

文章编号: 1006-2467(2023)04-0464-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.514

碳中和背景下分布式光伏渗透与 售电市场耦合机制分析

张 晗¹, 韩 冬¹, 刘 坦², 黄 燕²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 国网合肥供电公司, 合肥 230061)

摘 要: 为评估碳中和背景下, 售电商随分布式光伏的高水平渗透而面临“死亡螺旋”运营窘境的可能性, 分析可能导致“死亡螺旋”的关键影响因素, 采用系统动力学方法进行建模分析. 首先建立销售电价等市场条件引导下的用户侧分布式光伏渗透模型, 其次根据分布式光伏渗透水平与售电商盈余之间的负反馈关系, 建立售电商盈余模型. 算例分析从中长期视角评估了分布式光伏发电量、批发电价等因素对售电商盈余的灵敏度影响. 结果表明: 售电商盈余在中长期时间内呈缓慢下降趋势, 若输配电量、批发电价、运维成本等多重影响因素同时发生较大变化, 所形成的极端场景可能引起售电商运营的“死亡螺旋”.

关键词: 碳中和; 分布式光伏; 系统动力学; 死亡螺旋

中图分类号: TK 01 **文献标志码:** A

Analysis of Market Coupling Mechanism Between Distributed Photovoltaic Penetration and Electricity Market Under Background of Carbon Neutrality

ZHANG Han¹, HAN Dong¹, LIU Tan², HUANG Yan²

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Grid Hefei Power Supply Company, Hefei 230061, China)

Abstract: In order to evaluate the possibility of the ‘death spiral’ operation dilemma faced by the retailers with the high level penetration of distributed photovoltaic (PV) under the background of carbon neutrality, and to analyze the key factors that may lead to the ‘death spiral’, the system dynamics approach is applied for modeling. First, the model of customer-side distributed PV penetration guided by market conditions such as sales tariff is established. Then, a model of surplus of retailers is established based on the negative feedback relationship between distributed PV penetration level and the surplus of retailers. The case study evaluates the sensitivity effects of factors such as the generation of distributed PV and wholesale electricity prices on the surplus of retailers. The results show that the surplus of retailers tends to decrease slowly in the mid-long term. An extreme scenario may cause the ‘death spiral’ of retailers in which multiple factors such as transmission and distribution volumes, wholesale tariffs, and maintenance costs change significantly at the same time.

Key words: carbon neutrality; distributed photovoltaic (PV); system dynamics; death spiral

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2021-12-18 录用日期: 2021-12-31

作者简介: 张 晗 (1996-), 硕士生, 从事电力市场研究.

通信作者: 韩 冬, 讲师; E-mail: han_dong@usst.edu.cn.

2020 年 9 月,中国向世界宣布了“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的目标。清洁能源的大规模高效利用是实现碳抵消,进而实现碳中和战略目标的重要手段^[1]。其中,用户侧分布式光伏作为能源开发与利用的重要方式之一,因其就近发电、就地消纳、低线损、使用寿命长等诸多优点被家庭用户广泛采用。

售电市场改革背景下,接入分布式光伏的用户用电需求对销售电价具有价格弹性,即随着用户侧分布式光伏的高水平渗透,用户减少向售电商购电,售电商的收入下降;售电商为维持原有的收益水平,向监管部门提议提高电价,若电价提高,则更多的用户选择接入分布式光伏:这是一个正反馈回路,若不加干预,售电商盈余会随着分布式光伏的高水平渗透而持续降低,售电商收支失衡,存在陷入“死亡螺旋”^[2-4]运营窘境的风险。特别是随着用户侧分布式光伏装机成本的逐年下降^[5]和储能系统的大规模部署^[6],售电商将面临更为严峻的售电环境。此外,输配电价改革后,回收电网准许成本和获得合理收益成为售电商的主要利润来源^[7],由于政府核定的输配电价往往低于以往的售电商购销价差^[8],售电商的输配电收入随之降低。文献[9]量化分析了售电市场环境下浙江海宁市光伏发电量对售电商利润的影响,并预测 2019 年海宁市售电商的售电利润将减少 1.29 亿元。加之受化石燃料成本上升和维护日益老化的输配电基础设施的影响,售电商的固定成本逐年增加^[10],盈余日益下降。因此,评估售电商“死亡螺旋”发生的可能性,分析可能导致“死亡螺旋”的关键影响因素,能够为售电商及时有效地做出应对提供参考,对保证售电商的可持续运营、促进电力系统的低碳运行具有重要的现实意义。文献[11]表明售电市场的放开对售电商利润、现金流、增值服务收益等均有影响;文献[12]考虑在售电侧放开背景下实施需求响应,合理分配用户电量以增加售电商的售电收益。现有研究缺少对售电商“死亡螺旋”运营窘境的前瞻性分析,未能揭示“死亡螺旋”的发生机理。

针对电力市场环境中,售电商的经济运营与分布式光伏渗透规模、用户的技术采纳程度以及多种市场因素之间具有复杂的耦合关系^[13],且多主体、多因素随时间不断变化的特性,本文采用系统动力学(System Dynamics, SD)模型,综合考虑分布式光伏渗透与售电商之间的市场耦合关系,模拟碳中和背景下分布式光伏随时间演变下的渗透过程和售电侧放开背景下售电商的经济运营情况,清晰地展

