

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210076

基于信托租赁的优质供电服务模式

李艳, 张华赢, 吴显, 汪伟, 汪楨子

(南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司), 广东 深圳 518020)

摘要: 敏感用户的工业生产过程因电压暂降跳停, 导致巨大的经济损失, 亟需安装治理设备满足优质电力需求。针对传统用户自购治理设备存在投资高、风险大的问题, 提出一种基于信托租赁的优质供电服务模式。该信托租赁模式解决了受治敏感负荷筛选、服务费用优化、服务费用分配三个问题, 通过定义“容量/损失比”筛选出有必要安装治理设备的敏感负荷, 以用户-服务商双方净收益最大化为目标优化服务费用。建立电力公司-设备制造商服务费用分配的不对称纳什谈判模型, 提出服务费用分配策略, 从而形成一套完整、可操作的服务模式。最后对某敏感用户进行实例分析, 证明了信托租赁模式的可行性, 为优质供电服务工作开展提供了一种新的模式参考。
关键词: 优质供电; 服务模式; 信托租赁; 容量/损失比; 双方净收益最大化; 不对称纳什谈判

Service pattern for premium power supply based on trust lease

LI Yan, ZHANG Huaying, WU Xian, WANG Wei, WANG Zhenzi

(New Smart City High-quality Power Supply Joint Laboratory of China Southern Power Grid
(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd.), Shenzhen 518020, China)

Abstract: The trips of industrial bproduction process for sensitive users are caused by voltage sag, which leads to huge economic loss, so it's urgent to install governance equipment to meet the demand for premium power. Aiming at the problems of high investment and high risk in the traditional users' self-purchase governance equipment, a service pattern for premium power supply based on trust lease is proposed. The specific content and implementation process of the pattern are proposed to solve the three problems of sensitive loads screening, service cost optimization and service cost allocation. By defining the "capacity/loss ratio" to screen out the sensitive loads which are necessary to install the governance equipment. The service cost is optimized with the goal of maximizing the net income of the user and the service provider. The asymmetric Nash negotiation model of the service cost allocation between the power company and the equipment manufacturer is established, and the strategy of service cost allocation is proposed. So far, a complete and operable service pattern has been formed. Finally, an empirical analysis of a sensitive user proves the feasibility of trust lease pattern and provides a new pattern reference for the development of premium power supply service.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. 090000KK52190169/SZKJXM2019669).

Key words: premium power; service pattern; trust lease; capacity/loss ratio; maximize the net income of both parties; asymmetric Nash negotiation

0 引言

随着产业结构优化升级^[1-3], 以半导体、晶圆制造为代表的高端制造业快速发展^[4], 大量敏感负荷接入电网^[5-8], 相关生产环节因电压暂降停机停产的

情况频发^[9-10], 导致巨大经济损失^[11-12]。敏感用户的电压暂降治理愿望强烈, 但部分用户难以负担高额的前期治理费用, 亟需多样化优质供电服务满足其优质电力需求。因此, 研究多方参与共赢的优质供电服务模式具有重要的现实意义。

国内外关于电压暂降治理及优质供电开展了大量研究, 主要集中于治理效果评估^[13-17]、优质供电方案^[18-21]、治理投资决策^[22-24]以及定制电力技术^[25-27]等

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(090000KK52190169/SZKJXM2019669)

方面。文献[16]建立配网公司成本、DG 运营商收益最大的双层嵌套模型, 得出 STATCOM 的最优配置方案, 但未考虑用户作为投资主体时的治理设备配置方案及其经济性问题。文献[17]提出了园区-设备级协同治理优化方案, 由园区管委会和用户进行融资协同治理, 但仅适用于工业园区用户, 而现实中敏感用户的接入点较分散, 难以应用该策略。文献[22]提出了考虑用户、政府、电网公司及新售电公司等多方参与的优质供电投资策略, 但未建议具体的服务模式。文献[23]提出了一种考虑公用电网级、用户电网级、用户设备级的电压暂降分级治理方案。电网级治理规模大、投资高、周期长, 在实际工程中, 用户设备级安装治理装置是主流的治理方式。传统的用户自行出资购置治理设备的模式, 存在初期投资大、后期风险高的问题, 部分用户迫于资金压力难以实施, 优质供电服务是解决这部分用户高品质用电诉求的重要途径。

