

不同区域集中式光伏电站平价上网经济性分析

高鑫, 王驰中, 桂芳旭, 陈衡*, 张锴, 张国强

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Economic Analysis of Grid Parity of Centralized Photovoltaic Power Plants in Different Regions

GAO Xin, WANG Chizhong, GUI Fangxu, CHEN Heng*, ZHANG Kai, ZHANG Guoqiang

(School of Energy Power and Mechanical, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要:【目的】基于光伏发电无政策补贴平价上网的背景,对集中式光伏电站平价上网经济性进行综合分析,可以为经济性优化提供参考。【方法】研究了集中式光伏电站经济评价的流程和临界点的精确计算方式,即采用编程递归计算代替传统的拟合曲线法。提出了光伏电站能否平价上网的判断方法,即位于临界点时的上网电价是否低于地区燃煤标杆电价,并以新疆某65.59 MW集中式光伏电站为例进行经济性分析,验证判断方法是否合理。【结果】该算法提升了临界点计算的准确度,并以此为基础分析了全国平价上网的总体形势和成本效益的发展趋势,结果表明全国集中式光伏电站基本可实现平价上网,且中部地区经济效益最好。【结论】通过临界点判断电站能否平价上网将有助于评估电站的抗风险能力,帮助企业做出合理决策,实现降本增效。

关键词: 光伏发电; 集中式光伏电站; 平价上网; 临界点; 降本增效; 经济效益; 经济评价流程

ABSTRACT: [Objectives] Based on the background of photovoltaic power generation without policy subsidy parity, the comprehensive analysis of the economic feasibility of grid parity for centralized photovoltaic power stations can provide a reference for economic optimization. [Methods] The process of economic evaluation of centralized photovoltaic power station and the accurate calculation method of critical point are studied, that is, the programming recursive calculation is used to replace the traditional fitting curve method. This paper puts forward the judgment method of whether the photovoltaic power station can be put on the grid at par, that is, whether the feed-in price at the critical point is lower than the regional coal-fired benchmark price. Taking a 65.59 MW

centralized photovoltaic power station in Xinjiang as an example, the economic analysis is carried out to verify whether the judgment method is reasonable. [Results] The algorithm enhances the accuracy of critical point calculations. Building upon this, an analysis of the overall situation and cost-effectiveness trends of grid parity in China is conducted. The findings suggest that centralized photovoltaic power stations in China can essentially achieve grid parity, with the central regions exhibiting the best economic benefits. [Conclusions] Using critical point analysis to determine if a power station can achieve grid parity will help assess the station's resilience to risks, assist businesses in making informed decisions to achieve cost reduction and efficiency improvement.

KEY WORDS: photovoltaic power generation; centralized photovoltaic power station; grid parity; critical point; cost reduction and efficiency improvement; economic benefit; economic evaluation process

0 引言

2021年6月国家发展和改革委员会发布了《关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知》,光伏发电正式迈入无政府补贴的平价上网时代^[1-3]。近年来,许多学者对光伏电站平价上网的经济性进行了研究。文献[4]优化了成本模型,并以某分布式光伏项目为例探讨平价上网的可行性。文献[5]研究了含税平准化度电成本(levelized cost of electricity, LCOE)降幅与核准电价降幅趋势的对比分析,并提出了经济性的优化建议。文献[6]构建了光伏储能项目动力学模型,并测定了平价上网的边界条件。文献[7]考虑碳收益因素,分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(52276006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52276006).

了光伏发电项目平价上网的经济性。文献[8]从技术性角度对光伏电站进行设计优化研究,旨在降低其度电成本。文献[9]考虑过网费等输电成本,分析了西部地区光伏跨区平价上网的经济性。文献[10]通过计算335个中国城市的光伏发电项目的未补贴单位利润(unsubsidized unit profit, UUP)来评估中国光伏平价上网的可行性。文献[11]考虑电网整合成本构建系统LCOE,并评估各地区光伏平价上网实现时间。文献[12]通过构建碳电联动模式,研究了碳排放配额(carbon emission quota, CEQ)对光伏发电收入和效率的影响。文献[13]通过比较LCOE和燃煤标杆电价,分析了分布式光伏发电需求侧和供应侧平价上网的可行性。文献[14]探讨了可交易绿色证书(tradable green certificate, TGC)在实现光伏平价上网中的作用,并预测了我国可能实现光伏平价上网的时间。文献[15]通过创建改进的灰色模型评估了我国未来10年的光伏装机容量,并以此预测了平价上网的时间。

