

光热发电主动支撑电力系统能力研究现状及展望

张金平, 周强, 赵龙, 张健美, 李津, 张睿骁, 王晨, 张永蕊

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃省 兰州市 730070)

Research Status and Prospects on Active Support Capability of Concentrated Solar Power

ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, ZHAO Long, ZHANG Jianmei, LI Jin,

ZHANG Ruixiao, WANG Sheng, ZHANG Yongrui

(State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu Province, China)

ABSTRACT: As the penetration rate of new energy power generation continues to increase, conventional units are gradually replaced by new energy sources, weakening the power grid's regulation capacity and causing insufficient flexibility in the power system. This brings a serious challenge to the stable operation of the power system. Concentrating solar power has energy storage characteristics and is a flexible, regulating power source with great development potential. To better understand the positioning, role, and challenges of concentrating solar power in high-permeability new energy power systems. This paper reviewed the current research on concentrating solar power to improve the flexibility of the power grid and presented some prospects. Firstly, sorted out the problems and challenges faced by the power grid due to insufficient system flexibility against the background of a high proportion of new energy access. Then, analyzed the advantages of concentrating solar power as a flexible power supply, and the research status of enhancing the system's regulation capacity through solar thermal power generation was summarized from five aspects: the flexible regulation capacity of solar thermal power generation, the inertia support and frequency regulation of solar thermal power generation, the reactive power and voltage support of solar thermal power generation, the assessment of the reliable capacity of solar thermal power generation, and the promotion of new energy consumption by solar thermal power generation. Finally, the development trends and future research directions of concentrating solar power actively supporting the power system were prospected.

KEY WORDS: concentrating solar power; flexible operation; renewable energy accommodation; inertia support; voltage stability

摘要: 随着新能源发电渗透率的不断提高, 越来越多的常规

机组被新能源机组逐步替代, 削弱了电网调节能力, 导致电力系统灵活性不足, 电网稳定运行面临严峻挑战。光热发电具有储能特性, 是极具发展潜力的灵活性调节电源。为更好认识光热发电在高渗透率新能源电力系统中的定位、作用与挑战, 该文对光热发电提升电网灵活性研究现状进行了总结, 并做出展望。首先, 梳理了高比例新能源接入背景下电网因系统灵活性不足面临的问题与挑战; 其次, 分析了光热发电作为灵活性电源的优势, 并从光热发电灵活调节能力、光热发电惯量支撑和频率调节、光热发电无功电压支撑、光热发电置信容量评估和光热发电促进新能源消纳五方面梳理了光热发电提升系统调节能力的研究现状; 最后, 对光热发电主动支撑电力系统的发展趋势及后续研究方向进行了展望。

关键词: 太阳能光热发电; 灵活运行; 可再生能源消纳; 惯量支撑; 电压稳定

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0587

0 引言

随着具有间歇性、波动性特点的新能源发电电源在电网中的占比逐渐增加, 如何增加系统灵活调节能力成为各国关注的焦点。2024年12月20日, 国家发展改革委、国家能源局印发《电力系统调节能力优化专项行动实施方案(2025—2027年)》, 要求到2027年电力系统调节能力显著提升, 以支撑2025—2027年年均新增2亿kW以上新能源的合理消纳利用, 全国新能源利用率不低于90%^[1]。

太阳能光热发电(concentrated solar power, CSP)集发电与储热为一体, 具有出力灵活可控等优势, 可快速深度参与电网调峰, 宜与风电、光伏等新能源发电互补运行^[2-3], 是极具发展前景的灵活性调节电源。随着光热发电技术的不断发展, 未来大型光热电站将有望扮演与常规机组相似的“压舱石”角色, 为电力系统提供调峰调频和惯量支撑等服务, 保障电力系统安全稳定运行, 在高比例新能源接入的西部大型新能源基地中起到重要支撑作

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(522722230048)。

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company (522722230048).

用^[4-5]。

围绕光热发电支撑新型电力系统构建,本文首先梳理分析了高比例新能源接入背景下电网灵活性、可靠性、稳定性及新能源接纳方面面临的问题及挑战,然后在分析光热发电特性优势的基础上,从光热发电参与灵活性调节、系统惯量支撑与频率调节、无功电压支撑、光热发电置信容量评估和促进新能源消纳五方面梳理了光热发电支撑电网灵活性调节能力研究的现状,最后对有待深入研究的方向进行了展望。

1 高渗透率新能源接入弱电网系统的挑战

1.1 高比例新能源出力波动特性显著,对系统灵活性提出更高要求

以风电、光伏为代表的新能源具有高度随机性、波动性的特点,随着新能源渗透率逐步提升,新能源出力的随机性、波动性影响愈发显著,加之现阶段新能源功率预测精度不是很精确,往往导致新能源发电能力与实际用电需求不匹配,进而加重了电网调峰负担;同时随着新能源逐步成为主力电源,会进一步削弱电网调节能力,导致电网调节能力不足的问题将愈加凸显。2019年,国家电网公司经营区内,新能源日最大功率波动达1.07亿kW,占其装机的31%,预估2050年新能源日最大功率波动将超过10亿kW^[6]。因此,新能源出力强不确定性带来的灵活性问题,使得高占比新能源电网对短时快速调节、长时电量支撑、跨季能量时移等灵活调节资源需求增加^[7-8],以有效应对风光出力波动。

1.2 高比例新能源发电对天气的敏感性大大增加,极端天气下电力供应保障难度加大

新能源发电能力高度依赖风光资源,因此风速、太阳光照强度等气象要素的细微变化都会直接影响大范围风电、光伏发电出力^[7]。特别是近年来随着全球气候变暖,沙尘、雾霾、冰冻、极热等极端天气频发,经常出现夏季“极热无风”、冬季“极寒少光”现象,使得新能源发电出力显著下降,甚至达到极低水平^[9]。这种超长时间的低出力不仅引发电力供应短缺,还可能因电力供需不平衡扰乱电网安全稳定运行^[10]。例如2021年2月中旬美国得克萨斯州出现极寒天气使得风电机组结冰停机,从而引发因电力供应不足的大停电事故,给社会生产生活带来严重影响^[11]。因此,为应对各类极端场景带来的电力保供难题,亟需提升高渗透率新能源送端电网对极端天气的抵御能力,保障极端天气条件下电力可靠供应。

1.3 高比例新能源接入下电网缺乏惯性和阻尼支撑,系统稳定问题更加复杂

随着新能源接入比例的不断升高,促使发输电环节中高压大容量电力电子装备的广泛应用,使得电力系统的动态特性发生了巨大变化^[12]。同时常规电源接入比例逐渐降低,导致电网中提供惯量支撑和系统阻尼的传统同步机组极少,新能源发电系统抗扰能力弱,电网动态支撑能力下降,易引发暂态过电压、电磁宽频振荡等诸多问题,严重威胁电力系统的安全稳定运行^[13]。例如2009年美国德克萨斯州、2012年河北沽源地区均发生过风电场群与线路相互作用而引发的次同步振荡现象,影响了电网的安全稳定运行^[14]。因此,围绕协调灵活调节资源为弱电网系统提供主动支撑能力,提升系统惯量支撑和频率调节等能力是当前亟待攻克的难点问题^[15]。

1.4 高比例新能源并网快速增长与消纳能力不匹配,新能源消纳面临困境

新能源渗透率的提高显著增加了风光新能源消纳压力。根据国家能源局数据,截至2024年底,我国新能源装机14.08亿kW,约占全国电力总装机的41.74%^[16]。紧靠现有资源难以满足规模化新能源并网消纳的需求,导致新能源消纳问题和怪象频现,如市场化方式消纳大趋势下“负电价”的出现。2023年“五一”期间,山东电力现货市场出现了连续22h的负电价。因此,提升新能源发电的灵活调度能力,实现高比例风光新能源高效消纳,是推动新能源高质量发展的迫切需要^[17]。