现了不同市场条件对分布式光伏渗透的影响,通过敏感度分析找出了影响售电商盈余的多种因素,为避免售电商陷入“死亡螺旋”的运营窘境提供一定的参考。

1 市场反馈机制

传统售电格局下,用户购电方式为电网企业统购统销模式,售电商可根据自身的盈余情况提议电价,由政府等监管部门审核批准,售电市场相对垄断^[7]。售电市场改革后,竞争性业务有序放开,电力供应呈现多元化,用户侧分布式光伏可满足用户的部分用电需求,用户购电需求开始对销售电价出现价格弹性,从而影响着用户和售电商的购售电决策行为。随着售电市场的逐步放开,在理想的售电市场环境下,分布式光伏、用户、售电商以及监管部门将在电价等市场条件的引导下形成一个闭环反馈系统,相互影响和制约^[14],即随着用户侧分布式光伏渗透水平的提高,用户的购电需求降低,售电商盈余减少,售电商向监管部门提议提高电价,监管部门根据市场在资源配置中起决定性作用、电价机制适应市场要求的原则确定新的销售电价,新的销售电价引导新的分布式光伏渗透水平。建立销售电价影响下的分布式光伏渗透水平与售电商盈余形成的市场反馈机制,如图 1 所示。其中,“+”代表正反馈关系,“-”代表负反馈关系。

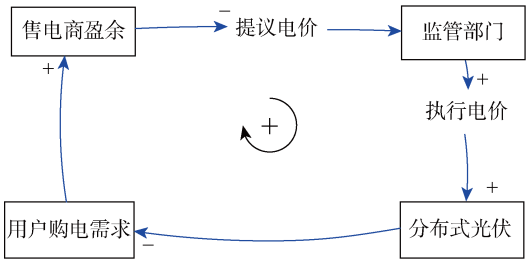


图 1 光伏渗透与售电商运营的市场反馈机制
Fig. 1 Market feedback mechanism for PV penetration and retailers' operation

2 建立 SD 模型

2.1 SD 对分布式光伏渗透与售电市场耦合机制分析的适用性说明

SD 的基本思想是系统的行为模式与特性主要取决于系统内部的结构,系统内部各因素之间相互作用并相互制约,随着时间的推移,系统处在不断的动态变化中,从中可以得到目标因素随时间变化而展现出的特性。SD 采用定性定量相结合以及系统综合推理的方法,在构建出合理因果关系的基础上,

建立严谨准确的方程,通过计算机仿真得到准确结果^[15].

用户侧分布式光伏的渗透是一个涉及经济活动和自身技术革新的过程,且与用户的技术采纳率、售电商盈余之间相互影响和制约,加之各经济因素和市场主体随时间处于动态变化之中,难以反映这些反馈关系和动态特性. SD 的分析方法兼顾定性定量,能够从系统的角度出发,把握事物动态发展的趋势,分析系统内部因素相互作用关系的特点,因此适合建立基于 SD 的碳中和背景下分布式光伏与售电市场耦合机制模型,以获得分布式光伏随时间演变下的渗透水平和售电市场环境下售电商的运营情况,分析可能导致“死亡螺旋”的关键影响因素,为售电商及时、有效做出应对提供参考.

2.2 SD 总模型

由图 1 中建立的市场反馈机制可知,售电市场

环境中,分布式光伏的渗透水平在销售电价等经济因素的引导下,与用户、售电商之间存在耦合关系. 根据系统目标,将总模型分为售电商盈余、销售电价、用户技术采纳率和分布式光伏渗透共 4 个子模块,总模型的系统流程如图 2 所示. 图中,紫色字体表示影子变量,模型很大时,若某变量已在一个子块中定义,那么在另一个子块中,用影子变量引用^[15]. 图中子模块之间存在多条反馈回路,具体为:销售电价的提高增加了分布式光伏发电的净现值,缩短了分布式光伏的投资回报时间,从而提高用户的光伏投资意愿,促进分布式光伏渗透水平的提高;同时,分布式光伏发电量的增加直接降低售电商的盈余水平,售电商由于自身的盈余减少而提议提高电价. 各子模块之间相互关联,子模块内部元素之间相互影响,加之系统随时间发生变化,适合用 SD 方法建模分析.