当前“增值税即征即退比例50%”政策的取消、新版“两个细则”和调峰辅助服务费的落实对光伏电站的收益率指标能否达到各发电企业标准产生了巨大考验^[16-18]。同时,西部大开发政策到2030年年底将成为历史,西部光伏发电项目在税金成本上不再具有优势。光伏发电平价上网是大势所趋,但缺少政策支持,光伏电站如何规避风险、提高经济性从而实现盈利是企业将面临的问题。因此,本文对集中式光伏电站平价上网进行综合分析,并对经济性优化方面提出对策和建议。

1 平价上网影响因素分析

光伏电站平价上网属于发电侧平价,即光伏发电按照传统能源的上网电价收购(无补贴)也能实现合理利润^[19]。全投资内部收益率(internal rate of return, IRR)是在不融资情况下由企业自行建设运营的折现率,而资本金内部收益率是考虑一定比例和期限的融资情况下的折现率。目前,光伏在我国实现发电侧平价的条件可以理解为光伏发电成本达到煤电价格水平。通过比较财务评价达到企业基准收益率(税前全投资内部收益率和资本

金内部收益率)的最低上网电价与当地标杆煤价的高低,判断集中式光伏发电项目能否顺利实现平价上网,若最低上网电价低于标杆煤价,则表示电站可实现平价上网;反之,则不能实现。

影响集中式光伏电站能否平价上网的因素主要有静态投资成本、经营成本、发电小时数、各项税率和银行贷款利率等。

1.1 静态投资成本

静态投资成本主要由设备及安装工程、建筑工程、其他费用、基本预备费和送出工程费用组成^[20]。其中,光伏电池组件费用占静态投资比例超过45%,组件价格的波动对整体成本影响巨大。因此,在项目规划和采购阶段应注重光伏组件的成本控制和优化。

1.2 经营成本

经营成本是电站运营期间每年需要支付的费用,主要由运维费、人工费及其他成本组成。

目前,大多数发电企业已将修理费、材料费、运维人员费用及其他费用全部纳入运维费中。集中式光伏电站运维费一般为0.04~0.55元/W,未来运营管理成本基本保持稳定。其他成本主要包括用地租金、组件更换、电费损失等额外成本^[21]。

1.3 发电小时数

发电小时数主要与太阳能资源丰富程度、光伏系统总效率、组件衰减率、弃光限电相关。发电小时数越大,电站的营业收入越高,因此需减少弃光限电,提高光伏消纳水平。

光伏系统综合能效由污秽、温度等因素造成的损失占比超过3.7%,降低相关损失能有效提高光电转化效率。此外,光伏组件首年衰减率平均为2.00%,剩余运营期内衰减率平均为0.45%,运营年限一般为25年。

1.4 税费和银行贷款利率

税费主要包括企业所得税、增值税、销售税金及附加。此外,西部地区集中式光伏电站到2030年前可享受企业所得税15%的政策支持,当前所有光伏发电项目均可享受企业所得税“三免三减半”政策。

财务费用由长期贷款利息、流动资金贷款利息和短期贷款利息组成。同时,建设期利息也与

贷款利率相关。随着国家政策的调整，贷款利息逐渐降低，这意味着还本付息总额将会大幅下降，可以降低电站的经营风险。

2 经济评价

2.1 经济评价流程

集中式光伏发电项目经济评价流程如图1所示。融资前分析应根据拟投资的光伏系统参数形成项目方案，计算光伏发电项目的建设投资、营业收入、经营成本和流动资金。

根据项目投资现金流量分析结果判断方案的可行性。融资后应根据融资方案复核建设期利息、还本付息计划和总成本费用分析，再进一步分析项目的利润及利润分配、财务计划现金流量、资产负债，根据资本金现金流量分析结果评估资本金的使用情况。最后，根据各企业全投资内部收益率(所得税前)和资本金内部收益率指标完成项目临界点分析并获得最低上网电价，即可判断项目是否可以平价上网。

