

槽式光热电站连续运行模拟

刘 冰^{1,2}, 詹 扬^{1,2}, 田景奎¹, 田增华¹, 吕俊复²

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 使用THERMOFLEX软件对100 MW的槽式光热电站进行建模,模拟典型日电站连续运行动态过程。模拟中太阳法向直射辐射(DNI)、地理和气象条件采用某项目的实测参数。模拟结果表明,通过调节导热油的流量、温度、分配以及偏焦系数、热罐液位等主要运行参数,能够保证主蒸汽的温度、压力和流量,实现电站在一定负荷下的平稳运行,并获得了该条件下发电量、厂用电等性能参数。模拟发现,电站在夏至日和冬至日,集热装置接收有效辐射差别很大,随时间变化规律也不同,电站的运行参数的调节方案也存在较大差异。

关键词: 太阳能; 太阳能电站; 动态模拟; 运行参数; 性能模拟

中图分类号: TK514

文献标识码: A

0 引 言

光热发电作为一种可再生的清洁发电技术,相比于风电、光伏,具有稳定性更好,可作为基础负荷的特点。槽式光热电站是目前成熟度最高,商业化运行程度最高的光热发电技术^[1]。前人针对光资源辐射波动特性开发了光热电站多种控制技术^[2,3],主要包括镜场系统的控制策略^[4-6]和动力系统的控制策略。镜场系统的控制技术主要是通过调节导热油的流量控制导热油镜场的出口温度,并没有考虑储能系统的影响。前人关于槽式光热电站储能技术的研究较多,但能够工程应用的实例仍较少^[7]。Powell等^[8]建立瞬态模型,研究考虑与不考虑储能系统的电站在晴天和阴天中不同的运行策略。Jost等^[9]将导热油在回路中分配作为输入参数,建模研究电站在连续运行情况下主蒸汽参数稳定的控制策略。García-Barberena等^[10]使用Simul-CET软件研究不同控制策略下化石燃料的使用对电站总体性能的影响。

本文利用THERMOFLEX软件对考虑储热的100 MW槽式光热电站的连续运行动态过程进行模拟,获得了电站运行时的关键参数,探索电站运行特性、典型工况运行参数调整以及槽式光热技术的整体性能。

1 数值模型

1.1 研究内容和方法

本文基于100 MW容量汽轮机,搭建完整的带储能的槽式光热电站的模型,如图1所示。根据热力系统优化设计结果,整体布置中采用双列布置,导热工质从镜场和储能系统流出,经过阀门1和阀门2的分配分别进入过热器和高温再热器,在上述两者出口汇集共同进入蒸汽发生器,在其出口再由阀门3和4阀门分配进入预热器和低温再热器。汽轮机采用一级再热,共有八级抽汽,回热系统为“三高四低一除氧”。

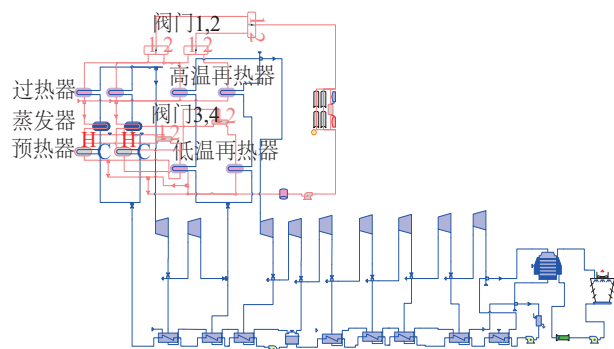


图1 槽式光热电站整体系统图

Fig. 1 System diagram of parabolic trough solar thermal power plant

利用 THERMOFLEX 软件对槽式光热电站进行建模,根据设备选型、布置方案确定主要部件的物理尺寸和性能参数,进行变工况计算。由于模型计算得到的热平衡图为稳态的情况,而光热电站运行时,每个时刻太阳辐射能量和太阳的位置都是在变化的,同时带储能装置的光热电站,储能装置的运行是连续的过程,因此当需要计算较长时间内电站运行过程流量、负荷等的情况时,无法使用稳态计算。本文利用 E-Link 功能,将多组输入参数写入到 Excel 表格,程序将进行多组计算,将输出结果以 Excel 表格的形式给出。在 Excel 中,储能系统在一个时刻的状态将作为下一个时刻的输入条件带入,这样就可以完成电站长时间运行参数的计算。

