定价与年均成本

Table 6 Pricing and annual cost of power value-added services

优质供电增值 服务方案	附加电价/ (元/(kW·h))	年均成本/ 万元
1	0.007 95	55.29
2	0.005 23	4.26
3	0.003 75	1.94

将 3 种用户分别应用 3 种服务,结果如表 7、8 所示。由表 7 可以看出,I、II、III 级用户在分别应用 3 种服务中的服务方案 1、2、3 时获得的年均收益最大,而在其他情况下收益过小甚至为负值。由表 8 可得出,电网公司分别在 I 级用户应用服务方案 1、II 级用户应用服务方案 2 和 III 级用户应用服务方案 3 时获得的年均收益最大。因此,基于该文所提方法分类结果给出的不同类型优质供电增值服务策略,可使供电公司稳固客源、免遭投诉并获得最大化

的相应服务收入,同时用户的年均收益也得到最大化,有效增加用户满意度,双方的共同利益均得到提升,从而验证了该文所提用户分类方法的科学性与有效性。

表 7 不同优质供电增值服务下用户年均收益

Table 7 Annual revenue of customers for different power value-added services 万元

用户	年均收益		
	服务方案 1	服务方案 2	服务方案 3
I	90.99	-127.98	-137.96
II	-40.42	10.61	-3.23
III	-45.47	5.56	7.88

表 8 不同优质供电增值服务下电网公司年均收益

Table 8 Annual revenue of utilities for different power value-added services 万元

用户	年均收益		
	服务方案 1	服务方案 2	服务方案 3
I	103.71	49.31	19.71
II	2.41	33.70	25.28
III	-26.67	14.57	11.56

4 结语

该文针对新一轮电改后用户可自由选择售电公司供电和持续优化用电营商环境的双重场景,为电网公司提出了一种实现差异化服务用户群体细分的方法,即基于终身价值与电能质量需求的用户分类方法。该方法优点如下。

1)通过考虑用户终身价值与电能质量需求,提出了一种新的优质电力用户分类指标体系,兼顾了电网公司与用户双方的需求,为优质电力用户分类奠定基础。

2)在优质电力用户分类时,针对传统 k -means 聚类事先不能自行选择 k 值、对初始聚类中心选择有依赖性问题进行改进,提出了改进 k -means 算法。

3)在获得优质电力用户分类指标数据的基础上,基于模糊理论实现数据规范化处理,利用所提出的改进 k -means 聚类算法对海量用户指标数据进

行分类,并利用基于熵权的模糊层次分析法实现指标权重计算,最后,形成一种可定性、定量划分用户类别的优质电力用户分类方法。该方法有助于电网公司面对海量用户时可明确用户属性、把握关键客户、发展差异化优质供电服务以及实现利益最大化。

