

用户供电质量需求识别与优质供电增值服务策略

马智远, 莫文雄, 许中, 周凯

(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420)

摘要: 优质供电的增值服务是电力公司提高售电竞争力的一项重要途径。优质供电是一个定性概念, 采用供电质量指标进行定量刻画时, 不同用户对优质供电的需求差异很大, 供电企业不可能对每个用户提供完全不同的供电, 基于对优质供电的需求类别, 提供增值服务是更可行的方式。首先, 研究用户对优质供电的多样性需求和供电公司的服务愿望, 提出电能质量分类指标体系, 包括用户价值指标和电能质量效用指标, 刻画用户的电能质量需求; 其次, 基于所提的指标体系和各指标重要程度, 建立用户供电质量需求类别识别模型, 采用定性定量相结合的方式, 对用户供电质量类别进行划分, 并设计了优质供电差异化增值服务套餐; 最后, 提出增值服务套餐成本-收益模型, 实现对单个用户的增值服务内容的确定和增值服务价格的计算。实例分析证明了所提方法的合理性和有效性, 为售电企业吸引新用户、开展差异化增值服务提供了参考。

关键词: 电能质量; 优质供电; 供电质量; 类别识别; 增值服务; 套餐设计

中图分类号: TM 714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)02-0024-09

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.006

User Power Supply Quality Demand Identification and Strategy for Value-added Service of Premium Power Supply

Ma Zhiyuan, Mo Wenxiong, Xu Zhong, Zhou Kai

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

Abstract: The value-added service of premium power supply is an important way for power companies to improve the competitiveness of power selling. Premium power supply is a qualitative concept. When quality index of power supply is used for quantitative description, the demand of different users for premium power supply is very different, and it is impossible for power supply enterprises to provide completely different power supply for each user. Therefore, it is a more feasible way to provide value-added services based on the demand categories of premium power supply. Firstly, the diversity demand of users for premium power supply and the service desire of power supply companies are studied, and the classification index system of power quality is put forward, including customer value index and power quality utility index, which depicts the power quality demand of customers. Secondly, based on the proposed index system and the importance of each index, a power supply quality demand category identification model for users is established with the combination of qualitative and quantitative methods to classify the user power supply quality categories, and a differentiated value-added service package for premium power supply is designed. Finally, the cost-benefit model of value-added service package is proposed to determine the value-added service content and calculate the value-added service price of a single customer. The case analysis proves the rationality and effectiveness of the proposed method, which provides a reference for power selling enterprises to attract new users and carry out differentiated value-added services.

Key words: power quality; premium power supply; quality of power supply; category identification; value-added service; service package design

0 引言

供电质量问题已经成为用户投诉和抱怨的主要

基金项目: 南方电网科技项目(基于多功能变流装置的优质供电技术研究与示范应用 080037KK52160006)

原因^[1]。以不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)、有源滤波器(active power filter, APF)、动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)等为代表的定制电力(custom power)技术已较为成熟^[2]。供电企业通过优化配置定制电力技术方案,

为用户提供差异化优质供电增值服务,并由此创造利益增长点,已成为当前售电市场的热点问题。研究供用电双方均满意的低成本优质电力增值服务策略,具有重要理论价值和现实意义。

针对优质供电增值服务,国内外已开展大量探索,但用户优质供电需求分类识别和增值服务的成本-效益问题,是当前尚未得到解决的两个关键性问题。

在用户分类识别方面,现有用户分类主要是围绕用电负荷特性、客户价值评价等开展研究,提出了模糊 k-means 聚类^[3]、模糊 c-means(FCM)^[4]、层次聚类(hierarchical clustering, HC)^[5]和自组织映射(self organizing map, SOM)^[6]等方法。针对用户供电电压等级、低谷用电率、用电负荷、功率因数、电耗占能耗比重、企业总资产、合同履约率等技术性和非技术指标已分别开展了研究^[7],并提出了当前价值、潜在价值和信用状况等电力用户分类指标。欧盟试图通过立法促使供电企业提供过去和现在的供电质量等信息,包括负荷曲线、地理位置、当前能耗、历史同期能耗、标准化平均供电水平等^[8]。利用这些信息提升用户节能和优质供电意识,激励用户采取措施^[9-10]。有学者对供电质量引起的用户用电风险开展了研究,把用电风险细分为运行风险、政策风险和管理风险等^[11]。遗憾的是,现有用户分类对用户所需优质供电需求定量刻画不足,难以解决实际问题。事实上,随着高科技产业的发展,各行业电力用户对供电质量要求越来越高且差异性越来越明显。文献[12]研究表明,供电质量已经给用户造成了严重的经济损失。文献[13]研究了谐波引起的损耗及其量化方法。可见,用户对优质供电的理解和需求差异性很大,用户优质供电需求分类和识别是解决优质供电问题的基础。