模拟过程中,导热工质的选型,确定镜场出口和储能系统出口导热工质的温度,蒸汽轮机的选型确定了镜场作为热源,即光资源较好时,和储能系统作为热源,即光资源较差时,主蒸汽的温度、压力和流量,进而确定了上述 2 种模式下进入热力系统的导热工质的温度和质量流量。而在不同的辐射条件,光资源代表年的夏至日和冬至日时,电站连续运行过程中为了维持蒸汽轮机的稳定出力,就需根据光资源的变化,改变主蒸汽温度、压力和流量,进而确定进入热力系统的导热工质的流量,流入和流出储能系统的导热工质流量以及镜场偏焦比例等参数的调节方案。根据上述模拟结果,本文分析了电站连续运行过程中运行参数随光资源条件变化和季节变换时的调节规律。

1.2 模拟参数

本文建立完整的槽式光热电站的模型,包括镜场系统、蒸汽发生系统、蒸汽轮机、冷凝器、冷却塔以及相关的辅助设备。集热装置为南北布置、水平东西跟踪。蒸汽发生系统中,预热器、过热器和再热器通常管侧工质为水/蒸汽,壳侧工质为导热油,而蒸发器管侧工质为导热油,壳侧工质为水/蒸汽。储能装置采用冷-热双罐形式,采用储能介质为熔融盐。模拟中太阳法向直射辐射(DNI)和气象条件采用某项目的实测参数,其他需要输入的主要环境和设备参数见表 1。

表 1 设计工况电站方案设计输入参数			
Table 1 Modelling input parameter at design point			
装置	参数	单位	数值
环境	DNI	W/m^2	850
	纬度	$^{\circ}$	40.17
	经度	$^{\circ}$	104.8
	干球温度	$^{\circ}C$	10
	大气压力	MPa	0.0926
	湿度	%	30
阀门 1/2	开度	—	0.72/0.28
阀门 3/4	开度	—	0.65/0.35
集热系统	导热工质	—	Therminol VP-1
	集热器类型	—	LS-2
	行间距	m	15
	对流系数	$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	56.78
	太阳倍数	—	2.8
	出口油温	$^{\circ}C$	391
储能系统	冷端端差	$^{\circ}C$	5
	热端端差	$^{\circ}C$	5
	储能时间	h	10
	储能工质	—	60%NaNO ₃ +40%KNO ₃ (质量分数)
蒸汽轮机	主蒸汽参数	$^{\circ}C/MPa$	383/10.0
	再热蒸汽参数	$^{\circ}C/MPa$	383/2.02
	给水温度	$^{\circ}C$	250
冷凝器	平均背压	kPa	8

2 结果与讨论

2.1 方案设计结果

根据设计参数,THERMOFLEX 软件计算出热力系统主要部件,如蒸汽发生系统、蒸汽轮机、冷凝器和空冷塔的物理尺寸和结构,以及油盐换热器的换热性能参数。THERMOFLEX 软件主要进行热平衡计算,集热系统布置方案的优化由 SAM(system advisor model)完成^[11]。在变工况模拟中,在不同辐射条件下,集热器接收的有效辐射能,用 ANI 表征(aperture normal irradiance),如式(1)所示,主要考虑光资源的几何损失,余弦效应和行间遮挡^[12]。集热管吸收的热量 \dot{Q} ,如式(2)所示,主要考虑光学损

