

一种基于 TOPSIS 法的光伏用户群内 用户重要性评估方法

李培强^{1†}, 薛文琦¹, 唐学贤², 王继飞³, 金言³, 范华³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 国网湖南省电力有限公司邵阳供电公司, 湖南邵阳 422000;
3. 国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北张家口 075000)

摘要:同一个配电网区域会存在着多个光伏用户, 组建光伏用户群是管理它们的有效方法之一. 为了进一步促进光伏用户群的稳定与发展, 需要对群内用户进行重要性评估. 本文针对实行内部电价的光伏用户群, 分析运营商的收益本质, 基于合作博弈论提出计算群内用户对运营商收益贡献值的方法. 从用户、运营商和电网的 3 个方面, 定义用户的重要性评估指标, 再基于多准则决策中的逼近理想解排序(TOPSIS)法对光伏用户群内的用户进行重要性评估与排序. 仿真算例验证了该综合评估方法的有效性.

关键词:光伏用户群; 内部电价; 合作博弈; TOPSIS 法; 重要性评估

中图分类号:TM73; F123.9

文献标志码:A

A Method of User Importance Assessment in Photovoltaic User Group Based on TOPSIS Method

LI Peiqiang^{1†}, XUE Wenqi¹, TANG Xuexian², WANG Jifei³, JIN Yan³, FAN Hua³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Shaoyang Power Supply Company, Shaoyang 422000, China;
3. State Grid Jibei Electric Power Company Limited Zhangjiakou Power Supply Company, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: There will be multiple photo voltaic(PV) users in the same distribution network area, and building a PV user group is one of the effective ways to manage them. In order to further promote the stability and development of the PV user group, it is necessary to evaluate the importance of users within the group. This paper analyzes the nature of the operator's revenue for the PV user group that implements the internal electricity price, and proposes a method for calculating the contribution value of the user to the operator's revenue based on the cooperative game theory. From the three aspects of users, operators and power grids, the importance evaluation indicators of users are defined, and then the importance evaluation and ranking of users in the PV user group are carried out based on the TOPSIS method in multi-criteria decision making. Simulation examples verify the effectiveness of the comprehensive evaluation method.

Key words: PV user group; internal electricity price; cooperative game; TOPSIS method; importance assessment

* 收稿日期:2020-6-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677059), National Natural Science Foundation of China(51677059); 国家重点研发计划项目(2018YFB0905304), National Key R & D Program of China(2018YFB0905304); 国网冀北电力有限公司科技项目(SGJBJ00DDJS1800989), Science and Technology of Project of Grid Huabei Electric Power Co. Ltd(SGJBJ00DDJS1800989)

作者简介:李培强(1975—),男,山西定襄人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail:lpqcs@hnu.edu.cn

随着传统化石能源急剧枯竭,全球环境危机不断加重,可持续发展成为当今主题.在具有清洁与可再生特点的新能源中,数量最大的是太阳能^[1].光伏发电能够有效缓解能源紧缺和环境污染^[2].在国家的提倡鼓励下,光伏产业规模化发展迅猛^[3-6].

分布式光伏发电具有靠近用户侧、建设规模灵活、安装简单、适用范围广的特点,是光伏发电重要的应用形式.近些年随着国家能源主管部门出台了一系列政策和光伏发电成本的下降,分布式光伏得到了快速发展^[7].未来,同一个配电网区域往往会存在着多个分布式光伏用户,组建光伏用户群是管理它们有效的方法之一.管理者通过制定合适的集群内部电价,一方面能使集群内的用户获得经济利益,另一方面可以减小向大电网倒送的功率^[8].文献[9]提出了一种基于光伏用户群电能供需比的内部电价模型,降低了群内用户的用电成本并提高群内用户光伏电能的共享量.文献[10]设计了一种基于弹性电价的电力需求响应机制,实现了配电侧高比例光伏用户群的电能高效消纳,提高了光伏群的经济效益,降低了实时发、用电的不平衡电量.文献[11]建立了与系统净负荷相关联的用电成本模型,再基于博弈论提出了针对光伏用户群的需求侧响应模型,此方法能有效地节约用户成本和优化系统负荷特性.文献[12-16]基于集群内部电价与主从博弈设计了光伏用户群的能量管理系统,提高了群体的用电效益,改善了光伏用户群的净负荷特性.现有关于光伏用户群的文献主要研究了用户群的经济运行,少有对群内用户重要性评估方面的研究.但是成立一个稳定繁荣的光伏用户群,需要解决技术上的难点,也需要解决用户贡献的评估等问题^[17].从用户群管理者角度来说,区分出重要的用户并给予激励(一般为经济上的奖励)有利于群体的稳定;从用户角度来说,成为一个重要的用户将会得到激励,这会鼓励用户投资产生更多的电能,并且会在未来一段时间得到收益,这将会促进光伏用户群的发展与完善.光伏用户群拥有合理的重要性评估和奖励制度,也会吸引其它的光伏用户加入到群内来,使得光伏用户群发展壮大.

