

基于 Stachelberg 博弈的光伏增值服务定价模型

贾楚蕴, 李华强

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着新能源技术的不断成熟, 新型能源在未来能源结构中的比例将会越来越大, 发展前景良好。在售电侧进一步开放的背景下, 为增强客户粘性, 争取潜在客户, 电网企业提出了光伏增值服务的概念。将光伏售卖商、电网公司以及光伏增值服务消费者作为研究的主体, 采用 Stackelberg 博弈法建立了包含 3 个主要参与方在内的关于光伏增值服务系统的双层定价模型, 提出了基于最佳收益的光伏增值服务定价方法。同时, 对河南光伏园区的实际情况进行了研究分析, 建立了该地区“自发自用, 余电上网”的 Stackelberg 双层博弈定价模型, 确定了该模式下的最优定价。最后, 运用两经济性评价指标对该地区采用“自发自用、余电上网”服务模式下的经济效益进行了评价和总结。结果表明, 用户在购买此种光伏增值服务后, 不仅可以享受光伏发电这种清洁能源, 同时通过向电网出售余电还节约了购电成本, 逐渐收回成本甚至盈利。

关键词: 园区屋顶光伏; 光伏增值服务; 运营模式分析; 服务定价; Stackelberg 博弈模型; 经济效益分析

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0052-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.011

PV Value-added Service Pricing Model Based on Stand-alone Stachelberg Game

Jia Chuyun, Li Huaqiang

(Institute of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: With the development of new energy technology, the new-type energy will occupy increasingly larger proportion of the future energy structure, and the development prospect is bright. Under the policy background of further opening the sales side, the concept of photovoltaic (PV) value-added service is proposed to enhance customer stickiness and gain potential customer of power grid enterprises. Using Stackelberg game method, the pricing model of double PV value-added service system is established including three main game participants, that is, the PV seller, grid company and PV value-added service consumers as the research subjects, and the pricing method of PV value-added services is put forward based on the best benefits. At the same time, the actual situation of Henan PV park is studied and analyzed. The Stackelberg double-deck game pricing model for "spontaneous self-use and surplus PV power selling to grid" in the region is established, and the optimal pricing in this mode is determined. Finally, two economic evaluation indexes are used to evaluate and summarize the economic benefits of "spontaneous self-use and surplus PV power selling to grid" service mode. The results show that the users after buying the PV value-added services, not only can enjoy the clean energy of PV power generation, but also save electricity purchasing cost, and by selling surplus power to grid, gradually recover costs or even make a profit.

Key words: roof photovoltaic in the park; PV value-added services; operation mode analysis; service pricing; Stackelberg game model; economic benefit analysis

0 引言

太阳能是绿色可再生能源, 对太阳能光伏发电的推广, 是新能源应用的重要举措。光伏发电对于一些耗能较大的用户而言, 既可以通过发电来获得相应的收益, 又可以解决用电高峰期遭遇的错峰限

电问题。近年以来, 中国分布式光伏发电得到了迅猛的发展, 基于建筑屋顶发展分布式光伏发电更是一大热点。

随着售电侧逐渐放开, 电网企业内部业务分化为管制性业务和非管制性业务。通过开展优质增值服务, 可以帮助电网企业提升非管制型业务板块的竞争力。增值服务本质是一种服务, 而不是实物产

品不能单纯依靠“成本+收益”的概念来对其进行定价,特别是光伏增值服务,具有博弈的特点,需要考虑市场各参与方相互作用的因素,因此需要在定价过程中引入博弈论的有关方法。

目前,国内外众多学者对工业屋顶光伏系统及博弈论定价方法进行了研究。例如文献[1]在对屋顶光伏发电系统成本效益进行分析之后,提出了屋顶光伏系统的不同运营模式,并对不同运营模式的经济效益进行了评价。文献[2]研究了居民用户和企业用户的分布式光伏与储能电池混合系统的最优运营模式,分析了不同运营模式下的经济性结果,表明光储一体的运营模式对居民户具有更高的经济效益。文献[3-4]对民用负荷系统的分布式光储系统进行了研究,探讨了影响民用负荷系统光伏和储能设备容量配置的响应激励机制,同时对屋顶太阳能光伏潜力进行了评估及研究。而国内外对博弈论定价的应用也存在于各大领域,例如文献[5]针对实时电价定价问题提出了基于双层博弈的实时定价策略,有效地减少了区域总用电峰均比,起到削峰填谷的作用。文献[6]针对城市公共交通定价的局限性,提出了基于合作博弈概念的双层模型,从而制定出更加具有合理性、科学性、实用性的定价策略。综上所述,多数文献主要从屋顶光伏的应用前景以及居民、工业光伏的运营模式上进行了研究,而国内缺乏将光伏应用与电网公司增值服务相结合进行分析的研究,对增值服务定价的讨论仍处于起步阶段。

