

绿色电力交易对电力市场的影响机理及效果分析

文/戴立新¹ 匡也²

1. 国家电投集团江苏电力有限公司无锡苏州分公司；2. 上海发电设备成套设计研究院有限公司

为分析绿色电力交易对电力市场的影响，从我国绿色电力交易的运行现状入手，通过构建绿色电力参与电力市场交易模型，结合京津冀地区的实际情况展开算例分析。结果显示，未来绿色电力价格、装机容量和发电量会持续增高，绿色电力占总发电量的比例逐年升高；同时传统火电机组的装机容量和发电量也会适度增加，提供辅助服务以保证电力系统稳定运行。

为实现“双碳”目标，必须推动我国能源结构向着可再生、清洁低碳的方向转型。绿色电力交易是我国电力市场的一大创新，有利于调整能源结构，更快地实现“双碳”目标^[1]。2021年9月，国家发展改革委等部门发布了《绿色电力交易试点工作方案》（以下简称《工作方案》），以加快绿色能源生产消费，建立完善的市场体系和机制。2023年10月，国家发展改革委和能源局联合发布《关于进一步加快电力现货市场建设工作的通知》，旨在加快全国统一电力市场体系建设，助力构建新型能源体系。近年来，随着风电、光伏发电机组的发电量增加，绿色电力的市场化程度显著提高，同时电力商品的价值也出现了较大差异^[2]。在此背景下，分析绿色电力交易对电力市场的影响，能为绿色电力市场的发展、新型能源体系的构建提供理论支持。

我国绿色电力交易的运行现状

1. 绿色电力交易政策

在我国，基于传统的电力市场框架建立绿色电力交易的市场机制，主要手段是绿色电力交易，辅助措施是绿色电力证书交易，全面体现了绿色电力的能源价值及其对环境的贡献。我国绿色电力交易

政策的演进历程可划分为三个阶段。

第一阶段，时间跨度为2005—2019年。在此期间，绿色电力政策主要由可再生能源电价补贴、可再生能源电力的保障性收购和绿色电力证书交易构成，这些政策主要侧重于从电源端促进绿色电力的发展。第二阶段，时间跨度是2019—2021年。这一阶段，可再生能源的消纳保障机制得以正式确立，而且《京津冀绿色电力市场化交易规则》开始试行。这一系列举措，标志着我国绿色电力交易市场逐步成型，绿色电力的消纳端也开始被纳入政策体系中。第三阶段，时间跨度是2021年9月至今，以《工作方案》的出台为关键节点，我国绿色电力交易政策迈入一个新阶段，绿色电力交易的试点工作正式启动。此后，《绿色电力交易实施细则》、《南方区域绿色电力交易规则（试行）》等文件相继出台，为全国各地绿色电力交易的实践提供了明确的政策指引。

我国的绿色电力交易，既能满足电力用户对绿色电力的需求，又能提供绿色电力消费认证服务。如今，电力用户可通过北京和广州的电力交易中心，采用双边协商、集中竞价、挂牌交易和场外协商等多种方式，进行绿色电力交易^[3]。该绿色电力

交易模式的应用，为用户开辟了一条直接购买绿色电力的渠道，有效解决企业在绿色电力消费认证方面的难题，还能推进可再生能源的生产和利用。

2. 绿色电力交易存在的问题

我国绿色电力交易政策出台晚，实施细则不完善，因此在交易过程中存在一些问题。

一是价格倒挂问题。绿色电力因其“零碳排放”的特性，对于有能源需求的企业而言，具有显著的减排效益，因此其市场价格通常高于传统的火力发电价格。这一价格差异，即被称为绿色电力的“环境溢价”，是对其环保价值的体现。然而，当绿色电力的市场价格低于传统电力价格时，其“零碳排放”的环保特性便无法通过电价得到合理反映，从而导致环境溢价流失。这种价格倒挂现象，给绿色电力企业带来了经济损失，降低其投资回报预期，进而影响对未来绿色电力项目的投资意愿。