因此本文针对基于内部电价优化运行的光伏用户群,首先研究了群运营商的收益本质,基于合作博弈论提出了计算群内用户对运营商收益贡献值的方法.其次从用户、运营商和电网三个方面,定义了用户的重要性评估指标,再基于TOPSIS法对光伏用户群内的用户重要性进行评估与排序.

1 光伏用户群的系统结构

光伏用户群的运营框架简图如图1所示,它由多个光伏用户及集群运营商(cluster operator, CO)所构成.所有光伏用户以内部电价与运营商进行交易,运营商再以电网电价(光伏用户与电网直接交易的电价)与电网进行电能交易.

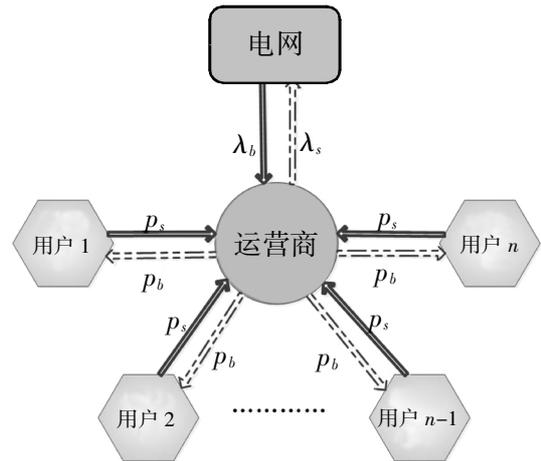


图1 用户、集群运营商和大电网之间的交易关系和价格

Fig.1 Relationship and prices of energy exchanges among prosumers, co and utility grid

作为集群电能交易的主导者,运营商通过设定内部的交易价格来引导用户的用电行为,同时也是所有用户收益与支出的结算中心^[18].它制定集群电价 p_s 与 p_b 、 λ_b 与 λ_s ,并通过高级测量体系(AMI)^[19]与用户侧能量管理系统(user energy management system, UEMS)^[19]进行信息交互,完成电能交易.它以 p_s 收购余电用户多余的电能,以 p_b 向缺电用户出售电能.若集群总体用电大于其光伏产能,运营商以 λ_b 收购大电网电能,若集群整体余电,则以 λ_s 从大电网购电.在此过程中通过差价最大化其自身收益.故 p_s 不低于上网电价 λ_s ,且 p_b 不大于电网电价 λ_b .通过集群运营商实现的共享光伏电量越大,集群运营商的获利就会越大.

而用户跟随主导者集群运营商,依照电价进行需求响应,最大化自身用电效益.通过UEMS,用户能预测自身用电量与光伏发电量,与运营商进行信息交换并根据运营商制定的内部价格对用户的用电行为进行优化决策.光伏用户既可以成为售电用户,也成为购电用户.当光伏发电量大于用户用电量,多余的电能按照内部售电价格 p_s 出售给集群运营商;

当光伏用户发电量小于自身用电量时,用户需要根据内部购电价格 p_b 从运营商购买电量. 集群内所有电能交易均通过运营商实现.