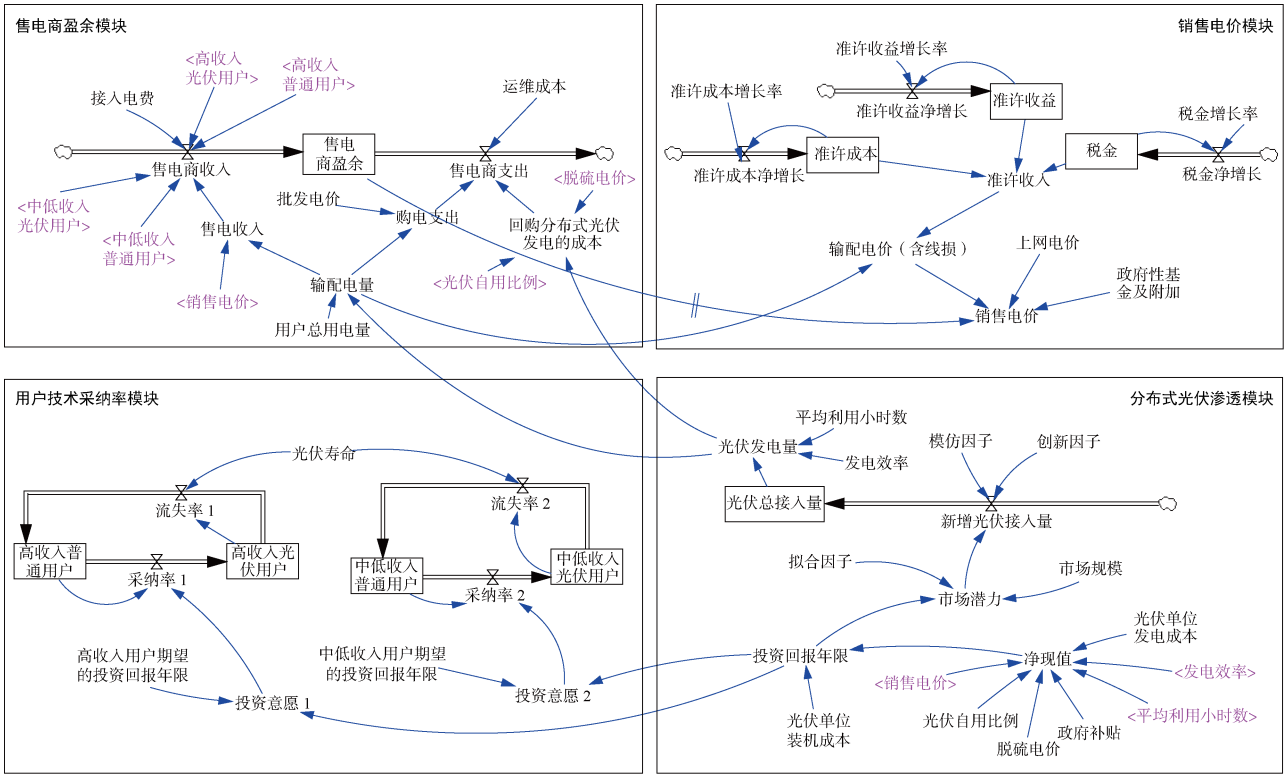


图 2 总模型系统流程图
Fig. 2 Flow chart of general model system

2.3 销售电价模块

理顺价格形成机制是新电改的重点任务之一^[16]. 销售电价不仅与用户侧分布式光伏渗透水平之间存在正反馈关系,而且直接影响售电商的盈余,合理的销售电价应正确引导电力消费,保证售电商的可持续发展. 销售电价由上网电价、输配电价(含线损)、政府性基金及附加共 3 部分组成^[17]. 其中,

上网电价包含容量电价和电量电价,容量电价可由政府制定,电量电价由市场竞争形成. 输配电价(含线损)是电网企业提供接入系统、联网、电能输送和销售服务的价格总和,数值上等于准许收入与输配电量的比值;准许收入是准许成本、准许收益和价内税金的总和. 政府性基金及附加实质上是全体电力用户分摊的与电力行业相关的产业政策成本. 由此,

销售电价可定义如下:

$$T = T_O + T_D + T_G \quad (1)$$

$$T_D = P_i / G \quad (2)$$

$$P_i = P_c + P_r + T_{\text{tax}} \quad (3)$$

式中: T 为销售电价; T_O 为上网电价; T_D 为输配电价(含线损); T_G 为政府性基金及附加; P_i 为准许收入; G 为输配电量; P_c 为准许成本; P_r 为准许收益; T_{tax} 为价内税金。

2.4 分布式光伏渗透模块

目前,我国分布式光伏发电渗透水平较低,尚处于发展的初始期,必将经历发展期、成熟期的发展过程^[18],因此适合用 S 型增长曲线来拟合分析。用户侧分布式光伏的接入和消纳,是一个包含社会经济影响和自身技术革新的复杂过程,销售电价、政府补贴、分布式光伏成本等市场条件分别与分布式光伏的消纳之间存在特定的反馈关系,且分布式光伏技术扩散的速率还受市场规模等因素的影响。

文献[19]提出了一种考虑光伏投资回报特性以及技术利用率的巴斯扩散模型,并利用 Lyapunov 函数对该模型进行了稳定性判定,可以得到分布式光伏在不同市场条件下的稳定扩散范围。在此基础上,建立分布式光伏渗透模型:

$$R(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + qe^{-(p+q)t}/p} \quad (4)$$

