

# 含多类型电源的电力系统光热发电效益评估方法

傅旭<sup>1</sup>, 王进军<sup>1</sup>, 张雨津<sup>1</sup>, 孙沛<sup>1</sup>, 李富春<sup>1</sup>, 邵成成<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**光热发电(CSP)在电力系统中发挥的效益与 CSP 的运行方式、储热时长等密切相关,合理评估 CSP 效益对 CSP 的发展具有重要影响。文中提出一种全面评估 CSP 容量效益、电量效益的等值年费用法,并计及了机组启停、储能电源跨日调节。对含有 CSP 的系统进行 8 760 h 生产仿真模拟,比较 CSP 投运前后系统火电装机需求和煤耗的变化,评估 CSP 的容量效益和电量效益,进而评估 CSP 的国民经济性。对西北地区实际电网进行仿真,仿真结果验证了所提方法的有效性。研究结果表明:CSP 的国民经济效益与 CSP 的投资、调峰方式、储热时长和新能源发电规模相关。相较于以光热发电量最大为目标的 CSP 不参与调峰运行,CSP 参与调峰运行时其国民经济性更优。

**关键词:**光热发电(CSP); 新能源发电; 容量效益; 电量效益; 新能源弃电率; 煤耗

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)01-0213-06

## 0 引言

光热发电(concentrating solar power, CSP)具有清洁、调节性能好等优点,但同样受资源约束,其储热环节受储热容量限制,因此 CSP 的效益评估相比常规电源要复杂得多<sup>[1-3]</sup>。对于含有风电、光伏、光热、水电、火电、抽水蓄能、储能等多类型电源的系统,须综合考虑 CSP 的资源特性、运行方式、储热时长等,合理评估 CSP 在电网中的综合效益<sup>[4-7]</sup>。

文献[8]以减小系统运行成本、调峰成本和弃电成本为目标,协调考虑了 CSP 与直流输电线路的灵活调节能力。文献[9-10]建立光伏-光热联合模型,对含有光伏和 CSP 的系统优化运行进行了研究。文献[11-12]提出光热机组可以配合风电运行,降低风电机组的不确定性,进而降低系统的辅助服务需求并提高系统可靠性。文献[13]考虑光伏发电与负荷的相关性,分别计算白天及夜间光伏发电置信容量。在电力系统规划设计阶段,CSP 参加装机平衡的规模大小对系统规划设计与调度运行至关重要<sup>[14-16]</sup>,与资源特性、储热时长、调峰方式等密切相关<sup>[17-19]</sup>。文献[20]将多台 CSP 机组聚合成一台等效机组,从而减小问题规模、加快模型求解速度。文献[21]综合考虑火电调峰成本与储热成本,提出一种 CSP 储热容量配置方法。文献[22]对 CSP 的容量效益及其影响因素进行了研究。

CSP 除了容量效益,还具有减少火电煤耗的电量效益,为全面评估 CSP 的效益,文中以系统供电

可靠性不变为约束,对 CSP 的容量效益、电量效益进行了综合研究,采用 8 760 h 全时段生产仿真模拟法,模拟了火电启停、储能电源和光热跨日调节等因素。对西北地区实际电网进行仿真,分析了 CSP 的效益及影响因素,研究成果可为 CSP 的运行和合理发展规模确立提供参考。

## 1 CSP 综合效益评估

### 1.1 CSP 效益计算

#### 1.1.1 容量效益

CSP 的容量效益是指系统因 CSP 而减少的常规电源装机需求。文献[22]以系统供电可靠性指标不变为约束,利用加入 CSP 后火电装机的减少量来衡量 CSP 的容量效益。文中采用该方法测算 CSP 的容量效益,图 1 为 CSP 容量效益示意。

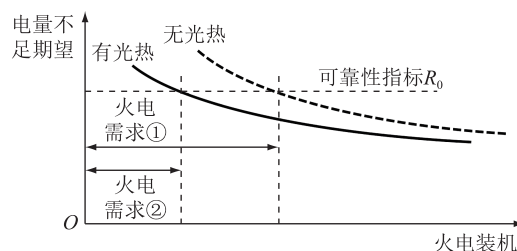


图 1 CSP 容量效益示意

Fig.1 Schematic diagram of capacity efficiency of CSP

由图 1 可知,若没有 CSP,则可靠性指标为  $R_0$  时,系统火电需求为①;加入 CSP 后,可靠性指标相同时,系统火电需求为②。加入 CSP 前后火电需求的差值即为 CSP 的容量效益,计算流程如下:

