

塔式太阳能热发电站的输出与 储热调峰特性研究

周 慧, 张开宇, 胡锦涛*, 刘盛豪, 王玄骅, 王 巍

(浙江可胜技术股份有限公司, 杭州 310053)

摘 要: 随着电网峰谷差的增大, 其对调峰电源的需求也随之增加, 塔式太阳能热发电站具有良好的可调度性, 是优质的绿色调峰电源。以青海省某商业化运行的 50 MW 塔式太阳能热发电站为研究对象, 对其组成部分、运行模式、输出特性及储热调峰能力进行了分析。分析结果显示: 1) 该太阳能热发电站可克服光伏发电、风电的随机性、波动性缺点, 在多云天气下也能维持稳定高功率输出, 同时还能根据用电需求维持低功率持续运行, 表现出良好能量调节能力。2) 该太阳能热发电站可以在光伏发电、风力发电高峰期时, 快速降功率运行; 而在光伏发电、风力发电处于谷值时, 快速升功率运行, 使电网最大限度地消纳光伏发电和风电。

关键词: 塔式太阳能热发电站; 储热调峰; 输出特性; 调峰电源

中图分类号: TK519

文献标志码: A

0 引言

可再生能源存在间歇性和波动性, 其大规模并网增大了电网等效负荷的峰谷差, 进而对电网的安全运行造成了威胁^[1-4]。为使电网有效消纳可再生能源, 使用高稳定性的电源进行灵活调峰成为一种有效方法^[5-6], 其中, 采用熔盐储能技术的塔式太阳能热发电站, 可通过储换热系统实现能量的快速释放与转换, 具有天然的调峰优势^[7-12]。

国内外学者已做了大量有关太阳能热发电储热调峰特性的研究。比如: Boukelia 等^[13]对有无储热和燃料备用系统的槽式太阳能热发电站的输出功率进行了研究。崔杨等^[14]研究发现: 火电机组的调峰成本受并网太阳能热发电站储热容量的影响, 通过合理配置储热容量能有效降低火电机组的调峰成本。张尧翔等^[15]对太阳能热发电的可调节特性及太阳能热发电-火电联合调峰

控制的可行性进行了分析, 并通过算例验证了其有效性。负温韵等^[16]基于电网经济性调度问题建立了太阳能热发电站需求响应模型, 得出火电机组和太阳能热发电站配合可以提高电网对可再生能源的消纳深度。董海鹰等^[17]对热电联产运行模式下的太阳能热发电储热调峰策略进行了研究, 研究结果表明: 热电联产运行模式下, 通过太阳能热发电站的辅助供热, 可显著提高电网的风电消纳水平。

虽然已有研究对太阳能热发电站的储热调峰特性进行了研究, 但基于太阳能热发电站实际运行数据的储热调峰特性的研究仍较为欠缺。因此, 本文以青海省某商业化运行的 50 MW 塔式太阳能热发电站(下文简称为“本太阳能热发电站”)为研究对象, 对其组成部分、运行模式、输出特性及储热调峰能力进行分析, 旨在为大规模商业化塔式太阳能热发电站的设计和运行提供理论支持。