式中: $R(t)$ 为时间 t 内接入系统的分布式光伏总容量; m 为市场潜力,表示分布式光伏在特定市场条件下的最大接入量; p 、 q 分别为巴斯扩散模型中的创新系数和模仿系数,反映了不同用户行为导致分布式光伏接入的可能性。 p 、 q 须满足 $0 < p < q < 1$, 且 $p + q \in [0.3, 0.6]$ ^[20]。市场潜力与市场规模、分布式光伏投资回报时间等因素有关,假设用户全部选择“自发自用、余电上网”的运营模式,则市场潜力可拟合如下:

$$m = R^{\text{MS}} e^{-a^{\text{PB}}} \quad (5)$$

$$t^{\text{PB}} = \frac{C_i R(t)}{N_{\text{PV}}} \quad (6)$$

$$N_{\text{PV}} = X_{\text{PV}} \beta T + X_{\text{PV}} (1 - \beta) T_r + X_{\text{PV}} (B - G_g) \quad (7)$$

$$X_{\text{PV}} = R(t) h \eta \quad (8)$$

式中: R^{MS} 为市场规模; a 为拟合系数; t^{PB} 为投资回报时间; C_i 为分布式光伏的单位装机成本; N_{PV} 为选择“自发自用、余电上网”模式的用户接入分布式光伏后的净现值; X_{PV} 为时间 t 内分布式光伏的总发电量; β 为光伏自用比率; T_r 为脱硫燃煤标杆上网电价(下称“脱硫电价”); B 为政府补贴; G_g 为分布式光伏单位发电成本; $R(t)$ 为时间 t 内接入的分布式光

伏总容量; h 为时间 t 内光伏光照时间; η 为分布式光伏电池的发电效率。净现值包括三项,第一项为用户自用光伏发电量而节省下来的节电收益;第二项为用户的卖电收益,售电商按脱硫电价回购用户的剩余光伏发电量;第三项为全电量的政府补贴减分布式光伏单位发电成本。

2.5 用户技术采纳率模块

分布式光伏渗透水平的提高,意味着接入分布式光伏的家庭数量增多,且呈 S 型增长趋势。然而接入分布式光伏的家庭中,通常高收入家庭的接入光伏比率远高于中低收入家庭^[21],这是因为不同的收入群体对分布式光伏存在不同的投资意愿。投资意愿为用户期望的分布式光伏投资回报时间与实际的投资回报时间之比。由于收入水平的差异,中低收入家庭期望的投资回报时间小于高收入家庭,所以在相同的实际投资回报时间之下,中低收入家庭的光伏投资意愿较低。文献[22]采用中位数相对标准法对我国不同收入群体进行划分,得到我国高收入群体约占总体的 20%,中低收入群体约占总体的 80%。本文也采用该比率对用户群体进行分类。基于文献[23]提出的用户对新产品的采用率模型,考虑高收入家庭和中低收入家庭的差异性,建立适用于分布式光伏市场的用户采用率模型:

$$H_{\text{PV}} = Y_1 H_0 \quad (9)$$

$$L_{\text{PV}} = Y_2 L_0 \quad (10)$$

$$Y_1 = t_{e1}^{\text{PB}} / t^{\text{PB}} \quad (11)$$

$$Y_2 = t_{e2}^{\text{PB}} / t^{\text{PB}} \quad (12)$$

$$D_1 = H_{\text{PV}} / P_1 \quad (13)$$

$$D_2 = L_{\text{PV}} / P_1 \quad (14)$$

式中: H_{PV} 、 L_{PV} 分别为采纳分布式光伏的高收入和中低收入家庭数; Y_1 、 Y_2 分别为高收入和中低收入家庭的光伏投资意愿; H_0 、 L_0 分别为未采纳分布式光伏的高收入和中低收入家庭数; t_{e1}^{PB} 、 t_{e2}^{PB} 分别为高收入和中低收入家庭用户期望的投资回报时间; D_1 、 D_2 分别为高收入和中低收入光伏家庭的光伏流失率; P_1 为分布式光伏的平均寿命周期。

2.6 售电商盈余模块

输配电价改革后,售电商的售电收入为政府核定的输配电价与售电量的乘积,由于政府核定的输配电价往往低于以往的购销价差,且随着分布式光伏的高水平渗透,售电商的售电份额减少,售电商收入水平不断降低。售电侧放开背景下,售电商失去了市场垄断地位,盲目提议提高销售电价可能造成售电份额的进一步丢失。由于售电商的盈余在不同时间段内受政策的影响较大,且受分布式能源渗透水

平制约的特点,适合用 SD 方法对售电商的盈余进行建模分析.售电商的运营收入主要包括售电收入以及向用户收取的接入电费,售电商业务成本主要包括购电成本、回购分布式光伏发电的成本和运营维护成本^[24].售电商盈余即售电商业务收入与业务成本之差.

采用包含接入电费和电量消费的两部制结构作为电价费率模型.接入电费是售电商向用户收取的一次性费用,与用电量无关;电量消费采用双阶梯电价的计价方式.居民费率模型如下:

$$E_i = c + e_i \quad (15)$$

$$e_i = \begin{cases} \pi_1 q_i, & q_i \in (0, q_x] \\ \pi_1 q_x + \pi_2 (q_i - q_x), & q_i \in (q_x, +\infty) \end{cases} \quad (16)$$

式中: E_i 为用户 i 需缴纳的电费; c 为接入电费; e_i 为电量消费成本; π_1 、 π_2 分别为第一阶梯与第二阶梯的单位电价; q_i 为用户 i 的实际购电量; q_x 为第一阶梯的最大用电量.