考虑到增值服务本身的特殊性,引入了博弈的概念来对增值服务进行分析。将光伏售卖商、电网公司以及光伏增值服务消费者作为研究的主体,采用 Stackelberg 博弈法建立了基于 3 个主体的光伏增值服务系统的双层定价模型,对最佳收益下的光伏增值服务的定价方法进行了分析。Stackelberg 博弈法是一种建立产量领导模型,分析存在不同行动次序对象的动态博弈法。而光伏板售卖商、电网企业及增值服务消费者的行为都受前者行为的影响,因此符合 Stackelberg 博弈法的研究条件。

1 工业园区屋顶光伏年发电量及增值服务分析

1.1 屋顶光伏发电量的计算方式

根据中国气象局 2017 年《中国风能太阳能资源

年景公报》中可以得到全国各地 2017 年的地表水平面平均总辐射量的分布。2017 年中国太阳能资源分布见表 1。由表中可以看出 2017 年,中国东北西部、华北北部、西北和西南大部年水平面总辐射量超过 1400 kWh/m²,其中新疆东部、西藏中西部、青海大部、甘肃西部、内蒙古西部等地区年水平面总辐射量超过 1750 kWh/m²,太阳能资源最丰富;新疆大部、内蒙古大部、甘肃中东部、宁夏、陕西山西河北北部、青海东部南部、西藏东部、四川西部、云南大部及海南等地区年水平面总辐射量 1400~1750 kWh/m²,太阳能资源很丰富;东北大部、华北南部、黄淮、江淮、江汉、江南及华南大部等地区年水平面总辐射量 1050~1400 kWh/m²,太阳能资源丰富;四川东部、重庆、贵州中东部、湖南及湖北西部地区年水平面总辐射量在 1050 kWh/m²以下。

表 1 2017 年中国太阳能资源分布

地 区	年水平面总辐射量 /(kWh·m ⁻²)
新疆东部、西藏中西部、青海大部、甘肃西部、内蒙古西部等	>1750
新疆大部、内蒙古大部、甘肃中东部、宁夏、陕西山西河北北部、青海东部南部、西藏东部、四川西部、云南大部及海南等	>1400~≤1750
东北大部、华北南部、黄淮、江淮、江汉、江南及华南大部	>1050~≤1400
四川东部、重庆、贵州中东部、湖南及湖北西部	≤1050

由文献[5]可知,屋顶光伏发电系统的发电量不仅与太阳辐射强度大小有关,还与系统的装机容量有着直接的联系。光伏系统的装机容量越大意味着对太阳能的利用率越大,从而使光伏系统的发电量增大,给用户带来更大的效益。根据光伏发电系统的装机容量及光伏发电的年日照峰值小时数来对发电量进行计算。光伏发电系统年发电量由式(1)计算得出:

$$Q = T_s \times P \times \eta \times (1 - D)^{n-1} \quad (1)$$

式中: T_s 为光伏系统年满负荷日照小时数; P 为屋顶光伏发电系统的装机容量, kW; D 为太阳能光伏发电系统的平均年衰减率; η 为光伏发电系统综合考虑各影响因子后的综合效率,包括光伏方阵倾角修正因子、逆变器转换损耗因子、线路及变压器损耗因子等,分别表示为 η_1 、 η_2 和 η_3 。