(1) 给定系统电源结构和规模,进行 8 760 h 生产模拟。计算无 CSP 时系统的电力盈缺情况,统计

得到电量不足的数值  $R_0$ ,即可靠性指标;若系统的电力装机有盈余,则计算系统的火电装机需求。

(2) 加入 CSP,逐步降低火电装机容量,进行生产模拟计算,直到其供电可靠性指标  $R$  与无 CSP 情况下供电可靠性指标  $R_0$  相同。

(3) 比较 CSP 加入前后火电装机需求和系统煤耗,确定 CSP 的容量效益。

### 1.1.2 电量效益

CSP 的电量效益是指 CSP 投入运行后,火电发电量降低,从而减少的火电发电耗煤量。产生电量效益的原因主要有:(1) CSP 加入系统后可以减少火电发电量;(2) 光热具有调节性能,可以降低风电和光伏的弃电率,从而增加风电和光伏发电量,降低火电发电量;(3) CSP 可以改善火电运行条件,从而降低火电的煤耗。

### 1.1.3 综合效益

对含有 CSP 的系统进行 8 760 h 生产仿真模拟,在系统供电可靠性指标保持不变的情况下计算 CSP 投运前后火电装机需求变化量和煤耗变化量,计算流程如图 2 所示。

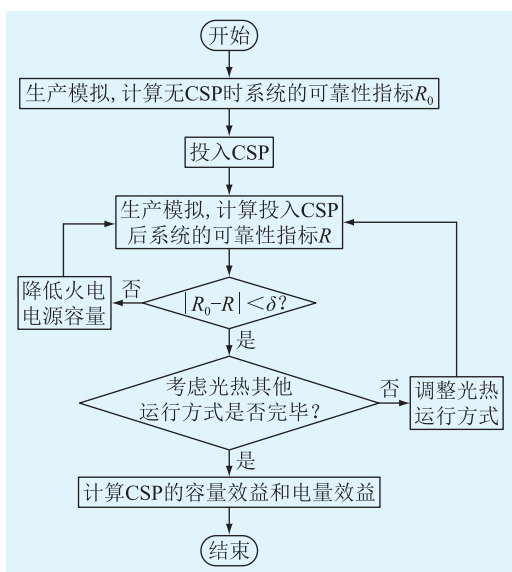


图 2 CSP 容量效益和电量效益计算流程

Fig. 2 Flow chart of calculating capacity and electricity energy benefit of CSP

### 1.1.4 CSP 国民经济评价

CSP 国民经济效益计算如下:

(1) 采用 8 760 h 生产仿真模拟,计算无 CSP 情况下,火电装机需求  $H_1$ ,系统煤耗  $M_1$ 。

(2) 加入 CSP,给定运行方式,进行 8 760 h 生产仿真模拟,计算火电装机需求  $H_2$ ,系统煤耗  $M_2$ 。

(3) 计算 CSP 容量效益,即加入 CSP 后减少的火电装机需求。

$$C_{CSP}^H = H_1 - H_2 \quad (1)$$

(4) 计算 CSP 的电量效益,即加入 CSP 后减少的系统煤耗。

$$M_{CSP} = M_1 - M_2 \quad (2)$$

(5) 计算 CSP 的综合效益。

$$R_{CSP} = r_H p_H C_{CSP}^H + \alpha_H p_H C_{CSP}^H + p_M M_{CSP} \quad (3)$$

式中:  $r_H$  为火电生命周期内的资金回收系数;  $p_H$  为火电单位装机容量造价;  $\alpha_H$  为火电运行维护费率;  $p_M$  为标准煤的价格。

(6) 计算 CSP 的成本支出。

$$T_{CSP} = r_{CSP} p_{CSP} C_{CSP} + \alpha_{CSP} p_{CSP} C_{CSP} \quad (4)$$

式中:  $C_{CSP}$  为 CSP 的装机容量;  $r_{CSP}$  为 CSP 生命周期内的资金回收系数;  $p_{CSP}$  为 CSP 单位装机容量造价;  $\alpha_{CSP}$  为 CSP 运行维护费率。