二是供需平衡问题。一方面，绿色电力的电源本身具有不稳定性，导致绿色电力的供电能力出现波动；另一方面，大规模的风电和光电接入电网后，可能会影响到电能的稳定性和质量，此时需要依赖传统的火电进行调峰和调频。随着“双碳”目标的推进，未来我国绿色电力的装机容量将持续快速增长。因此，在维持高比例绿色电力接入的同时，确保电力供应与需求的平衡，成为一个亟待解决的问题。

三是电能结构问题。尽管我国可再生能源发电的装机容量在逐年攀升，但火力发电依然占据着电力供应的主导地位。当前，绿色电力自愿交易市场虽占据主流，却未能充分激发企业对绿色电力的需求潜力。在电力市场和碳排放市场之间，尚未明确互认互换机制的现状下，虽然企业为塑造自身的低碳形象，愿意承担绿色电力所带来的环境成本，但其积极采用和消化绿色电力的意愿仍有待加强。

绿色电力参与电力市场交易模型的构建

1. 运行机理

系统动力学 (System Dynamic, SD) 是一门融合系统科学理论与计算机模拟技术的学科，它专注于探索系统的反馈结构，并通过分析反馈行为来深入理解系统。该学科的核心观点在于，系统的

内部结构从根本上塑造了其行为模式与特性，且强调将定性研究与定量研究方法相结合。在处理非线性、涉及多重反馈的系统状态变化的问题时，尤其是绿色电力市场与整个电力市场的关系、发展规划及战略制定等方面，系统动力学展现出独特的优势。

通过一系列的实地调研与数据分析，本次研究选择传统能源发电商、绿色电力发电商和电网企业等关键市场主体作为研究对象。基于多主体理论框架，结合系统动力学的建模方法，构建一个关于绿色电力参与电力市场交易的系统动力学模型。利用该模型，分析电力市场中多个主体的行为决策，以及绿色电力交易对整个电力市场产生的影响。

2. 系统界定

为了科学构建绿色电力参与电力市场交易的系统动力学模型，首先设定以下模型边界和假设条件：在系统界定上，该系统动力学模型由两大子系统构成：一是绿色电力交易市场子系统；二是电力市场子系统。假设条件包括：①电力市场的供给主体，是传统能源生产商和绿色电力生产商；②发电类型划分，传统能源生产商专注于火电生产，而绿色电力生产商则专注于风电和光伏发电生产；③绿色电力交易模式，采用电力与绿色证书捆绑的交易模式；④辅助服务成本分摊，发电侧的辅助服务成本，根据传统能源发电商和绿色电力发电商的发电比例进行合理分摊。

3. 市场主体利润模型

(1) 火电生产商的利润模型

$$P_f = W_{fg} + W_{fp} - C_f - C_{fp} \quad (1)$$

式中， P_f 为火电生产商的利润； W_{fg} 为火电生产商的发电收益； W_{fp} 为火电生产商在调峰时获得的收益； C_f 为发电成本； C_{fp} 为辅助服务成本。

收益和成本指标的计算公式为

$$W_{fg} = p^f \times g_f \quad (2)$$

$$W_{fp} = (Q_{fic} - Q_{fwb}) \times P_{fp} \times \partial_{fp} \quad (3)$$

$$C_f = m_1 \times g_f^2 + n_1 \times g_f + o_1 \quad (4)$$

$$C_{fp} = C_t - C_{sp}, \quad C_t = Q_{fp} \times P_{fp} \times \partial_{fp} \quad (5)$$

式中， p^f 为火电能源的上网电价； g_f 为火电生产商的发电量； Q_{fic} 为火电机组的装机容量； Q_{fwb} 为火电机组的实际出力； P_{fp} 为火电生产商的调峰价格； ∂_{fp} 为

调峰时的技术系数； m_1 、 n_1 、 o_1 为火电机组的成本系数； C_l 为总辅助服务费用； C_{gp} 为绿色电力生产商的辅助服务成本； Q_{fp} 为火电的调峰量。