通过优质供电为用户提供增值服务,创造电力市场竞争条件下的供电企业新的效益增长点,必须解决不同增值服务策略下的优质供电成本-收益问题。针对不同优质供电需求,供电企业和用户均希望建立双方能接受的公平、公正、透明的有偿服务。供电企业不可能也不必要为每个用户提供专门的供电服务。通过用户优质供电分类识别,按照不同类别用户提供增值服务套餐是降低优质供电成本,达到供用电双方均满意的有效路径。但是,采用优质供电套餐模式提供增值服务,同样存在差异性问题。以电压暂降敏感用户为例,用户设备类型、供电容

量、供电接入点等不同,均会影响所采用的 UPS、DVR 等定制电力技术方案的成本和收益。推行优质供电增值服务,急需一套同时考虑供用电双方利益的增值服务套餐设计方案和成本-收益计算方法。

下面以用户对优质供电的多样化需求为切入点,引入用户价值指标和多电能质量效用指标,提出一套用户优质供电需求分类指标体系,并基于熵权法提出一种用户优质供电需求分类方法。同时基于用户优质供电需求分类,提出用户优质供电增值服务套餐及其成本-收益量化方法,并进行实例分析证明所提方法的有效性和可行性。

1 电能质量需求分类指标体系

优质电力增值服务存在两个层面的问题,一方面是电力公司愿意售卖相关服务给用户,另一方面是用户愿意购买相应服务。电力公司为用户提供增值服务,会选择具有购买能力、信誉良好的用户,这里提出用户价值指标来刻画用户的综合素质。不同用户对不同的电能质量指标要求各异,但都可以量化为电能质量效用,以电能质量为用户带来的经济损失或收益增长来刻画用户的电能质量需求,这里提出电能质量效用指标来刻画用户电能质量需求。

基于客户价值理论^[8],将有关客户终身价值(customer lifetime value, CLV)的电力客户价值指标与有关用户优质供电需求的电能质量指标相结合,综合考虑售电公司与用户双方的不同需求,提出电力用户分类指标体系,如图 1 所示。

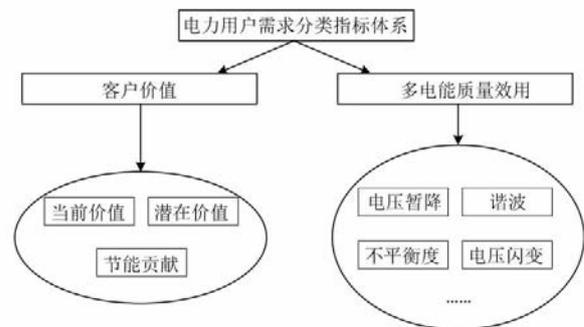


图 1 电力用户需求分类指标体系

1.1 客户价值指标

客户价值是指从企业角度看,客户能够带给企业的价值。通常使用客户为企业带来收益的货币贡献来定义客户价值,这种意义下的客户价值称为客户终身价值,即企业从客户的整个生命周期内获得

现金流的净现值^[8]。对现有客户来说,传统客户终生价值可分成2个部分^[14]:一是当前价值,即如果客户保持使用现在向电网公司购买的服务并持续购入,将来能够给电网公司提供的价值;二是潜在价值,即如果电网公司通过有效的交叉销售、调动客户增量购买积极性或客户向别人推荐产品和服务等,未来可能增加的客户价值。然而,随着能源可持续发展战略的提出,电网公司进行客户价值评估时不仅要考虑货币贡献,还需考虑非货币贡献,即用户的节能环保效益和持续发展潜力^[15]。

1.1.1 当前价值

用户当前价值主要体现在收入贡献、服务成本、信用等级等方面。收入贡献是度量用户当前价值的最基本标准,由用电量和平均电价共同决定。这里重新定义加权平均资本成本(weighted average cost of capital, WACC)以计算用户未来能为电网公司带来的收入贡献的期望净现值^[16]。

$$WACC = \sum_{t=1}^T \frac{(S_t - C_t)}{(1+d)^t} \quad (1)$$

式中: S_t 为 t 时段内用户购电量与购电电价乘积,即用户向电网公司缴纳的购电费用; C_t 为电网公司买电费用; d 为折现率; t 为时间单元(如月/季度/年); T 为时间单元总数,即预期的客户生命周期。

服务成本是售电公司在不同用户服务上的不同投入,可由电压等级、用电负荷率、低谷用电率、峰谷负荷差共同表征。电压等级可以体现电力用户的用电规模,对高电压等级的用户,电网公司需提供的运营成本越低,这标志着电网公司供电变压费用的降低,从而增加了电网公司可获得的利润。用电负荷率指用户本期的平均负荷与其历史最大负荷的比值,可以反映用户用电情况和负荷分布特征。低谷用电率指客户在低谷时段的用电量占该月总用电量的比例,可以缓解高峰时段用电压力,降低电网公司运行成本。峰谷负荷差可以表征用户是否需要改变用电模式与需求响应。

$$LR = \frac{L_{\text{now-ave}}}{L_{\text{history-max}}} \quad (2)$$

$$LVECR = \frac{Q_V}{Q_{\text{total}}} \quad (3)$$

$$HL = \frac{Q_P}{Q_V} \quad (4)$$

式中: $L_{\text{now-ave}}$ 为用户本期平均负荷; $L_{\text{history-max}}$ 为用户历史最大负荷; Q_V 为用户本期低谷时段累计用电