收稿日期: 2024-12-11

通信作者: 胡锦涛(1994—), 男, 硕士、中级工程师, 主要从事太阳能热发电方面的研究。hujinhua@cosinsolar.com

1 本太阳能热发电站概括

1.1 组成部分介绍

本太阳能热发电站由聚光集热系统、储换热系

统 (包括储热系统和换热系统)、汽轮机发电系统 3 部分组成, 其运行原理图如图 1 所示。图中: 高加和低加分别为高压加热器和低压加热器的简称。

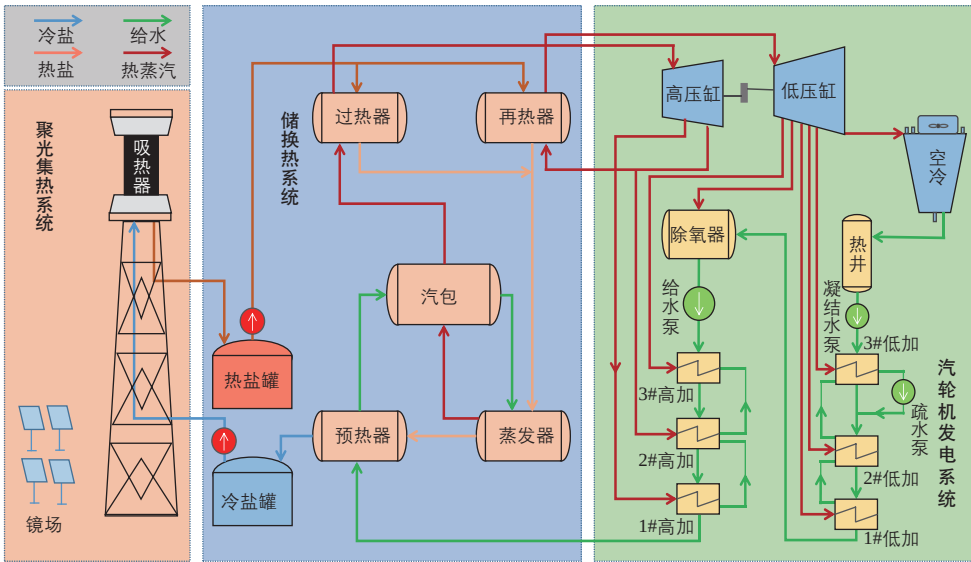


图 1 本太阳能热发电站的运行原理图
Fig. 1 Operating principle diagram of CSP station

本太阳能热发电站通过定日镜阵列 (镜场) 将太阳辐射反射到吸热塔塔顶的吸热器上, 吸热器将表面聚集的太阳辐射能转化为吸热器内部传热工质 (采用熔盐, 由 60% 的 NaNO_3 和 40% 的 KNO_3 组成) 的热能; 随后, 通过管道将由吸热器加热至 $565\text{ }^\circ\text{C}$ 的熔盐输送到储热系统的热盐罐中储存, 发电时热盐罐内的高温熔盐由热盐泵输送至换热系统, 在换热系统中高温熔盐与给水换热, 产生高品质过热蒸汽, 进而推动汽轮发电机组发电。

本太阳能热发电站配置了储热时长为 7 h 的储热系统, 采用具有超高压、高温、中间一次再热特性的凝气式汽轮发电机组, 支持频繁启停。本太阳能热发电站的主要技术参数如表 1 所示。

1.2 本太阳能热发电站的运行模式分析

由于太阳辐照具有周期性和波动性的特点, 通过配备储热系统, 本太阳能热发电站可实现聚光集热系统和汽轮机发电系统的解耦运行。根据运行特点, 本太阳能热发电站可分为 4 种运行模

表 1 本太阳能热发电站的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of tower CSP station

参数	数值
年利用小时数 (设计值)/h	2920
镜场面积 / m^2	542700
吸热器额定功率 /MW	230
吸热器进 / 出口温度 / $^\circ\text{C}$	290/565
储热容量 /MWh	837
装机容量 /MW	50

式, 分别为: 1) 储热模式。法向直接辐照度 (DNI) 达到聚光集热系统运行条件时, 聚光集热系统运行, 储热系统储热, 但此时储热量达不到汽轮发电机组启动条件。2) 储热且发电模式。当储热系统储热量满足汽轮发电机组启动条件时, 汽轮发电机组启动, 汽轮机发电系统运行; 此时, 本太阳能热发电站储热与发电同时进行。3) 发电模式。当 DNI 不满足聚光集热系统运行条件时, 聚光集热系统停运, 但此时储热系统储存的热量能满

足汽轮机发电机组运行,汽轮发电机组可根据电网调度需求进行负荷调节。4) 停机模式。在 DNI 为零或处于低值的情况下,聚光集热系统不运行且储热系统热量不足时,汽轮机发电系统停运。