若某售电商在其服务范围内为 M 个用户供电,则这 M 个用户所需缴纳的电费为

$$\bar{E}(M) =$$

$$\bar{E}[\pi_1 (q_x M) + \pi_2 (Q - q_x M - X_{PV} \beta)] \quad (17)$$

式中: $\bar{E}(M)$ 为售电商在给定零售侧费率下的售电收入; Q 为 M 个用户的总用电量.则售电商的盈余可拟合为

$$R_p = \bar{E}(M) + M c - \lambda \bar{E}(Q - X_{PV} \beta) - T_r X_{PV} (1 - \beta) - \theta \quad (18)$$

式中: R_p 为售电商盈余; λ 为批发电价; $Q - X_{PV} \beta$ 即为输配电量; $T_r X_{PV} (1 - \beta)$ 为售电商回购用户光伏发电量的支出; θ 为售电商的运维成本.前两项之和为售电商售电和收取接入电费的总收入,后三项之和为售电商批发量、回购分布式光伏发电量和运行维护的总成本.

3 算例分析

3.1 原始数据和参数设置

采用我国华东地区某城市电网的数据作为原始数据.该城市约有 2 000 万人,全年总用电量约为 1.568×10^{12} kW·h;分布式光伏初始接入规模为 854 MW,单位装机成本为 4 元/W,单位发电成本为 0.49 元/(kW·h);全年平均光照时间为 1 120 h,光伏发电效率为 64%;政府全电量补贴为 0.18 元/(kW·h),第一阶梯和第二阶梯的单位电价分别为 0.617、0.677 元/(kW·h);接入电费为每

天 0.6 元,售电商批发电价为 0.34 元/(kW·h),脱硫电价为 0.37 元/(kW·h),售电商运维成本为每年 1.14×10^9 元.创新系数为 0.002,模仿系数为 0.5,拟合系数为 0.3,光伏自用比率为 50%;高收入家庭期望投资回报时间为 10 年,中低收入家庭期望投资回报时间为 5 年,初始高收入和中低收入光伏家庭数分别为 1 724 户和 271 户;光伏平均寿命周期为 25 年,高收入和中低收入家庭占比分别为 20%和 80%.

3.2 仿真分析

在此现行市场条件下,根据式(4)可得该地区分布式光伏极限接入容量为 $1.063 8 \times 10^7$ kW.销售电价、政府补贴和光伏单位装机成本直接影响投资光伏系统的净现值,从而影响分布式光伏的渗透水平.为了量化分析光伏渗透水平对 3 种影响因素的敏感度,分别设置 3 种影响因素发生相同幅度变化的场景.参考分布式光伏单位装机成本近年来下降的趋势,预测光伏装机成本将按每年 30%的幅度下降^[5],因此分别设置场景 1~3;考虑到当前光伏补贴正在退坡,另设置场景 4 和 5,具体如下:① 场景 1,其他市场条件不变,销售电价增长 30%;② 场景 2,其他市场条件不变,分布式光伏单位装机成本下降 30%;③ 场景 3,其他市场条件不变,政府补贴增长 30%;④ 场景 4,其他市场条件不变,补贴退坡 30%、装机成本下降 30%;⑤ 场景 5,其他市场条件不变,补贴退坡 30%.

如图 3 所示,不同因素的取值会影响分布式光伏渗透的速率,但不会改变渗透的总体趋势.由红、蓝、黄 3 条曲线可以看出,对分布式光伏渗透水平影响最大的 3 个因素依次是销售电价、分布式光伏单位装机成本和政府补贴.

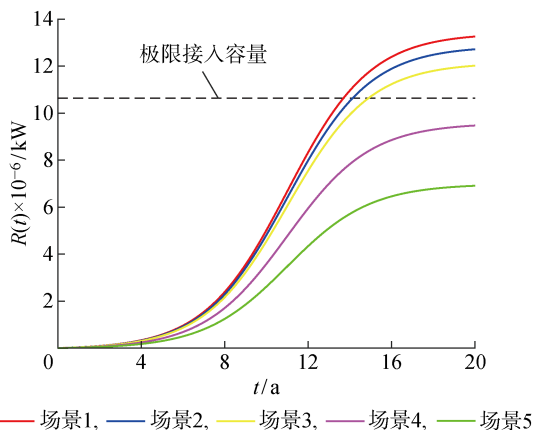


图 3 不同场景下分布式光伏渗透水平

Fig. 3 Penetration level of distributed PV in different scenarios

虽然政府补贴的影响较小,但是当补贴下降 30%时,分布式光伏的增长速率明显减弱,极限接入容量约仅有现行市场条件下的 2/3,但是如果伴随着单位装机成本的同步下降,分布式光伏依然可以在稳定扩散的范围内保持较快的增长趋势.因此,补贴退坡过程可以综合考虑光伏单位装机成本的下降趋势退坡至完全取消.