量; Q_P 为峰时段累计用电量; Q_{total} 为用户本期总用电量。

信用等级使用拖欠率(delinquency rate, Dr)进行评估,表示拖欠和应收账款的比例^[17]。越新的拖欠率越能反映客户的可信度,Dr越高,用户风险等级就越高,可信度就越低。在此使用最近3个月、半年、一年和历史同期的加权拖欠率累计,Dr的计算如式(5)所示。

$$Dr = \frac{1}{4}(r_1 \times Dr_3 + r_2 \times Dr_6 + r_3 \times Dr_{12} + \zeta_4 \times Dr_{\text{history}})$$

$$\zeta_i = \frac{2^{4-i}}{\sum_{k=0}^3 2^k} \quad (5)$$

式中:Dr₃是最近3个月的拖欠率;Dr₆是最近半年的拖欠率;Dr₁₂是最近一年的拖欠率;Dr_{history}是历史同期拖欠率。

1.1.2 潜在价值

用户潜在价值是指用户持续生产和盈利的能力。对于电力公司而言,为用户进行优质供电的服务,需要投入大量定制电力设备,如果购买优质电力服务的用户不能持续生产和盈利,就可能会出现用户拖欠优质电力服务费用的情况。电力公司不仅会损失有偿优质电力服务的服务费用,还会损失购置、运输、安装、拆卸电能质量补偿设备的大量成本。相较于普通欠缴电费的情况,电力公司可以直接选择停电的方式止损;但是,优质电力服务需要电力公司大量的前期投入,如果出现欠费或用户违背合同约定期限,要求停止服务的情况,电力公司损失巨大。所以,评价用户持续生产和盈利,选择潜在价值大的客户,是电力公司选择客户时非常重要的指标。

采用历史同期用电增长率和历史同期电费增长率刻画用户潜在价值指标,具体公式如式(6)、式(7)。

$$HGREC1 = \frac{Q_{\text{now}} - Q_{\text{before}}}{Q_{\text{before}}} \quad (6)$$

$$HGREC2 = \frac{P_{\text{now}} - P_{\text{before}}}{P_{\text{before}}} \quad (7)$$

式中: Q_{now} 为本期用电量; Q_{before} 为历史同期用电量; P_{now} 为本期产生电费; P_{before} 为历史同期产生电费。

1.1.3 节能贡献

节能贡献是指用户通过采取推行合同能源管理机制、更新设备、改进生产工艺流程、开展节能管理活动等一系列举措,从而提高电能利用效率,减少能源损耗为供电企业带来的社会收益,属于非货币贡献。具体指标可选择功率因数、电能消费强度下降

率、是否推行合同能源管理项目、是否设立节能管理部门、是否具有持续发展潜力。前两点为数值型指标,后两点为二元(布尔)型指标。

$$PCIRr = \frac{Q_n^{per} - Q_b^{per}}{Q_b^{per}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: Q_n^{per} 表示统计期内用户单位产值的用电量; Q_b^{per} 表示上一统计期内单位产值用电量。

1.2 电能质量效用指标

效用是用户对售电公司某种商品或服务的需求偏好程度^[18],一般由用户感知获得,可作为用户价值评价、购买决策的依据。通常情况下,由于敏感用户对电能质量扰动会产生大量损失,因此该类用户对售电公司的要求不只包括可靠供电与合理电价,对电能质量与优质供电的需求反而更强烈,因此,其对优质供电增值服务套餐是有偏好的。为了衡量用户对差异化增值服务套餐的偏好程度,可以引入多电能质量效用概念,统一刻画电力用户的多样化优质电力需求。

1.2.1 考虑多种电能质量问题的效用指标

根据效用理论(utility theory),用户的多电能质量效用可定义为:用户使用的优质供电增值服务套餐能满足其电压暂降、谐波、三相不平衡等电能质量需求的程度,是对用户电能质量需求是否得到满足以及满足度的一种心理评价。用户对多电能质量效用的实际感知会受到用户主观想法的影响^[19]。此外,多电能质量效用还会受到优质供电增值服务套餐的竞争力、市场占有率等不确定或不可测因素的影响,因此,多电能质量效用包括可量化和不可量化两部分,如式(9)所示。

$$V = U + \varepsilon \quad (9)$$

式中: V 为多电能质量效用; U 为其可量化部分; ε 为不可量化部分。

根据学者 Kahneman 和 Tversky 提出的前景理论(prospect theory)^[20]和累积前景理论(cumulative prospect theory)^[21],用户关心优质供电增值服务套餐带来的用电效用,同时,由于用户存在损失厌恶心理,其在效用方面更重视损失而不是同等的收益。因此,式(9)中的 U 可写为

$$U = v(x) = \begin{cases} x^\alpha & x > 0 \\ -\lambda(-x)^\alpha & x < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $v(x)$ 为优质供电增值服务套餐带来的用户感知效用; x 为电能质量经济损失指标(power quality

economic loss index, PQELI); α 为反映用户风险规避心理的系数,取值为 $0 < \alpha < 1$; λ 为反映损失厌恶的系数,取值为 $\lambda > 1$,具体取值可调查统计或专家经验确定。