失和末端损失^[13]。电站设计方案下主要性能参数如表2所示。

$$ANI = DNI \cdot \cos \theta \cdot f_{\text{shadow}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= ANI \cdot \eta_{\text{opt}} \\ &= ANI \cdot \eta_{\text{nominal}} IAM(\theta_{\perp}, \theta_{\parallel}) f_{\text{clean}} f_{\text{endloss}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ANI ——聚光镜开口接收的直射辐射能; θ ——太阳高度角; f_{shadow} ——行间损失系数; η_{nominal} ——集热器名义效率,取75%; IAM ——入射角修正系数; f_{clean} ——清洁系数,取0.95; f_{endloss} ——末端损失系数。

表2 设计工况下电站性能参数

Table 2 Performance and operation parameters at design point condition		
装置	参数	数值
集热系统	导热油进口温度/℃	296
	导热油质量流量/kg·s ⁻¹	1080
	母管热损/kW	5629
	集热回路进口流速/m·s ⁻¹	2.07
	集热回路出口流速/m·s ⁻¹	2.42
电站	集热场总面积/m ²	1.3×10 ⁶
	出力负荷/MW	100.1
	厂用电/kW	9478
	净发电效率/%	35.8

2.2 夏至日连续运行调节

图2中为夏至日太阳法向直射辐射实测和模拟得到的集热管吸收的有效辐射能的数据。由DNI实测数据曲线可看出07:30开始即可达到350 W/m², 12:00~16:00时段峰值, 19:00后开始出现明显下降, 至20:30降为零。集热管吸收有效辐射能与实测值在全天的变化规律相同, 这与文献[12]对北纬35°的SEGS电站集热装置在典型日的性能分析的结果一致。文献[14]研究几何损失和光学损失对集热器性能的影响程度, 指出余弦效应是影响集热器吸收辐射资源的主要因素。而根据文献[15]对水平东西跟踪集热装置入射角变化规律的研究结果, 余弦效应造成的辐射资源吸收能力的损失在夏至日很小, 很好地解释了图2中两曲线的关系。

流入热力系统的热量主要由导热油温度和流量决定。根据被加热导热油的热量来源, 电站一般

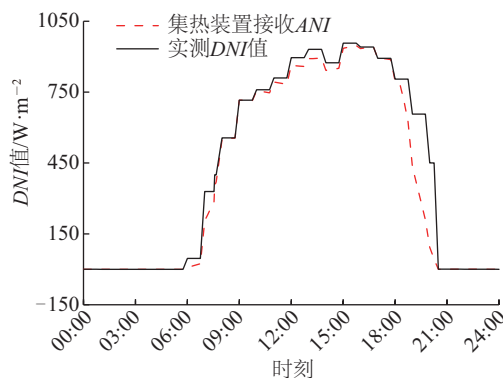


图2 夏至日实测DNI值与集热器吸收有效辐射能比较

Fig. 2 Comparison of measured DNI value and aperture normal direct irradiance value during summer solstice

分为太阳能发电、太阳能+储能发电、储能发电3种发电模式。结合图3、图4可看出当光资源较好时, 导热油在镜场中被加热到额定出口温度, 一部分进入热力系统, 一部分进入储能系统放热, 此时主蒸汽温度为383℃, 流量为108 kg/s; 当光资源较差时, 被镜场加热的导热油与被储能系统加热的导热油混合, 以低于额定温度进入热力系统, 此时主蒸汽温度下降, 流量也发生变化; 当仅有储能装置作为热量来源时, 主蒸汽流量为110 kg/s, 温度为371℃。

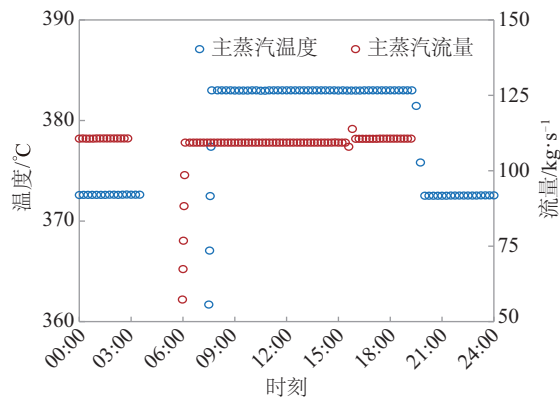


图3 夏至日主蒸汽参数

Fig. 3 Variation of main steam temperature and mass flow rate during summer solstice