2 光伏用户的收益

把每天光伏用户发电的时间 T 平均分成 m 段, 每段的时间间隔为 $\Delta t = T/m$, $E_i(k)$ 表示用户 i 在第 k 个时段的发电量; $u_i(k)$ 表示用户 i 在第 k 个时段的用电量. 在第 k 个时段, 用户 i 的净功率计算为

$$D_i(k) = E_i(k) - u_i(k) \quad (1)$$

2.1 光伏用户直接与电网交易的收益

当用户与电网直接交易时, 余电用户以电价 λ_s 将多余的电量出售给电网, 缺电用户以电网购电电价 λ_b 从电网购买电量. 余电光伏用户在第 k 时间段的收益由两部分组成: 一部分为自发自用收益; 另一部分为余电上网收益, 可表示为:

$$P_i(k) = [\lambda_b u_i(k) + \lambda_s D_i(k)] \Delta t \quad (2)$$

缺电用户 i 的在第 k 时间段的收益计算为:

$$P_i(k) = \lambda_b E_i(k) \Delta t \quad (3)$$

用户 i 在计算周期 T 内的收益为:

$$P_i = \Delta t \sum_{k=1}^m a_i^k [\lambda_b u_i(k) + \lambda_s D_i(k)] + \Delta t \sum_{k=1}^m (1 - a_i^k) \lambda_b E_i(k) \quad (4)$$

式中: P_i 表示计算周期 T 内光伏用户 i 的收益, 当光伏用户 i 为余电用户时, 收益为自用收益和上网收益; 当光伏用户 i 为缺电用户时, 收益为自用收益.

定义 a_i^k 为

$$a_i^k = \begin{cases} 1, & D_i(k) \geq 0 \\ 0, & D_i(k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

2.2 合作联盟模式下光伏用户的收益

光伏用户群的合作联盟模型^[20]: 多个光伏用户形成合作联盟, 实现余电用户与缺电用户的电能共享, 相对比光伏用户与电网分别交易, 联盟整体的收益增加; 再基于 Shapley 值对联盟收益进行公正、效率分配.

n 个光伏用户形成合作联盟 S 后, 可以看做一个大微电网, 整体与电网交易, 参考式(4)计算合作联盟 S 在一个计算周期的收益为:

$$v(s) = \Delta t \sum_{k=1}^m \sum_{i \in s} b_k [\lambda_b u_i(k) + \lambda_s D_i(k)] + \Delta t \sum_{k=1}^m \sum_{i \in s} (1 - b_k) \lambda_b E_i(k) \quad (6)$$

定义 b_k 为

$$b_k = \begin{cases} 1, & \sum_{i \in s} D_i(k) \geq 0 \\ 0, & \sum_{i \in s} D_i(k) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

相对于各光伏用户与电网直接交易模型, 合作联盟模型在计算周期 T 内增加的总收益 Δv 为

$$\Delta v = \sum_{k=1}^m \min \left\{ \sum_{i \in P} D_i(k), - \sum_{j \in Q} D_j(k) \right\} (\lambda_b - \lambda_s) \quad (8)$$

式中: P 、 Q 分别代表余电用户与缺电用户的集合.

光伏用户群共有 n 个光伏用户, 基于 Shapley 值对联盟收益分配, 对于任意一个光伏用户 i , 它在一个周期 T 内的收益计算公式为:

$$v_i = \sum_{s(i \in s)} \omega(|s|) [v(s) - v(s/i)], i=1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$\omega(|s|) = \frac{(n-|s|)! (|s|-1)!}{n!} \quad (10)$$

式中: s_i 是联盟中包含微电网 i 的所有子集, $|s|$ 是子集 s 中的用户个数; $w(|s|)$ 是加权因子; $v(s)$ 是集合 s 产生的收益; $v(s/i)$ 表示集合 s 中除去微电网 i 后, 剩下的微电网形成合作联盟所获得的总收益.

2.3 内部电价模式下光伏用户和 CO 的收益

当光伏用户是光伏用户群的一员, 光伏用户在第 k 时段以内部售电电价 $p_s(k)$ 和购电电价 $p_b(k)$ 与运营商进行交易. 余电用户收益为:

$$P_i^c(k) = [\lambda_b u_i(k) + p_s(k) D_i(k)] \Delta t \quad (11)$$

在内部电价下, 缺电用户在第 k 时间段的收益由两部分组成, 一部分是自发自用收益; 另一部分为购电节省的成本^[21], 用户收益为:

$$P_i^c(k) = \lambda_b E_i(k) \Delta t + [p_b(k) - \lambda_b] D_i(k) \Delta t \quad (12)$$

用户 i 在计算周期 T 内的收益为

$$P_i^c = \Delta t \sum_{k=1}^m a_i^k [\lambda_b u_i(k) + p_s(k) D_i(k)] + \Delta t \sum_{k=1}^m (1 - a_i^k) \{ \lambda_b E_i(k) + [p_b(k) - \lambda_b] D_i(k) \} \quad (13)$$

CO 在计算周期 T 内的收益为:

$$I = \sum_{k=1}^m \min \left\{ \sum_{i \in P} D_i(k), - \sum_{j \in Q} D_j(k) \right\} [p_b(k) - p_s(k)] \quad (14)$$

3 群内用户重要性评估与排序

本文评估群内用户重要性评估与排序分成3步:1)定义评估指标;2)标准优先级排序与权重计算;3)对用户进行重要性评估与排序.