因此,光伏发电系统的综合效率为

$$\eta = (1 - \eta_1) \times (1 - \eta_2) \times (1 - \eta_3) \quad (2)$$

1.2 光伏增值服务的基本模式

增值服务的参与方包括光伏设备售卖商、电网公司、光伏增值服务消费者以及政府机构,增值服务参与者及模式如图 1 所示。

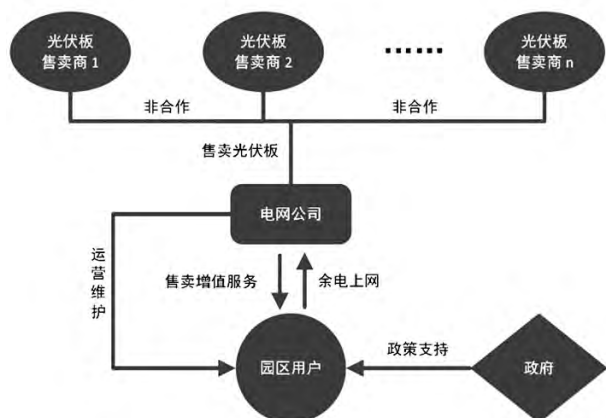


图 1 增值服务参与者及模式

光伏设备售卖商: 将光伏组件提供给电网公司获取一定收益。

电网公司: 为消费者提供完整的包括安装、运营、维护在内的光伏增值配套服务, 从而向消费者收取相应费用。同时电网公司向消费者购买余电, 总收益为售卖增值服务所得减去余电上网的购电成本。

消费者: 在购买服务后, 不仅可以节约购电成本, 还可以向电网出售余电来获得收益。

政府: 作为整套增值服务的调配者, 为整套服务提供政策支持以及资金补助, 从而获得环境效益以及税收收入的增加。

整个增值服务设计的目的是将经济效益最大化, 降低运行成本, 符合博弈论的思想。博弈的最终目的是针对系统中的任意不确定性, 使系统运行的成本最小化。因此经济效益最大化问题也可转化为各参与方之间的最优定价问题, 故下面采用 Stack-berg 博弈来对问题进行求解。

2 效益最大化问题以及 Stackelberg 双层博弈模型

由于政府在整套系统中起到调控的作用, 因此重在考虑由光伏售卖方、电网及光伏消费者三方组成的博弈系统, 利用博弈论将增值服务设计问题转

换为基于光伏增值服务各级定价问题, 从而对系统的经济效益问题进行研究。

步骤 1: 市场参与者分析。

1) 光伏板供应商: 为电网公司提供各类不同的光伏板。

2) 光伏增值服务消费者(即园区的各类用户): 对电网提供的光伏增值服务进行购买。

3) 光伏增值服务提供者(即电网企业): 为消费者提供各种服务。

步骤 2: 参数设定。

设 p 为光伏板的销售价格, 市场期望销售量函数是由潜在市场需求和随机波动因素决定的, 用函数 $y(p)$ 表示。由文献[7]知市场期望销售量函数一般可分为两种形式: 线性期望函数以及固定弹性系数期望函数。此处由于光伏增值服务是新型的产品类型, 故采用线性期望函数形式。设 q 为销售量, a 为光伏板增值服务潜在的市场规模, 即可等价于当地的光伏发电量, b 为关于光伏板增值服务销售价格的价格弹性因子, 即销售量随销售价格的变化率, 则有

$$y(p) = q = a - bp \quad (3)$$

步骤 3: 电网公司售卖光伏增值服务层子模型建立。

在时间段 $[t, t+1]$ 中, 电网公司想要最大化自己的利益, 需要调整光伏增值服务的价格, 考虑消费者的价格敏感度, 结合购买欲望, 在销售量和销售价格之间寻找平衡。则在时间段 t 中获得的光伏增值服务收益可表示为

$$\Pi_r = (p_r - w + c_0) \times q_r \quad (4)$$

$$q_r = a - b \times p_r \quad (5)$$

$$c_0 = p_r \times \lambda - c_g \quad (6)$$

式中: q_r 和 p_r 分别为 r 光伏板售卖商下的光伏板销售价格及销售量; w 为光伏板的批发价格; c_0 为光伏维护服务每年所得收入; λ 为光伏增值服务消费者每年的光伏维护支出占增值服务售价的比例; c_g 为电网公司自身提供光伏维护服务所支出的成本。在此情形下电网的效益最优问题可以表示为

$$\max \Pi_r = [p_r \times (1 + \lambda) - w - c_g] \times (a - b \times p_r) \quad (7)$$