图4中表明夏至日全天连续运行中, 热罐液位的变化情况。当镜场采集到多余热量时, 部分导热油会流经油盐换热器加热来自冷罐的熔融盐。相对地, 当镜场采集的热量不足时, 部分冷的导热油会流经油盐换热器被来自热罐的熔融盐加热。

在连续运行过程中, 冷罐和热罐的液位一直

处于变化中。模拟中假设在 00:00 时刻,热罐中熔盐量为 30%满储的状态。凌晨开始为储能发电模式,为保证导热油流量和温度的稳定,热罐的液面处于稳定下降的状态。当热罐液位接近 1 m 时,储能系统停止工作,导热油无法被加热,电站停机。到 08:00 后镜场加热的导热油流量超过额定工况下的需求,多余的导热油进入储能装置放热,热罐液位开始升高。蓄热初期,热罐液位上升的速度是随辐射资源的增加而增加,在 09:00 时由于油盐换热器达到最大的热交换能力,热罐液位开始以固定速率上升,至 17:30 时热罐储满。在 19:00 后,随着辐射资源的降低,储能系统开始放热过程,液面降低的速度随辐射资源降低而加快,最后达到储能发电模式时的下降速度。

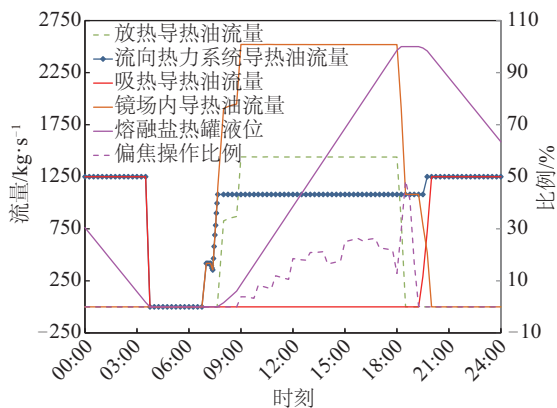


图4 夏至日全天运行参数调整方案(运行计划173 d)

Fig. 4 Operation parameters adjustment scheme during summer solstice

图4中表明了全天连续运行中导热油流经镜场和储能系统的流量分配方案。由于夏至日较好的辐射资源,从 06:45,镜场开始加热导热油,流量逐渐增加,至 09:00 后储能系统达到最大的换热能力,此后进入镜场的导热油流量维持不变直到热罐储满。在 17:30 后随着储能系统的关闭,进入镜场的导热油快速下降到仅保证汽轮机额定出力所需要的流量。从 19:00 开始随着辐射资源的降低,镜场内的导热油流量逐渐减少。经储能系统加热的导热油与镜场出口的导热油混合进入蒸汽发生系统,此时导热油的温度为两者的混合温度,即处于 381~391 ℃之间。在 20:00 后导热油开始全部由储能系统加热,只能升温至 381 ℃。为维持汽轮机的额定出力,需要将导热油的流量提高到白

天流量的 1.15 倍。图4给出了镜场系统偏焦系数变化情况。偏焦的操作是从热罐液位开始以固定速率上升时开始,偏焦系数随白天的辐射资源的变化而变化,在 18:30 达到最大值,而后随辐射资源的持续降低而降低,至储能系统开始放热时变为零。

当辐射资源为某项目实测的 DNI 数据时,现有的方案设计可保证在白天满发的情况下,完成 10 h 的储能,辐射资源与镜场系统、热力系统、储能系统之间的配置合理。

2.3 冬至日连续运行调节

图5为冬至日太阳法向直射辐射实测和模拟得到的集热管吸收的有效辐射能的数据。图5中可发现在冬至日正午时刻,有效吸收辐射能与辐射资源实测数据出现了相反的变化规律,与夏至日两者关系相反,而这主要是由于冬至日余弦效应导致的辐射能吸收损失变大造成的。上述结论与文献[12]中计算得到的冬至日 SEGS 电站集热器吸收的有效辐射能的变化规律一致。