在现行的市场条件下,由于高收入和中低收入家庭投资意愿的程度不同,所以采纳分布式光伏的速率不同.如图 4 所示,前期高收入家庭采纳分布式光伏的速率大于中低收入家庭;约在第 10 年高收入家庭采纳分布式光伏的数量趋于稳定,增长率趋于 0;中低收入家庭采纳分布式光伏的速率较慢,在中长期时间内未能达到稳定扩散的水平.

对中低收入的家庭来说,在其他现行市场条件不变的基础上模拟光伏单位装机成本下降 30% (C1)和光伏电池发电效率增长 30%(C2)的情况,图 4 中,相比光伏发电效率的提高,光伏单位装机成本的降低可以在单位时间内吸引更多的中低收入家庭.由此可见,中低收入家庭采纳分布式光伏需要更大的经济效益激励,尤其在光伏补贴逐步退坡的形势下,光伏单位装机成本的下降可以有效地减轻中低收入家庭前期的接入负担.

图 5 为销售电价对光伏接入量和售电商盈余的影响.可知,提高销售电价虽然可以暂时提高售电商的盈余,但随着分布式光伏接入量的增加,售电商会丢失更多的市场份额,盈余仍然呈下降趋势.虽然售电商的盈余很难降到负数范围内,但从售电商经济运营的层面来说,盈余的大幅下降不利于售电商的持续稳定运营.

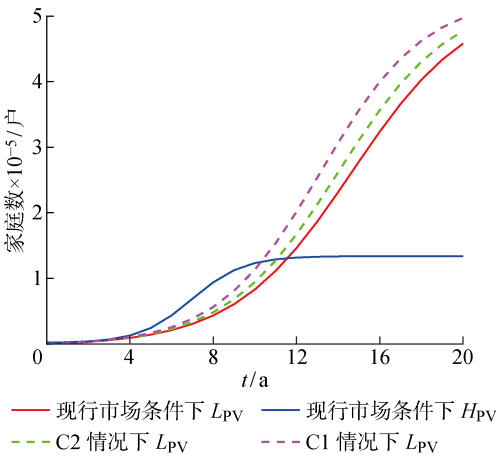


图 4 不同收入水平家庭采纳光伏情况
Fig. 4 Adoption of PV in different income families

图 6 为光伏单位装机成本对光伏接入量和售电商盈余的影响.可知,随着分布式光伏单位装机成本的降低和光伏接入容量的增加,售电商的盈余呈下降趋势,但在中长期时间内盈余仅下降了 0.05%.这是由于在其他因素不变的情况下,光伏单位装机成本的降低在中长期时间内仅激励光伏接入量增长了 0.06%,对售电量的影响较小,尤其在电价水平不变的情况下,售电商盈余的波动较小.

根据式(18)售电商的盈余函数,从售电商支出层面看,批发电价和售电商运维成本的上升直接增加了售电商的支出;从售电商收入层面看,输配电量的降低直接减少了售电商的收入;光伏平均光照时间、光伏自用比率是间接影响因素,增加光伏发电量从而减少输配电量.图 7 对影响售电商盈余的 5 种因素进行了灵敏度分析.其中,因素 1 为输配电量减少 5%、因素 2 为批发电价增加 5%、因素 3 为运维成本增加 5%、因素 4 为光伏平均光照时间增加 5%、因素 5 光伏自用比率增加 5%.考虑到光伏平均利用时间等因素在短时间内的波动幅度不会太

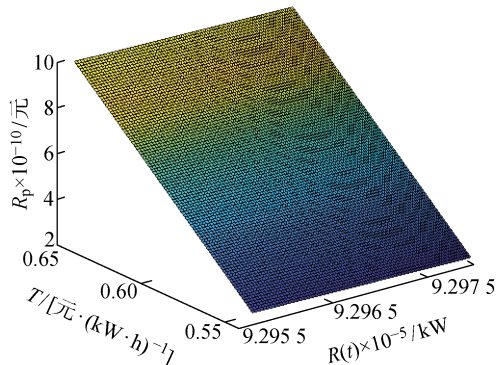


图 5 销售电价对光伏接入量和售电商盈余的影响
Fig. 5 Impact of electricity price on integration capacity of distributed PV and surplus of retailers

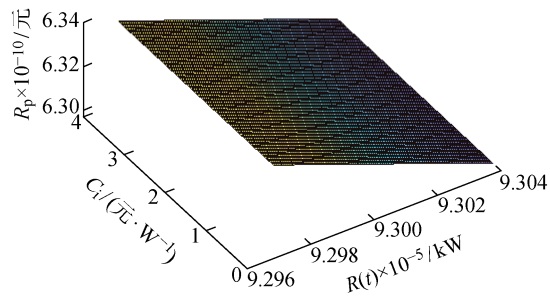


图 6 光伏单位装机成本对光伏接入量和售电商盈余的影响
Fig. 6 Impact of unit installed cost of PV on integration capacity of distributed PV and surplus of retailers

大,为方便对比分析,设置 5 个因素的波动幅度均为 5%。

由图 7 可知,红色线为现行市场条件下,售电商盈余在中长期时间内的演变趋势;输配电量、批发电价、售电商运维成本三者的波动均可直接降低售电商的初始盈余水平,光伏平均光照小时数和光伏自用比率的波动并不会造成售电商初始盈余的减少。经对比可知,对售电商盈余影响最大的因素依次是输配电量、批发电价、售电商运维成本、光伏平均光照小时数、光伏自用比率。