式(10)中 x 以欧盟莱昂纳多电能质量工作组(LPQI)2007年的电能质量损失调查结果为依据,以多电能质量扰动现象对用户造成的年经济损失为指标,包括电压暂降与暂升、短时中断、长时中断、谐波、三相电压不平衡、电压波动与闪变等,如图2(a)所示, x 的取值如式(11)所示。

$$x_t = S_t + C_t \quad (11)$$

式中: x_t 为一段时间(一年)内用户因电能质量造成的经济损失; S_t 为设备成本,即保护装置在同一时间段内的投资成本; C_t 为与该段时间 t 内相关电压事件导致的工艺过程中断相关的直接成本,可计算为

$$C_t = c \cdot n \quad (12)$$

式中: c 为单次中断的平均成本,包括人工成本、废品损失、停工损失、生产利润损失、重新启动成本、其他成本、节约成本; n 为 t 时间段内的中断次数。

用户多电能质量感知效用 $v(x)$ 受风险规避心理影响,同时由于用户感知损失 x 表示为负值,可用凸函数表示^[21],如图2(b)所示。

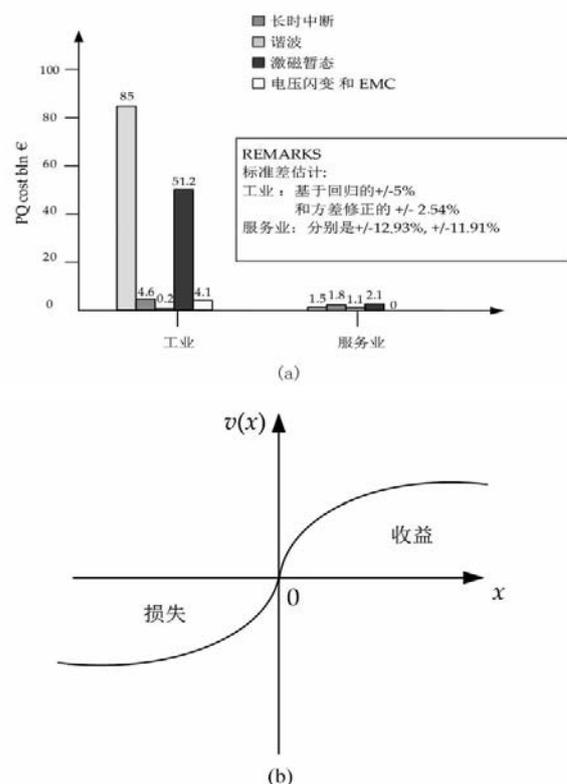


图2 用户多电能质量效用函数

1.2.2 电能质量效用指标评估

根据式(10)至式(12),用户多电能质量效用评估方法为:

1) 以LPQI电能质量损失调查方法及其得到的非居民用电电能质量损失数据为依据,统计实测电能质量事件,通常以年周期进行统计;

2) 根据式(11)与式(12)确定用户所经受电能质量扰动事件造成的经济损失,得电能质量经济损失指标 x ;

3) 根据式(10)确定用户多电能质量感知效用 U 。

2 用户电能质量需求分类

在建立电力用户分类指标体系后,需要对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,建立电力用户等级划分模型。

2.1 数据归一化处理

由于用户的各类指标数据具有较大的差异性,在比较不同用户的指标特征时,数值的大小会影响相似度计算。为了缩小和统一量纲,更明显地体现用户终身价值及电能质量特性差异,需要进行数据归一化处理。

评价指标通常包括效益型和成本型两种,效益型指标是指属性值越高对评价结果越好的指标,成本型指标是指属性值越低对评价结果越好的指标。可按式(13)、式(14)将属性指标转化为规范型指标。

$$g_i = \frac{g_i^o - g_{\min}^o}{g_{\max}^o - g_{\min}^o} \quad (13)$$

$$l_j = \frac{l_{\max}^o - l_j^o}{l_{\max}^o - l_{\min}^o} \quad (14)$$

式中: g_i 和 l_j 分别为归一化处理后的效益型指标和成本型指标; g_i^o 和 l_j^o 分别为归一化处理前的效益型指标和成本型指标; g_{\max}^o 和 g_{\min}^o 为归一化处理前效益型指标的最大值与最小值; l_{\max}^o 和 l_{\min}^o 为归一化处理前成本型指标的最大值与最小值。