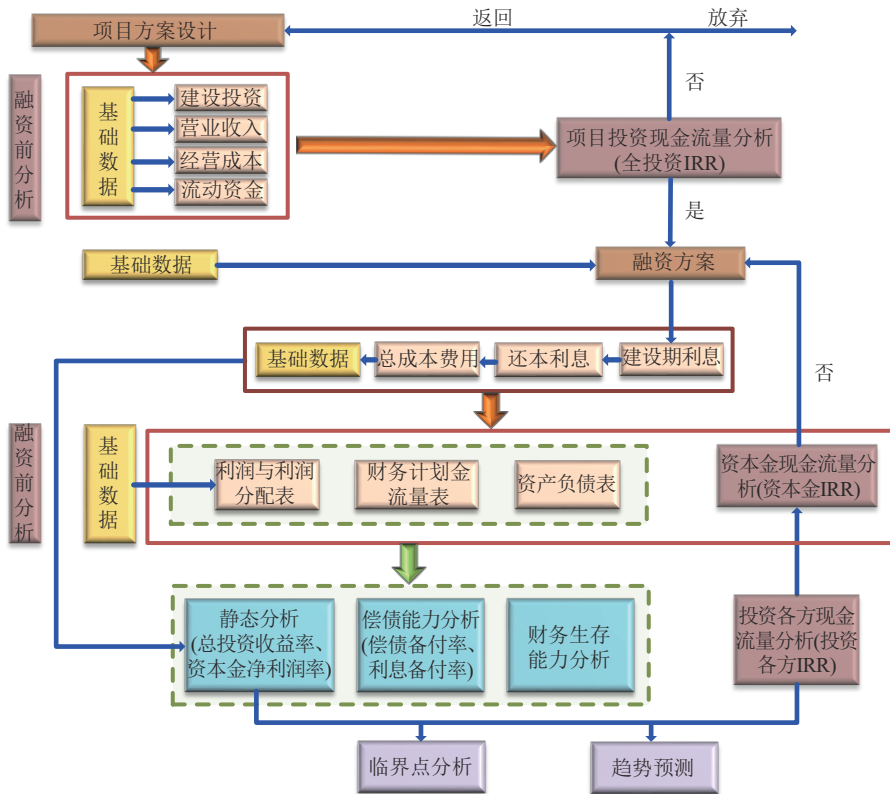


图1 集中式光伏发电项目经济评价流程图

Fig. 1 Economic evaluation flow chart of centralized photovoltaic power generation project

同时，考虑到市场化交易电价可能低于燃煤标杆电价，因此引入平准化度电成本作为辅助评价指标。平准化度电成本与电价无关，它只与企业的实际支出有关，可以提供对项目的额外评估信息。

2.2 财务内部收益率

财务内部收益率 (financial internal rate of return, FIRR)指能使项目计算期内净现值为零时的折现率^[22]，即

$$\sum_{t=1}^n (C_1 - C_0)_t (1 + F_{IRR})^{-t} = 0 \quad (1)$$

式中： C_1 为现金流入量； C_0 为现金流出量； $(C_1 - C_0)_t$ 为第 t 期的净现金流量； n 为项目计算期； F_{IRR} 为财务内部收益率。

计算全投资IRR和资本金IRR时，运营期内的 C_1 相同，为售电收入、增值税抵扣、回收流动资金之和，但是由于贷款利息需要支付，因此 C_0 需要分别计算，公式如下：

$$C_{0a} = C_{0i} + C_{wc} + x_a + x_b \quad (2)$$

$$C_{0b} = \dot{C} + C_{BP} + C_{BI} + x_a + x_b + x_c \quad (3)$$

式中： C_{0a} 为全投资现金流出； C_{0i} 为建设投资； C_{wc} 为流动资金； x_a 为经营成本； x_b 为缴纳销售税

金及附加; C_{ob} 为资本金现金流出; \dot{C} 为项目资本金; C_{BP} 为借款本金偿还; C_{BI} 为借款利息支付; x_c 为缴纳所得税(考虑三免三减半政策和西部大开发政策)。

当财务内部收益率大于或等于企业所设定的判别基准(通常称为基准收益率 i_0)时,光伏发电项目方案在财务上可考虑接受。

2.3 平准化度电成本

结合国内经营成本和税费,修正平准化度电成本计算公式如下:

$$Z = \frac{P + \sum_{t=1}^T \frac{x_a}{(1+\theta)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{x_b}{(1+\theta)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{x_c}{(1+\theta)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{x_d}{(1+\theta)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E}{(1+\theta)^t}} \quad (4)$$

式中: P 为动态投资成本现值; T 为运营年限; x_d 为缴纳增值税额; E 为每年发电量; θ 为贴现率。

2.4 敏感性临界点分析

为确定基准收益率的电价、建设投资和平均发电小时数,需要分析敏感性临界点。文献[23]介绍了假设曲线并估算误差的方法来计算敏感性临界点,但该方法不适用精准计算临界点。根据文献[23]中的敏感性分析图,可以观察到内部收益率与影响因素之间呈现单调的变化关系,因此可以考虑递归思路,使用计算机编程来快速获取临界点的分析结果。