根据文献[8]求解:

$$\frac{d\Pi_r}{dp_r} = 0 \quad (8)$$

式中 μ 考虑为定值。由此可得到电网提供的增值服务价格的最优解。

步骤 4: 光伏增值服务消费者层子模型建立。

采用自发自用余电上网的模式, 等同于分布式能源, 根据规定全国范围内自 2018 年 1 月 1 日以后投运的、采用“自发自用、余量上网”模式的分布式光伏发电项目, 补贴标准为 0.37 元/kWh。在时间段 $[t, t+1]$ 中, 采用此种运营模式时, 上网的电量为光伏板发电量减去消费者实际的用电量。设 Q 为光伏发电系统总发电量, Q_0 为消费者实际用电量, 根据政策设光伏发电系统每千瓦时的补贴为 h , 该地区消费者售卖回电网的价格为 h_1 , 当地市电基准价格为 j , 则当 $Q - Q_0 \geq 0$ 时, 此种运营模式的增值服务中消费者可以获得的净收益为

$$\Pi_l = Q \times h + Q_0 \times j + (Q - Q_0) \times h_1 - p_r \times (q_1 + \lambda) \quad (9)$$

若 $Q - Q_0 < 0$ 则有

$$\Pi_l = Q_0 \times j - p_r \times (q_1 + \lambda) \quad (10)$$

3 博弈模型数值算例分析

3.1 算例描述

为了更好地体现光伏增值服务的效益, 在基于以上博弈论模型的理论分析结果上, 对两种增值服务模式分别设置算例进行分析, 以便更好地表现两种模式的经济效益以及差异性。这里选取河南地区作为算例分析的地点。因为河南地区在太阳能辐射量分级中处于第 3 级, 即辐射量处于中等的地区, 具有一定普适性。

光伏板售卖方层博弈模型计算: 首先, 对博弈论各层价格进行分析, 由式(1)可以对河南地区的年发电量进行计算。由统计数据知, 河南地区的年辐射量约为 5850 MJ/m^2 , 年日照小时数在 1050 ~ 1400 之间, 这里选取年日照小时数为 1200。考虑到多数消费者都采用固定支架的安装方式, 所以由表 2 列出的年光照小时数和光伏板满负荷光照小时数的关系可知河南地区的满负荷发电时间为 $T_s = 900 \text{ h}$ 。

表 2 年日照时间与满负荷光照时间

年日照小时数/h	1200	1600	2000	2400	2600
固定支架安装光伏板 满负荷光照时间/h	900	1028	1120	1296	1368

对于一般的园区用户而言, 3570 m^2 的厂房足

够安装 250 kW 的光伏发电系统, 因而设定 $P = 250 \text{ kW}$ 。由光伏板的参数可以知道每块光伏板的最大功率为 300 W, 则此处设定平均输出功率为 100 W。故此工厂可以配备光伏板 2500 块, 潜在市场规模为 2500。

光伏发电系统周期约为 25 年, 而光伏发电系统的衰减率为 0.55%, 各影响因子作用效率如表 3 所示。故系统的综合效率为 89.4%, 从而可以得到光伏发电系统的年发电量为

$$Q = 900 \times 250 \times 87.6\% \times (1 - 0.55\%)^{n-1} \text{ kWh} \quad (11)$$

表 3 各影响因子作用效率

系数	系数名称	对应损失率/%
η_1	线路损失	≈ 4
η_2	逆变器损耗	≈ 5
η_3	失配损耗	≈ 4

由式(11)可得出光伏发电系统年出力情况如图 2 所示。

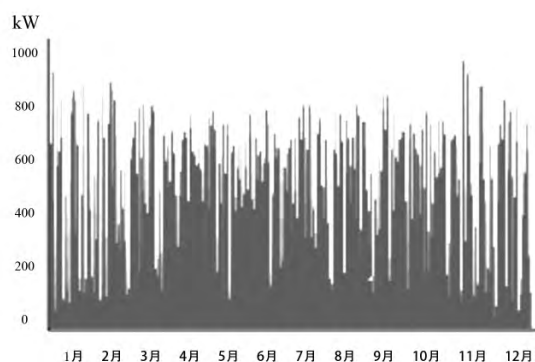


图 2 光伏系统出力

目前光伏组件的市场平均价格为 0.3 美元/W, 根据实际市场情况这里令每块光伏组件的购买成本为 570 元, 故有 $w = 570$, 同时设定 $a = 2500$, $b = 0.8$ 。

3.2 电网层博弈模型计算

由电网层博弈模型可知, 电网所获得的的光伏板增值服务收益为

$$\Pi_r = [p_r \times (1 + \lambda) - w - c_g] \times (a - b \times p_r) \quad (12)$$