除了节能贡献指标中的是否推行合同能源管理项目、是否设立节能管理部门与持续发展潜力指标,其余都为效益型和成本型指标。对这类非数值型指标,可以采用附加值的形式。

$$z = \pm \frac{1}{n} \quad (15)$$

式中: z 为非数值型指标可附加的值,“是”时为“+”,“否”时为“-”; n 为总指标数。

2.2 指标权重确定

指标权重计算使用熵权法,计算步骤如下^[22]:

- 1) 计算特征比重;
- 2) 计算熵值;
- 3) 计算差异性系数;
- 4) 确定权重。

2.3 用户电能质量需求分级

在确定指标权重后,根据电力用户分类指标体系和分类结果,由于综合指标分值处于 $[0,1]$ 之间,因此可将电力用户划分为3个等级,分别为I、II、III级电力用户,建立电力用户等级划分模型,如表1所示。

表1 用户电能质量需求等级划分

| 等级 | 综合指标分值 |
|------|-----------|
| I级 | (0.6,1] |
| II级 | (0.3,0.6] |
| III级 | [0,0.3] |

针对各级优质供电的需求,具体分析如下:

1) I级——需求非常强烈

I级电力用户具有极高的经济价值和社会影响力,用电量与可信用度较高,具有较高的节能贡献与持续发展潜力,对电能质量极其敏感,发生轻微电能质量问题将造成重大损失,如造成重要设备损坏或大量产品报废,恢复生产需要较长时间。这种级别的用户主要包括在社会、政治、经济生活中占有重要地位,中断供电可能造成人身伤亡、重大环境巧染、重大政治影响、重大经济损失、社会公共秩序严重混乱以及对供电可靠性有特殊要求的重要用电客户与重点关注客户等,例如高端制造业、信息技术产业、政府机关、医疗中心等。

2) II级——需求强烈

II级电力用户具有较高的经济价值和社会影响力,用电量与可信用度中等,具有一定的节能贡献与持续发展潜力,对电能质量敏感,发生电能质量问题将造成较大损失,或将影响重要用电单位的正常工作以及造成人员集中的公共场所秩序混乱。

3) III级——无强烈需求

III级电力用户具有较低的经济价值和社会影响力,用电量与可信用度较低,节能贡献与持续发展潜力

较低,遭受电压暂降等电能质量扰动现象后造成的经济损失较低。这种级别的用户要求各种电能质量指标满足国家标准即可,只有在发生持续断电或电压波动幅度过大,持续时间较长才会受到影响。除了I、II级用户以外的电力用户均为III级电力用户。

3 优质电力增值服务套餐设计

3.1 增值服务套餐内容设计

优质供电增值服务是售电侧改革下售电公司竞争的必然结果^[23]。对不同级别的电力用户,售电公司可提供的差异化增值服务套餐中应包含信息服务、网络交易服务、预测诊断服务、治理方案服务、节能服务、需求侧管理服务^[24]。其中,信息服务与网络交易服务应为用户可无偿享受的基础增值服务,具体内容如下:

1) 信息服务:为用户用电安全知识普及服务、行业资讯与用电信息发布服务、停电信息发布服务;及时通知停电信息,确保通知到位。

2) 网络交易服务:提供网络商店服务、网络支付服务,用户可根据自身需求直接在网上缴纳电费或购买相应优质供电差异化服务。

3.1.1 I级电力用户增值服务套餐

1) 预测诊断服务:针对I级用户对电能质量极其敏感的特点,提供用户所在配电网的系统元件故障与电能质量状态的监测、预测诊断等服务。

2) 治理方案服务:针对I级用户易因电能质量问题造成重大损失的特点,采集并分析用户的设备运行参数、电能质量免疫力等信息,基于电能质量监测,对用户设备实际耐受水平与供电质量等级之间的兼容水平进行评估,为用户提供最佳用电设备咨询服务,同时为用户提供治理方案设计定制电力设备配置服务,如在关键敏感设备侧安装APF、DSTATCOM和DVR等设备,增配备用电源与不间断电源(UPS)等储能设备,以使敏感设备免受电压暂降、短时中断、谐波等电能质量扰动的影响。另一方面,提供设备维护指导服务,为大型电力用户提供内部配电网的更新、改造等业务。

3) 节能服务:售电公司根据业务范围,加强节能技术研发,优先提供节能改造、节能项目咨询、新技术新设备应用等服务,为用户提供合同能源管理服务。对于多能源供能的用户,售电公司还可为其

提供综合低碳能源解决方案。

4) 需求侧管理服务:为用户提供能效提升服务。例如,结合现行电价政策和节能重点,电力企业可以每年定期或不定期地进行电力需求侧技术培训,以引导用户提升能效管理水平,帮助用户实现削峰填谷并调节负荷特性,减少设备所需能耗与电费。