以综合电价为例,计算电价临界点的思路如下:

1) 如果基本方案得到的内部收益率低于企业基准收益率,那么可以寻找一个合适的电价,使得计算得到的内部收益率刚好高于企业目标收益率,即获得满足基准收益率要求的电价最小值。

2) 确定综合电价变化幅度。由于当前内部收益率小于基准收益率,不妨假设变化幅度为100%。将综合电价增大为原来的2倍,计算当前内部收益率是否大于基准收益率。如果大于基准收益率,说明满足要求的参数需要在0%~100%的范围内增大;否则,增加变化幅度并再次计算。

3) 在确定了大致变化幅度后,在变化区间内采用二分查找法获取精准临界电价。

2.5 光伏组件成本和收益率趋势预测

近年来,由于硅料产能过剩,光伏组件价格

持续降低,平均组件价格已由2022年超过2元/W降至2023年年末不足1元/W。虽然降低了光伏发电的准入门槛,但选择何时投资对电站的造价成本有着较大的影响。

此外,集中式光伏电站需要更高的土地、储能、接入、运维等成本,且不同地区的上网电价、发电小时数也各不相同,因此聚类分析不同场景的数据特征,提出技术经济优化建议,预测光伏发电工程成本效益演化及发展趋势十分必要。

结合已有数据特征,组件成本预测可以采用线性回归法,收益率趋势预测可以采用多项式回归法。线性回归法的基本原理是假设因变量(预测变量)与1个或多个自变量(用于预测的变量)之间存在线性关系,基本方程如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5)$$

式中: Y 为要预测的目标变量; X_1, X_2, \dots, X_n 为用于预测的特征变量; β_0 为截距; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数,表示每个自变量对因变量的影响; ε 为误差项。

光伏组件成本预测案例如图2所示,已知前6周的光伏组件平均价格,利用线性回归法以80%置信水平预测后3周的组件价格,可知组件价格将会稳定在0.9元/W以上。

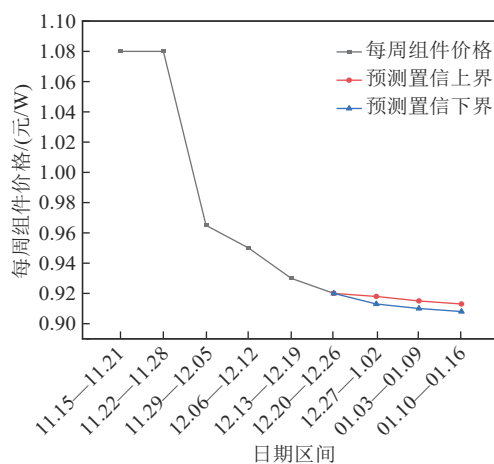


图2 光伏组件成本预测案例

Fig. 2 A photovoltaic module cost prediction case

3 集中式光伏电站平价上网案例分析

以2022年某发电集团在新疆某地区建设的集中式光伏电站为例,进行平价上网经济性分析。该电站的基本参数如表1所示。

表1 新疆某光伏电站基本参数

Tab. 1 Basic parameters of a photovoltaic power station in Xinjiang

序号	基本参数	数值	序号	基本参数	数值
1	建设期/月	5	14	人工年平均工资/万元	18
2	项目运营期/a	25	15	运维费/(元/W)	0.048
3	直流装机容量/MW	65.59	16	固定资产残值/%	0
4	建设投资/万元	24 647.43	17	首年等效发电小时数/h	1 629.9
5	可抵扣税金/万元	2 376.06	18	投运首年衰减率/%	2
6	资本金基准收益率/%	6.5	19	第二年及以后逐年衰减率/%	0.45
7	全投资基准收益率(所得税前)/%	6.0	20	上网电价(含税)/[元/(kW·h)]	0.262
8	流动资金单位千瓦指标/[元/(kW·h)]	30	21	增值税税率/%	13
9	资本金占动态投资比例/%	30	22	企业所得税税率/%	25
10	长期贷款利率/%	4.0	23	城市维护建设税税率/%	5
11	短期贷款利率/%	3.7	24	教育费附加/%	5
12	预定还款期/a	15	25	土地租金/(万元/a)	146.3
13	管理人员数量/人	1	26	储能更换/万元	869.9

经过测算，该光伏发电项目全投资内部收益率(所得税前)为6.25%，资本金内部收益率为7.13%，LCOE为0.247 6元/(kW·h)。该集团全投资基准收益率(所得税前)为6.0%，资本金基准收益率为6.5%，显然光伏电站具有良好的经济效益。