式中: λ 为光伏增值消费者每年的光伏维护支出占增值服务售价的比例, 一般取值为 1% ~ 3%, 这里取 3%。而电网公司自身提供光伏维护服务所支出的成本为光伏板批发价的 1% ~ 3%, 这里同样取 3%。故有 $c_g = w \times 3\%$ 。由 $a = 2500$, $b = 0.8$ 可知, 此情况下电网效益的最优解为

$$\max \Pi_r = \max(-0.824p_r^2 + 3\,348.68p_r - 2\,417\,750) \quad (13)$$

由 $d\Pi_r/dp_r = 0$ 可得,电压增值服务的最优解为 $p_r = 2\,031.97$ 。

故获得最大收益的电网公司增值服务售价为 2 031.97 元。

3.3 消费者层博弈模型计算

由参考文献[9-10]可知,考虑光伏增值服务的主要运营模式为自发自用余电上网模式,等同于分布式能源的应用。当系统的发电量大于用户的用电量时,可以由系统向电网输电^[11]。而光伏发电时间在 7:00—17:00,与园区办公及生产时间吻合,光伏发电利用率高,90%的光伏发电量可以被有效利用,10%的光伏发电量上网外送。

根据规定全国范围内采用此种分布式能源光伏发电模式的项目补贴为 0.42 元/kWh,补贴时间为项目建成后 20 年。河南省作为第三类资源区光伏项目的上网电价为 1 元/kWh,河南省电费为 0.61 元/kWh。

因而在时间段 $[t, t+1]$ 中,采用“自发自用、余电上网”模式时,光伏增值服务消费者每年可以节约的电费为光伏板年发电量 $\times 90\% \times (0.61 + 0.42)$,而通过余电上网获得的收益为光伏板年发电量 $\times 10\% \times (1 + 0.42)$ 。

从而得消费者购买光伏增值服务的初期投资成本为

$$C_i = p_r \times q_r = p_r \times (a - b \times p_r) = 1\,776\,803.34 \text{ 元} \quad (14)$$

而光伏消费者在此种运营模式下考虑光伏项目维护费用情况时每年的净收益为

$$\Pi_i = 210\,699.9 \times 0.9945^{n-1} - 38\,351.45 \quad (15)$$

3.4 光伏增值服务采用“自发自用、余电上网”模式下的经济效益分析

经济效益评价指标是反应此增值服务的模式是否具有投资的意义^[12]。净现金流量是现金流量表中的一个指标,是指一定时期内,现金及现金等价物的流入(收入)减去流出(支出)的余额(净收入或净支出),反映了企业本期内净增加或净减少的现金及现金等价数额。具体计算公式为

建设期某年净现金流量 = - 该年发生的原始投资

经营期某年净现金流量 = (运营收入 - 相关现金流出 - 折旧) $\times (1 - \text{税率})$ + 折旧

此用户购买光伏增值服务的初期总投资为 1 776 803.34 元,则在此模式下,结合上面消费者的年收益及投资总成本,该光伏增值服务后消费者的年净现金流量如表 3 所示。

表 3 净现金流量

年份	初期投资/元	年收益/元	净现金流量/元
0	1 776 803.34	0	-1 776 803.340
1	0	172 348.450	172 348.450
2	0	171 189.601	171 189.601
3	0	170 037.125	170 037.125
4	0	168 890.988	168 890.988
5	0	167 751.154	167 751.154
6	0	166 617.590	166 617.590
7	0	165 490.260	165 490.260
8	0	164 369.131	164 369.131
9	0	163 254.168	164 254.168
10	0	162 145.337	162 145.337
11	0	161 042.604	161 042.604
12	0	159 945.937	159 945.937
13	0	158 855.301	158 855.301
14	0	157 770.664	157 770.664
15	0	156 691.993	156 691.993
16	0	155 619.254	155 619.254
17	0	154 552.415	154 552.415
18	0	153 491.444	153 491.444
19	0	152 436.308	152 436.308
20	0	151 386.975	151 386.975

对不同产品的经济效益的评价指标有很多,大部分文献在得到净现金流量的基础上考虑的经济性指标仅为投资回收期,而此经济指标有其自身的局限性,它仅从项目寿命期内的全部费用和效益进行了考虑;而净现值(NPV)和内部收益率(IRR)作为投资项目评价的动态指标,克服了投资回收期的缺陷,既考虑了资金的时间价值,也考虑了项目寿命期内的全部费用和效益,几十年来一直是国内外投资决策中的重要指标。