(7) 计算 CSP 的国民经济净收益。

$$Q_{CSP} = R_{CSP} - T_{CSP} \quad (5)$$

若 CSP 的国民经济净效益大于 0,则建设光热电站是经济的,否则建设电站是不经济的。

## 1.2 生产模拟模型

综合考虑新能源弃电量和发电煤耗,在满足负荷需求的情况下,尽量减少新能源弃电量和系统发电煤耗,目标函数为:

$$\min\{f_1 + \lambda_1 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 + \lambda_5 f_5 + \lambda_6 f_6\} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} f_1 &= \sum_{t=1}^L \sum_{i=1}^G (C_{i,t}(P_{i,t}, U_{i,t}) + Q_{i,t}^{up}(U_{i,t-1}, U_{i,t}) + Q_{i,t}^{off}(U_{i,t-1}, U_{i,t})) \\ f_2 &= \sum_{t=1}^L \sum_{b=1}^B (W_{b,t,0} - W_{b,t}) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (S_{b,t,0} - S_{b,t}) \\ f_3 &= \sum_{t=1}^L \sum_{i=1}^H E_{i,t} \\ f_4 &= \sum_{t=1}^L \sum_{i=1}^N (H_{i,t}(P_{i,t}^s, U_{i,t}^s) + M_{i,t}^{up}(U_{i,t-1}^s, U_{i,t}^s) + M_{i,t}^{off}(U_{i,t-1}^s, U_{i,t}^s)) \\ f_5 &= \sum_{t=1}^L \sum_{b=1}^B l_{b,t} \\ f_6 &= \sum_{t=1}^L \sum_{b=1}^B h_{b,t} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中:  $f_1$  为火电机组发电成本;  $f_2$  为新能源发电的弃电量;  $f_3$  为水电弃电量;  $f_4$  为光热机组发电成本;  $f_5$  为损失负荷成本;  $f_6$  为损失备用成本;  $C_{i,t}$  为煤电机组  $i$  在时刻  $t$  的发电成本函数;  $P_{i,t}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的有功出力;  $Q_{i,t}^{up}$ ,  $Q_{i,t}^{off}$  分别为机组  $i$  在时刻  $t$  的启动和停机费用;  $U_{i,t}$ ,  $U_{i,t-1}$  为 0-1 变量,分别表示机组  $i$  在时刻  $t$  和时刻  $t-1$  的运行状态,为 0 表示关停,为 1

表示启动;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  分别为弃风、弃光、弃水以及因光热机组调峰运行而造成效率降低的惩罚因子;  $\lambda_5$  为失负荷惩罚因子;  $\lambda_6$  为失备用惩罚因子;  $W_{b,t}$  为时刻  $t$  节点  $b$  的风电场出力;  $W_{b,t,0}$  为时刻  $t$  节点  $b$  的风电场的预测出力;  $S_{b,t}$  为时刻  $t$  节点  $b$  的光伏电站出力;  $S_{b,t,0}$  为时刻  $t$  节点  $b$  的光伏电站预测出力;  $E_{i,t}$  为水电机组  $i$  时刻  $t$  的弃水量;  $L_{b,t}, h_{b,t}$  分别为时刻  $t$  节点  $b$  的失负荷量和失备用量;  $H_{i,t}$  为光热机组  $i$  在时刻  $t$  的效率;  $M_{i,t}^{sp}, M_{i,t}^{off}$  分别为光热机组  $i$  在时刻  $t$  的启动和停机费用;  $U_{i,t}^s, U_{i,t-1}^s$  为 0-1 变量分别表示光热机组  $i$  在时刻  $t$  和时刻  $t-1$  的运行状态, 为 0 表示关停, 为 1 表示启动;  $P_{i,t}^s$  为光热机组  $i$  在时刻  $t$  的有功出力;  $G$  为所有火电机组的集合;  $H$  为所有水电机组的集合;  $N$  为所有光热机组的集合;  $L$  为调度周期;  $B$  为所有节点的集合。

目标函数的约束条件包括系统平衡约束、电站/机组运行约束、地区间联络线功率约束等, 具体表达式见文献[22]。

## 2 CSP 效益评估案例

### 2.1 系统参数

以我国某省区电网为算例进行验证, 该电网负荷 28 000 MW, 直流外送 16 000 MW, 内用电量 1 800 亿 kW·h, 外送电量 1 024 亿 kW·h, 电源结构如表 1 所示。由于 CSP、风电和光伏的成本下降速度较快, 因此工程造价考虑 2 个场景, 其参数如表 2 所示, 其中标煤价按 800 元/t 考虑。

表 1 某实际电网电源装机

Table 1 Power supply of practical grid

电源类型	装机规模/万 kW	电源类型	装机规模/万 kW
水电	992	风电	2 400
火电	3 997	光伏	1 150

表 2 建设成本参数

Table 2 Parameters of construction cost

造价场景	CSP		光伏发电		煤电	
	造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	寿命/a	造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	寿命/a	造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	寿命/a
场景 1	25 000	30	5 000	20	4 000	30
场景 2	12 500	30	2 500	20	4 000	30