1.3 本太阳能热电站典型日的运行模式分析

选取 2019 年 12 月 21 日(晴天)作为典型日,对本太阳能热发电站在 4 种运行模式下的运行情况进行分析,分析结果如图 2 所示。图中:①为停机模式;②为储热模式;③为储热且发电模式;④为发电模式。

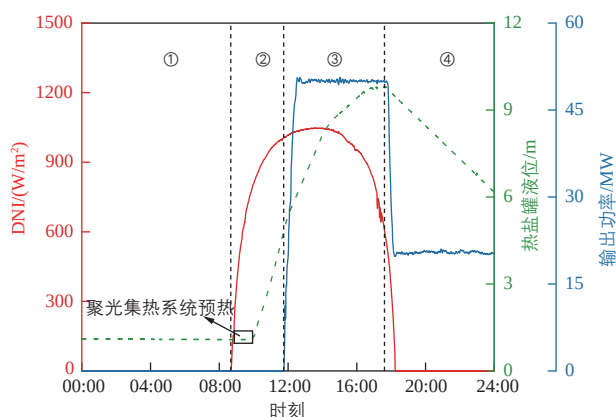


图 2 本太阳能热电站典型日的 4 种运行模式

Fig. 2 Four operating modes of CSP station during a typical day

由图 2 可知:00:00~08:50 时段,本太阳能热发电站处于停机模式,主要是因为此时 DNI 为零且储热系统的储热量不足导致的。08:50~11:45 时段,本太阳能热发电站处于储热模式,随着 DNI 逐渐升高,聚光集热系统开始工作,储热系统中的热熔盐液位不断升高,但汽轮发电机组尚未启动,因此本太阳能热发电站处于储热模式。11:45~17:40 时段,本太阳能热发电站处于储热且发电模式,随着热盐罐液位不断上升,储热系统热量达到汽轮发电机组启动条件,其开始运行并发电。17:40~24:00 时段,本太阳能热发电站处于发电模式,随着 DNI 下降,聚光集热系统停止运行,此时汽轮发电机组使用储热系统储存的热量发电。

2 本太阳能热发电站的输出特性及储热调峰能力分析

2.1 高输出功率分析

从电网角度来看,为有效消纳大幅增加的风电、光伏发电等随机性大的可再生能源,其需要配置大量调峰电源。本塔式太阳能热发电站配备了储热系统,能实现聚光集热系统和汽轮机发电系统解耦运行,使汽轮发电机组的输出功率不再受 DNI 的限制,在各种天气下均可实现高负荷下的高功率输出,可作为极好的调峰电源。

为验证本太阳能热发电站在不同天气条件下的输出特性,选取 2019 年 8 月 8—10 日,对应的天气状态分别为多云(厚云)、少云和晴天,对本太阳能热发电站在 72 h 内的输出功率进行分析,分析结果如图 3 所示。

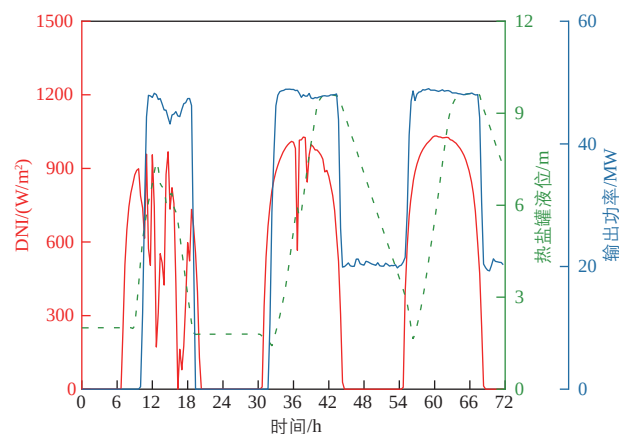


图 3 72 h 内本太阳能热发电站的输出功率

Fig. 3 Output power of CSP station within 72 h

由图 3 可知:在 0~24 h 期间,当 DNI 发生剧烈变化时,聚光集热系统从第 13 h 开始逐渐降低负荷运行直至停机;而在 10~19 h 期间,汽轮发电机组利用热盐罐中的热量产生蒸汽,使自身维持在高输出功率状态(平均输出功率大于 45 MW);然后随着热熔盐被消耗至低位值,汽轮发电机组停止运行,本太阳能热发电站进入停机模式。在 24~72 h 期间,汽轮发电机组输出功率从第 32 h 开始提高,并以高输出功率状态维持至第 44 h 时,随着用电负荷的下降,汽轮发电机组的