在售电侧放开和持续优化用电营商环境的双重背景下,深入研究并分析用户分类,对电网公司掌握竞争优势、实现稳固发展、提升企业和人民群众对优质电力服务的获得感有重要意义。针对此种用户分类方法,如何进一步实现合理差异化套餐推荐将是下一步研究方向。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[EB/OL]. <https://wenku.so.com/d/d66dec46644bf66af3cf5ca5d9c444bc>, 2020-03-14.
- [2] 喻小宝,谭忠富,屈高强. 基于电力客户评估的差异化电价套餐研究[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 9-19.
YU Xiaobao, TAN Zhongfu, QU Gaoqiang. Research on differentiated price package based on power customer evaluation[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 9-19.
- [3] 曾鸣,杨素萍,杨鹏举,等. 社会节能环境下电力客户价值评估研究[J]. 华东电力, 2008, 36(6): 15-19.
ZENG Ming, YANG Suping, YANG Pengju, et al. Power customer value assessment in energy-saving social environment[J]. East China Electric Power, 2008, 36(6): 15-19.
- [4] 门业堃,钱梦迪,于钊,等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 179-186.
MEN Yekun, QIAN Mengdi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based on game theory and combination weighting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 179-186.
- [5] 赵会茹,赵浩然,陈国平,等. 新电改背景下电力用户资产综合价值评估模型和差异化接收策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 105-111.
ZHAO Huiru, ZHAO Haoran, CHEN Guoping, et al. Comprehensive values evaluation model & differentiated reception strategy of electric power users' assets under new power reform[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 105-111.
- [6] 荀挺,王祥浩,胡文斌,等. 电网综合数据质量评价系统及其软件实现[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 62-69.
XUN Ting, WANG Xianghao, HU Wenbin, et al. Power grid comprehensive data quality evaluation system and its software realization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 62-69.
- [7] 董沫如,赵金锋,胡西民,等. 基于蒙特卡洛模拟的电力客户满意度测评[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 68-71+77.
DONG Moru, ZHAO Jinfeng, HU Ximin, et al. Power customer satisfaction evaluation based on monte carlo simulation[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 68-71+77.
- [8] 陈金木,黄尚渊,徐栋,等. 基于客户价值和感知服务质量的电力客户分级服务模式[J]. 价值工程, 2014, 33(29): 174-177.
CHEN Jinmu, HUANG Shangyuan, XU Dong, et al. Power customer classification service mode based on the customer value and perceives service quality[J]. Value Engineering, 2014, 33(29): 174-177.
- [9] 夏伟钊,滕欢,曹敏,等. 基于两阶段聚类的单相电能表质量评价模型研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 120-125.
XIA Weizhao, TENG Huan, CAO Min, et al. Research on quality evaluation model of single phase electric energy meter based on two-stage clustering[J]. Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 120-125.
- [10] 许杨子,胡蓓蓓,赵彬,等. 基于改进物元法的电力大客户潜在投资价值评价[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(7): 38-44.
XU Yangzi, HU Beibei, ZHAO Bin, et al. Evaluation of potential investment value of large power customers based on improved matter element method[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(7): 38-44.
- [11] 张加贝,徐云,周崇东,等. 基于加权FCM聚类算法的电力市场主体价值细分[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 129-134.
ZHANG Jiabei, XU Yun, ZHOU Chongdong, et al. Value segmentation of powermarket subject based on the weighted FCM clustering algorithm[J]. Journal of

- Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 129-134.
- [12] 刘慧丽. 基于承诺度的半契约情景下客户终身价值建模[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- [13] Targosz R, Manson J. Pan European LPQI power quality survey[C]//19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007.
- [14] 杨用春, 穆启天, 高亚静, 等. 考虑谐波治理的售电公司供电服务套餐设计[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 32-40. YANG Yongchun, MU Qitian, GAO Yajing, et al. Design of power supply service plan for electric company considering harmonic management [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 32-40.
- [15] GB/Z 32880.1—2016. 电能质量经济性评估[S].
- [16] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079. LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [17] 荆平, 乔光尧, 甄晓晨, 等. 典型工业用户电压暂降及中断经济损失调查评估[J]. 大功率变流技术, 2012(4): 1-4. JING Ping, QIAO Guangyao, ZHEN Xiaochen, et al. Survey and assessment of the economic loss caused by supply voltage sags and interruptions in typical industrial plants [J]. High Power Converter Technology, 2012(4): 1-4.
- [18] 丁泽俊, 朱永强. 电能质量的经济损失评估与选择性治理[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 91-94. DING Zejun, ZHU Yongqiang. Economic loss assessment and selective governance of power quality [J]. Modern Electric Power, 2010, 27(5): 91-94.
- [19] Sangma F, Guru B. Watersheds characteristics and prioritization using morphometric parameters and fuzzy analytical hierarchical process (FAHP): a part of Lower Subansiri Sub-Basin [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(3): 473-496.
- [20] 朱天博, 傅军, 杨一帆, 等. 基于用电信息采集系统用户负荷特性聚类分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15A): 70-73. ZHU Tianbo, FU Jun, YANG Yifan, et al. Cluster analysis of load characteristic based on electricity consumption information acquisition system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15A): 70-73.
- [21] Peng B, Wan C, Dong S F, et al. A two-stage pattern recognition method for electric customer classification in smart grid [C]//IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Sydney, NSW, 2016.
- [22] 董世安. 基于客户价值评估的供电企业客户关系管理研究[D]. 北京:华北电力大学, 2010.
- [23] Carlsson F. On impacts and ride-through of voltage sags exposing line-operated AC-machines and metal processes [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.
- [24] Mon D L. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight [C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Yokohama, Japan, 1995.