再对综合电价进行敏感性临界点分析，如表2、3和图3所示。用递归编程法计算得到的临界值分别为0.256 4、0.255 0元/(kW·h)，而用拟合曲线法得到的临界值存在一些误差，这对计算售电收入有较大影响。因此，为更好地评估电站的抗风险能力，需使用更加精确的敏感性临界点计算方法。这2项关键指标的临界值均高于当地燃煤标杆电价0.25元/(kW·h)，表明该电站暂时无法实现平价上网。此外，随着电量不断涌入电力市场进行交易，项目全生命周期电价是否能维持在0.256 2元/(kW·h)以上存在一定不确定性。

表2 拟合曲线法分析电价临界点

Tab. 2 Fitting curve method to analyze the critical point of electricity price

指标	基准值/%	拟合曲线	拟合程度	临界值/[元/(kW·h)]
全投资IRR	6.0	$y=0.139 4x+6.249 1$	0.999 5	0.256 8
资本金IRR	6.5	$y=0.272 1x+7.210 9$	0.999 4	0.254 7

表3 递归编程法分析电价临界点

Tab. 3 Recursive programming method to analyze the critical point of electricity price

指标	基准值/%	变化量/[元/(kW·h)]	变化幅度/%	临界值/[元/(kW·h)]
全投资IRR	6.0	-0.005 1	-1.95	0.256 4
资本金IRR	6.5	-0.006 7	-2.56	0.255 0

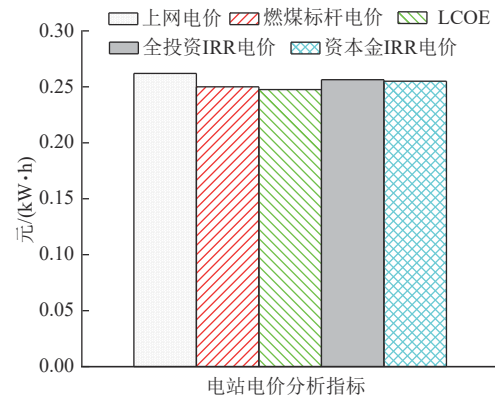


图3 新疆某光伏电站电价分析

Fig. 3 Electricity price analysis of a photovoltaic power station in Xinjiang

4 全国集中式光伏电站平价上网经济性分析

全国各省燃煤标杆电价的统计数据如表4所示。经过数据整理和经济性计算，将2022年某集团公司全国新建集中式光伏电站分为东部、中部、西部3个地区进行综合分析，各地区数据通过加权计算得到，结果如图4和表5所示。2个收益率指标仍以6.0%和6.5%为基准。

表 4 2022 年全国燃煤标杆电价
Tab. 4 China's coal-fired benchmark electricity price in 2022

序号	地区	标杆电价[元/(kW·h)]	序号	地区	标杆电价[元/(kW·h)]
1	北京	0.359 8	17	河南	0.377 9
2	天津	0.365 5	18	湖北	0.416 1
3	河北	0.364 4	19	湖南	0.450 0
4	山西	0.332 0	20	重庆	0.396 4
5	山东	0.394 9	21	四川	0.401 2
6	蒙西	0.282 9	22	陕西	0.354 5
7	蒙东	0.303 5	23	甘肃	0.307 8
8	辽宁	0.375 7	24	青海	0.227 7
9	吉林	0.373 1	25	宁夏	0.259 5
10	黑龙江	0.374 0	26	新疆	0.250 0
11	上海	0.415 5	27	广东	0.453 0
12	江苏	0.391 0	28	广西	0.420 7
13	浙江	0.415 3	29	海南	0.429 8
14	安徽	0.384 4	30	贵州	0.351 5
15	福建	0.393 2	31	云南	0.335 8
16	江西	0.414 3	32	西藏	0.250 0

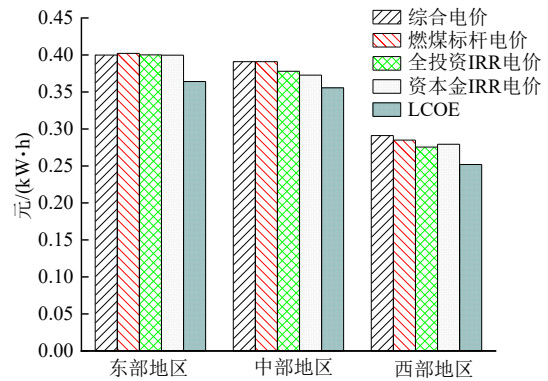


图 4 不同地区集中式光伏电站上网电价分析
Fig. 4 Analysis of on-grid price of centralized photovoltaic power stations in different regions