由于资金或技术的匮乏, 用户难以自行开展电压暂降治理工作, 往往更信赖电力公司, 委托其解决电压暂降问题。电力公司为响应不同用户的治理诉求, 可与多方设备制造商达成合作, 将治理设备按需出租给用户。本文将信托产品交易思想引入治理设备融资租赁模式, 提出一种基于信托租赁的优质供电服务模式(Trust Lease Premium Power, TLPP), 并叙述了 TLPP 的运营主体及运营模式。提出了基于容损比的敏感负荷筛选方法, 解决了敏感负荷安装治理设备可能存在的“入不敷出”问题; 构建多目标优化模型, 提出了“用户-服务商”间的服务费用定价策略; 建立不对称纳什谈判模型, 提出了服务商各主体间关于服务费用的分配策略; 最后进行实例分析, 验证了所提模式的可行性和有效性。

1 基于信托租赁的优质供电服务

1.1 TLPP 利益相关方

TLPP 的利益主体包括三方: 用户、电力公司和设备制造商。电力公司和设备制造商组合为优质供电服务商, 承担不同分工, 共同为用户服务, 最终实现三方共赢。从传统融资租赁角度出发, TLPP 三方的角色定位如图 1 所示。

用户: 有优质供电需求但经济实力不足, TLPP 模式将初期投资压力转移给服务商, 避免了传统的用户自行承担模式投资大、风险高的问题。用户无需承担治理设备的全寿命周期运维费用, 租赁期内设备的运维由服务商负责, 减轻用户负担。

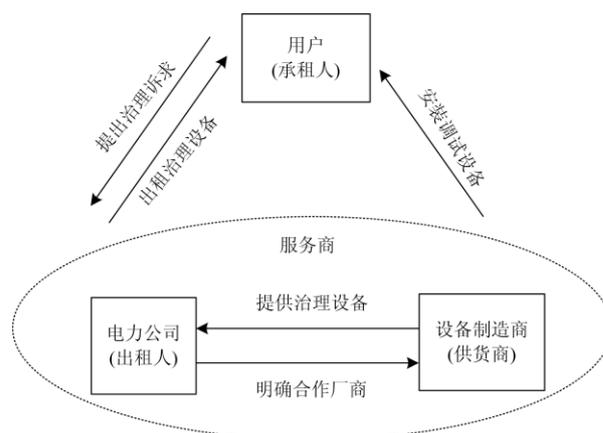


图 1 信托租赁三方角色定位

Fig. 1 Tripartite role positioning in TLPP

电力公司: 具有技术公信力, 主要工作包括制定优质供电服务方案、技术支撑、实现设备制造商与用户的对接、促成用户的优质电力投资。TLPP 模式的开展, 不仅能提升电力公司收益、开拓新型业务模式和获利渠道, 而且能增强客户粘性, 提升售电市场开放下的电力公司竞争力。

设备制造商: 提供治理设备、负责设备运维、收取服务费用。TLPP 的投资回报周期比传统直接售卖治理设备的回报周期更长, 但从长远发展角度来看, 设备整体销量增加、销售额增长, 且租赁期满后的净收益能超过原本直接出售设备的利润, 设备制造商的利益更大化。