2 光热发电在新型电力系统的支撑方面优势分析

2.1 光热发电发展概况

2.1.1 我国光热电站发展现状

近年来,国家积极推动光热发电项目规划建设。根据国家太阳能光热联盟的相关统计,截至2024年底,我国共有14座光热电站并网发电,总装机容量820MW;其中,最大装机规模110MW,最小装机规模10MW,储热时长一般为8~16h,包含9个塔式、3个槽式、2个线性菲涅尔式。从地域分布上来看,上述项目分布在青海(5个)、甘肃(6个)、新疆(1个)、内蒙古(1个)、西藏(1个)五地。具体见表1。随着“沙戈荒”大型新能源基地建设和各项政策有序推进,作为落实市场化并网条件的配套选择之一,我国光热发电将迎来快速发展。

2.1.2 光热发电技术分类及特性分析

光热发电系统包含集热系统、储热系统、蒸汽

表1 2024年底我国并网光热发电项目统计 Table 1 Statistics of grid-connected solar thermal projects in China by the end of 2024				
典型项目	类型	规模/(万kW)	储热时长/h	
甘肃首航节能敦煌100MW光热项目	塔式	10	11	
甘肃兰州大成敦煌50MW光热发电示范项目	菲涅尔式	5	15	
甘肃酒泉玉门鑫能50MW光热发电项目	塔式	5	9	
甘肃首航节能示范敦煌10MW光热项目	塔式	1	15	
青海中广核德令哈50MW光热项目	槽式	5	9	
青海中控德令哈50MW光热项目	塔式	5	7	
中电建青海共和50MW光热项目	塔式	5	6	
青海中控德令哈10MW光热项目	塔式	1	2	
新疆中能建哈密50MW熔盐塔式光热项目	塔式	5	15	
内蒙古乌拉特中旗100MW光热项目	槽式	10	10	
青海鲁能格尔木50MW光热项目	塔式	5	12	
中核集团新华发电玉门“光热+”示范项目	菲涅尔式	10	8	
阿克塞汇东新能源有限公司“光热+”示范项目	塔式	11	8	
西藏扎布耶源网荷储一体化光热电站项目	槽式	4	16	

产生系统及发电系统4部分。按照聚能方式及结构,太阳能光热发电技术可分为槽式、塔式、线性菲涅尔式和碟式4类,如图1所示。塔式光热发电技术虽然投资成本高,但具有聚光倍数高、光热转换效率高、热量传输路径短等特点,适合在昼夜温差大、缺水、环境恶劣的我国西部地区推广应用。

槽式光热发电因其聚光与集热系统结构简单、能量收集跟踪控制简单,是全球最早实现商业化运行的光热发电技术,但相较于塔式光热发电,槽式光热发电系统集热存在效率和工作温度相对较低缺点。菲涅尔式光热发电采用菲涅尔结构聚光镜代替抛物面,降低了聚光镜生产技术难度和成本,但同样存在集热效率偏低、系统总体效率有待提高的

问题。碟式系统由于受到单机规模和造价的限制,目前推广应用很少。上述4类光热发电技术特点分析对比情况如表2所示^[18-19]。

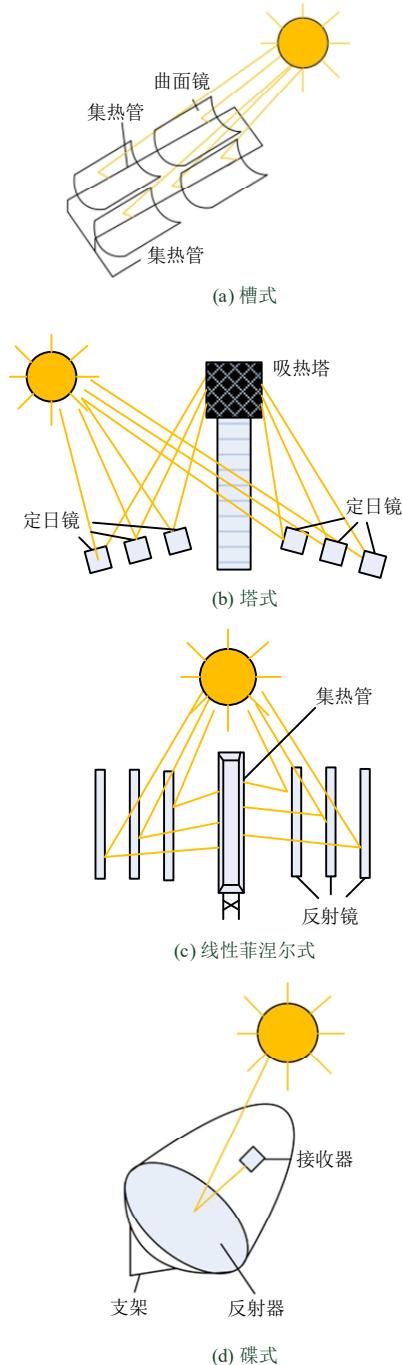


图1 4类光热技术示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of four types of solar thermal technologies

表2 不同类型光热发电技术特点 Table 2 Characteristics for different types of solar thermal technologies								
类别	聚光方式	聚光比	传热介质	储能	运行温度/℃	系统效率/%	投资成本	成熟度
槽式	线聚焦	30~80	水蒸气、熔盐、导热油	可	350~550	21	中	商业化应用
塔式	点聚焦	600~1500	水蒸气、熔盐、导热油	可	500~1400	23	高	商业化应用
线性菲涅尔式	线聚焦	25~100	水蒸气、熔盐、导热油	可	270~550	20	中	商业化应用
碟式	点聚焦	1000~4000	空气	否	700~1500	29	高	小规模试用