下面主要考虑“自发自用,余电上网”此种运营模式,对用户购买电网光伏增值服务的经济性进行评估,通过对主要经济性指标的计算来对服务进行评价。

净现值(NPV)是指投资项目预计在其寿命周期内各年创造的净效益按资金成本折现后之和,而内部收益率(IRR)是指使项目净现值等于0时的折现率,即:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i} \quad (16)$$

式中: B_i 为第 i 年增值服务的收益; C_i 为第 i 年增值服务的费用; N 为项目寿命。

若有

$$\sum_{i=1}^N \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i} = 0 \quad (17)$$

求得 r 即为内部收益率。净现值和内部收益率都是反映项目盈利能力的指标。前者体现的是绝对盈利能力,后者体现的是相对盈利能力^[13]。

就这里而言,光伏增值服务的寿命以光伏板的寿命长度决定,即为20年。由净现金流量表中数据可求得 $N=20$ 情形下光伏增值服务的净现值(NPV),当 $NPV=0$ 时,可求得光伏增值服务的内部收益率(IRR)为7%。当评价项目的内部收益率大于基准收益率时,项目便是可行的。一般将银行利率作为项目的基准收益率,由最新数据得2018年各大银行的平均利率为2.28%,故此增值服务项目的内部收益率明显高于基准收益率,故此增值服务项目是可行的。光伏增值服务回收期 and 光伏增值服务年收益如图3、图4所示。

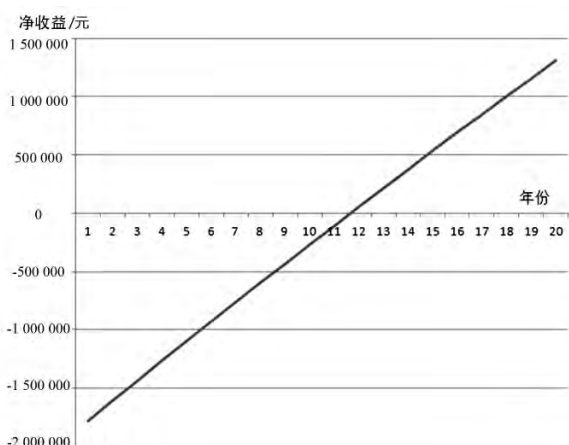


图3 光伏增值服务回收期

由图3和4可知,消费者在购买了光伏增值服务后10年左右便可收回成本。

4 结 语

基于 Stackelberg 博弈论的思想对光伏增值服务

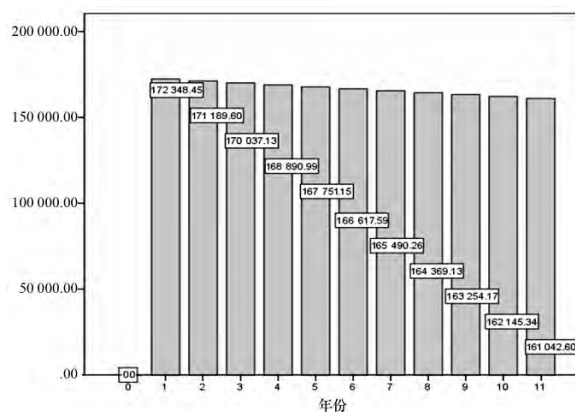


图4 光伏增值服务年收益

定价问题进行了建模,通过求解双层博弈模型中经济效益最大化问题得到了各层参与者的最优定价并给出了完整的定价策略。通过河南地区的实例分析计算对模型的经济性进行了验证,可在较短时间内收回成本且获得收益。所建模型不依赖于具体的光伏出力数据,可依据任意地区实际情况进行建模分析,具有较强的普适性,对电网公司具有一定的推广价值。同时对光伏增值服务的研究为电网公司提供了新能源建设与增值服务结合的新视角,且在一定程度上拓宽了博弈论的工程应用范围。