1.2 TLPP 运营模式

TLPP 三方的具体合作流程如图 2 所示。

1) 组成服务商: 电力公司积极寻找多方设备制造商达成合作, 形成支撑 TLPP 的设备支持库。

2) 明确用户: 用户向电力公司提出电压暂降的治理诉求, 申报敏感负荷信息, 筛选出需要安装治理设备的敏感负荷, 根据用户需求确定合作的设备制造商。

3) 签订合同: 电力公司分别与用户、设备制造商关于服务方案、合作协议达成一致后, 三方签署 TLPP 合同。

4) 设备运行: 优质供电服务合同正式生效, 设备制造商根据合同在用户方安装调试治理设备, 保证设备正常运行。

5) 服务费用: 用户每年定期向服务商缴纳定额的服务费用, 服务商根据合作协议, 按比例分配服务费用。

租赁期满后, 用户根据自身经营状况及前景规划, 再与服务商磋商确定后续合作方式。

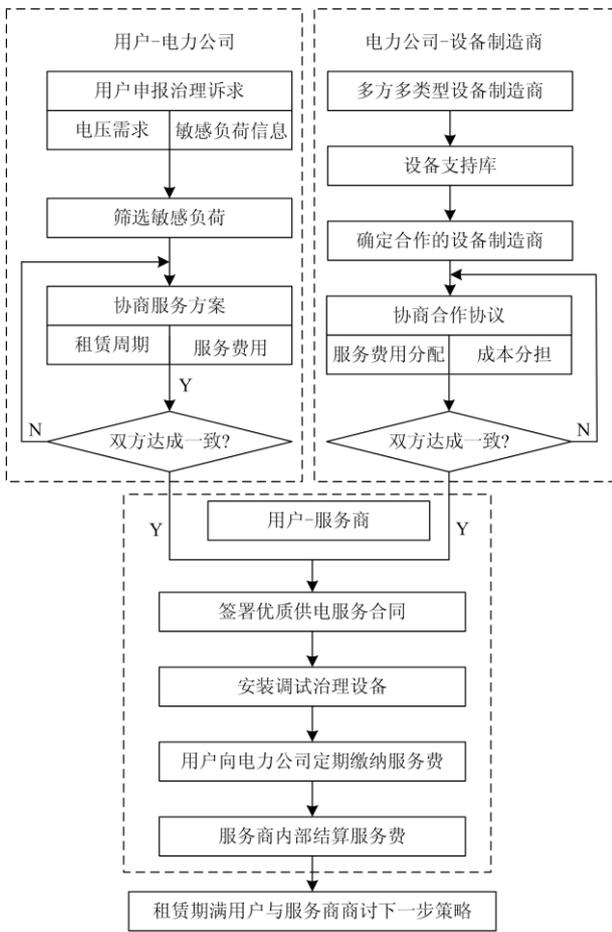


图 2 信托租赁优质供电服务运营模式
Fig. 2 Operation model of the TLPP

2 TLPP 服务费用定价策略

为保证 TLPP 的正常运营，需要最大化各方利益，服务费用定价是核心问题，本文提出的考虑容损比的 TLPP 服务费用优化模型解决了同时实现用户和服务商收益最大化的问题。

2.1 基于容损比的敏感负荷筛选方法

用户侧电压暂降治理，应集中治理经济损失较大的敏感负荷，以提升用户投资回报率。因此筛选待治理敏感负荷是治理工作的前提。本文提出“容量/损失比”（简称“容损比”）概念，作为受治设备的筛选依据。容损比 R 的表达式为

$$R = \frac{S_L}{C_{\text{loss}} N_{\text{pre}}} \quad (1)$$

式中： S_L 为某敏感负荷的额定容量(kVA)； C_{loss} 为该敏感负荷在电压暂降下跳停导致的单次经济损失(万元)； N_{pre} 为该敏感负荷未配置治理设备时的年跳停次数。

量产治理设备的储能供给时间为标准时间，比如不间断电源(Uninterruptible Power System, UPS)的标准供给时间为 10 min 或 15min，而治理成本主要取决于治理设备的额定容量，与敏感负荷的容量需求正相关。敏感负荷的容量越小，损失越高，其所需的治理设备容量越小，相应地治理后减少的损失越多，治理该负荷的投资回报率越高。式(1)从容量、损失两个维度出发，通过 R 值来反映敏感负荷受治的必要性， R 值越小，负荷越有必要治理。

单台敏感负荷治理效益为其在租赁期内减少的经济损失，如式(2)的左边部分。当治理效益等于式(2)的右边部分治理成本时，可得敏感负荷容量与其经济损失的关系式。

$$C_{\text{loss}} (N_{\text{pre}} - N_{\text{after}}) \cdot T = (a \cdot S_L) \cdot c \quad (2)$$

式中： T 为租赁时长，一般取年为单位； N_{after} 为采用治理方案后敏感负荷的年跳停次数； a 为敏感负荷额定容量等级系数，表征治理设备容量与敏感负荷容量间的比例关系，比如敏感负荷耐受能力为 0.7 p.u.时，建议补偿容量为其容量 S_L 的 70%； c 为治理设备单位容量的成本。

定义治理效益等于治理成本时的容损比，其为基准容损比 R_{BT} ，求解式(2)可得

$$R_{\text{BT}} = \frac{1}{ac} \left(1 - \frac{N_{\text{after}}}{N_{\text{pre}}}\right) T \quad (3)$$

可根据租赁年限计算基准值，满足 $R < R_{\text{BT}}$ 的敏感负荷，应进行治理。

2.2 成本-效益量化

租赁期内，治理设备的使用权属于用户，所有权属于设备制造商；双方无直接交易，服务过程由电力公司推进。电力公司与用户协商服务费用时，应综合考虑服务商整体成本、效益。

租赁期内，用户投入成本包括：初始投资成本、服务费用、运行管理成本，经济效益为电压暂降治理后减少的经济损失。服务商投资成本包括：初始投资成本、运维成本、故障成本及折旧成本，经济效益为服务费用。考虑到资金的时间价值，在此将多项成本以及效益终值折现为租赁初始时的现值进行量化。