设置光热场景 A~E 对 CSP 效益进行分析, 参数设置如表 3 所示。其中, 场景 A 不考虑 CSP; 场景 B~E 中 CSP 容量为 200 万 kW。

### 2.2 CSP 效益评估

光热场景 A 和场景 B 生产模拟运行结果如表 4

表 3 CSP 效益分析场景

Table 3 Scenario of capacity benefit analysis of CSP

光热场景	调峰方式	储热时长/h	光伏/万 kW
场景 A	无光热		1 150
场景 B	调峰	12	1 150
场景 C	不调峰	12	1 150
场景 D	调峰	10	1 150
场景 E	调峰	12	1 650

所示。系统没有 CSP 的情况下, 火电装机需求为 3 997 万 kW, 煤耗为 5 851 万 t, 新能源弃电率为 6.0%; 加入 200 万 kW 光热后, 火电装机需求为 3 907 万 kW, 即 CSP 容量效益为 90 万 kW, 容量替代率为 45%, 煤耗降低 286 万 t, 新能源弃电率 5.0%。

表 4 生产模拟运行结果

Table 4 Results of production simulation

参数	场景 A	场景 B
光伏/万 kW	1 150	1 150
风电/万 kW	2 400	2 400
光热装机/万 kW	0	200
火电装机/万 kW	3 997	3 907
光热容量效益/万 kW	0	90
风电电量/(亿 kW·h)	530	533
光伏电量/(亿 kW·h)	155	159
光热量/(亿 kW·h)	0	74
新能源弃电率/%	6.0	5.0
系统煤耗/万 t	5 851	5 565

光热场景 B 在造价场景 1 和场景 2 下的发电效益评估如表 5 所示。

表 5 CSP 效益评估

Table 5 Benefit evaluation of CSP

项目	造价场景 1	造价场景 2	临界造价场景
社会收益/万元	270 195	270 195	270 195
容量效益/万 kW	90	90	90
电量效益/万 t	286	286	286
容量效益等年值/万元	30 314	30 314	30 314
火电运维费/万元	10 800	10 800	10 800
电量效益等年值/万元	229 081	229 081	229 081
光热年费用/万元	432 887	216 444	270 195
光热投资/万元	5 000 000	2 500 000	3 120 850
光热等年值/万元	382 887	191 444	238 987
光热运维费/万元	50 000	25 000	31 209
光热净效益/万元	-162 693	53 751	0

在当前光热、光伏、风电的造价成本下(造价场景 1), 建设光热电站不具备国民经济性。当光热、光伏、风电的造价成本降至当前成本的 50% 时(造价场景 2), CSP 具有国民经济性。表 5 给出了 CSP

国民经济可行的造价临界点。可以看出,CSP 造价降低至当前造价的 62%左右的时候,CSP 开始具有国民经济效益。

光热场景 B 中 CSP 白天没有发电,晚上负荷高峰时光热机组发电,降低系统中常规电源的装机容量,发挥了 CSP 的容量效益。

可以看出,当系统消纳新能源目标要求较高时,完全依靠风电光伏,可能弃电率会很高,而装设光热,一方面增加了新能源消纳量,另一方面不会对系统调峰提出更高的要求。未来若要大规模发展 CSP,必须对 CSP 容量效益的发挥给予合理的补偿,而不能仅仅按照光热发电量结算。

### 2.3 CSP 国民经济效益的影响因素研究

本节分析 CSP 国民经济效益的影响因素,考虑的因素包括:CSP 的调峰方式、储热时长、新能源规模,如表 3 中的场景 C~E 所示。表 6 为场景 C~E 的生产模拟结果。

表 6 生产模拟运行结果

Table 6 Results of production simulation

参数	场景 C	场景 D	场景 E
容量效益/万 kW	0	700	1 100
替代率/%	0	35.0	55.0
火电煤耗/万 t	5 681	5 572	5 451
弃电量/(亿 kW·h)	59	38	60
弃电率/%	8.1	5.2	7.5