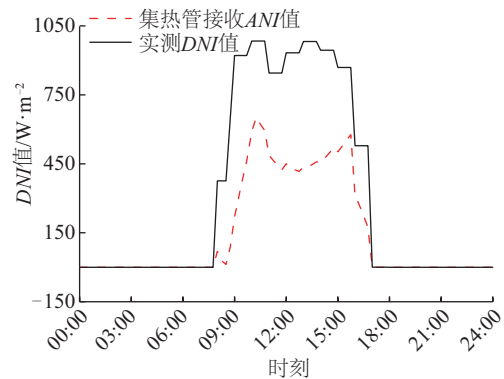


图5 冬至日实测 DNI 值与集热器吸收有效辐射能比较

Fig. 5 Comparison of measured DNI value and aperture normal direct irradiance value during winter solstice

图6中可看出,凌晨储能发电时主蒸汽的参数平稳,至 03:45 热罐液位降至最低,系统关机。09:00~16:00,主蒸汽的参数并不平稳,约在正午时段主蒸汽温度和流量均出现下降,这主要是由于此时集热器接收的有效辐射能仅为 450 W/m²,镜场吸收的全部热量仍不足以满足蒸汽机组在额定负荷下的运行,而此时几乎无储热可释放。17:00 后随着辐射资源趋于零,镜场无法吸热进行发电,系统关机。

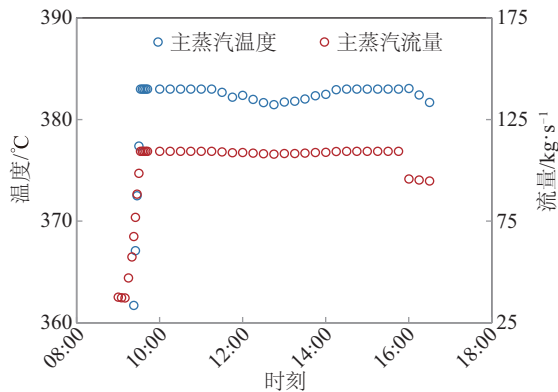


图6 冬至日主蒸汽参数

Fig. 6 Variation of main steam temperature and mass flow rate during winter solstice

由于冬至日与夏至日集热器接收的有效辐射能的较大差异,电站的运行参数调节也存在明显区别。图7中可看出在冬至日白天,镜场吸收的热量几乎全部用于发电,仅在11:00和16:00有多余热量用于储热,这也与集热器接收的有效辐射能的变化规律一致。由于热罐液位一直处于很低的水平,因此冬至日里电站没有偏焦的操作。少量导热油在13:00和17:30附近,流经油盐换热器被加热后送入热力系统。

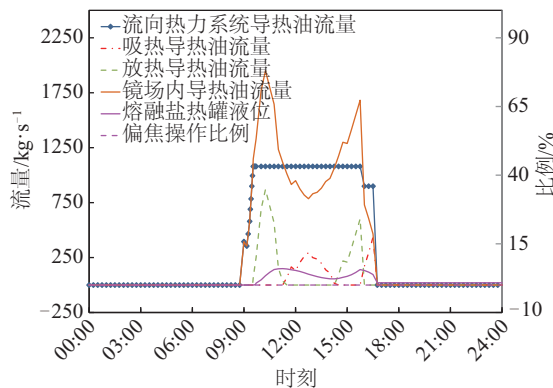


图7 冬至日全天运行参数调整方案(运行计划356 d)

Fig. 7 Operation parameters adjustment scheme during winter solstice

3 结论

本文使用 THERMOFLEX 建立带储热系统的100 MW 槽式太阳能光热电站的模型,利用准稳态计算模拟了电站在夏至日和冬至日连续运行过程,主要结论如下:

1)模拟结果表明方案设计中集热系统、热力系

统、储能系统与实测辐射资源的匹配较为合理,在典型年辐射资源较好时,可满足满发及10 h 储能,而在辐射资源较差时,也可满足白天的满发状态。

2)电站运行过程中,可通过调节导热油流量、其在镜场和储能系统的分配,以及导热油镜场出口温度、镜场偏焦系数等参数来保证连续运行过程中主蒸汽温度、压力和流量的稳定,保证电站出力的稳定。