2.2.1 用户成本-效益量化

用户租赁期内总效益 P_u 为

$$P_u = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{k=1}^M C_{\text{loss}-k} (N_{\text{pre}-k} - N_{\text{after}-k})}{(1+r)^t} \quad (4)$$

式中： M 为敏感负荷台数； $C_{\text{loss}-k}$ 为第 k 台敏感负荷在电压暂降下跳停，导致的单次经济损失(万元)；

$N_{\text{pre}-k}$ 、 $N_{\text{after}-k}$ 为采用治理方案前、后第 k 台敏感负荷的年跳停次数; r 为折现率。

用户租赁期内总成本 C_u 为

$$C_u = C_{I_u} + \sum_{i=1}^T \frac{(1+r)^i - 1}{r(1+r)^i} \cdot C + \frac{C_g}{(1+r)^T} \quad (5)$$

式中: C_{I_u} 为用户初始投资成本, 包括设备运输、安装调试等费用; C 为年服务费; C_g 为运行管理成本。

2.2.2 服务商成本-效益量化

服务商租赁期内总效益 P_s 是收取用户服务费的收入。

$$P_s = \sum_{i=1}^T \frac{(1+r)^i - 1}{r(1+r)^i} \cdot C \quad (6)$$

服务商租赁期内总成本 C_s 为

$$C_s = C_{I_s} + \sum_{i=1}^T \frac{(C_w + C_f)}{(1+r)^i} + C_z \quad (7)$$

式中: C_{I_s} 为服务商初始投资成本, 包括治理设备购置 C_o 、服务设计 C_{sd} 、咨询验收 C_{ca} 等费用; C_w 为年均运维成本; C_f 为年均故障成本; C_z 为折旧成本。

治理设备购置成本 C_o 由治理设备容量决定, 即

$$C_o = \sum_{m=1}^Y c_m S_m \quad (8)$$

式中: Y 为治理设备台数; c_m 为第 m 台治理设备单价; S_m 为第 m 台治理设备容量。

采用平均折旧法计算折旧成本, 如式(9)所示。

$$C_z = \frac{C_o - C_L T}{n} \quad (9)$$

式中: C_L 为治理设备生命期末残值; n 为设备生命周期, 单位为年。

2.3 服务费用优化模型

2.3.1 目标函数

TLPP 服务商的经济效益是收取的服务费用, 服务费用越高, 电力公司和设备制造商的整体收益越高; 对于用户, 服务费用是进行电压暂降治理的成本, 用户期望服务费用越低越好。服务商和用户的目标矛盾, 本文选择租赁期内用户总净收益 f_1 最大化和服务商总净收益 f_2 最大化作为目标函数, 构建多目标优化模型, 优化变量包括租赁年限 T 和年服务费 C 。

第一个优化目标为用户总净收益 f_1 最大化:

$$\max f_1 = P_u - C_u \quad (10)$$

第二个优化目标为服务商总净收益 f_2 最大化:

$$\max f_2 = P_s - C_s \quad (11)$$

2.3.2 约束条件

1) 服务商效益约束

服务商开展 TLPP 的净收益不低于服务商最低合作期望收益, 即

$$f_2 \geq \Delta F_e + \Delta F_m \quad (12)$$

式中: ΔF_e 为电力公司最低期望收益; ΔF_m 为设备制造商最低期望收益。

2) 用户效益约束

为保证用户生产经营活动的可持续性, 用户单个租赁年内的治理成本应小于年收益, 即小于每年减少的经济损失。

$$\frac{C}{(1+r)^T} + \frac{C_g}{T(1+r)^T} < C_{\text{loss}}(N_{\text{pre}} - N_{\text{after}}) \quad (13)$$

3) 租赁年限约束

为了便于用户规划经营, 缩短服务商投资回报周期, 租赁年限限制在治理设备生命周期内, 同时根据容损比确定租赁年限最小值, 即

$$T_{\min} < T < n \quad (14)$$

式中, T_{\min} 为最短租赁年限, 是所有满足 $R < R_{BT}$ 的敏感负荷的基准容损比 R_{BT} 对应的各租赁年限的最大值。

2.3.3 模型求解

两个目标函数相互矛盾, 当决策变量变化时, 用户净收益的优化会引起服务商净收益的劣化, 并不存在一组解使得两个目标函数均达到最大值, 只能取 Pareto 解集。NSGA-II 算法是一种搜索 Pareto 前沿的有效方法^[28-29], 适用于本文多目标优化模型的求解。