2.2 光热发电在高比例新能源电网中的应用优势

光热发电由于配备储热系统, 供电能力持续稳定, 且光热发电机的汽轮机结构大致上与传统汽轮机一致^[20-21], 能够作为灵活性调节电源, 为电力系

统持续提供调峰调频和惯量支撑, 如图 2 所示。

因此从光热发电原理、运行特性等方面来看, 光热发电在支撑“双高”特征电力系统方面具有优势, 具体见下文。

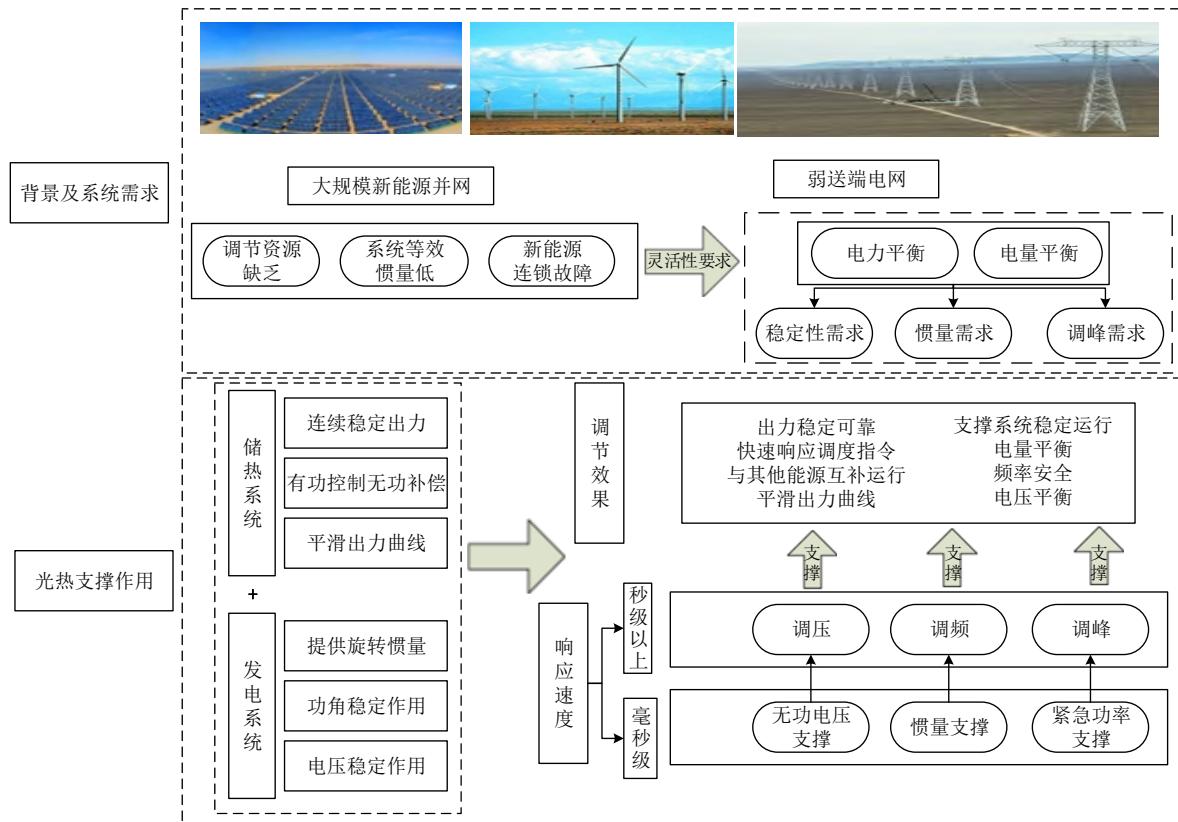


图 2 光热发电发挥调节和支持作用框架

Fig. 2 Framework of the regulatory and supporting role of CSP

2.2.1 降低新能源出力不确定性, 提高新型电力系统的快速调节能力

光热电站自带储能功能, 其配备的储热系统使光热发电机组具有能量时移特性和快速调节能力^[22-23], 可实现功率的平稳输出和灵活调节, 能够快速深度

参与电网调峰调频。表 3 对比分析了光热发电与常规机组、电化学储能调节性能。可见, 相对于常规机组, 光热发电机组有良好的调节性能^[5,24-26], 且相对于电化学储能, 光热电站提供了低成本长周期的储能解决方案^[27]。

表 3 光热发电、常规机组、电化学储能调节性能对比

Table 3 Comparison of regulation performance among solar thermal power generation, conventional units, and electrochemical energy storage

类型	调节范围(相对于装机容量)%	调节速率(相对于装机容量)/(%/min)	蒸汽发生器升温速率/(°C/min)	汽轮机启动时间(0~100%负荷)/min	惯量支撑	最大储能时长/h	优点
光热发电机组	20~100	3~4	允许 10	20~60	旋转惯量	8~16	容量大、储热温度高、成本低、可频繁启停
常规发电机组	50~100	1~2	允许 5	60~240	旋转惯量	—	容量大、技术成熟
电化学储能	0~100	100	—	—	虚拟惯量	1~2	清洁、性能好

2.2.2 光热发电系统具有同步机特性, 可提升系统等效惯量和短路比水平

光热发电具有同步机特性, 能够在惯量响应、电压调节、功率调节等方面提供主动支撑, 可以扮演类似于火电的稳定器作用, 有效抑制新能源暂态过电压和维持频率稳定, 提升电力系统稳定水平^[27-28]。

1) 提升系统等效惯量水平。

同步发电机组惯量支撑是指同步机组通过释放转子的动能或者吸收电能抑制系统频率的变化, 对系统频率起支撑作用的能力, 一般用同步发电机惯性常数表征系统惯量水平。假设新能源接入场景下, 不考虑风电、光伏和储能提供的虚拟惯量, 仅

考虑同步机组提供的惯量，此时电力系统 T 时段的整体惯量水平采用等效惯量常数^[25,29-30]可表示为

$$H_{\text{eq}}^{T,\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^N u_{G,i}^T H_{G,i}^T S_{G,i}^T}{\sum_{i=1}^N S_{G,i}^T + \sum_{j=1}^M S_{\text{RES},j}^T} \quad (1)$$

式中： $S_{G,i}^T$ 为 T 时段同步发电机组 i 的额定容量； $u_{G,i}^T$ 为 T 时段同步发电机组 i 的启停变量； $S_{\text{RES},j}^T$ 为 T 时段并网新能源机组 j 的额定容量； $H_{G,i}^T$ 为 T 时段同步发电机组 i 的惯量常数； N 和 M 分别是同步发电机组和新能源机组数量。

由于光热发电在发电环节与常规火电机组原理基本一致，对于一定容量的光热电站，其惯性常数仅与机组启停状态有关，与其实际出力无关。因此，在含光热机组的系统 T 时段内，系统等效惯量常数可表示为

$$H_{\text{eq}}^{T,\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^N u_{G,i}^T H_{G,i}^T S_{G,i}^T + \sum_{k=1}^{n_{\text{CSP}}} u_{\text{csp},k}^T H_{\text{csp},k}^T S_{\text{csp},k}^T}{\sum_{i=1}^N S_{G,i}^T + \sum_{j=1}^M S_{\text{RES},j}^T + \sum_{k=1}^{n_{\text{csp}}} S_{\text{csp},k}^T} \quad (2)$$

式中： $H_{\text{csp},k}^T$ 为光热电站 k 的等效惯量常数； $u_{\text{csp},k}^T$ 为光热电站 k 的启停变量； $S_{\text{csp},k}^T$ 为光热电站 k 的装机容量； n_{csp} 为光热电站的数量。

比较式(1)(2)可以看出，当新能源并网容量一定情况下，保持常规机组并网容量不变或光热机组替代部分常规机组时，光热电站的接入能够提升系统的等效惯量水平。

2) 提升新能源场站短路比水平。

光热发电与传统常规机组特性相似，通过“光热+新能源”模式不仅可以发挥光热发电的储能和

调峰功能，改善新能源综合出力特性；也可以提升电网短路比水平，增强系统强度，抑制系统电压波动^[31-32]。

依据新能源多场站短路比(multiple renewable energy station short circuit ratio, MRSCR)定义^[32-33]：

$$R_{\text{MRSCR}_i} = \frac{S_{\text{aci}}}{P_{\text{eqi}}} = \frac{|U_i^2 / Z_{\text{eqii}}|}{P_{\text{rei}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{\text{eqij}} / Z_{\text{eqii}}| P_{\text{rej}}} \quad (3)$$

式中： S_{aci} 为第 i 个新能源场站在电网侧接入点的短路容量； U_i 为新能源场站 i 的并网点电压； P_{rei} 为新能源场站 i 的额定功率； Z_{eqii} 和 Z_{eqij} 分别为交流网络侧的节点阻抗矩阵中对应新能源场站 i 的自阻抗和场站 i 、 j 之间的互阻抗。图 3 为两新能源场站的等效示意图。图 3 中： Z_{T1} 、 Z_{T2} 为变压器阻抗； Z_1 、 Z_2 为线路阻抗； Z_s 为系统侧等值阻抗。

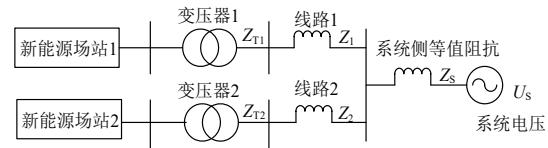


图 3 新能源场站等效接入示意图

Fig. 3 Equivalent access diagram of new energy station

图 3 中新能源场站 1 的自阻抗为

$$Z_{11} = Z_{\text{T1}} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{\text{T2}} + Z_2)}{Z_{\text{T2}} + Z_2 + Z_s} \quad (4)$$

新能源场站 1 与 2 之间互阻抗 $Z_{12} = Z_s$ ；则新能源场站 1 的 MRSCR1 表达^[33]为

$$R_{\text{MRSCR1}} = \frac{|U_1^2 / Z_{11}|}{P_{\text{re1}} + |Z_{12} / Z_{11}| P_{\text{re2}}} \quad (5)$$

若采用光热+新能源场站接入模式，如图 4 所示。

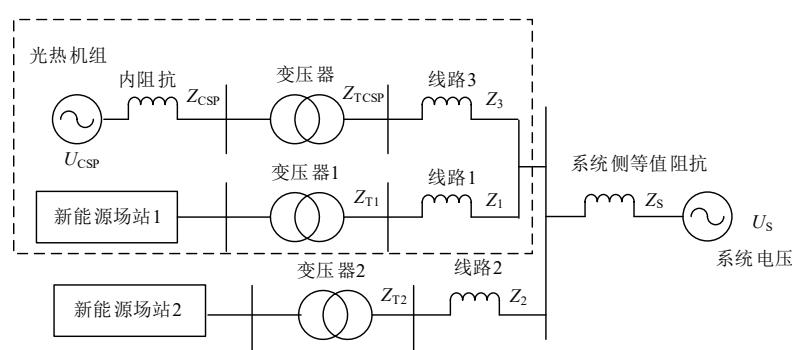


图 4 光热+新能源场站等效接入示意图

Fig. 4 Equivalent access diagram of solar thermal+new energy power stations

图 4 中： Z_{csp} 为光热发电机组内阻； Z_{TCSP} 为光热发电变压器阻抗； Z_3 为线路阻抗；接入光热电站后，新能源场站 1 的自阻抗为

$$Z'_{11} = Z_{\text{T1}} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{\text{T2}} + Z_2)(Z_{\text{csp}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}{Z_s(Z_{\text{T2}} + Z_2) + (Z_{\text{csp}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{\text{T2}} + Z_2) + (Z_{\text{csp}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s} < Z_{11} \quad (6)$$