(2) 绿色电力生产商的利润模型

$$P_g = W_{gg} - C_g - C_{gp} \quad (6)$$

式中， P_g 为绿色电力发电商的利润； W_{gg} 为绿色电力生产商的发电收益； C_g 为发电成本； C_{gp} 为辅助服务成本。

收益和成本指标的计算公式为

$$W_{gg} = p^g \times g_g \quad (7)$$

$$C_g = m_2 \times g_g^2 + n_2 \times g_g + o_2 \quad (8)$$

$$C_{gp} = \frac{g_g}{g_g + g_f \times 0.5} \times C_l \quad (9)$$

式中， p^g 为绿色电力的上网电价； g_g 为绿色电力生产商的发电量； m_2 、 n_2 、 o_2 为绿色电力机组的成本系数。

(3) 电网企业的利润模型

$$P_{grid} = W_{tpd} - C_l \quad (10)$$

式中， P_{grid} 为电网企业的利润； W_{tpd} 为电网企业的输配电价收益； C_l 为电网损耗成本。

收益和成本指标的计算公式为

$$W_{tpd} = P_l \times Q_{de} \quad (11)$$

$$C_l = Q_{ac} \times N_1 \times P_s \quad (12)$$

式中， P_l 为电网企业的输配电价； Q_{de} 为电网企业的输配电量； Q_{ac} 为某区域的发电总量； N_1 为电网损耗率； P_s 为销售电价。

(4) 电力用户的利润模型

$$P_u = W_{drr} - C_2 \quad (13)$$

式中， P_u 为电力用户的利润； W_{drr} 为电力用户的需求响应收益； C_2 为电力用户的购电成本。

收益和成本指标的计算公式为

$$W_{drr} = V_{dr} \times P_{dr} \quad (14)$$

$$C_2 = (1-u) \times P_{fsc} \times g_f + u \times P_{gsc} \times g_g \quad (15)$$

式中， V_{dr} 为电力用户的需求响应量，一般取值用电量的2.5%； P_{dr} 为需求响应时段的价格； u 为电力用户购买绿色电力的意愿； P_{fsc} 、 P_{gsc} 分别为火电和绿色电力的销售价格。

4. 目标函数模型

各个市场主体以多目标最优进行决策以达到市场均衡，此时对应的目标函数为

$$w = \max(P_f + P_g + P_{grid} + P_u) \quad (16)$$

式中， w 为在多目标最优条件下的社会总福利，此时火电生产商、绿色电力生产商、电网企业和电力用户的利润达到最优。

5. 因果关系分析

首先，对绿色电力而言：①随着绿色电力需求的不断增长，绿色电力交易价格随之上涨，反过来抑制了电力用户对绿色电力的需求，最终促使绿色电力市场的供需达到平衡状态；②绿色电力需求的增长，推动了绿色电力装机容量的扩张，从而增加绿色电力的发电量和上网电量。当供应量超过需求量时，绿色电力交易价格会下降，这一降价趋势又进一步刺激电力用户对绿色电力需求的增长，形成正反馈循环。

其次，对于传统火电而言：①随着火电需求的增加，导致传统电力的交易价格的上涨，降低电力用户对火电的购买意愿，使得火电市场的供需达到平衡状态；②火电需求的增长，促进传统能源装机容量的增加，进而提升火电的发电量和上网电量。在供过于求的情况下，火电交易价格出现下滑，这一降价策略又进一步激发了电力用户对火电需求的增长，形成正反馈循环。

6. 系统动力学模型

在因果关系的基础上，进一步分析存量流量情况，在火电生产商、绿色电力生产商、电网企业和电力用户之间，得到明确的、可视化的关系。需要注意的是，目标函数模型只是系统动力学模型的一部分，因此现实情况中还会受到其他变量的影响。例如：纳入绿色电力装机容量、火电装机容量两个变量，以反映它们对绿色电力和火电发电量的影响；纳入绿色电力需求与火电需求两个变量，用以体现电力用户需求对绿色电力和火电价格的影响。得到的系统动力学模型，在算例分析中才能得到更加精确可靠的结果。

绿色电力交易对电力市场的影响效果算例分析

1. 数据来源

2018年，京津冀地区开始试行绿色电力市场化交易；2020年完善了交易规则和实施细则，2023年绿色电力交易全面铺开。本次研究以京津冀为对象进行算例分析，相关数据来源于国家统计局、能源