3.1 定义评估标准

从用户角度看,光伏用户的主要收益是自发自用而节省的用电费用,当用户有余电分享给群内用户使用,可以降低群内购电电价,节约缺电用户用电成本,而且用户更乐意加入余电相对充裕的光伏用户群,所以分享电能越多的用户会得到其他用户的喜爱.从运营商的角度来说,运营商的收益跟用户群中的互用电量有关,余电与缺电用户对它的收益都有贡献,用户对它的收益贡献值越大也就越重要.从电网角度来看,整个光伏用户群的总装机容量越大越会得到电网的重视,而且用户装机容量越大,提供电能的潜力也越大,因此用户的装机容量也是评估用户重要性需考虑的因素.因此定义评估用户重要性评估标准如下:a)分享光伏电量;b)对运营商收益的贡献;c)用户的装机容量.

3.1.1 分享的光伏电量计算

余电用户分享的电能行为是运营商和其他缺电用户获利的根本原因,分享电能越多的用户越重要.用户*i*在一个计算周期*T*内分享的电量为:

$$H_i = \Delta t \sum_{k=1}^m a_i D_i(k) \quad (15)$$

3.1.2 用户对运营商收益的贡献计算

在运营商主导下的光伏用户群,实质是运营商把光伏用户联盟起来再与电网交易,这等同于联盟博弈,只是增加的联盟收益大部分被运营商获得,其他光伏用户获得了剩下了一部分增加的收益.用户*i*在联盟博弈下的收益减去在集群中的收益就是用户*i*对运营商收益的贡献值,用户*i*在一个计算周期内的贡献值计算如下:

$$C_i = v_i - P_i \quad (16)$$

3.1.3 用户的装机容量

整个光伏群的装机容量越大,电网对这个光伏用户群就越重视,所以对群内用户重要性排序,用户*i*的装机容量*F_i*也需得到考虑.

3.2 评价标准的优先级与权重计算

用户分享的电能越多,对用户和运营商都是有利,可以节约用户购电成本和通过降低CO的购电

成本而增大它的收益,而且应鼓励用户多分享电能,因此本文把评估指标a排在第1位.指标b不但可以反映余电用户对CO的收益,而且可以表明缺电用户对CO的收益贡献,所以把评估指标b排第2位,剩下的评估指标c排第3位.所以排序结果如下:1)分享光伏电能;2)对运营商收益的贡献;3)用户的装机容量.

评估指标的排名越靠前,权重系数越大.根据“排名权重”(weights from ranks)方法计算评价标准的权重系数^[22].

$$\lambda_j = \frac{f-j+1}{\sum_{j=1}^f (f-j+1)} \quad (17)$$

式中:*f*代表评价标准的总数目, λ_j 表示第*j*条评价标准的权重系数.

3.3 基于TOPSIS法的用户重要性评估与排序

TOPSIS评价法的基本原理(逼近于理想解的思路):在基于归一化后的原始矩阵中,找出有限方案中的最优方案和最劣方案(分别用最优向量和最劣向量表示),然后分别计算出评价对象与最优方案和最劣方案间的距离,获得该评价对象与最优方案的相对接近程度,以此作为评价优劣的依据^[23-24].

本文定义用户*i*在第*j*(*j*=1,2,3)条标准下的取值为:

$$y_{ij} = \begin{cases} H_i, & j=1 \\ C_i, & j=2 \\ F_i, & j=3 \end{cases} \quad (18)$$

通过线性变换对用户的数据*y_{ij}*进行数据预处理,得到规范决策矩阵*Z*

$$z_{ij} = y_{ij} / y_j^{\max} \quad (19)$$

式中: y_j^{\max} 表示所有用户中对应第*j*条标准取得的最大值.