新能源场站 1、2 间互阻抗:

$$Z'_{12} = \frac{Z_s(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}{Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3} \quad (7)$$

则新能源场站 1 的短路比变为

$$\frac{Z'_{12}}{Z'_{11}} = \frac{Z_s(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}{Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3} \times$$

$$\frac{Z_s(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s}{(Z_{T1} + Z_1)[Z_s(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s] + Z_s(Z_{T2} + Z_2)(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)} =$$

$$\frac{Z_s}{Z_{T1} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{T1} + Z_1)}{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)} + \frac{Z_s(Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{T2} + Z_2)}{Z_s(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{T2} + Z_2) + (Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s}} =$$

$$\frac{Z_s}{Z_{T1} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{T1} + Z_1)}{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)} + \frac{Z_s(Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)(Z_{T2} + Z_2)}{(Z_{T2} + Z_2)(Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3) + Z_s(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}} =$$

$$\frac{Z_s}{Z_{T1} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{T1} + Z_1)}{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)} + \frac{Z_s(Z_{T2} + Z_2)}{Z_{T2} + Z_2 + \frac{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s}{(Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}}} =$$

$$\frac{Z_s}{Z_{T1} + Z_1 + \frac{Z_s(Z_{T2} + Z_2)}{Z_{T2} + Z_2 + \frac{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)Z_s}{(Z_s + Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}}} <$$

$$\frac{Z_s}{Z_{11} + \frac{Z_s(Z_{T1} + Z_1)}{(Z_{\text{CSP}} + Z_{\text{TCSP}} + Z_3)}} < \frac{Z_{12}}{Z_{11}}$$

(9)

结合式(6)和式(9), 对比式(5)与式(8), 可知由于采用光热+新能源电站模式接入后功率折算比和自阻抗均小于新能源场站单独接入系统的功率折算比和自阻抗, 在相同功率时, 式(8)所示的短路比大于式(5)短路比, 表明光热+新能源电站模式有助于提高新能源多场站短路比, 能够起到一定的电压支撑作用, 抵御系统母线电压扰动, 抑制新能源脱网, 提升系统的稳定性与安全性。

2.3 光热电站具有储能特性, 可促进新能源消纳

新能源集中开发远距离送出是我国新能源规模化开发的主要模式。由于新能源资源富集区域缺乏常规电源支撑, 限制了新能源远距离送出消纳^[4]。光热发电兼具调峰电源和储能双重功能, 能够发挥以新能源消纳新能源的作用。首先, 在配备大容量储热系统的情形下, 光热电站可实现能量的长时间储存和灵活释放, 保障光热发电连续稳定出力, 填补常规火电机组退出后的发电空间, 支撑电网平衡和控制不确定因素, 增强电网运行的稳定性和可靠性, 为大电网稳定运行提供关键的调节和支撑作用, 增加电网接纳可再生能源能力^[34]。其次, 光热

此时功率折算比为

$$R'_{\text{MRSCR1}} = \frac{|U_1^2 / Z'_{11}|}{P_{\text{re1}} + |Z'_{12} / Z'_{11}| P_{\text{re2}}} \quad (8)$$

发电与风光新能源互补运行时, 光热电站通过调节自身出力, 实现光热与风电光伏联合发电灵活可控运行, 平滑风电光伏出力波动, 促进风光“优先发电”。

3 当前光热发电支撑能力研究应用现状

3.1 光热发电灵活调节方面

目前对光热发电灵活调节能力的相关研究主要集中于利用其出力灵活调节能力解决电力系统优化运行问题, 针对光热发电与其他单一电源联合优化运行、调度提出了一系列优化方法。文献[35-37]研究光热发电与风电联合调度中利用光热发电出力灵活性降低风电出力不确定性与波动性对系统功率平衡的冲击。文献[23,38]综合考虑火电机组向下调峰成本与储热成本, 利用光热发电出力调节的灵活性有效减轻电网下调峰压力, 降低了火电机组调峰成本。文献[39-40]分析了电加热设备(electric heater, EH)对光热电站调度灵活性的影响, 并建立含 EH 光热发电-火电旋转备用优化模型, 有效降低火电承担的旋转备用容量, 提高系统调峰能力, 促进高比例风电接入系统的风电消纳。文献[41]建立

了光伏光热联合系统分层优化运行模型，实现光伏光热协调发电，有效缓解了火电机组的深度调峰，提高了系统运行的经济性。文献[42]提出了一种考虑系统储能状态的功率协调控制策略，实现了不同工况和控制模式下的光伏与光热系统协同运行，提升了系统调节能力和响应性能。文献[43]提出一种CSP充当黑启动电源以支撑电力系统机组恢复的运行优化策略，充分发挥CSP的灵活性，为待恢复机组提供可靠的功率支撑，促进系统的恢复进程。此外，部分文献探讨了光热电站与风电、光伏等其他类型电源联合优化运行策略，从而在整体上降低风电、光伏发电的不确定性和对电网的冲击。文献[44]利用CSP具有出力灵活可控、可调度性强的特性，平抑风电机组出力的波动性，构建计及光热发电的光-风-火虚拟电厂(virtual power plant, VPP)联合调度模型，提升VPP的调节能力，解决VPP实际出力偏离其申报值的难题。文献[45]在分析风电、光伏、光热互补性的基础上，建立了日前时间尺度下计及价格需求响应的风-光-光热优化调度模型，提高新能源电站之间的协调调度能力。文献[46]在计及综合成本的前提下，提出了含风电、光伏、CSP联合发电系统最优经济调度策略，有效提高多源联合并网运行的经济性。

综上，上述文献利用光热发电的灵活调节特性，建立了日前时间尺度下含光热发电的多源联合发电调度模型，但未充分考虑风光机组出力预测偏差、光照强度预测偏差对光热电站的储热状态变化特性影响，难以满足多场景不同时间尺度下各电源高效协调出力需求，后续研究需利用实时修正的风光电预测信息，探讨在多时间尺度上光热电站与风电、光伏等多电源集成的热电耦合系统中调节策略，以进一步挖掘光热发电调节潜力。

3.2 光热发电惯量支撑和频率调节方面

低惯量水平的电力系统因惯量短缺在受到功率扰动时难以保障系统频率的稳定^[30]。随着新能源装机占比的逐渐升高，电力系统惯量逐步减小，容易出现系统频率偏差过大而诱发频率崩溃等恶性事故。光热发电由于配置储热装置具有类似常规机组的调节能力，相关研究表明光热电站能显著改善系统频率性能，提升系统的稳定性与安全性^[47]，文献[48]研究量化光热电站在降低系统运行风险和提供频率支持方面的效益，说明光热发电并网可促进可再生能源消纳并改善系统频率响应特性。文献[49]提出了一种适用于电力系统动态分析的光热发电系统简化动态模型，基于此模型量化分析了光热发电

系统在不同运行工况下的一次调频能力，研究了机组负荷大小、压力设定模式和主蒸汽温度对系统一次调频性能的影响。文献[50]考虑介质传热和换热过程中相变参数对光热发电系统性能的影响，研究控制光热发电系统换热介质流量温度以提高光热发电系统参与频率调节的响应性能。