光热不参与调峰(场景 C),系统总的新能源发电量增加,系统煤耗降低了 170 万 t,但系统并没有因为 CSP 增加 200 万 kW 而降低了常规火电的装机需求,其容量效益为 0,且由于 CSP 不参与调峰,新能源弃电率较高,为 8.1%。场景 D 为场景 B 中 CSP 储热时长降低 2 h 的场景,CSP 容量效益为 70 万 kW,容量替代率为 35%,煤耗降低 279 万 t,新能源弃电率为 5.2%。与场景 B 相比,储热时长降低后,CSP 的调节性能有所降低,容量效益的发挥也有所降低。场景 E 为场景 B 中光伏规模增加 500 万 kW 的场景。光伏规模增加后,系统新能源弃电率有所提高,系统火电装机需求为 3 887 万 kW,CSP 容量效益为 110 万 kW,容量替代率为 55%,煤耗降低 288 万 t,新能源弃电率为 7.5%。表 7、表 8 为综合考虑 CSP 容量效益和电量效益后的国民经济评价结果。在当前的新能源造价情况下(造价场景 1),CSP 不具备国民经济性。随着新能源发电成本的降低,当新能源造价降低一半时(造价场景 2),光热参与调峰(场景 D 和场景 E)具有国民经济性,但 CSP 不参与调峰时,仍不具备国民经济性。

表 7 CSP 效益分析(造价场景 1)

Table 7 Benefit analysis of CSP (cost case 1)

参数	场景 C	场景 D	场景 E
社会收益/万元	135 859	255 187	281 001
容量效益/万 kW	0	70	110
电量效益/万 t	170	279	288
容量效益等年值/万元	0	23 578	37 050
火电运行维护费/万元	0	8 400	13 200
电量效益等年值/万元	135 859	223 209	230 751
成本支出/万元	432 887	419 035	432 887
光热投资等年值/万元	382 887	370 635	382 887
光热运维费/万元	50 000	48 400	50 000
国民经济效益/万元	-297 029	-163 848	-151 886

表 8 CSP 效益分析(造价场景 2)

Table 8 Benefit analysis of CSP (cost case 2)

参数	场景 C	场景 D	场景 E
社会收益/万元	135 859	255 187	281 001
容量效益/万 kW	0	70	110
电量效益/万 t	170	279	288
容量效益等年值/万元	0	23 578	37 050
火电运行维护费/万元	0	8 400	13 200
电量效益等年值/万元	135 859	223 209	230 751
光热年费用/万元	216 444	202 591	216 444
光热投资等年值/万元	191 444	179 191	191 444
光热运维费/万元	25 000	23 400	25 000
国民经济效益/万元	-80 585	52 596	64 557

### 3 结语

文中通过对比 CSP 投入前后,系统火电装机需求和煤耗的变化,对 CSP 的容量效益和电量效益进行评估。CSP 的国民经济效益与 CSP 的投资、调峰方式、储热时长和新能源发电规模相关。CSP 参与调峰运行时其国民经济性优于以 CSP 量最大为目标的不参与调峰运行时的国民经济性。西北地区实际电网的仿真验证了文中方法的有效性,可为光热效益评估提供更全面的视角,为合理评估光热效益提供参考。

#### 参考文献:

[1] 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.

[2] 吴鸣. 太阳能光热与热电耦合发电技术综述(下)[J]. 节能与环保,2014(3):50-53.  
WU Ming. Combined solar thermal power and heating generation