输出功率维持在 20 MW 左右。

综上可知, 在本太阳能热发电站连续运行的 72 h 中, 聚光集热系统可与汽轮机发电系统解耦运行, 汽轮机发电系统不受 DNI 限制, 即使在多云天气 DNI 剧烈变化、早晚光照资源不理想时, 只要热盐罐液位高, 本太阳能热发电站仍可实现高负荷稳定输出。说明本太阳能热发电站在太阳辐照资源波动时, 仍具有高输出功率稳定输出的能力。

2.2 低输出功率的连续输出特性

由于本太阳能热发电站的储热时长只有 7 h, 无法满足汽轮发电机组 24 h 满负荷运行的需求, 但汽轮发电机组频繁启停又会影响其使用寿命。因此, 本太阳能热发电站采取白天满功率发电、夜间降功率保证汽轮发电机组连续运行的优化策略, 以减少汽轮发电机组的启停次数, 降低设备频繁启停过程产生的热冲击, 提高汽轮发电机组的使用寿命。

为验证该策略有效性, 对本太阳能热发电站在 2020 年 2 月 1—13 日期间连续运行 13 天的情况进行统计, 得到该期间的输出功率、热盐罐液位及 DNI 数据, 如图 4 所示。

由图 4 可知: 连续 13 天运行期间, 在白天, 本太阳能热发电站以储热且发电模式运行, 当聚光集热系统停止运行时, 汽轮发电机组则维持在低输出功率工况运行。

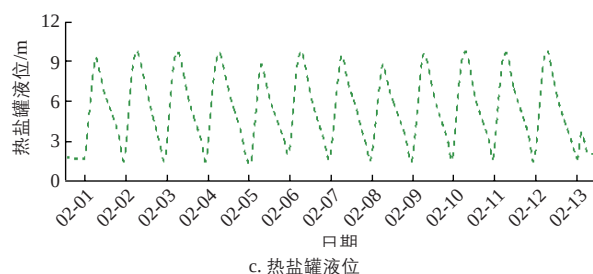
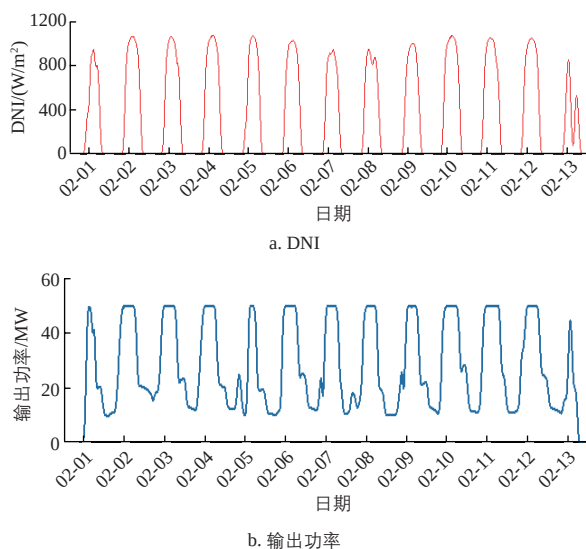


图 4 本太阳能热发电站连续 13 天的运行曲线

Fig. 4 Operating curve of CSP station for thirteen consecutive days

在运行的 13 天中, 汽轮发电机组连续运行了 292.8 h, 不间断发电量达 8.39 GWh, 不间断发电量达成率为 105.2%。这表明, 汽轮发电机组的低输出功率运行能力不仅为本太阳能热发电站的发电量提供了保障, 也为其响应电网调度带来更多的操作空间。