由于系统出现频率偏差时，光热电站汽轮机组通过能量的快速释放与转化，可以高效灵活地调节电力供应，且能提供惯量支撑，抑制系统频率的变化^[51]。基于此，学者在含光热发电的机组组合策略中考虑“惯量支撑-一次频率响应-准稳态-二次频率响应”动态频率响应特性，研究满足不同调频阶段调节的需求，降低低惯量水平对电力系统频率响应变化的影响。文献[25]按照时间顺序将频率动态过程分为惯量响应、一次调频响应和二次调频响应3个步骤，提出了考虑运行风险及频率动态约束的光热并网机组组合模型，显著改善系统的频率响应。文献[52]提出了一种太阳能热发电与燃气轮机组成的联产系统惯性功率补偿优化控制方法，提升了系统动态性能与鲁棒性。文献[53]考虑光热储能状态差异，提出了光伏-光热联合发电系统的一次调频控制策略、区域系统二次调频控制策略，改善联合发电系统频率调节性能，有效提升系统频率响应能力。

综上，现有研究中关于光热发电与系统中多源惯量支撑和频率调节协同控制策略研究较少。当前在“源-网-荷-储”多样化惯量资源共存下，迫切需要开展光热电站与系统中储能、风光机组和可调节负荷等多样化虚拟惯量资源协同配合研究，以满足不同场景下系统调频需求和经济运行。

3.3 光热发电无功电压支撑方面

在抑制暂态过电压和提升动态电压支撑方面，由于光热电站采用类似火电机组的汽轮机结构，光热发电可通过发电机机端电压控制实现光热机组的无功电压调节，也可以直接控制并网点母线电压。从对电网的电压支撑角度看，与控制机端电压相比，控制光热电站高压侧母线的电压可以更好地控制系统电压，提高系统的稳定性。因此目前文献多采用利用光热发电储热系统的协同支撑，实现对光热电站与系统连接点的电压控制。文献[54]以西北某省实际电网为模型，探究了N-1及N-2故障工况下光热机组不同出力时对系统暂态电压稳定的效果，表明光热电站对交流电网动态电压的支撑能力与其输出无功功率正相关。文献[55]研究光热电站对电网的支撑作用，并与光伏+储能+分布式调

相机方案的支撑作用进行对比,指出为充分地发挥光热电站对系统故障时的动态无功支撑作用,光热电站机组参数可参照分布式调相机性能参数适当优化。文献[56]针对实际运行的大规模光热、光伏混合电站并网后受电站内外部电压状态影响的现状,提出一种考虑光热光伏混合电站内外双重电压安全的两阶段无功优化控制方法,有效抑制光伏出力的波动冲击,降低了站内电压安全越限和失稳风险,提升了系统电压安全稳定水平。文献[57]提出一种适应于光热-光伏联合发电系统的无功分层协调优化控制策略,实现了系统无功补偿任务的优化分配,提高系统汇集母线电压稳定性。文献[58]基于非线性 PID(proportional-integral-derivative)算法提出了一种改进的 AVR-PSS(automatic voltage regulator-power system stabilizer)控制策略,提高了系统低压穿越能力,保证了光伏-光热联合发电系统可以在电压下降时通过调节出力有效支持电网电压恢复。

综上,目前缺乏光热机组机端电压控制,以实现对电网无功电压支撑的深入研究。未来随着光热发电单机规模不断增大,机组的强励磁能力允许其快速转为调相运行,以发挥光热同步机对电网电压支撑作用,因此该方面值得进一步探索。此外,后续需持续研究适用于电压安全稳定动态分析的光热电站动态模型,以优化完善光热机组控制参数,从而进一步提高其无功电压的支撑能力。

3.4 光热发电置信容量评估方面

光热电站可作为火电的替代能源和调峰电源,在响应国家“碳达峰”“碳中和”的号召下,利用光热电站代替一定容量常规火电机组符合未来光热电站的发展趋势。因此,围绕准确评估光热发电的“容量价值”以支撑构建以新能源为主体的新型电力系统相关文献开展了研究。文献[59-60]分析不同太阳倍数和储热时长对光热电站容量置信度和经济性的影响,研究了不同风光容量配比下的光热最优经济性配置,保证光热电站在较高容量置信度的条件下的经济性。由于在光热发电容量参数确定情况下,光热电站置信容量评估结果还受多重因素影响,如太阳直接辐射预测的不确定性、光热储热环节运行方式、新能源接入比例、系统可靠性保证率等,因此在不同运行场景下光热电站的置信容量评估结果也不同。文献[61]研究光热电站通过增加应急备用锅炉可应对极端天气和季节性电力电量供应的不平衡,做到全容量全时段替代火电装机,保障电力可靠供应。文献[62]研究指出光热电站容

量可信度与其运行方式密切相关,调度运行中光热电站可通过预留较多的备用容量以提高其容量可信度。文献[63-65]分析了储热环节对光热电站可信容量的影响,指出光热电站由于具有储热环节其容量价值可达90%~95%,在配备大容量储热系统的情形下光热电站可以达到接近连续平稳发电的目的。文献[66]分析比对了不同新能源占比下光热电站与光伏电站的容量价值,得出光热电站的容量价值效益是光伏电站的2~3倍。

综上,现有光热电站置信容量评估方法仍未充分考虑光热电站与其他电源协同运行特性及其多重不确定性因素对评估准确性的影响,有待进一步探索适用于不同场景的光热电站置信容量评估新方法,并考虑各影响因素算法参数和权重确定策略。

3.5 光热发电促进新能源消纳方面

光热发电自带储能功能,可以与风电、光伏互补运行,提高系统新能源消纳能力,已经成为当前光热发电技术研究的热点之一。文献[67]采用的光热-火电联合调峰控制方法,有效提高系统调峰能力,以减少受阻风光电量。文献[68]利用光热电站灵活的调节特性在深度调峰时段协调火电机组参与辅助调峰,在降低系统调峰成本的同时能有效抑制风光以及负荷的短时功率波动,提升风光消纳率。文献[69]提出了一种考虑风光不确定性的风-光-光热联合发电系统的光热电站储热容量优化配置策略,有效抑制风光出力的不确定性,提高了清洁能源消纳能力。文献[70]考虑CSP提供旋转备用,降低了火电机组所需承担的备用容量的同时促进了风电消纳。文献[71]提出了一种含EH光热电站与风电的联合发电系统,通过与不含EH光热电站对比分析,表明含EH的光热电站可以显著提高风电消纳率,提升系统运行的灵活性。文献[72]针对含风电-光伏-光热-水-火-储的多能互补电力系统,研究了相应的随机生产模拟方法,有效模拟了典型供电场景下的失负荷与能源消纳结果,对评估多能互补系统的消纳指标具有重要指导意义。文献[73]基于100%可再生能源渗透系统,提出了一种光热电站容量规划的决策相关随机规划模型,分析不同新能源出力场景下CSP最优容量,从容量规划角度,探讨CSP对提高可再生能源消纳的影响。

综上,现有研究基于光热发电与光伏、风电等能源互补性,从多能互补系统调度运行、多能互补系统容量优化规划等方面分析了光热发电促进新能源消纳的策略和效果。但上述策略方法多限于日前典型场景下互补系统优化调度促进新能源消纳,

未考虑多时间尺度风光资源预测误差不确定性对各能源间协调运行方式的影响以及光热电站基于“热”环节在各能源间时序耦合特性对新能源消纳的影响,后续需要针对多时间尺度下不同新能源出

力场景进一步探索 CSP 在多能互补系统中适应新能源出力不确定性的运行优化方法。

本文所综述的光热发电支撑能力研究现状具体如表 4 所示。

表 4 本文所综述的光热发电支撑能力研究现状

Table 4 Research status of the support capacity of photothermal power generation reviewed in this paper