参考文献

- [1] 白建勇. 屋顶光伏系统技术经济评价及运营模式选择研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [2] 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.
- [3] 程瑜, 赵鹏飞. 含光伏及储能的民用负荷需求响应策略与效益分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1055-1062.
- [4] 郭晓琳. 基于屋顶面积的徐州市屋顶太阳能光伏潜力评估[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [5] 张运贵, 李晖照, 王雪, 等. 基于双层博弈的实时电价定价策略研究[J]. 电工技术, 2018(4): 36-39.
- [6] 史小特. 基于博弈论的城市公共交通定价模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [7] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙, 等. 最优碳税税率对供应链结构和社会福利的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(4): 886-900.
- [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.
- [9] Wu Yuan, Su Xiaojie, Tan Xiaqi, et al. Cooperative Distributed Energy Generation and Energy Trading for Future Smart Grid [C]. 2014 33rd Chinese Control Conference (CCC) IEEE 2014.
- [10] Zhong Zhenfang, Meng Qingwei, Liu Jizhen. Control System Comprehensive Performance Assessment [C]. 第三十三届中国控制会议论文集 (E 卷), 2014.
- [11] Prajna Paramita Dash, Amirnaser Yazdani. A Mathematical Model and Performance Evaluation for a Single-Stage Grid-Connected Photovoltaic (PV) System [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 9, Issue 6, ISSN (online) 1553–779x. DOI: <http://doi.org/10.2202/1553-779x.2033>.

- [12] B. Chitti Babu, Suresh Gurjar, Ashish Meher. Analysis of Photovoltaic (PV) Module during Partial Shading Based on Simplified Two-Diode Model [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2015, 16(1): 1613–1626.
- [13] Weiqi Yuan, Jie Ji, Zhao Meng, et al. Comparison Study of the Performance of Two Kinds of Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems and A PV Module at High Ambient Temperature [J]. Energy 2018, 148: 1153–1161.

作者简介:

贾楚蕴 (1995), 硕士研究生, 从事光伏发电研究;

李华强 (1964), 博士研究生, 教授, 从事电力市场研究。

(收稿日期: 2019–11–25)

(上接第 16 页)

缆的载流能力; 其次是方案 7、8; 再次是方案 2; 最差的是方案 1; 对于同相两根电缆, 若它们的布置在整个两回三相电缆布置中的相对位置越对称, 则二者的互阻抗差异越小, 而自阻抗均相同, 所以两根电缆间的电流分配会越均匀, 分流系数越接近于 1。

2) 对于输电走廊紧张的城市电缆线路而言, 方案 5、6 是最优选择, 既可节约走廊宽度, 又能充分利用电缆的载流能力。在高度受限的应用场合 (如电缆夹层、活动地板等), 方案 3 为最优方案。

3) 增大电缆间距可改善并联电缆分流不均现象, 电缆越长, 并联电缆分流不均现象越严重。

4) 针对工程实例, 在既定相序连接的限制条件下提出了优化措施, 明显减小了并联电缆分流不均的程度。

参考文献

- [1] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向 [J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100–104.
- [2] 杨军, 伍咏红, 江文波, 等. 基于双端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 208–213.
- [3] 王晓彤, 林集明. 广东-海南 500 kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(12): 6–10.
- [4] 鹿洪刚, 覃剑, 陈祥训. 35 kV 电力电缆在线故障测距仿真研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(24): 81–86.

- [5] 胡志坚, 陈允平, 张承学, 等. 长距离高压电缆线路互感参数测量 [J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 17–18.
- [6] 索南加乐, 杨钺, 杨忠礼, 等. 用于同杆双回线保护的时域电容电流的分相补偿方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 77–81.
- [7] 王育学, 张哲, 尹项根, 等. 平行多回电缆序阻抗参数的计算与分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(8): 186–191.
- [8] 邓星, 蒙绍新, 尹项根, 等. 多回并联电缆线路参数的不对称性分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3119–3124.
- [9] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较 [J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689–697.
- [10] 韦刚, 张子阳, 房正良, 等. 多回输电线路并架的不平衡性分析 [J]. 高电压技术, 2004(10): 9–11.
- [11] 王晓彤, 项祖涛, 宋新立, 等. 采用垂直排列的 500 kV 双回电缆线路参数的不平衡度分析 [J]. 高压电器, 2017, 53(2): 132–138.
- [12] 李炳华. 低压阻燃电力电缆通流能力研究 [J]. 建筑电气, 2015, 34(7): 31–33.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 (上册) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 181–183.
- [14] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

作者简介:

李浩原 (1987), 博士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电、换流站绝缘配合。

(收稿日期: 2019–11–25)