2.3 快速变负荷储热调峰能力

随着可再生能源发电装机容量的增加, 电网峰谷差进一步加大, 可再生能源电力消纳能力面临挑战, 致使出现大量弃风、弃光现象。虽然火电是重要的调峰电源, 但火电机组的调峰能力受锅炉燃烧稳定性、水动力安全性和环保装置在低负荷运行下适应性的限制。在传统火力发电系统中, 由于汽包的筒体壁较厚, 机组快速变负荷运行时, 汽包筒体会产生由内外壁温差引起的径向热应力和外壁上下温差引起的周向热应力, 从而降低其使用寿命。自然循环形式下, 锅炉的变负荷速率主要受汽包寿命的限制^[18-20]。对于未进行灵活性改造的火电机组, 其负荷可调范围通常为 50%~100%, 负荷调节率为 1%~3% Pe/min^[21-22]。

本太阳能热发电站在设计上考虑了汽轮发电机组的频繁启停和宽负荷调节能力, 运行中可精准控制汽轮机发电系统的熔盐流量和温度。该设计可实现汽轮发电机组蒸汽参数数值的精细化控制和平稳过渡, 降低快速变负荷时温度变化对汽轮发电机组主要设备的热冲击, 延长设备使用寿命。利用文献 [23] 中的公式, 对本太阳能热发电站变负荷运行下汽包的循环应力幅值进行计算。

汽包内径为 1500 mm，壁厚为 65 mm，材料为低合金高强度的 13MnNiMoR 钢，计算结果如表 2 所示。

表 2 本太阳能热发电站变负荷运行下汽包的最大循环应力幅值计算结果

Table 2 Calculation results of maximum cyclic stress amplitude of steam drum under variable load operation in CSP station

负荷类型	外壁上下温差 /°C	内外壁温差 /°C	最大循环应力幅值 /MPa
升负荷	25.51	12.47	60.97
降负荷	20.82	20.89	83.96

由表 2 可知：升负荷时汽包的最大循环应力幅值为 60.97 MPa，降负荷时汽包的最大循环应力幅值为 83.96 MPa。根据文献 [24] 的研究结果，汽包壁上的循环应力幅值低于 150 MPa 时，对其寿命损耗很小。由此可得，本太阳能热发电站变负荷运行时对汽包造成的影响较小。

由于本太阳能热发电站变负荷运行时冷 / 热盐罐内的冷 / 热盐温度基本不变，因此变负荷运行对储罐产生的热应力可忽略不计。文献 [24] 的研究结果表明，当主蒸汽温度波动不超过 $\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，转子和气缸上不会产生有害热应力。根据本太阳能热发电站 2019 年 11 月 9 日的数据，其变负荷时主蒸汽最大温度波动为 $-3.720\text{ }^{\circ}\text{C}$ (升负荷) / $4.152\text{ }^{\circ}\text{C}$ (降负荷)，均小于 $\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因此，可以认为在变负荷运行过程中汽轮发电机组侧产生的热应力对其自身寿命的影响很小。

根据文献 [25]，塔式太阳能热发电站的负荷调节范围可达 20% ~ 100%，负荷调节率可达 3% ~ 6% Pe/min。将传统火电厂与塔式太阳能热发电站的变负荷能力进行对比，如表 3 所示。

由表 3 可知：变负荷运行时，塔式太阳能热发电站在安全性、环保性、负荷调节范围和负荷调节速率等方面均优于传统火电厂。

选取 2019 年 11 月 9—10 日期间本太阳能热发电站储热调峰时的运行曲线，如图 5 所示。

由图 5 可知：在夜间时段，本太阳能热发电

站维持在低负荷运行状态，但在 31 h 用电高峰期时却能快速升至满功率运行状态。

表 3 传统火电厂与塔式太阳能热发电站的变负荷能力对比

Table 3 Comparison of variable load capacity between traditional coal-fired power plants and tower CSP station