在实际优质供电服务中, 需要从 Pareto 最优解集中选择出一组最优折衷解作为最终的服务方案。

1) 单目标单一满意度

采用偏大型模糊隶属度函数对 Pareto 最优解集中每组解对应的各目标函数赋予满意度, 如式(15)所示。

$$\mu_{km} = \begin{cases} 1 & f_{km} \geq f_{m\max} \\ \frac{f_{km} - f_{m\min}}{f_{m\max} - f_{m\min}} & f_{m\min} \leq f_{km} \leq f_{m\max} \\ 0 & f_{km} \leq f_{m\min} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, M 为目标函数的个数; μ_{km} 为第 k 组 Pareto 解对应第 m 个目标函数的满意度; f_{km} 为 Pareto 最优解集中第 k 组解对应第 m 个目标函数的函数值; $f_{m\min}$ 为 Pareto 最优解集中所有解对应第 m 个目标函数函数值的最小值; $f_{m\max}$ 为 Pareto 最优解集中所有解对应第 m 个目标函数函数值的最大值。

2) 多目标综合满意度

通过各 Pareto 解对应的各目标函数的满意度得

到各 Pareto 解的满意度 μ_k ，其表达式为

$$\mu_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mu_{km} \quad (16)$$

通过对各 Pareto 解的满意度比较，选择满意度最高的解作为最终方案。

3 TLPP 服务费用分配模型

各治理设备的技术指标特点各异，可能存在多治理设备协同工作的场景，出现多家设备制造商服务一户用户的情况。服务商主体包含电力公司、多方设备制造商 $j(j=1,2,\dots)$ ，多主体共同分配收取的用户服务费用。解决服务费用在各主体间的分配问题是 TLPP 正常运营的关键。

3.1 基于不对称纳什谈判的服务费用分配模型

服务费用的分配过程是服务商各利益主体讨价还价的谈判过程。博弈论中的纳什谈判模型是解决这类收益分配问题的有效手段^[30-31]。在 TLPP 中，电力公司具备令用户信服的公信力，掌握大量客户资源，处于主导者地位，建立不对称纳什谈判模型如式(17)所示，以服务商收益分配比例的纳什积最大化为目标，研究服务商之间的服务费用分配策略。

$$\begin{cases} \max \left\{ (k_e - x_e^-)^{\varphi_e} (k_j - x_j^-)^{\varphi_j} \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} k_e + \sum_{i=1}^j k_i = 1 \\ k_e \geq x_e^- \\ k_j \geq x_j^- \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中： φ_e 、 φ_j 分别为电力公司、设备制造商 j 的分配因子； k_e 、 k_j 分别为电力公司、设备制造商 j 最终的服务费用比例； x_e^- 、 x_j^- 分别为电力公司、设备制造商 j 最低合作分配比例期望， (x_e^-, x_j^-) 即为服务商谈判破裂点。

根据服务实施时的实际服务商运营主体构建拉格朗日函数，求解不对称纳什谈判模型。

3.2 服务费用分配因子测度

服务商某主体的分配因子大小主要由谈判地位、投资占比、风险承担三种因素决定。假设电力公司、设备制造商 j 受第 $m(m=1,2,3)$ 种因素的影响，其系数分别为 a_m 、 b_{jm} ，且 $a_m + b_{jm} = 1$ 。

分配因子的测度公式为

$$\begin{cases} \varphi_e = a_1 w_1 + a_2 w_2 + a_3 w_3 \\ \varphi_j = b_{j1} w_1 + b_{j2} w_2 + b_{j3} w_3 \end{cases} \quad (18)$$

式中， w_1 、 w_2 、 w_3 分别为谈判地位、投资占比、风险承担三种因素所占权重系数，且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

各因素影响系数的确定：(1) 谈判地位表征服务

商各主体在 TLPP 模式中的重要程度，采用专家打分法进行确定；(2) 投资占比表示服务商各主体在投资成本占服务商投资总成本的比重；(3) 风险承担主要考虑电力公司承担的设备制造商违约风险，以及设备制造商在 TLPP 模式中面临的竞争风险，通过模糊评价法进行量化。