3.1.2 II级电力用户增值服务套餐

1) 预测诊断服务(同3.1.1)。

2) 治理方案服务(同3.1.1)。

3) 节能服务(同3.1.1)。

3.1.3 III级电力用户增值服务套餐

1) 治理方案服务:采集并分析用户的设备运行参数、电能质量免疫力等信息,对用户设备实际耐受水平与供电质量等级之间的兼容水平进行评估,并为用户提供优质供电服务购买咨询服务、定制电力设备维护或更换服务。

2) 节能服务:为用户提供节能电器设备供应服务、分布式电源设备销售服务、使用培训及维修咨询服务,例如可以为农村及偏远山区用户销售风力照明灯、屋顶发电等分布式电源设备。

3.2 增值服务套餐成本-收益模型

3.2.1 成本模型

1) 投资建设费用

投资建设费用为套餐内各项服务的投资之和,各项服务投资费用包括设备投资、技术投资等费用。投资建设费用的模型为

$$I = \sum_{i=1}^n C_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中: I 为优质供电差异化套餐投资费用; C_i 为套餐内第*i*项增值服务的投资费用; n 为套餐内所包含服务数目。

对I级和II级用户来说,投资建设费用为

$$I = \rho_{\text{mon}} S_1 + \sum_i^m \rho_i S_{2i} + F \quad (21)$$

对III级用户来说,投资建设费用为

$$I = \sum_i^m \rho_i S_{2i} + \rho_d S_3 \quad (22)$$

式中: ρ_{mon} 为用户需安装的监测设备单价; ρ_i 为电能质量治理设备单价,元/kVA; S_1 为监测设备容量; S_{2i} 为电能质量治理设备容量; F 为节能服务合同年支付费用。

2) 运行维护费用

运行维护费用主要包括设备和线路的运行成

本、检修费用、人工维护费用等。具体模型为

$$M = IR_m \quad (23)$$

式中: M 为优质供电差异化套餐的年运行维护费用; R_m 为优质供电差异化套餐的年运行维护率。

3.2.2 收益模型

目前进行的电力体制改革中,售电公司还没有真正的建立起增值服务盈利机制,其提供的增值服务还无法与购售电合同分开,按不同比例分别收取增值税。因此增值服务套餐成本及其为售电公司带来的价值主要表现为用户购电电价的增加。无增值服务时,用户购电电价由上网电价、输配电价和售电公司利润组成;加入增值服务后,用户购电电价由上网电价、输配电价、政府性基金及电费附加、售电公司利润和增值服务费用构成。其中,输配电价和政府性基金及电费附加是“不变成本”,售电公司利润是上网电价下调从发电侧得到的利润。

无增值服务时,电力用户购电电价计算公式为

$$p_{u0} = p_g + p_l + p_v = p_g + p_l + k_l \Delta p \quad (24)$$

式中: p_g 为上网电价; p_l 为输配电价; p_v 为反映售电公司利润的电价,认为其与售电公司交易的发电侧降价 Δp 成比例, k_l 为比例系数。

有增值服务时,不同等级电力用户购电电价计算公式分别为

$$p_u^{I,II} = p_{u0} + p_{va}^{I,II} \\ = p_{u0} + \frac{\alpha \rho_{mon}^{I,II} S_1 + \alpha \sum_i^m \rho_i^{I,II} S_{2i} + NF + NM^{I,II}}{NQ} \quad (25)$$

$$p_u^{III} = p_{u0} + p_{va}^{III} \\ = p_{u0} + \frac{\alpha \sum_i^m \rho_i^{III} S_{2i} + \alpha \rho_{mon}^{III} S_3 + NM^{III}}{NQ} \quad (26)$$

式中: $p_{va}^{I,II}$ 和 p_{va}^{III} 分别为 I、II 和 III 由于增值服务套餐而增加的用电成本; N 为所签订增值服务套餐合同的年限; Q 为用户年均交易成交电量; α 为套餐合同有效期内售电公司的设备投资成本回收率。

4 案例分析

4.1 用户数据构造及分类结果

通过走访中国南部某省的多家电力用户,其中 6 家用户能提供较详细的信息,用以验证所提方法。对 6 位用户的各项指标数据,进行归一化处理,均值如表 2 所示。

表 2 各指标分布平均值

| 指标 | 平均值 |
|---------------------------|-------|
| WACC/(10 ⁶ 元) | 11.57 |
| PLR | 0.75 |
| LVECR | 0.25 |
| HL | 1.5 |
| Dr | 0.65 |
| HGREC1 | 0 |
| HGREC2 | 0 |
| 功率因数 | 0.9 |
| PCIRr | 0 |
| PQELI/(10 ⁶ 元) | 50 |

这里所用的电力用户分类指标为终身价值和电能质量效用,采用熵权法对指标权重进行两次计算,得到用户的客户价值与综合分值,如表 3 所示。 α 和 λ 分别取 0.88 和 2.25^[20-21]。