规范决策矩阵*Z*乘以权重系数得到加权规范阵*X*为:

$$x_{ij} = \lambda_j \cdot z_{ij} \quad (20)$$

定义理想解*x_j^{*}*和负理想解*x_j⁰*为:

$$x_j^* = \max_i (x_{ij}) \quad (21)$$

$$x_j^0 = \min_i (x_{ij}) \quad (22)$$

计算用户*i*到理想用户与负理想用户的距离:

$$d_j^* = \sqrt{\sum_{j=1}^f (x_{ij} - x_j^*)^2} \quad (23)$$

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^f (x_{ij} - x_j^0)^2} \quad (24)$$

计算用户与光伏群内理想用户的接近程度.

$$C_i^* = \frac{d_i^0}{d_i^0 + d_i^*} \quad (25)$$

通过 C_i^* 由大到小排列光伏用户的重要程度.

4 算例分析

4.1 基础数据

在一个区域内,5 个装有光伏发电系统的用户组成光伏用户群,它们在 CO 的主导下运行.5 个用户都安装了光伏发电系统,它们典型日光伏输出电量曲线、用户的日负荷消耗曲线如图 2、图 3 所示.根据中国大部分地区的分布式光伏上网电价,参数 λ_s 取燃煤机组标杆上网电价 0.4 元/(kW·h), λ_c 则采取商业电价,取 1.0 元/(kW·h).

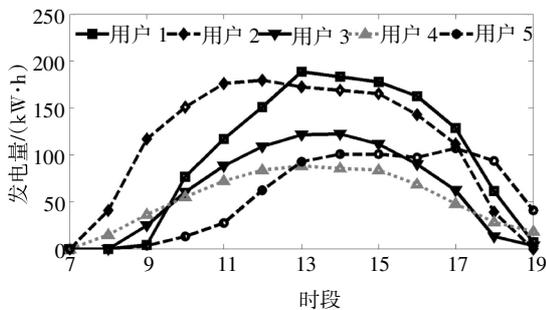


图 2 各时间段用户的发电量

Fig.2 Prosumer' photovoltaic output power in each period

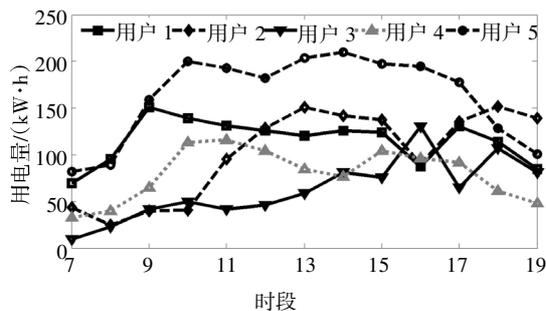


图 3 各时间段用户的用电量

Fig.3 Prosumer' power consumption in each period

光伏用户群各用户的装机容量如表 1 所示.

表 1 光伏用户的装机容量

Tab.1 PV user installed capacity

用户编号	1	2	3	4	5
装机容量(kW)	228	216	146	106	120

4.2 用户重要性评估与排序

用户计算周期 T 内分享的光伏电量如表 2 所示.

表 2 光伏用户分享的电量

Tab.2 The amount of electricity shared by PV users

用户编号	1	2	3	4	5
电量(kW·h)	280.6	466.4	260.2	12.7	0

用户在合作联盟模式下和内部电价模式下计算周期 T 内的收益分别如表 3 和表 4 所示.

表 3 合作联盟模式下的收益

Tab.3 Benefits in the cooperative alliance model

用户编号	1	2	3	4	5
收益/元	1180.8	1349.3	728.73	707.91	943.01

表 4 内部电价模式下的收益

Tab.4 Benefits in the internal electricity price model

用户编号	1	2	3	4	5
收益/元	1 107.9	1 216.9	661.08	675.3	775.6

基于表 3 和表 4 的数据,根据式(16)计算得到用户对运营商的收益如表 5 所示.

表 5 光伏用户对运营商收益的贡献

Tab.5 PV users' contribution to CO revenue

用户编号	1	2	3	4	5
收益贡献/元	72.9	132.4	67.65	32.61	167.41

实行内部电价时,CO 在计算周期 T 内的收益 $I=473.07$ 元,用户对 CO 收益贡献之和与 CO 收益值相等,验证了贡献值计算的正确性.