支撑能力分类	具体方法	主要研究进展及存在问题	未来研究方向
电网灵活性 调节	光热与风电等单一新能源电源联合发电 ^[35-37] , 利用光热电站可调度能力, 平滑出力曲线	目前时间尺度受极端场景的影响大	考虑日内小时级滚动调度和联合系统的实时控制问题
	光热与多电源联合发电系统 ^[44-46] , 建立综合成本最优风电、光伏、光热发电联合出力调度模型	未充分考虑不同时间尺度预测误差的不确定性对 CSP 调度灵活性的影响	研究多时间尺度光热与风电、光伏等多电源集成的热电耦合系统调节能力
惯量支撑和频率调节	光热发电与风电、光伏联合调频 ^[25,53] , 改善系统频率响应特性	缺乏光热与风电、光伏联合发电系统调频责任明晰, 忽略储热系统预测状态偏差对调频性能的影响	开展光热与系统中储能、风光机组和可调节负荷等多样化虚拟惯量资源协同配合策略
无功电压支撑	控制并网点母线电压 ^[54-55] , 通过比较并网点电压的大小控制无功输出	缺乏光热机组机端电压控制以实现对电网无功电压支撑的深入研究	研究光热发电转为调相运行的策略; 持续研究适用于电压安全稳定分析的光热电站动态模型
光热发电置信容量评估	对比分析不同太阳倍数和储热时长对光热电站容量置信度 ^[62-65]	未充分考虑光热电站与其他电源协同运行特性及其多重不确定性因素对评估准确性的影响	不同场景的光热电站置信容量评估新方法及考虑各影响因素算法参数和权重确定策略
促进新能源消纳	光热发电参与系统调峰、提供旋转备用 ^[67-71] , 减少受阻风光电量	未充分考虑风光资源预测精度变化对各能源间协调运行方式影响, 对新能源消纳能力的改善有限	研究多时间尺度下适应新能源出力不确定性多能互补系统中 CSP 储热系统性能和容量对弃风消纳产生的影响

4 光热发电支撑新型电力系统构建中需要关注的问题

在“双碳”目标引导下, 高比例新能源接入给电网灵活性提出更高要求, 有效利用可调节电源提升电网灵活性对于系统安全稳定运行至关重要。光热发电调节特性优异, 未来将成为支撑电网实现高比例可再生能源接入的重要调节电源。针对现有光热发电参与系统灵活调节存在的不足和挑战, 本文给出了以下几个需要进一步研究的思路和方向。

1) 研究适应多场景的光热发电支撑电网灵活性调节模型和控制策略。虽然光热发电采用类似火电机组的汽轮机结构, 具有类似常规组的调节能力, 但光热发电在能源汇聚模式、结构参数和系统工况控制方面与火电机组存在差异, 沿用类似于火电的控制方法并不适用于光热机组, 应结合电网调峰调频调压等运行需求, 研究建立适应多场景、不同类型光热机组接入系统的动态模型, 分析多种类型、不同容量配置的光热电站响应电网需求的控制模式和实际调节响应过程中与系统中其他灵活调节资源协同优化策略, 提升涉网安全水平。此外由于我国光热电站多处于西北高寒高海拔的特殊自然环境中, 沙尘、大风等极端天气频发, 应根据所在地的实际情况研究对光热电站动态模型进行修正, 以及优化控制策略参数, 提高光热发电灵活调

节能力对恶劣运行环境的适应性。

2) 进一步挖掘光热发电紧急功率支撑和无功电压调节能力。未来随着新能源渗透率不断提升和光热发电单机规模不断增大, 迫切需要进一步挖掘光热电站发挥系统稳定器作用的潜力。应综合考虑不同天气情况下光热电站运行状况、系统稳定运行需求、运行效益等约束, 研究分析在系统故障、爬坡能力不足等场景下光热发电作为紧急功率支撑电源与系统中其他资源的协调机制与优化控制策略, 为系统在调峰和消纳等方面提供稳定的电力支撑。此外, 光热发电机组的结构与同步调相机类似, 研究电网紧急故障情况下如何快速通过运行状态切换使其快速转为调相运行及相应调相运行策略以充分发挥光热同步机对电网的电压支撑作用对于提高电网安全稳定水平具有重要意义。

3) 考虑对新能源基地支撑能力的光热电站规划研究。当前我国正逐步加快以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型新能源基地规划建设, 需考虑技术发展、政策支持等因素, 探索光热发电规划布局对新能源基地的支撑能力。从技术层面, 由于“沙戈荒”新能源基地地理位置偏远, 且其周边区域缺乏常规电源支撑, 亟需考虑多类型运行场景, 研究建立适应大规模电力系统规划的光热发电模型和光热发电主动支撑控制系统架构。针对高比例新能源接入送端电网结构对新能源接纳能力影响, 分析

光热电站不同选址定容对新能源基地接入送端电网调峰、调频、调压和紧急支撑等多环节调节能力的支撑作用,为电网规划中科学合理配置光热电站提供决策依据。同时,围绕“沙戈荒”新能源基地中风电-光伏-光热联合发电系统运行优化和容量规划,考虑电网运行稳定性、经济性等约束条件,明确大型新能源基地中光热电站参与系统控制策略选择原则和优化算法,从而在保障新能源基地高效送出的同时实现运行成本最优化。从政策支持方面,完善光热发电在大型新能源基地中发挥“调节电源”作用的相关政策和市场机制。推动光热发电与风电光伏的一体化发展,明确光热与风电、光伏等电源打捆送出方式和配比原则,建立合理的协同运行、统一调度模式,优化提升规模化新能源外送比例。探索依据光热电站的储热容量或提供调节需求响应级别设定补贴方案,并形成长效激励机制,激发新能源企业配置大容量储热容量的光热电站意愿,促进光热规模化发展。

4)探索构建面向光热电站参与的电力市场机制。随着电力市场改革进程的推进,光热发电参与市场交易是必然趋势。完善光热发电的电力市场机制,围绕系统灵活性的多样需求,结合光热发电灵活性调节特性,构建适于光热电站参与调峰调频、无功调节、旋转备用、黑启动等辅助服务的市场交易机制和运行模式。探索提出考虑太阳辐照度和市场价格不确定性影响的光热电站参与电力市场竞争策略,提升光热电站在电力市场中的竞争力。完善辅助服务价格机制,建立尖峰电价和深谷电价机制,激励光热电站发挥储热系统的能量时移作用。丰富市场化的辅助服务品种,针对高比例新能源接入下极端场景,探索建立面向光热发电调节特性的快速响应类辅助服务,发挥光热电站作为系统稳定支撑电源作用和效益。

5 结论

“十五五”期间,可再生能源装机比重会进一步提高,系统调峰调节能力严重不足。光热发电集发电与储能为一体,出力稳定、可靠,调节性能优越,是实现能源转型目标不可或缺的重要技术手段。基于此,本文梳理了光热发电在储热调节、电压支撑等方面的优势,介绍了现阶段光热发电提升系统灵活性、系统惯量支撑和频率调节、无功电压支撑、光热发电置信容量评估及促进新能源消纳方面的研究现状,并剖析了未来光热机组替代常规机组而作为系统稳定支撑电源需要关注的问题。相信

随着光热发电技术的进步和光热发电规模化发展,光热发电有望成为我国新型电力系统的“压舱石”。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.国家发展改革委 国家能源局关于印发《电力系统调节能力优化专项行动实施方案(2025—2027年)》的通知[EB/OL]. (2024-12-20). <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20468>.
- [2] 赵东元,胡楠,傅靖,等.提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(24): 1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8(in Chinese).
- [3] 王冲,陆煜,左娟,等.计及光热电站与风氢系统互补运行的低碳经济调度策略[J].电力自动化设备,2023,43(12): 188-196.
WANG Chong, LU Yu, ZUO Juan, et al. Low-carbon economic scheduling strategy with complementary operation of concentrated solar power plant and wind-hydrogen system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 188-196(in Chinese).
- [4] 王杨,罗抒予,姚凌翔,等.面向大型新能源基地的太阳能光热发电规划研究综述:场景、模型与发展方向[J].电网技术,2025,49(7): 2712-2724.
WANG Yang, LUO Shuyu, YAO Lingxiang, et al. A review of concentrating solar power planning for large-scale renewable energy bases: scenarios, models and development perspectives[J]. Power System Technology, 2025, 49(7): 2712-2724(in Chinese).
- [5] 王志峰,何雅玲,康重庆,等.明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J].华电技术,2021,43(11): 1-4.
WANG Zhifeng, HE Yaling, KANG Chongqing, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4(in Chinese).
- [6] 赵紫原.随着大规模新能源接入电网,未来电力系统或出现运转调频能力下降、无功支撑不足、电压稳定问题突出、越限风险增加等多重问题——电力系统直面新能源高比例并网挑战[N].中国能源报,2020-11-09(11).
- [7] 刘泽洪,周原冰,李隽,等.超高比例新能源弱电网系统供电关键问题研究[J].新型电力系统,2024,2(3): 282-296.
LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, LI Jun, et al. Research on key issues on supplying ultra-high new energy penetrated weak systems[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(3): 282-296(in Chinese).
- [8] 孟秋,廖凯,郑舜玮,等.考虑灵活性区域互济的电力系统源-网-储协同规划[J].电网技术,2024,48(8): 3165-3174.
MENG Qiu, LIAO Kai, ZHENG Shunwei, et al. Source-grid-storage coordinated planning for power system considering flexibility mutual aid among regions[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3165-3174(in Chinese).
- [9] 王邦彦,皮俊波,王秀丽,等.天气数据驱动下基于深度主动学习的新型电力系统供需失衡风险快速评估方法[J].电网技术,2024,48(10): 4050-4059.
WANG Bangyan, PI Junbo, WANG Xiuli, et al. A fast assessment method for supply-demand imbalance risk of new power systems based on deep active learning driven by weather data[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4050-4059(in Chinese).
- [10] 郭红霞,陈凌轩,张启,等.电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J].电网技术,2024,48(10): 3975-3991.
GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Research and response to extreme scenarios in new power system: a review from