为探寻“死亡螺旋”发生的可能性,设置销售电价上升 20%。根据光伏装机成本每年 30% 的下降幅度,设置对售电商盈余影响最大的 5 种因素也同时发生 30% 的波动,模拟售电商发生“死亡螺旋”场景如图 8 所示。

图 8 中,现行市场条件下售电商盈余呈缓慢下降趋势,20 年后的售电商盈余仅下降了 3.84%。此外,即使销售电价提高,售电商的初始盈余由 679 亿

元增长到了 689 亿元,但是随着多种影响因素叠加产生效应,售电商盈余于第 6 年左右出现剧烈的下降趋势,20 年后的售电商盈余相比初始时下降了 11.24%,降至 612 亿元,存在陷入“死亡螺旋”的风险。然而在现实情况下,并不能保证多种因素同时发生较大变化,且类似平均光照时间等因素,是一个相对固定的数值,因此难以产生强烈的聚合效应,“死亡螺旋”发生的可能性较小。即使在模拟的“死亡螺旋”情境中,第 8 年时曲线才首次低于现行市场条件下的售电商盈余,因此政府等监管机构有充足的时间做出应对策略。

4 结论

通过 SD 方法对碳中和背景下用户侧分布式光伏高水平渗透与售电商经济运营之间的市场耦合关系进行了量化分析,主要结论如下:

(1) 售电市场环境下,销售电价与分布式光伏的接入容量之间存在正反馈关系。光伏补贴可参考分布式光伏单位装机成本下降的幅度退坡,以保证分布式光伏在稳定扩散的范围内保持较快的增长趋势,加快碳抵消进程。

(2) 对售电商盈余影响最大的因素依次是输配电量、批发电价、售电商运维成本、光伏平均光照时间、光伏自用比率,售电商可通过控制自身运维成本以维持盈余水平。

(3) 从中长期视角来看,现行市场条件下售电商盈余呈缓慢下降趋势,降低售电商盈余的多种因素难以同时发生较大改变,因此“死亡螺旋”发生的可能性较小。

参考文献:

- [1] 王文彬,郑蜀江,范瑞祥,等. “双碳”背景下微网分布式电能交易绩效评价指标与方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 312-324.
WANG Wenbin, ZHENG Shujiang, FAN Ruixiang, et al. Performance evaluation index and method of micro-grid distributed electricity trading under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 312-324.
- [2] KUBLI M. Squaring the sunny circle? On balancing distributive justice of power grid costs and incentives for solar prosumers[J]. Energy Policy, 2018, 114: 173-188.
- [3] MUAFA M, ADJALI I, BEAN P, et al. Can adoption of rooftop solar panels trigger a utility death

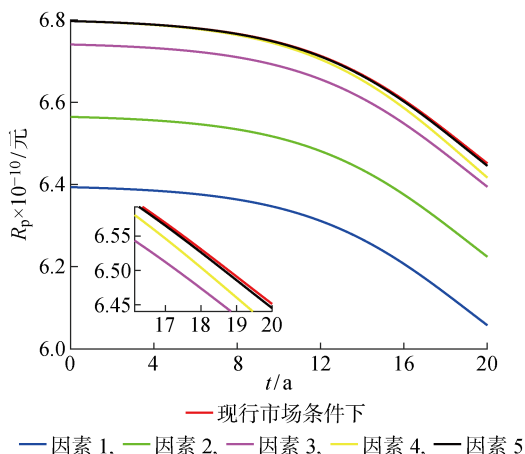


图 7 不同因素对售电商盈余的灵敏度分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of different factors on surplus of retailers

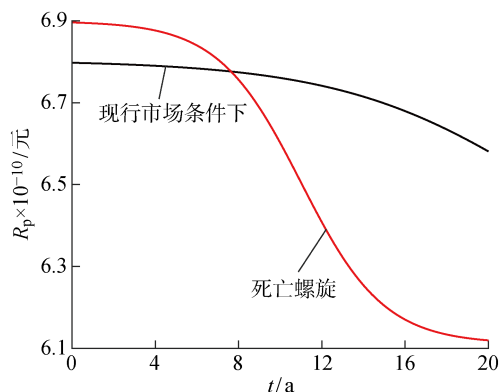


图 8 模拟“死亡螺旋”场景

Fig. 8 Simulation of scenario of ‘death spiral’