表 3 电力用户综合分值

| 用户 | A | B | C | D | E | F |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 评分 | 0.430 9 | 0.179 4 | 0.996 8 | 0.021 3 | 0.050 7 | 0.100 4 |

因此,根据第 2 节中给出的不同类别电力用户对应分值,可以判定 C 用户属于 I 级电力用户, A 用户属于 II 级电力用户, B、D、E、F 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。

4.2 增值服务套餐收益分析

应用所提分类方法,对国内某晶圆制造厂^[25]进行分类,判定其为 I 类用户。根据 3.1.1 节为该用户设计增值服务套餐并进行收益分析^[26]。已知该用户有 6 台电能质量监测设备安装于高压进线,已有电能质量治理设备为 UPS,年治理成本为 478.7 万元;某年因电压暂降造成的经济损失为 2 464.3 万元,治理后经济损失减少 346.2 万元。负载容量为 40 000 kVA,年均用电量为 200 GWh。

该用户原有 UPS 治理方案无法覆盖全部用电负荷。使用所推荐的增值服务套餐后,在原有治理方案基础上加装大容量 DVR 进行集中治理。目前 DVR 单价约为 0.18 万元/kVA,加装容量为 20 000 kVA,年运维成本按设备购置成本的 5% 考虑, k_l 取 50%, α 取 70%。利用式(24)、式(25),对用户与售电公司所签订合同的用电电价与合同年限之间关系进行分析,如图 3 所示。

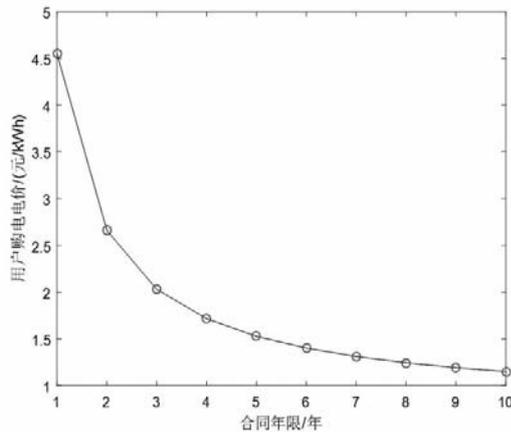


图3 用户购电电价与合同年限关系曲线

由图3可以看出,随着合同年限不断增加,用户的购电电价呈现下降趋势,同时购电电价的下降速度越来越缓慢。这是因为电价公式中售电电价与合同年限成反比例关系,并且合同年限越长,DVR治理方案的投资回收期越长,售电公司的年均投资回收金额就越低。对图3进一步分析可以得到,合同年限大于等于6年时,电价下降速度变得较为缓慢,因此综合考虑售电公司与用户的需求后,可以选择6年为用户所签订合同年限,如表4所示。

表4 增值服务套餐设计

| 增值服务套餐设计 | 电价/(元/kWh) |
|----------|------------|
| 无增值服务 | 0.682 0 |
| 有增值服务 | 1.402 0 |

假设DVR均能可靠动作且补偿能力为50%额定电压,根据某年电压暂降监测数据,有一次暂降处于DVR补偿范围之外,可得出用户使用套餐后年经济损失为22.5万元,比无增值服务套餐情况下减少了2441.8万元。因此,对无增值服务套餐和有增值服务套餐情况下用户年经济支出进行分析,如表5所示,可以得出有增值服务套餐情况下,用户每年所支付的电费虽然增加了1440万元,但遭受电压暂降所造成的经济损失却大大降低,使得用户年总经济支出与无增值服务套餐情况相比降低了26.17%。因此所设计的增值服务套餐可以给用户带来更好的经济效益,也可以明显改善其电能质量。同时,对售电公司来说,增值服务套餐可以为自身带来收益,也可以增强自身优势降低电能质量扰动对客户造成的经济损失,吸引并留住客户。

表5 不同套餐下用户年经济支出

| 增值服务套餐 | 年支付电费/万元 | 年经济损失/万元 | 年经济支出/万元 |
|--------|----------|----------|----------|
| 无增值服务 | 1364 | 2464.3 | 3828.3 |
| 有增值服务 | 2804 | 22.5 | 2826.5 |

5 结 语

面向电力市场激烈竞争的现状,前面以优质供电为切入点,提出了用户供电质量需求识别及优质供电增值服务策略。并基于中国南方某省的用户数据验证所提方法,得到以下结论:

1) 考虑客户当前价值、潜在价值和节能贡献,提出客户价值指标,为电力公司选择优质供电服务对象提出量化指标;提出电能质量效用指标来刻画因电能质量导致的经济损失,描述用户对使用优质电力的愿望。

2) 基于熵权法,提出一种用户优质供电需求分类方法。根据所提方法,把用户需求分为I、II、III类,提出每类需求的主要增值服务内容。

3) 针对用户的优质供电需求的个体差异,提出用户优质供电增值服务套餐及其成本-收益量化方法,并进行实例分析,结果证明了所提方法的有效性和可行性。

4) 所提方法可促进电力公司优质供电的服务进程。以优质供电差异化增值服务套餐的方式推广有偿优质供电服务,可为电力公司降低差异化增值服务成本,同时对售电公司掌握竞争优势、实现稳固发展有重要意义。