- perspective of electricity and power balance[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 3975-3991(in Chinese).
- [11] SHRESTHA S, PANCHALOGARANJAN V, MOSES P. The February 2021 U.S. southwest power crisis[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217: 109124.
- [12] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [13] 刘纯, 赵牧驰, 汪海蛟, 等. 新能源同步发电机序阻抗建模及其对宽频振荡的抑制作用[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3595-3603.
LIU Chun, ZHAO Muchi, WANG Haijiao, et al. Modelling of sequence impedance of renewable energy synchronous generator and its suppression effect on broadband oscillation[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3595-3603(in Chinese).
- [14] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200(in Chinese).
- [15] 钟祖浩, 文云峰, 叶希, 等. 多类型资源协调的“双高”送端电网频率紧急控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3801-3811.
ZHONG Zuhao, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Emergency frequency control strategy for double-high sending-end grids with coordination of multiple resources[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3801-3811(in Chinese).
- [16] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. (2025-01-27). <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cab3458aaaf78ba4558970054/c.html>.
- [17] 王文烨, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 197-206.
WANG Wenye, JIANG Fei, ZHANG Xinhe, et al. Low-carbon and flexible dispatch of high-proportion wind-photovoltaic multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 197-206(in Chinese).
- [18] 张耀明, 邹宁宇. 太阳能热发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [19] 张福君, 李凤梅. 综述太阳能光热发电技术发展[J]. 锅炉制造, 2019(4): 33-36, 46.
ZHANG Fujun, LI Fengmei. Review on technological development of concentrating solar power[J]. Boiler Manufacturing, 2019(4): 33-36, 46(in Chinese).
- [20] 周玥, 周子健, 曹田田, 等. 基于光热发电的热化学储热体系研究现状与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(12): 4818-4832.
ZHOU Yue, ZHOU Zijian, CAO Tiantian, et al. Research progress and prospects in thermochemical energy storage systems based on solar thermal power generation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022, 53(12): 4818-4832(in Chinese).
- [21] DOMÍNGUEZ R, CONEJO A J, CARRIÓN M. Operation of a fully renewable electric energy system with CSP plants[J]. Applied Energy, 2014, 119: 417-430.
- [22] 朱芝润, 余娟, 杨知方, 等. 计及光热发电非线性运行特性的区域电网功率调节能力刻画方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3541-3552.
ZHU Zhirun, YU Juan, YANG Zhifang, et al. A method for characterizing the power regulation capability of regional power grid considering the nonlinear operation characteristics of concentrating solar power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3541-3552(in Chinese).
- [23] 崔杨, 于世鹏, 张节潭, 等. 考虑光热电站调峰补偿的高比例新能源电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4922-4934.
CUI Yang, YU Shipeng, ZHANG Jietan, et al. Economic dispatch of high-proportion renewable energy power system considering peak-shaving compensation of concentrating solar power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4922-4934(in Chinese).
- [24] 高湘彬, 廖超豪, 李根. 线性菲涅尔式光热电站控制策略及变负荷速率研究[J]. 热力发电, 2024, 53(5): 47-55.
GAO Xiangbin, LIAO Chaohao, LI Gen. Study on control strategy and variable load rate of linear Fresnel solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5): 47-55(in Chinese).
- [25] 方宇晨. 光热电站与风电场联合优化运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [26] 钱勇, 倪剑. 光热汽轮发电机组技术特点[J]. 中国重型装备, 2018(4): 1-3, 7.
QIAN Yong, NI Jian. Technical features of steam turbine generator by concentrated solar power[J]. China Heavy Equipment, 2018(4): 1-3, 7(in Chinese).
- [27] 杜尔顺, 张宁, 康重庆, 等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019.
DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019(in Chinese).
- [28] 赵冬梅, 徐辰宇, 杜泽航, 等. 就地无常规电源支撑下考虑新能源基地频率稳定的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9691-9705.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, DU Zehang, et al. Optimization configuration method for energy storage considering frequency stability of new energy bases without conventional power supply support on site[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9691-9705(in Chinese).
- [29] 李东东, 张佳乐, 徐波, 等. 考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2913-2921.
LI Dongdong, ZHANG Jiale, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2913-2921(in Chinese).
- [30] 叶林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-462.
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-462(in Chinese).
- [31] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-505.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-505(in Chinese).
- [32] 杨鑫, 黄永章, 管飞, 等. 新能源同步机对新能源多场站短路比的提升作用[J]. 华北电力大学学报, 2022, 49(3): 75-83.
YANG Xin, HUANG Yongzhang, GUAN Fei, et al. Research on improving multiple renewable energy stations short circuit ratio by motor-generator pair[J]. Journal of North China Electric Power