图 4 和表 5 表明, 各地区收益率均满足要求, 特别是中部地区电站效益最好; 而西部地区年利用小时数最高, 表明光储系统的建设已初具成效, 此外, 西部地区的 LCOE 较低, 新疆、西藏等地区有望尽快实现平价上网。

表 5 全国集中式光伏电站平价上网分析

Tab. 5 Analysis of parity access of centralized photovoltaic power station in China

地区	投资成本/(元/kW)	年利用小时数/h	LCOE/[元/(kW·h)]	综合电价/[元/(kW·h)]	燃煤标杆电价/[元/(kW·h)]
东部	4 506.54	1 139.50	0.364 1	0.399 9 ^a	0.402 2
中部	4 252.20	1 128.37	0.355 6	0.391 0	0.391 0
西部	4 275.73	1 531.31	0.252 0	0.291 0	0.285 0

地区	全投资 IRR/%	资本金 IRR/%	全投资 IRR 电价临界值/[元/(kW·h)]	资本金 IRR 电价临界值/[元/(kW·h)]
东部	6.01	6.74	0.397 8	0.397 4
中部	6.41	7.62	0.378 0	0.372 8
西部	6.25	7.09	0.257 0	0.256 8

注:^a包含了调峰辅助费用,单位为元/(kW·h)。

通过进一步分析可以得出以下结论:

1) 各地区集中式光伏电站临界值电价均低于标杆煤价, 这意味着光伏电站基本能够实现平价上网。这是一个积极的发展趋势, 表明光伏电站的运营相对稳定, 风险较小。

2) 中西部地区的集中式光伏电站具有较好的收益规模; 而在东部地区, 收益水平相对有限, 这可能与土地租赁、建筑安装费等支出较高有关。通过进一步分析这些因素的影响, 可以为优化东部地区的光伏电站经营提供有益的参考。

3) 在企业预期收益的范围内, 中部地区能够承受电价波动的幅度最大, 表明中部地区的集中式光伏电站有较好的发展前景和抗风险能力, 企业可以考虑扩大在该地区的投资规模。

5 光伏电站降本增效的对策与建议

随着光伏发电成本的持续降低, 许多地区已经实行在保障小时数内的发电量以燃煤标杆电价收购, 超出部分参与市场化交易的政策。各地区不同的保障小时数与市场电价的不确定性共同影响光伏电站经济性, 未来光伏发电是否会全电量参与市场化交易仍有待观察。

在平价上网时代, 针对如何提高集中式光伏电站的经济性以从容面对未来可能产生的风险, 提出以下对策和建议。

5.1 政府层面

1) 建立合理的电力市场机制, 完善电网接入条件

通过电力市场改革, 建立合理的上网电价机

制，保障光伏电站的电力销售收益，鼓励企业积极投资和建设光伏电站；加强电网建设和升级，提高电网接入能力和可靠性，确保光伏电站能够全额上网；加快研究新能源电力跨省调度方法，完善跨区域调度机制^[24]。

2) 降低企业非技术成本

非技术成本包括土地、融资成本和送出并网费用等。

从土地成本来看，土地租赁价格较高，政府应当出台相关政策，提升土地使用率，例如促进农光互补、渔光互补、林光互补等。特别是西部地区，提升土地使用率应是推动西部开发的必要举措。

从融资成本来看，民营企业贷款利率普遍比国有企业高，且还款年限短，导致光伏电站经营难度增大。政府部门应当给予民营企业更多的信任和支持，帮助民营集中式光伏电站更好地融入光伏发电市场。

从送出并网费用来看，该成本占静态投资比重一般超过6%，且种类繁多，给企业造成了不小的负担。《关于做好新能源配套送出工程投资建设有关事项的通知》中指出，电网企业应做好新能源配套送出工程的回购工作^[25]。政府应当促使电网企业回购线路，明确回购时间和相关细则，降低发电企业的非技术成本。

3) 优化审批流程，促进技术升级

简化光伏电站项目的审批流程，减少繁琐的手续和时间成本；促进光伏电站与电网的互联互通，提升电力系统的稳定性和可靠性；鼓励企业研发新技术、新工艺，提高光伏组件能效比，降低组件衰减率，提高电站的发电量。