4 实例验证

4.1 用户基础数据

将 TLPP 模式应用于某半导体制造企业，该用户工厂内敏感负荷接线情况如图 3 所示。

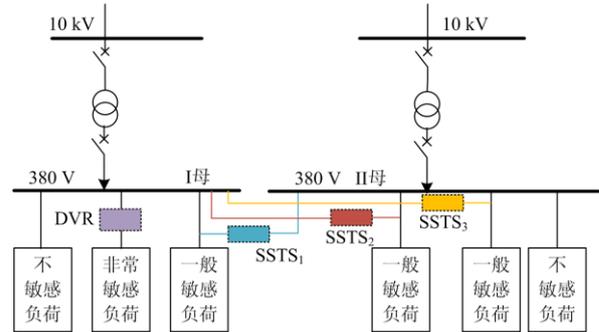


图 3 某半导体制造厂的电气主接线

Fig. 3 Main electrical connection of a semiconductor manufacturing facility

统计用户敏感负荷的额定容量、单次中断损失及年均中断次数，计算容损比，得出 $13 < R_1 < 15$ 、 $42 < R_2 < 60$ ，分别划分为非常敏感负荷、一般敏感负荷。按照用户预期 5 年的治理周期，动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Restorer, DVR) 市场均价 2 000 元/kVA，由式(3)计算得 $R_{BT} = 25$ ，非常敏感负荷可安装治理设备进行治理。由此，在 380 V 非常敏感负荷处安装 DVR，一般敏感负荷处安装固态切换开关 (Solid State Transfer Switch, SSTS) 设备，电力公司在设备支持库中分别选择 DVR 设备制造商和 SSTS 设备制造商，在该用户处进行治理。

非常敏感负荷额定容量共计 500 kVA，按补偿 40% 最大压降，共需安装 200 kVA 的 DVR。另根据用户实际情况，共需安装 3 套 SSTS (额定电压 400 V，额定电流 700 A)，市场均价在 440 元/kVA^[13]。

4.2 服务费用优化

经治理后，用户减少的年经济损失为 68 万元，用户初始投资成本 5 万元，年均运行管理成本约为 0.2 万元。DVR、SSTS 年运行维护成本均为购置成本的 5%，年均故障成本约为 0.2 万元，假设设备生命周期均为 15 年。折现率取 6%。

求解优化模型，得到 10 组 Pareto 最优解集样

本, 如表 1 所示。

表 1 Pareto 最优解集样本

Table 1 Pareto optimal solution set samples

编号	租赁时间 $T/\text{年}$	年服务费 $C/\text{万元}$	用户总净收益 $f_1/\text{万元}$	服务商总净收益 $f_2/\text{万元}$
1	5	51.69	62.86	122.40
2	5	47.58	80.63	104.63
3	5.5	43.19	84.88	100.61
4	6	46.29	54.01	131.74
5	6	45.58	57.43	128.31
6	6	44.70	61.77	123.97
7	6	42.05	74.73	111.02
8	6.5	49.77	67.67	163.28
9	6.5	38.03	129.37	101.58
10	6.5	31.21	165.10	65.85

求解各 Pareto 解的满意度, 在此列表 1 中 10 组样本的 Pareto 解的满意度, 如表 2 所示。

表 2 最优解集样本各 Pareto 解的满意度

Table 2 Satisfaction of each Pareto solution of the optimal solution set samples

编号	1	2	3	4	5
μ_k	0.316 0	0.424 6	0.423 6	0.424 5	0.454 1
编号	6	7	8	9	10
μ_k	0.417 0	0.415 6	0.376 6	0.365 3	0.345 8

所有 Pareto 解满意度最高为 $\mu_5=0.454 1$, 即表 1 中第 5 组解为最优。

因此, 针对用户的优质供电服务方案为: 租赁时间为 6 年, 每年定期缴纳服务费用为 45.58 万元。

4.3 服务费用分配

求解不对称纳什谈判模型, 得到服务商各主体的最终服务费用分配比例, 如式(19)所示。

$$k_i = x_i^- + \varphi_i \left(1 - \sum_{i=1}^3 x_i^-\right) \quad (19)$$

式中, $i = e, 1, 2$ 。决定分配因子测度的各影响系数具体数值如表 3 所示。

表 3 分配因子测度各影响系数值

Table 3 Distribution factor measures the value of each influence coefficient

	a_1	a_2	a_3
电力公司	0.4	0.12	0.38
DVR 设备商	b_{11}	b_{12}	b_{13}
	0.3	0.42	0.33
SSTS 设备商	b_{21}	b_{22}	b_{23}
	0.3	0.46	0.29

三种因素的权重分别为: $w_1=0.15$ 、 $w_2=0.5$ 、 $w_3=0.35$, 经计算得: $\varphi_e=0.253 0$ 、 $\varphi_1=0.370 5$ 、

$\varphi_2=0.376 5$ 。

将各参数值代入式(19)中, 得到的服务商各主体收益分配比例的纳什积最大时, 服务费用分配比例为: $k_e=0.125 3$ 、 $k_1=0.487 1$ 、 $k_2=0.387 6$ 。