- University, 2022, 49(3): 75-83(in Chinese).
- [33] 杨浩, 刘虎, 丁肇豪, 等. 计及短路比提升与暂态过电压抑制的含高比例风电送端电网两阶段式调相机优化配置[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 540-551.
- YANG Hao, LIU Hu, DING Zhaozhao, et al. Two-stage optimal configuration of condenser for high-proportion wind power sending-end power grid considering short circuit ratio increase and transient overvoltage suppression[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 540-551(in Chinese).
- [34] XU Ti, ZHANG Ning. Coordinated operation of concentrated solar power and wind resources for the Provision of energy and reserve services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1260-1271.
- [35] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 含大规模储热的光热电站-风电联合系统多日自调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 17-23.
- JIN Hongyang, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Multi-day self-scheduling method for combined system of CSP plants and wind power with large-scale thermal energy storage contained[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 17-23(in Chinese).
- [36] GONZÁLEZ J L, DIMOULKAS I, AMELIN M. Operation planning of a CSP plant in the Spanish day-ahead electricity market[C]// Proceedings of the 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14). Krakow: IEEE, 2014: 1-5.
- [37] DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Exploring the flexibility of CSP for wind power integration using interval optimization[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [38] 崔杨, 杨志文, 严干贵, 等. 降低火电机组调峰成本的光热电站储热容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1605-1611.
- CUI Yang, YANG Zhiwen, YAN Gangui, et al. Capacity configuration of thermal energy storage within CSP to reduce the cost of peak load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1605-1611(in Chinese).
- [39] 崔杨, 张家瑞, 仲悟之, 等. 计及电热转换的含储热光热电站与风电系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6482-6493.
- CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal scheduling of concentrating solar power plant with thermal energy storage and wind farm considering electric-thermal conversion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6482-6493(in Chinese).
- [40] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 等. 高比例风电接入系统光热发电-火电旋转备用优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5478-5489.
- ZHANG Yaixiang, LIU Wenying, PANG Qinglun, et al. Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5478-5489(in Chinese).
- [41] 肖白, 王涛. 太阳能光伏-光热联合发电的优化运行模型[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 163-170.
- XIAO Bai, WANG Tao. Optimal coordinated operation model considering photovoltaic power and concentrating solar power[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2): 163-170(in Chinese).
- [42] 林克曼, 王召珩, 吴峰, 等. 光伏-光热联合发电系统动态建模与功率协调控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 110-117.
- LIN Keman, WANG Zhaoheng, WU Feng, et al. Dynamic modeling and coordinated control strategy of hybrid PV-CSP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 110-117(in Chinese).
- [43] 孟荣涛, 李少岩, 顾雪平, 等. 光热电站作为黑启动电源时计及机组恢复效益的运行优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3486-3498.
- MENG Rongtao, LI Shaoyan, GU Xueping, et al. Operation optimization considering unit recovery effect when concentrating solar power station acts as black-start power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3486-3498(in Chinese).
- [44] 彭院院, 周任军, 李斌, 等. 计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 21-28.
- PENG Yuanyuan, ZHOU Renjun, LI Bin, et al. Two-stage optimal dispatching for solar-wind-thermal virtual power plant considering characteristic of concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 21-28(in Chinese).
- [45] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3103-3114.
- CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3114(in Chinese).
- [46] 崔杨, 杨志文, 张节潭, 等. 计及综合成本的风电-光伏-光热联合出力调度策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 269-275.
- CUI Yang, YANG Zhiwen, ZHANG Jietan, et al. Scheduling strategy of wind power-photovoltaic power-concentrating solar power considering comprehensive costs[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 269-275(in Chinese).
- [47] HODGE B, MILLER N, PAJIC S, et al. Concentrating solar power impact on grid reliability[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2018.
- [48] 方宇晨, 杜尔顺, 余扬昊, 等. 太阳能光热发电并网的综合效益量化评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5135-5146.
- FANG Yuchen, DU Ershun, YU Yanghao, et al. Comprehensive benefit analytical evaluation of gird-connected concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5135-5146(in Chinese).
- [49] 王杨, 关智文, 姚凌翔, 等. 光热发电系统简化动态模型与一次调频能力分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 112-123.
- WANG Yang, GUAN Zhiwen, YAO Lingxiang, et al. Simplified dynamic model and primary frequency regulation capability analysis of concentrated solar power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 112-123(in Chinese).
- [50] TERUNUMA R, OHMORI H. Model predictive control for concentrating solar power plants with thermal energy storage system [C]//Proceedings of the 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). Chiang Mai: IEEE, 2020: 274-279.
- [51] DU Ershun, ZHANG Ning, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.
- [52] 杨挺, 于亚利, 张亚健, 等. 计及热电耦合的太阳能联产系统功率协调控制[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3433-3440.
- YANG Ting, YU Yali, ZHANG Yajian, et al. Coordination control for integrated solar combined cycle with thermoelectric coupling[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3433-3440(in Chinese).
- [53] 王召珩. 光伏-光热联合发电系统动态建模与频率控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [54] 杨国清, 薛雨, 姚李孝, 等. 光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 134-139, 146.
- YANG Guoqing, XUE Yu, YAO Lixiao, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the

- operation characteristics of the new energy grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 134-139, 146(in Chinese).
- [55] 李富春, 刘飞, 邵成成, 等. 光热与光伏发电综合对比[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 246-253.
- LI Fuchun, LIU Fei, SHAO Chengcheng, et al. Comprehensive comparison between photothermal power generation and photovoltaic power generation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 246-253(in Chinese).
- [56] 李宗隆, 柏舸, 胡剑, 等. 考虑光热光伏混合电站内外双重电压安全的两阶段无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 170-179.
- LI Zonglong, BAI Ge, HU Jian, et al. Two-stage optimal reactive power control considering internal-external dual voltage security of a PV-CSP hybrid power station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 170-179(in Chinese).
- [57] 董海鹰, 张宏, 陈钊, 等. 光热-光伏联合发电系统无功分层协调优化控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 162-169.
- DONG Haiying, ZHANG Hong, CHEN Zhao, et al. Research on reactive stratification coordination optimization control strategy of CSP-PV hybrid system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 162-169(in Chinese).
- [58] GUO Yasen, LI Junxian, SHI Tao, et al. Research on coordinated control strategies of hybrid PV/CSP power plants[C]//Proceedings of the 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018: 2077-2081.
- [59] 王湘艳, 陈宁, 王维洲, 等. 计及置信容量的光热电站储热容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 103-109, 115.
- WANG Xiangyan, CHEN Ning, WANG Weizhou, et al. Optimal design for thermal energy storage capacity of CSP considering credible capacity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 103-109, 115(in Chinese).
- [60] 丁坤, 孙亚璐, 王湘, 等. 考虑置信容量和调峰能力的新能源基地光热电站配置方法[J]. 广东电力, 2024, 37(3): 25-34.
- DING Kun, SUN Yalu, WANG Xiang, et al. Concentrating solar power plant configuration method of renewable energy base with consideration of confidence capacity and peak shaving capacity[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 25-34(in Chinese).
- [61] 孙晓强, 汪莹, 李庆海, 等. 新型电力系统中光热电站完全替代火电规划研究[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2948-2954.
- SUN Xiaoqiang, WANG Ying, LI Qinghai, et al. Planning of solar thermal power station completely replacing thermal power in new power system[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2948-2954(in Chinese).
- [62] MADAENI S H, SIOSHANSI R, DENHOLM P. Estimating the capacity value of concentrating solar power plants with thermal energy storage: a case study of the southwestern United States[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1205-1215.
- [63] U. S. Department of Energy. SunShot vision study: section 6 integration of solar into the U. S. electric power system[R]. California: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [64] GUÉDEZ R, SPELLING J, LAUMERT B, et al. Optimization of thermal energy storage integration strategies for peak power production by concentrating solar power plants[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1642-1651.
- [65] KUEH K C Y, NATHAN G J, SAW W L. Storage capacities required for a solar thermal plant to avoid unscheduled reductions in output[J]. Solar Energy, 2015, 118: 209-221.
- [66] JORGENSEN J, DENHOLM P, MEHOS M. Estimating the value of utility-scale solar technologies in California under a 40% renewable portfolio standard[R]. Golden : National Renewable Energy Laboratory, 2014.
- [67] 张尧翔, 刘文颖, 李潇, 等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 1-7, 32.
- ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 1-7, 32(in Chinese).
- [68] 陈伟, 刘文翰, 魏占宏, 等. 计及需求响应的光热电站参与深度调峰的分层优化调度策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 579-590.
- CHEN Wei, LIU Wenhan, WEI Zhanhong, et al. Hierarchical optimal scheduling strategy for concentrating solar power participating in deep peak shaving considering demand response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(3): 579-590(in Chinese).
- [69] 解佗, 孙丹阳, 张刚, 等. 计及风光不确定性的风-光-光热联合发电系统中光热电站储热容量优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 32-39.
- XIE Tuo, SUN Danyang, ZHANG Gang, et al. Optimal capacity configuration of thermal storage within CSP plant in wind-PV-CSP hybrid power generation system considering uncertainty of wind and photovoltaic power[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 32-39(in Chinese).
- [70] 崔杨, 张汇泉, 仲悟之, 等. 计及价格型需求响应及CSP电站参与的风电消纳日前调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 183-191.
- CUI Yang, ZHANG Huiquan, ZHONG Wuwei, et al. Day-ahead scheduling considering participation of price-based demand response and CSP plant in wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 183-191(in Chinese).
- [71] 杨勇, 郭苏, 刘群明, 等. 风电-CSP联合发电系统优化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 151-157.
- YANG Yong, GUO Su, LIU Qunming, et al. Research on optimization operation for wind-CSP hybrid power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 151-157(in Chinese).
- [72] 朱睿, 胡博, 谢开贵, 等. 含风电-光伏-光热-水电-火电-储能的多能源电力系统时序随机生产模拟[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3246-3253.
- ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Sequential probabilistic production simulation of multi-energy power system with wind power, photovoltaics, concentrated solar power, cascading hydro power, thermal power and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3246-3253(in Chinese).
- [73] 史昭娣, 王伟胜, 黄越辉, 等. 考虑决策相关随机规划的光热电站容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7511-7521.
- SHI Zhaodi, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Capacity optimization of concentrating solar power plant based on decision-dependent stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7511-7521(in Chinese).

在线出版日期: 2025-09-25。

收稿日期: 2025-04-29。

作者简介:

张金平(1985), 男, 高级工程师, 通信作者, 从事新能源发电及并网研究工作, E-mail: zhangjinp@gs.sgcc.com.cn。



张金平

(责任编辑 徐梅)