局和电力交易中心等。主要变量和赋值如下：电力需求增长率为0.9%，机组出力上限 $\geq 65\%$ ，输配电价平均为0.12元/(kW·h)，电网损耗率为6%，火电机组年平均利用时间为4 380 h，绿色电力机组年平均利用时间为2 375 h。发电机组的成本系数取值见表1。

表1 不同发电机组的成本系数取值

发电机组类型	系数	取值
火电机组	m_1	4.56×10^{-14}
	n_1	0.335
	o_1	0.06
绿色电力机组	m_2	9×10^{-13}
	n_2	0.400
	o_2	0.30

2. 对绿色电力市场的影响

绿色电力的交易价格方面，2022—2025年交易价格呈逐渐下降趋势，原因在于发电量大于用户需求量。2025—2028年交易价格呈缓慢增高趋势，原因在于电力用户对绿色电力的使用意愿提升、消纳能力增强；绿色电力在建装机容量方面，2022—2028年呈持续增加趋势，年均增速为12.99%；绿色电力发电量方面，2022—2028年呈持续增加趋势，年均增速为31.48%，详见表2。

表2 绿色电力交易价格、装机容量和发电量变化趋势

年份	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
交易价格/ [元/(kW·h)]	0.517	0.508	0.498	0.493	0.507	0.526	0.565
装机容量/ 亿kW	0.874	1.905	2.117	2.749	3.204	3.880	4.563
发电量/ (千亿kW·h)	0.915	1.013	1.463	1.829	2.445	2.916	3.762

3. 对传统电力市场的影响

火电价格方面，2022—2025年价格呈逐渐下降趋势，原因在于随着清洁能源的发展，用户对绿色电力的需求增加，对火电的需求下降。2025—2028年价格呈缓慢增高趋势，原因在于随着绿色电力装机容量增加，需要利用火电提供辅助服务，在市场作用下价格上涨；火电在建装机容量方面，2022—2024年增速较快，2024—2028年增速明显减缓；火电发电量方面，2022—2023年增速较缓，2023—2028年呈持续增加趋势，年均增速为64.39%，详见

表3。

表3 火电价格、装机容量和发电量变化趋势

年份	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
价格/ [元/(kW·h)]	0.561	0.558	0.554	0.551	0.561	0.614	0.627
装机容量/ 亿kW	0.487	1.338	1.502	1.526	1.614	1.833	2.158
发电量/ (千亿kW·h)	1.749	1.755	2.032	2.376	2.507	2.816	3.125

4. 对能源结构的影响

2022年，绿色电力和火电占总发电量的比例分别为34.35%和65.64%；预计2028年，两者的比例分别为54.62%和45.38%。可见，未来绿色电力占总发电量的比例持续增加，而火电所占比例持续减小，详见表4。

表4 火电和绿色电力占总发电量的比例变化趋势

年份	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
绿色电力占比 (%)	34.35	36.60	41.86	43.50	49.37	50.87	54.62
火电占比 (%)	65.64	63.40	58.14	56.50	50.63	49.13	45.38

结束语

综上所述，绿色电力交易对电力市场具有明显影响，主要体现在3个方面：①绿色电力交易价格先降后升，装机容量和发电量持续增加，以满足用户对绿色能源的需求；②火电价格先降后升，装机容量和发电量适度增加，通过调峰、调频保证电力系统的运行稳定性；③绿色电力占总发电量的比例逐渐增高，而火电所占比例逐渐减小，有助于调整电源结构，从传统能源向清洁能源的方向转变，助力“双碳”目标实现。EA

参考文献

- [1] 魏庆坡，安岗，涂永前. 碳交易市场与绿色电力政策的互动机理与实证研究[J]. 中国软科学，2023(5): 198-206.
- [2] 刘文君，张莉芳. 绿色证书交易市场、碳排放权交易市场对电力市场影响机理研究[J]. 生态经济，2021，37(10): 21-31.
- [3] 赵新泉，王闪闪，李庆. 市场交易补偿可再生能源的正外部性研究[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(8): 42-50.