5.2 企业层面

1) 控制效率与成本平衡

选择高效的光伏组件、逆变器和其他设备，优化系统设计和布局，以最大程度提高能源转化效率和发电量；通过扩大光伏电站规模，实现规模经济效益^[26]。

2) 推动光伏储能系统建设

推动集中式光伏电站光伏储能系统建设，提高光伏消纳能力，降低限电率^[27]。同时，配置储

能系统可以使光伏成为电网优质电源，包括满足电网硬性要求、平滑出力曲线、提供辅助服务等。配置储能系统可获得“两个细则”中辅助服务上的补偿。储能系统还可参与电网削峰填谷，利用峰谷电价差帮助光伏电站创造更多的经济效益。

3) 确保精准高效的运营维护管理

精准高效的运维不仅可以确保集中式光伏电站的发电量维持在较高水平，还能有效降低电站的衰减率。可以建立科学有效的光伏电站运维管理体系，确保设备的正常运行和维护；采用先进的监测设备和远程监控技术，及时发现和处理设备故障，减少停机时间和损失。

6 结论

结合集中式光伏电站经济评价流程，对敏感性临界点的计算方法进行了优化，并提出了判断集中式光伏电站能否平价上网的方法。同时，针对平价上网时代下集中式光伏电站的经济性和未来发展趋势，给出了对策与建议，并得出以下结论：

1) 在项目规划和采购阶段应注重光伏组件的成本控制和优化。

2) 经济评价应重视临界值的作用。采用提出的敏感性临界点计算方法，通过计算内部收益率与影响因素的单调关系，基于二分法原理，利用计算机编程递归计算可获得准确的临界点分析结果。

3) 当前各地区的集中式光伏电站基本能够实现平价上网，但仍需控制成本与效率平衡。

4) 为促进光伏电站降本增效，政府和企业应合作建立合理的电力市场机制。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知[EB/OL]. (2021-06-07)[2024-01-03]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on matters related to the 2021 new energy grid electricity price policy[EB/OL]. (2021-06-07)[2024-01-03]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_

- 5617297.htm.
- [2] 王驰中, 高鑫, 陈衡, 等. 中国各地区光伏发电平价上网成本效益综合分析[J]. 可再生能源, 2024, 42(10): 1295-1301.
WANG C Z, GAO X, CHEN H, et al. Comprehensive cost-benefit analysis of photovoltaic power grid parity in various regions of China[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(10): 1295-1301.
- [3] 李靖, 徐天奇, 李琰, 等. 基于多市场耦合的新能源综合发电项目的盈利能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 65-76.
LI J, XU T Q, LI Y, et al. Profitability study of multi-market coupled integrated renewable energy generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 65-76.
- [4] 鲁正, 陈芸菲, 孙炜. 基于优化LCOE的光伏平价上网可行性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 153-158.
LU Z, CHEN Y F, SUN W. Feasibility analysis of photovoltaic power to grid parity based on optimized lcoe model[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 153-158.
- [5] 任晓旭, 王杰, 朱小炜. 从LCOE与电价关系角度实证研究光伏发电项目的平价上网路径[J]. 太阳能, 2022(4): 20-28.
REN X X, WANG J, ZHU X W. An empirical study on grid parity path of PV power generation projects from perspective of relationship between lcoe and electricity price[J]. Solar Energy, 2022(4): 20-28.
- [6] 宋越, 王玉玮, 苑曙光, 等. 光伏储能电站平价上网系统动力学分析模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 129-136.
SONG Y, WANG Y W, YUAN S G, et al. System dynamics analysis model of photovoltaic energy storage power station for grid parity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 129-136.
- [7] 王怀斌, 胡芳, 刘伊雯. 计及碳收益的光伏发电平价上网可行性研究[J]. 价格理论与实践, 2022(6): 43-47.
WANG H B, HU F, LIU Y W. Feasibility analysis of photovoltaic power to grid parity with carbon revenues[J]. Price (Theory & Practice), 2022(6): 43-47.
- [8] 马庆虎, 马超. 平价上网时代下光伏电站的设计优化研究[J]. 太阳能, 2022(12): 62-66.
MA Q H, MA C. Study on design optimization of PV power station in the era of grid parity[J]. Solar Energy, 2022(12): 62-66.
- [9] 刘孟哲, 袁家海. 西部集中式光伏跨区平价的经济分析[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2020(6): 35-46.
LIU M Z, YUAN J H. Economic analysis of cross-regional parity of centralized photovoltaics in western China[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2020(6): 35-46.
- [10] ZHANG M M, ZHANG C, LIU L Y, et al. Is it time to launch grid parity in the Chinese solar photovoltaic industry? Evidence from 335 cities[J]. Energy Policy, 2020, 147: 111733.
- [11] WANG R, HASANEFENDIC S, VON HAUFF E, et al. The cost of photovoltaics: re-evaluating grid parity for PV systems in China[J]. Renewable Energy, 2022, 194: 469-481.
- [12] SONG Y, LIU T, YE B, et al. Linking carbon market and electricity market for promoting the grid parity of photovoltaic electricity in China[J]. Energy, 2020, 211: 118924.
- [13] ZHANG M, ZHANG Q. Grid parity analysis of distributed photovoltaic power generation in China[J]. Energy, 2020, 206: 118165.
- [14] TU Q, MO J, BETZ R, et al. Achieving grid parity of solar PV power in China: the role of tradable green certificate[J]. Energy Policy, 2020, 144: 111681.
- [15] ZHANG L, DU Q, ZHOU D. Grid parity analysis of China's centralized photovoltaic generation under multiple uncertainties[J]. Energies, 2021, 14(7): 1814.
- [16] 吉伦奇, 汪晓露. 新版“两个细则”对发电企业的影响及应对策略[J]. 中国电力企业管理, 2022(28): 78-79.
JI L Q, WANG X L. Influence of the new edition of “two detailed rules” on power generation enterprises and countermeasures[J]. China Power Enterprise Management, 2022(28): 78-79.
- [17] 王玉洁, 谭忠富, 鞠立伟, 等. 风-光-储联合参与绿电交易下多主体效益分配模型[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 134-140.
WANG Y J, TAN Z F, JU L W, et al. Multi-subject benefit distribution model under the union participation of wind-solar-storage in green power transactions[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 134-140.
- [18] 王磊, 田旭, 傅旭, 等. 风光抽蓄互补系统合理容量效益研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 111-117.