项目	传统火电厂	塔式太阳能热发电
负荷调节范围 /%	50 ~ 100 ^[18-22]	20 ~ 100 ^[25]
负荷调节速率 /(% Pe/min)	1 ~ 3 ^[18-22]	3 ~ 6 ^[25]
低负荷稳燃能力	不稳定	稳定
水动力安全性	不安全	安全
低负荷运行下的环保性	不环保	环保
快速变负荷时主要设备的使用寿命	蒸汽参数剧烈变化, 使用寿命降低	蒸汽参数平稳变化, 使用寿命延长

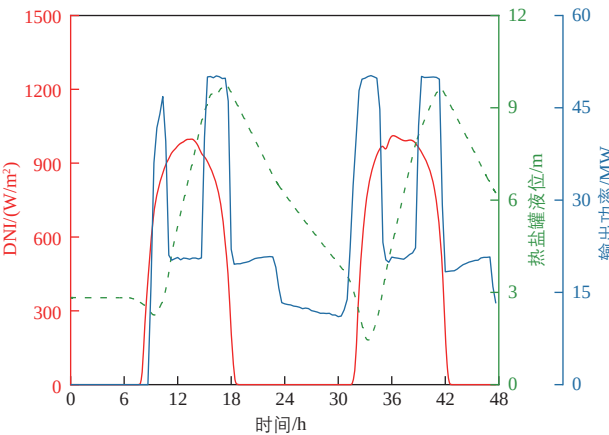


图 5 本太阳能热发电站储热调峰期间的运行曲线

Fig. 5 Operation curve of CSP station during thermal storage peak-shaving period

2019 年 11 月 9 日本太阳能热发电站储热调峰时的升、降负荷变化率如图 6 所示。

结合图 5、图 6 可知：在 10:44 ~ 11:07 时段内，本太阳能热发电站的输出功率从 48.82 MW 降至 20.89 MW，平均降负荷变化率为 2.32% Pe/min，最大降负荷变化率为 4.72% Pe/min，随后维持约 20.77 MW 的低输出功率运行 3.7 h。限功率时段 (10:30 ~ 15:00) 结束后，本太阳能热发电站重新开始升功率，在 14:58 ~ 15:17 时段内从 20.77 MW 升至 50.13 MW，平均升负荷变化率为 2.94%

Pe/min, 最大升负荷变化率为 5.02% Pe/min。

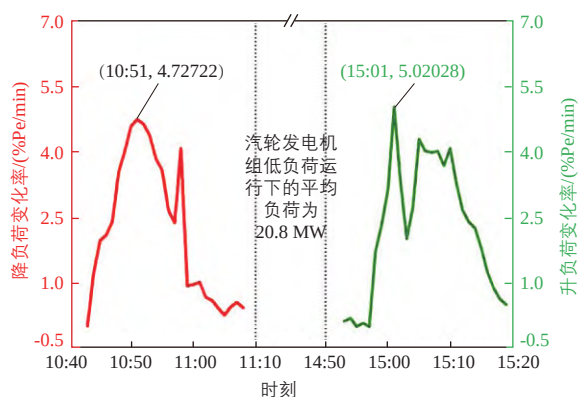


图6 本太阳能热发电站储热调峰时的升、降负荷变化率

Fig. 6 Rate of load increase and decrease during thermal storage peak-shaving of CSP station

根据本太阳能热发电站在不同时期的运行结果可以发现, 其通过储热调峰能够灵活配合电网调度时的快速变负荷需求。

结合光伏发电、风电及太阳能热发电的输出特性可知, 本太阳能热发电站可以在光伏发电、风力发电高峰期时, 快速降功率运行; 而在光伏发电、风力发电处于谷值时, 快速升功率运行, 使电网最大限度地消纳光伏发电和风电, 成为稳定的储热调峰电源, 承担调峰电源削峰填谷的作用, 与光伏发电和风电等可再生能源电力实现良好的互补。

3 结论

塔式太阳能热发电站具有零碳排放、调峰灵活、相对调峰幅度大等优点, 可以较好地满足电网对调峰电源的要求。本文以青海省某商业化运行的 50 MW 塔式太阳能热发电站为研究对象, 对其组成部分、运行模式、输出特性及储热调峰能力进行了分析。得到以下结论:

1) 该太阳能热发电站可克服光伏发电、风电的随机性、波动性缺点, 在多云天气下仍能维持稳定高功率输出, 同时其还能根据用电需求灵活、快速调整输出功率, 并维持低功率持续运行, 表现出良好能量调节能力。

2) 该太阳能热发电站可以在光伏发电、风力发电高峰期时, 快速降功率运行; 而在光伏发电、

风力发电处于谷值时, 快速升功率运行, 使电网最大限度地消纳光伏发电和风电。

研究结果可为参与电网调峰的大规模商业化塔式太阳能热发电站的设计和运行提供理论支撑。

[参考文献]

- [1] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 26-31.
- [2] 张虹, 孙权, 李占军, 等. 风氢耦合系统协同控制发电策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(3): 15-23.
- [3] 葛晓琳, 郝广东, 夏澍, 等. 高比例风电系统的优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 390-400.
- [4] 翁振星, 石立宝, 徐政, 等. 计及风电成本的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 514-523.
- [5] 崔杨, 修志坚, 刘闯, 等. 计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4403-4415.
- [6] 代佳豪, 肖刚, 祝培旺, 等. 太阳能布雷顿循环耦合蓄电池平抑光伏输出波动策略研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(6): 717-723.
- [7] FORRESTER J. The value of CSP with thermal energy storage in providing grid stability[J]. Energy procedia, 2014, 49: 1632-1641.
- [8] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: concepts, materials and modellization[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(1): 31-55.
- [9] 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.
- [10] 杜雅鑫. 含光热发电的高占比新能源电力系统优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [11] 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.
- [12] 孙晓强, 杨楠, 李庆海, 等. 基于“双碳”目标的光热电站调峰能力规划研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 73-83.
- [13] BOUKELIA T E, MECIBAH M S, KUMAR B N, et al. Investigation of solar parabolic trough power plants with and without integrated TES (thermal energy storage) and FBS (fuel backup system) using thermic oil and solar salt[J]. Energy, 2015, 88: 292-303.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] 贡轲韵, 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.
- [17] 董海鹰, 房磊, 丁坤, 等. 基于热电联产运行模式的光热发电调峰策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2763-2772.
- [18] 邢振中. 火力发电机组深度调峰技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [19] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8790.
- [20] 赵雨兰. 调峰对锅炉寿命影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [21] 张桂燕. 300 MW 火电调峰机组运行问题的研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2008.
- [22] 张顺. 火电机组的功率快速调节和深度调峰技术[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [23] 刘彤. 电站锅炉承压部件寿命分析及在线监测[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [24] 张保衡. 大容量火电机组寿命管理与调峰运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 146-291.
- [25] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟. 深度! 太阳能光热储能独特的调峰调频作用[EB/OL]. (2021-06-21). <http://www.cnste.org/html/fangtan/2021/0621/8029.html>.

RESEARCH ON OUTPUT AND THERMAL STORAGE PEAK-SHAVING CHARACTERISTICS OF TOWER CSP STATIONS

Zhou Hui, Zhang Kaiyu, Hu Jinhua, Liu Shenghao, Wang Xuanhua, Wang Wei

(Cosin Solar Technology Co, Hangzhou 310053, China)

Abstract: With the increase of the peak valley difference in the power grid, the demand for peak-shaving power sources also increases. Tower CSP stations have good dispatch ability and are high-quality green peak-shaving power sources. This paper takes a 50 MW tower CSP station in Qinghai Province as the study object of commercial operation, and analyzes its components, operating mode, output characteristics, and thermal storage peak-shaving capacity. The analysis results show that: 1) The tower CSP station can overcome the randomness and volatility of PV power generation and wind power, and can maintain stable high-power output even in cloudy weather. At the same time, it can also maintain low-power continuous operation according to electricity demand, demonstrating good energy regulation ability. 2) The tower CSP station can quickly reduce power during peak periods of PV and wind power generation. When PV and wind power generation are at their peak, they can quickly increase power and maximize the grid's consumption of PV and wind power.

Keywords: tower CSP station; thermal storage peak-shaving; output characteristics; peak-load regulation power