参考文献

- [1] 徐培栋,肖先勇,汪颖. 考虑母线电压时变区间特性的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):66-72.
- [2] 宋琪,文福拴,王维洲,等. 智能电网社会效益测评的压力-状态-响应模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):23-32.
- [3] Tsekouras, G. J., Hatzigiorgiou, N. D., Dialynas E. N. Two-stage Pattern Recognition of Load Curves for Classification of Electricity Customers [J]. Power System, 2007,22:11-28.
- [4] Stephen, B., Mutanen, A. J., Galloway S., et al. Enhanced load Profiling For residential Network Customers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29:88-96.

- [5] Chicco G., Napoli R., Piglione F. Comparisons among Clustering Techniques for Electricity Customer Classification [J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21: 933 - 940.
- [6] Marques D. Z., de Almeida K. A., de Deus A. M., et al. A Comparative Analysis of Neural and Fuzzy Cluster Techniques Applied to the Characterization of Electric Load in Substations [C]. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956), Sao Paulo, Brazil, 2004: 908 - 913.
- [7] Wang J., Wang, C., Wang, Z. The Study of Power Customer Classification Based on Principal Component Analysis and Improved Back Propagation Neural Network [C]. IEEE. 2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Tianjin, China, 2009: 1 - 5.
- [8] Bohari, A. M., Rainis R., Marimuthu M. Customer Lifetime Value Model in Perspective of Firm and Customer: Practical Issues and Limitation on Prospecting Profitable Customers of Hypermarket Business [J]. International Journal of Business and Management, 2011, 6: 161 - 169.
- [9] Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council on Energy End - use Efficiency and Energy Services and Repealing Council Directive 93/76/EEC. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 2006.
- [10] Iyer M., Kempton W., Payne C. Comparison Groups on Bills: Automated, Personalized Energy Information [J]. Energy Build, 2006, 38: 88 - 96.
- [11] Li Z., Wang, M., Ma X., et al. High Risk Management Model for the Power Enterprise Based on Rough Set Theory [J]. Systems Engineering Procedia, 2012, 3: 63 - 68.
- [12] Targosz R., Manson J. Pan European LPQI Power Quality Survey [C]. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007: 0263.
- [13] Wang J., Yang Z., Lin F., et al. Harmonic Loss Analysis of the Traction Transformer of High - speed Trains Considering Pantograph - OCS Electrical Contact properties [J]. Energies, 2013, 6: 5826 - 5846.
- [14] Hiziroglu A., Sengul S. Investigating Two Customer Lifetime Value Models From Segmentation Perspective [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 62: 766 - 774.
- [15] Rasanen, T., Ruuskanen, J., Kolehmainen M. Reducing Energy Consumption by Using Self - organizing Maps to Create More Personalized Electricity Use Information [J]. Applied Energy, 2008: 85, 830 - 840.
- [16] Cermák, P. Customer Profitability Analysis and Customer Life Time Value Models: Portfolio Analysis [C]. 16th Annual Conference on Finance and Accounting, ACFA Prague, 2015.
- [17] Song L., Zhan W., Qian S., et al. Customer Segmentation for Power Enterprise Based on Enhanced - FCM Algorithm [C]. ADMA 2012: Advanced Data Mining and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2012: 127 - 137.
- [18] Haslett D. W. What is Utility [J]. Economics and Philosophy, 1990, 6: 65 - 94.
- [19] Ropo J. P., Bleichrodt, H. Does Loss Aversion Exist? Experimental Evidence From Small Stakes Decisions Under Risk and Uncertainty [D]. Netherlands Erasmus School of Economics, Erasmus Universiteit Rotterdam, 2014.
- [20] Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1979, 47: 263 - 292.
- [21] Tversky A., Kahneman, D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5: 297 - 323.
- [22] Nie H., Yu T. Comprehensive Evaluation for Transmission Network Planning Scheme Based on Entropy Weight Method and VIKOR Method [C]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, China, 2011: 278 - 281.
- [23] 唐猛. 售电公司客户风险等级评估方法研究 [J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 73 - 78.
- [24] Wang L., Liu Z., Liu S., et al. Research on Business Model and Value - added Services of Electric Power Substitution [C]. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2017.
- [25] Mu Q., Re J., Ga Y., et al. Design of Power Supply Service Plan for Electric Company Considering Harmonic Management [C]. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, OR, USA, 2018: 1 - 7.
- [26] 电能质量经济性评估 第1部分: 电力用户的经济性评估方法: GB/Z 32880.1 - 2016 [S], 2016.

作者简介:

马智远(1987), 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量;

莫文雄(1971), 教授级高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量技术;

许中(1986), 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

周凯(1993), 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与用电技术监督。

(收稿日期: 2019 - 11 - 25)