- WANG L, TIAN X, FU X, et al. A study on the reasonable capacity benefit of the wind power-PhotovoltaicPumped hydro storage complementary system[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 111-117.
- [19] 王丰. 平价上网时代新能源发电的经济性分析和发展趋势[J]. 现代企业文化, 2022(21): 158-160.
WANG F. Economic analysis and development trend of new energy power generation in the era of cheap Internet access[J]. Modern Enterprise Culture, 2022(21): 158-160.
- [20] 王莎莎. W光伏发电项目建设期投资成本控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
WANG S S. Research on cost control of construction investment of W photovoltaic power generation project[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [21] 陈皓勇. “双碳”目标下的电能价值分析与市场机制设计[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 141-150.
CHEN H Y. Electricity value analysis and market mechanism design under carbon-neutral goal[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 141-150.
- [22] 国家发展和改革委员会, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3版. 北京: 中国计划出版社, 2006.
National Development and Reform Commission, Ministry of Construction. Methods and parameters of economic evaluation of construction projects[M]. 3rd ed. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [23] 吴玲, 曾宇峰. 敏感性分析中求不确定性因素临界点的一般方法[C]//中国运筹学会第六届学术交流会论文集(下卷). 长沙, 2000: 71-76.
WU L, ZENG Y F. A general method for finding the critical point of uncertain factors in sensitivity analysis [C]//Proceedings of the Sixth Academic Exchange Conference of Operations Research Society of China (Volume II). Changsha, 2000: 71-76.
- [24] 徐其春, 李良杰, 卢泽汉. 电网接入光伏发电功率的实时调度与预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 141-147.
XU Q C, LI L J, LU Z H. A study on the real-time scheduling and prediction of photovoltaic power connected to the power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 141-147.
- [25] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于做好新能源配套送出工程投资建设有关事项的通知[EB/OL]. (2021-05-31) [2024-01-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/06/content_5622679.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on matters related to investment and construction of new energy supporting transmission projects[EB/OL]. (2021-05-31) [2024-01-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/06/content_5622679.htm.
- [26] 刘浩, 张晓滨, 黄晨曦, 等. 高渗透率光伏微电网能量优化管理策略的研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 129-135.
LIU H, ZHANG X B, HUANG C X, et al. Research on energy optimization management strategies for high permeability photovoltaic microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 129-135.
- [27] 李兴明. 储能技术在光伏电站并网中的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(2): 180-181.
LI X M. Application of energy storage technology in grid connection of photovoltaic power station[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(2): 180-181.

收稿日期: 2024-08-01。

修回日期: 2024-11-02。

作者简介:



高鑫

高鑫(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏技术经济性评价、能源系统集成与评价、电站大数据分析 & 智能优化等, supper1234567890@126.com;



陈衡

陈衡(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为多能互补系统、系统综合评价、智慧电力系统、电网提质增效等, 本文通信作者, heng@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)