根据表 1 表 3 的数据和式(18)(19)计算得到规范决策矩阵 Z :

$$Z = \begin{bmatrix} 0.6016 & 0.4355 & 1 \\ 1 & 0.7909 & 0.9474 \\ 0.5579 & 0.4044 & 0.6404 \\ 0.0272 & 0.1947 & 0.4649 \\ 0 & 1 & 0.5263 \end{bmatrix}$$

根据式(17)计算评价标准的权重系数分别为 $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.3333, \lambda_3 = 0.1667$. 根据式(20)计算得到加权规范矩阵 X .

$$X = \begin{bmatrix} 0.3008 & 0.1452 & 0.1667 \\ 0.5 & 0.2636 & 0.1579 \\ 0.2789 & 0.1348 & 0.1068 \\ 0.0136 & 0.0649 & 0.0775 \\ 0 & 0.3333 & 0.0877 \end{bmatrix}$$

通过式(21)~(25)计算得到用户与光伏群内理想用户的接近程度的值如表6所示。

表6 用户与光伏群内理想用户的接近程度

Tab.6 User proximity to ideal users in the PV cluster

用户编号	1	2	3	4	5
接近程度	0.541 7	0.885 6	0.488 1	0.023 6	0.346 7

4.3 结果分析

根据表1、表2和表5可知,用户1的装机容量最大,用户4的装机容量最小.用户5对运营商的收益贡献值最大,用户4对运营商收益的贡献最小.用户2分享的电能最多,用户5分享电能最少且为0,它在每个时刻都需要向CO购买电量.现有文献没有对光伏用户群中用户重要性评估与排序进行研究,因此本文假设根据用户的单一属性进行重要性评估与排序.光伏用户群是在运营商的管理下进行运行,假设运营商从自身的收益出发,根据用户对自己收益的贡献值大小来进行排名.利用本文所提综合评估方法与它进行对比,用户排名结果对比如图4所示.

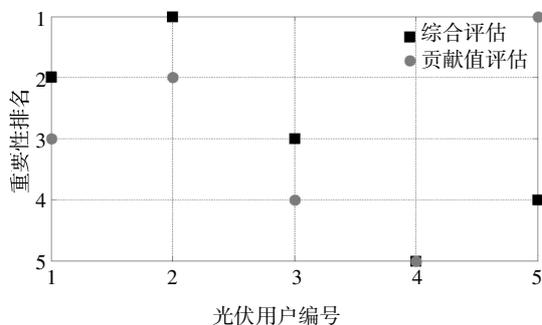


图4 用户重要性排名

Fig.4 User importance ranking

从图4可知,用户4在两种评估方法下排名结果相同.其它用户在两种评估方法下排名不同,用户5在根据贡献值评估方法下排名第一,但是在综合评估方法中排名第四,两种评估方法下的排名结果相差很大.对用户5用电行为进行分析,它在光伏用户群一天的运行过程中没有分享电能给其它用户能量,从成立光伏用户群的初衷来看,鼓励用户电能共享,它的表现较差.在综合评估方法中,鼓励用户分享电能,也考虑用户消纳多余光伏电能的能力和装机容量,因此综合评估下的排名更加合理和公平.

5 结论

本文针对基于内部电价优化运行的光伏用户群,分析了光伏用户群的运营商获利本质,基于合作博弈论提出了计算群内用户对运营商收益贡献值的方法.从用户、运营商和电网三个方面,定义了用户的重要性评估指标.然后基于多准则决策中TOPSIS法提出了适用于基于内部电价优化运行的光伏用户群内用户重要性评估与排序方法,利用实际数据对包含5个光伏用户的光伏用户群进行重要性评估与排序.通过案例分析,验证了所提方法的有效性和合理性.