- technology review (part 2) [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2014, 3(3): 50-53.
- [3] 张哲旸, 巨星, 潘信宇, 等. 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用[J]. *发电技术*, 2020, 41(3): 220-230.  
ZHANG Zheyang, JU Xing, PAN Xinyu, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application [J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(3): 220-230.
- [4] International Energy Agency (IEA). Technology roadmap: concentrating solar power [R]. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf).
- [5] 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.
- [6] 宋汶秦, 吕金历, 赵玲霞, 等. 光热-风电联合运行的电力系统经济调度策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 95-102.  
SONG Wenqin, LYU Jinli, ZHAO Lingxia, et al. Study on the economic dispatch strategy of power system with combined operation of concentrated solar power and wind farm [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 95-102.
- [7] 贡韞韵, 董海鹰, 马志程, 等. 考虑需求响应与光热电站参与的多源系统优化经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(14): 140-149.  
YUN Yunyun, DONG Haiying, MA Zhicheng, et al. Optimization economic dispatch of a multi-source system considering the participation of demand response and concentrating solar power plant [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(14): 140-149.
- [8] 沙韵, 周明, 杨宏基, 等. 考虑光热电站和直流联络线灵活性的高比例新能源互联系统优化运行[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3306-3313.  
SHA Yun, ZHOU Ming, YANG Hongji, et al. Interconnected power system optimal operation with renewable generation considering flexibility of concentrating solar power plants & HVDC Tie-line [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3306-3313.
- [9] 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.
- [10] 张宏, 董海鹰, 陈钊, 等. 基于模型预测控制的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 135-142.  
ZHANG Hong, DONG Haiying, CHEN Zhao, et al. Multi-time scale reactive power optimal control strategy of a CSP-PV system based on model predictive control [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 135-142.
- [11] CHEN R Z, SUN H B, GUO Q L, et al. Reducing generation uncertainty by integrating CSP with wind power: an adaptive robust optimization-based analysis [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(2): 583-594.
- [12] XU T, ZHANG N. 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.
- [13] 方鑫, 郭强, 张东霞, 等. 并网光伏电站置信容量评估[J]. *电网技术*, 2012, 36(9): 31-35.  
FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(9): 31-35.
- [14] 蒲天骄, 陈乃仕, 葛贤军, 等. 电力电量平衡评价指标体系及其综合评估方法研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 250-256.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, GE Xianjun, et al. Research on evaluation index system and synthetical evaluation method for balance of electric power and energy [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 250-256.
- [15] 刘明浩, 王丽萍, 王渤权, 等. 基于出力不均匀性的火电站电力电量平衡方法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 162-168.  
LIU Minghao, WANG Liping, WANG Boquan, et al. Power and energy balance method of thermal power station based on uneven output [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 162-168.
- [16] MADAENI S H, SIOSHANSI R, DENHOLM P. Estimating the capacity value of concentrating solar power plants: a case study of the southwestern United States [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 1116-1124.
- [17] 陈润泽, 孙宏斌, 李正烁, 等. 含储热光热电站的电网调度模型与并网效益分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(19): 1-7.  
CHEN Runze, SUN Hongbin, LI Zhengshuo, et al. Grid dispatch model and interconnection benefit analysis of concentrating solar power plants with thermal storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(19): 1-7.
- [18] 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.
- [19] 孙沛, 傅旭, 李富春, 等. 含有电加热装置的光热机组运行策略研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(3): 38-43.  
SUN Pei, FU Xu, LI Fuchun, et al. Study on operation strategy of concentrating solar power plant with electric heating device

- [J]. Smart Power, 2018, 46(3):38-43.
- [20] 邵成成,冯陈佳,李丁,等. 光热发电机组聚合模型及其在电力系统运行模拟中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11):3507-3516.
- SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, LI Ding, et al. Clustered CSP model and its application in power system operation simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11):3507-3516.
- [21] 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, 1896.
- 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, 1896.
- [22] 傅旭,杨欣,汪莹,等. 光热电站容量效益评估及影响因素研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3):186-192.
- FU Xu, YANG Xin, WANG Ying, et al. The capacity benefit evaluation of CSP power station and its influencing factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3):186-192.

作者简介:



傅旭

傅旭(1976),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统规划分析相关工作(E-mail: fuxu@nwepdi.com);

王进军(1980),男,硕士,高级工程师,从事发电厂设计相关工作;

张雨津(1991),男,硕士,工程师,从事电力系统规划分析相关工作。

### Benefit evaluation of CSP in power system with multiple types of power sources

FU Xu<sup>1</sup>, WANG Jinjun<sup>1</sup>, ZHANG Yujin<sup>1</sup>, SUN Pei<sup>1</sup>, LI Fuchun<sup>1</sup>, SHAO Chengcheng<sup>2</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The operation mode and heat storage time of concentrating solar power (CSP) have a profound impact on the benefits of CSP in power system. It has an important impact on the development of CSP by the reasonable evaluation on the benefits. An equivalent annual cost method for comprehensively evaluating the capacity benefit and electricity benefits of CSP is proposed in this paper. The start-up and shutdown of the unit and the cross-day adjustment of the energy storage power supply are considered by this method. The production simulation for the system with CSP is carried out in 8 760 h. By comparing the changes of thermal power installation demand and system coal consumption before and after the CSP is put into operation, the capacity benefits and electricity energy benefits of the CSP are evaluated, and then the national economy of the CSP is evaluated. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the simulation of the actual power grid in northwest China. The results show that the national economic benefits of CSP are related to the investment of CSP, the way of peaking, the hour of heat storage and the scale of new energy power generation. The national economy of CSP participating in peak-shaving operation is better than it doesn't.

**Keywords:** concentrating solar power (CSP); new energy generation; capacity benefits; electricity benefits; new energy abandonment rate; consumption of coal

(编辑 方晶)