服务商各主体每年分配到的服务费用为: $C_e=5.71$ 万元, $C_1=22.20$ 万元, $C_2=17.67$ 万元。

将信托租赁与直接购置两种模式下各主体经济指标进行对比, 包括用户投资成本与服务商各主体收益, 如表 4 所示。

表 4 两种服务模式各主体经济指标对比

Table 4 Comparison of main economic indicators

under two service patterns				
模式	用户投资/ 万元	DVR 设备商 收益/万元	SSTS 设备商 收益/万元	电力公司 收益/万元
信托 租赁	年服务费 45.58	133.20	106.02	34.26
直接 购置	一次性购置 费用 205.13	108.68	96.45	0

其中, 用户直接购置治理设备将不再包含 TLPP 模式中基于容损比的敏感负荷筛选服务, 若用户要实现非常敏感负荷的全治理, 根据其实际负荷容量, 预计购置 700 kVA 的 DVR, 导致过补偿问题, 考虑 3 套 SSTS 的成本以及设备运输、调试安装等相关费用, 用户直接购置投资将达到 205.13 万元。

根据表 4 对两种服务模式进行对比分析可知, TLPP 模式通过收取年服务费的方式缓解了用户初期投资压力, 降低了投资风险, 为用户提供全套的优质治理服务, 包括选取合适的设备商、明确安装治理设备进行治理的敏感负荷等, 减少了用户总投资, 提高了用户治理意愿。TLPP 模式保证了用户、设备制造商及电力公司三方的利益, 验证了该模式的有效性和可行性。

5 结论

本文提出了一种基于信托租赁的优质供电服务模式, 并提出了该服务模式下的服务费用优化算法及服务商各主体的利益分配方法, 为电压暂降敏感负荷的治理提供了一种新的治理模式。主要结论如下:

1) 提出“容损比”概念及计算方法, 筛选出适合安装治理设备的敏感负荷, 避免了资源浪费和不必要的治理成本。

2) 采用 TLPP 模式进行定制电力设备的交易, 有效降低了用户的初期投资成本和后期治理风险, 具有实际应用推广价值。

3) TLPP 模式涉及用户、电力公司及设备制造商多方参与,通过优化、博弈保证多主体收益最大化,实现多方共赢。

参考文献

- [1] 李苏秀,刘林,王雪,等. 泛在电力物联网商业模式理论体系与设计架构[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 1-9.
LI Suxiu, LIU Lin, WANG Xue, et al. Theoretical framework and architecture design of e-IoT business model [J]. Electric Power, 2019, 52(9): 1-9.
- [2] 刘颖英,冯丹丹,林才华,等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [3] 张宇帆,艾芊,肖斐,等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 187-196.
ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 187-196.
- [4] XU Y, WU Y, ZHANG M, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 2-10.
- [5] 陈韵竹,刘阳,黄聃喆,等. 电压暂降损失风险规避机制与保险方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 97-105.
CHEN Yunzhu, LIU Yang, HUANG Danzhe, et al. Research of loss risk evading mechanism and insurance scheme caused by voltage sags[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 97-105.
- [6] 李飞,郑志宇,张昭丞,等. 考虑电压暂降影响的交直流配网优选[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 120-126.
LI Fei, ZHENG Zhiyu, ZHANG Zhaocheng, et al. Optimization scheme of AC / DC distribution network considering voltage sags[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 120-126.
- [7] XIAN X, CHEN Y, WANG Y, et al. Multi-attribute analysis on voltage sag insurance mechanisms and their feasibility for sensitive customers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(16): 3892-3899.
- [8] XU F, GUO K, LI H, et al. Evaluation of fault level of sensitive equipment caused by voltage sag via data mining[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2625-2633.
- [9] 谭秀美,肖先勇,张逸,等. 基于敏感过程运行状态的事件型电能质量扰动损失评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 84-89.
TAN Xiumei, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Assessment of economic loss caused by event power quality disturbances based on sensitive process running states[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 84-89.
- [10] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等. 基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 105-110.
XIAO Xianyong, TAN Xiumei, WANG Ying, et al. Voltage sag economic losses assessment based on electrical characteristic-physical attribute-perceived loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 105-110.
- [11] XU Z, MO W, GUI L, et al. Practical test method for the sensitivity of programmable logic controller to voltage sags and short interruption[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2020, 14(6): 830-837.
- [12] HE H, ZHANG W, WANG Y, et al. A sensitive industrial process model for financial losses assessment due to voltage sag and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1293-1301.
- [13] 李春敏,肖先勇,张逸,等. 工业用户电压暂降损失风险的模糊综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 50-56.
LI Chunmin, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on loss risk of voltage sag for industry plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 50-56.
- [14] 潘霄,梁毅,张娜,等. 电压跌落下 MMC-HCVD 负序电流抑制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 38-43, 56.
PAN Xiao, LIANG Yi, ZHANG Na, et al. Research on control strategy of negative sequence current suppression of MMC-HCVD under voltage drop[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 38-43, 56.
- [15] 袁庆伟,王宇,盛晓东,等. 一种兼顾快速性和精确性的单相电压暂降检测算法[J]. 供用电, 2020, 37(12): 22-30.
YUAN Qingwei, WANG Yu, SHENG Xiaodong, et al. A single-phase voltage sag detection algorithm considering the quickness and accuracy of detection[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 22-30.
- [16] 丁凯,李伟,谢佳妮,等. 电压暂降治理效果评价指标体系及综合评价模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 197-203.
- [17] 陶顺,李玲,韦永忠,等. 计及暂降的供电可靠性评估方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5):