参考文献

- [1] 朱成章. 中国能源的未来[J]. 能源, 2019(2): 76—80.
ZHU C Z. The future of China's energy[J]. Energy, 2019(2): 76—80. (In Chinese)
- [2] 张伯泉, 杨宜民. 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 65—69.
ZHANG B Q, YANG Y M. Current status and development trend of wind and solar photovoltaic power generation [J]. Electric Power, 2006, 39(6): 65—69. (In Chinese)
- [3] 太阳能发展“十三五”规划[EB/OL]. 国家能源局, 2016—12—08. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/h20161216_23_58.htm. (In Chinese)
- [4] 薛文琦, 李培强, 王继飞, 等. 基于区块链的户用光伏多边交易平台设计与实现[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1—10 [2020-06-27]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000459>.
XUE W Q, LI P Q, WANG J F, et al. Design and Implementation of Blockchain-based Household Photovoltaic Multilateral Trading Platform [J/OL]. Journal of Electric Power System and Automation: 1—10 [2020-06-27]. (In Chinese)
- [5] 吴兴全, 李秋鹏, 乔梁, 等. 分布式光伏发电定价方法探[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(5): 10—14.
WU X Q, LI Q P, QIAO L, et al. Discussion on pricing methods of distributed photovoltaics [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(5): 10—14. (In Chinese)
- [6] 孙波, 廖强强, 刘宇, 等. 分布式光伏储能电池混合系统的经济性分析[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 102—107.
SUN B, LIAO Q Q, LIU Y, et al. Economic analysis of hybrid system containing distributed photovoltaic power and battery stored energy [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 102—107. (In Chinese)
- [7] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26—32.
CHEN W, AI X, WU T, et al. Influence of grid-connected photo-

- voltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26—32. (In Chinese)
- [8] 刘念, 王程, 雷金勇. 市场模式下光伏用户群的电能共享与需求响应模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 49—55.
LIU N, WANG C, LEI J Y. Power energy sharing and demand response model for photovoltaic prosumer cluster under market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 49—55. (In Chinese)
- [9] NIAN L, CHENG W, XIN B L, *et al.* Multi-party energy management for clusters of roof leased PV prosumers: A game theoretical approach[J]. Energies, 2016, 9(7): 536.
- [10] 吉斌, 莫峻, 谭建成. 高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3315—3322.
JI B, MO J, TAN J C. Design of Power Demand Response Mechanism for High Proportion of Photovoltaic Prosumer [J]. Power Systems Technology, 2018, 42(10): 3315—3322. (In Chinese)
- [11] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 自动需求响应模式下光伏用户群的优化运行模型 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3422—3432.
MA L, LIU N, ZHANG J H, *et al.* Optimal operation model of user group with photovoltaic in the mode of automatic demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2016. (In Chinese)
- [12] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, *et al.* Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(4): 2487—2498.
- [13] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 41—48.
MA L, LIU N, ZHANG J, *et al.* Distributed energy management of community energy internet based on leader-followers game [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 41—48. (In Chinese)
- [14] MA L, LIU N, ZHANG J H, *et al.* Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: A game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930—1942.
- [15] LIU N, YU X, WANG C, *et al.* Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: A stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(3): 1088—1098.
- [16] 王程, 刘念, 成敏杨, 等. 基于 Stackelberg 博弈的光伏用户群优化定价模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 146—153.
WANG C, LIU N, CHENG M Y, *et al.* Stackelberg game based optimal pricing model for photovoltaic prosumer cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 146—153. (In Chinese)
- [17] RATHNAYAKA A J D, POTDAR V M, KURUPPU S J. Design of smart grid prosumer communities via online social networking communities[J]. Int J Infonom, 2012(5): 544—556.
- [18] 李政萱. 主动配电网下多种博弈关系建模分析[D]. 华北电力大学电气与电子工程学院, 2017.
LI M X. Modeling and analysis of multi-game relationship under active distribution network [D]. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2017. (In Chinese)
- [19] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149—155.
HU Y. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149—155. (In Chinese)
- [20] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903—1910.
LIU N, ZHAO J, WANG J, *et al.* A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903—1910. (In Chinese)
- [21] RATHNAYAKA A J D, POTDAR V M, DILLON T S, *et al.* A methodology to find influential prosumers in prosumer community groups [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 706—713.
- [22] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119—121
YU X F, FU D. Summary of multi-index comprehensive evaluation methods [J]. Statistics and Decision, 2004 (11): 119—121. (In Chinese)
- [23] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YUE C Y. Decision theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [24] 蒋玮, 汪梁, 王晓东, 等. 面向用电双向互动服务的信息通信模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 75—81.
JIANG W, WANG L, WANG X D, *et al.* An information communication model for two-way interactive service of power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 75—81. (In Chinese)
- [25] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 面向不同投资主体的分布式光伏运营策略研究[J]. 电网技术, 2017, 40(1): 101—106.
XUE J H, YE J L, TAO Q, *et al.* Operating strategy of distributed PV system for different investors [J]. Power System Technology, 2017, 40(1): 101—106. (In Chinese)