- spiral? A tale of two US cities[J]. **Energy Research & Social Science**, 2017, 34: 154-162.
- [4] LAWS N D, EPPS B P, PETERSON S O, *et al.* On the utility death spiral and the impact of utility rate structures on the adoption of residential solar photovoltaics and energy storage [J]. **Applied Energy**, 2017, 185: 627-641.
- [5] YU C F, VAN SARK W G J H M, ALSEMA E A. Unraveling the photovoltaic technology learning curve by incorporation of input price changes and scale effects[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011, 15(1): 324-337.
- [6] 黄碧斌, 李琼慧. 储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J]. **电力自动化设备**, 2016, 36(6): 88-93.
- HUANG Bibin, LI Qionghui. Value assessment for energy storage in supporting large-scale integration of distributed PVs[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2016, 36(6): 88-93.
- [7] 张林, 胡宏伟, 杨萌, 等. 新一轮电力体制改革背景下省级电网企业管理模式优化思路与探讨[J]. **经贸实践**, 2018(18): 223-224.
- ZHANG Lin, HU Hongwei, YANG Meng, *et al.* Optimization of management mode of provincial power grid enterprises under the background of new round of power system re-form[J]. **Economic & Trade**, 2018(18): 223-224.
- [8] 陈凯, 李效臻, 黄康任. 输配电价改革: 电价、电量与投资关系研究[J]. **价格理论与实践**, 2017(4): 52-55.
- CHEN Kai, LI Xiaozhen, HUANG Kangren. Reform of transmission-distribution electricity price: Study on the relationship between the price, quantity and investment[J]. **Price: Theory & Practice**, 2017(4): 52-55.
- [9] 宋惠忠, 程慧, 韦安强, 等. 新能源光伏对售电市场影响分析[J]. **浙江电力**, 2018, 37(6): 42-46.
- SONG Huizhong, CHENG Hui, WEI Anqiang, *et al.* Effect analysis of photovoltaics on electricity sales market[J]. **Zhejiang Electric Power**, 2018, 37(6): 42-46.
- [10] 刘嘉, 蔡雨楠, 邢琳. 基于大数据的电网成本结构及效益综合分析研究与应用[J]. **电气自动化**, 2017, 39(5): 14-16.
- LIU Jia, CAI Yunan, XING Lin. Research and application of grid cost structure and synthetical benefit analysis based on big data[J]. **Electrical Automation**, 2017, 39(5): 14-16.
- [11] 王文彬, 郑蜀江, 范瑞祥, 等. “双碳”背景下微网分布式电能交易绩效评价指标与方法[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(3): 312-324.
- WANG Wenbin, ZHENG Shujiang, FAN Ruixiang, *et al.* Performance evaluation index and method of micro-grid distributed electricity trading under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(3): 312-324.
- [12] 李佳宇. 考虑需求响应的售电商购售电交易优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- LI Jiayu. Research on the optimization model of purchase and sale of electricity retailers considering demand response [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [13] 时璟丽. 可再生能源发展促进政策机制分析及建议[J]. **中国能源**, 2017, 39(9): 5-9.
- SHI Jingli. Analysis and suggestions on policy and mechanism of promoting renewable energy development[J]. **Energy of China**, 2017, 39(9): 5-9.
- [14] SUN T, TONG L, FENG D H. On the dynamics of distributed energy adoption: Equilibrium, stability, and limiting capacity[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2020, 65(1): 102-114.
- [15] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHONG Yongguang, JIA Xiaojing, QIAN Ying. System dynamics [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [16] 范慧英. 中国电价形成机制改革研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- FAN Huiying. Research on the reform of electricity pricing mechanism in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [17] 施宇翔. 深化电力体制改革下电价形成机制和规制研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- SHI Yuxiang. Research on forming mechanism and regulation of electricity prices under the deepen reform of the electric power system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [18] 艾兴政, 唐小我. 广告媒介下两种产品竞争与扩散模型研究[J]. **管理工程学报**, 2000, 14(3): 19-22.
- AI Xingzheng, TANG Xiaowo. Study of competition and diffusion models about two products in advertisement[J]. **Journal of Industrial Engineering and Engineering Management**, 2000, 14(3): 19-22.
- [19] 韩冬, 李孟瞳, 严正. 用户侧分布式光伏技术扩散能力评估方法[J]. **中国电机工程学报**, 2021, 41(3): 985-994.
- HAN Dong, LI Mengtong, YAN Zheng. Evaluation

method of diffusion capability of user-side distributed photovoltaic technology[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, 41(3): 985-994.

[20] 盛亚. 技术创新扩散与新产品营销[M]. 北京: 中国发展出版社, 2002.

SHENG Ya. Technology innovation diffusion and new product marketing[M]. Beijing: China Development Press, 2002.

[21] LUKANOV B R, KRIEGER E M. Distributed solar and environmental justice: Exploring the demographic and socio-economic trends of residential PV adoption in California[J]. **Energy Policy**, 2019, 134: 110935.

[22] 王宏. 中国中等收入群体划分标准: 综述、比较与现实选择[J]. **经济研究参考**, 2020(1): 58-69.

WANG Hong. Classification criteria of middle income groups in China: Summary, comparison and realistic choice[J]. **Review of Economic Research**, 2020 (1): 58-69.

[23] 郑彤彤. 用户创新的机理及模式研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

ZHENG Tongtong. Research on the mechanism and mode of user innovation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[24] 马天男, 杜英, 苟全峰, 等. 基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型[J]. **电力自动化设备**, 2019, 39(6): 192-204.

MA Tiannan, DU Ying, GOU Quanfeng, *et al.* Non-cooperative competition game model of multiple subjects in electricity market based on Berge-NS equilibrium[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2019, 39(6): 192-204.

(本文编辑: 孙伟)