- 151-156, 163.
TAO Shun, LI Ling, WEI Yongzhong, et al. Research on evaluation method of power supply reliability considering sag[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 151-156, 163.
- [18] 张爱祥, 宋士瞻, 王传勇, 等. 计及电能质量治理设备和不同主体利益的主动配电网规划[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 113-118, 153.
ZHANG Aixiang, SONG Shizhan, WANG Chuanyong, et al. Plan of active distribution network considering power quality control equipment and interest of different subjects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 113-118, 153.
- [19] 沈煜, 白敬强, 黄文焘. 考虑交互影响机理的多电能质量治理装置优化配置[J]. 供用电, 2020, 37(11): 42-47.
SHEN Yu, BAI Jingqiang, HUANG Wentao. Optimal configuration of multiple power quality management devices considering interaction effects[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 42-47.
- [20] 谢林枫, 王红星, 刘军成, 等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 41-47.
XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.
- [21] CHEN Y, XIAN X, WANG Y, et al. Severity index-based voltage sag insurance for high-tech enterprises[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(24): 5992-5999.
- [22] BOLLEN MATH H J, 肖先勇. 理解电能质量问题: 电压暂降与短时中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [23] 栾乐, 周凯, 肖天为, 等. 基于证据推理的优质电力投资决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 139-146.
LUAN Le, ZHOU Kai, XIAO Tianwei, et al. Premium power investment decision-making method based on evidence reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 139-146.
- [24] MA Y, XIAO X, WANG Y. Investment strategy and multi-objective optimization scheme for premium power under the background of the opening of electric retail side[J]. Energies, 2018, 11(8): 1-25.
- [25] 徐昉渊, 陈德彪, 赵晋斌. 基于最小功率补偿的动态电压补偿器设计[J]. 供用电, 2020, 37(3): 45-51.
XU Jiongyuan, CHEN Debiao, ZHAO Jinbin. Design of dynamic voltage restorer based on minimum power compensation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 45-51.
- [26] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [27] AHMED H M A, AWAD A S A, AHMED M H, et al. Mitigating voltage-sag and voltage-deviation problems in distribution networks using battery energy storage systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184.
- [28] 张金锋, 崔晓丹, 许剑冰, 等. 基于多用户非合作博弈模型的切负荷策略优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 127-134.
ZHANG Jinfeng, CUI Xiaodan, XU Jianbing, et al. An optimization method of load-shedding strategy based on a multi-user non-cooperative game model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 127-134.
- [29] 王进, 周宇轩, 戴伟, 等. NSGA-II 算法的改进及其在风火机组多目标动态组合优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2): 107-111.
WANG Jin, ZHOU Yuxuan, DAI Wei, et al. Improvement of NSGA-II algorithm and its application to multi-objective dynamic unit commitment optimization with wind-thermal power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(2): 107-111.
- [30] BANAEI M., BUYGI M O, SHEYBANI H R. Supply function Nash equilibrium of joint day-ahead electricity markets and forward contracts[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 133: 104-116.
- [31] SHAO X, ASAEDA H, DONG M, et al. Cooperative inter-domain cache sharing for information-centric networking via a bargaining game approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 6(4): 698-710.

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-03-07

作者简介:

李 艳(1971—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网技术, 电力系统电磁环境与电磁兼容;

张华赢(1981—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量监测与治理技术; E-mail: zhytygx@163.com

吴 显(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电能质量评估与治理技术。

(编辑 姜新丽)