3)夏至日里,集热器接收的有效辐射能与辐射资源的实测数据十分接近,变化规律也几乎相同。而冬至日里,集热器接收的有效辐射能在正午附近,出现了明显的下降,与辐射资源实测数据规律不一致,这主要是由于余弦效应造成的几何损失对夏至日影响最小,对冬至日影响最大造成的。模拟结果还表明辐射资源和季节性是影响电站运行情况的决定性因素,槽式光热电站在夏至日和冬至日里,电站运行参数的调节和电站出力差别很大,因此开展电站运行调节方案的研究具有十分重要的意义。

[参考文献]

- [1] 李明,季旭. 槽式聚光太阳能系统的热电能量转换与利用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [1] Li Ming, Ji Xu. Solar energy thermal conversion and utilization with trough concentrating system [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] Camacho E F, Rubio F R, Berenguel M, et al. A survey on control schemes for distributed solar collector fields Part I: Modeling and basic control approaches [J]. Solar Energy, 2007, 81: 1240—1251.
- [3] 刘鉴民. 太阳能热动力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] Liu Jianmin. Solar thermal power technology [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2012.
- [4] Camacho E F, Berenguel M, Alvarado I, et al. Control of solar power systems: A survey [A]. Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems [C], Leuven, Belgium, 2010.
- [5] Pasamontes M, Alvarez J D, Guzman J L, et al. A switching control strategy applied to a solar collector field [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(2): 135—145.
- [6] Silva R, Rato L, Lemos J, et al. Cascade control of a distributed collector solar field [J]. Journal of Process

- Control, 1996, 7: 111—117.
- [7] Medrano M, Gil A, Martorell I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies[J]. Renewable Sustainable Energy, 2010, 14(1): 56—72.
- [8] Powell K M, Edgar T F. Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71: 138—145.
- [9] Jost M, Grote W, Möllenbruck F, et al. Plant wide control of a parabolic trough power plant with thermal energy storage[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 419—425.
- [10] García-Barberena J, García P, Sanchez M, et al. Analysis of the influence of operational strategies in plant performance using Simul CET simulation software for parabolic trough power plants[J]. Solar Energy, 2012, 86(1): 53—63.
- [11] Wagner M J, Gilman P. Technical manual for the sam physical trough model[R]. NREL/TP-5500-51825, Contract No. DE-AC36-08GO28308, 2011.
- [12] 李换兵, 郑秋榕, 崔 凝. 抛物面槽式太阳能集热器性能分析[J]. 应用能源技术, 2015, (9): 32—37.
- [12] Li Huanbing, Zheng Qiurong, Cui Ning. Performance analysis of parabolic trough solar collector[J]. Applied Energy Technology, 2015, (9): 32—37.
- [13] Giostri A, Binotti M, Silva P, et al. Comparison of two linear collectors in solar thermal plants: Parabolic trough & Fresnel[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 135(1): 621—630.
- [14] 徐 立, 李 鑫, 原郭丰, 等. 太阳位置对抛物面槽式太阳能集热器运行影响[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(12): 2359—2362.
- [14] Xu Li, Li Xin, Yuan Guofeng. The influence of solar position upon the running parabolic trough solar collector system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 2359—2362.
- [15] 张宏丽, 王存旭, 王树群, 等. 抛物槽式集热器太阳入射角的计算[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 98—102.
- [15] Zhang Hongli, Wang Cunxu, Wang Shuqun, et al. Calculation of incident angle of parabolic trough collector[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(1): 98—102.

MODELING STUDY ON CONTINUOUS OPERATION OF PARABOLIC TROUGH SOLAR THERMAL POWER PLANT

Liu Bing^{1,2}, Zhan Yang^{1,2}, Tian Jingkui¹, Tian Zenghua¹, Lyu Junfu²

(1. North China Power Engineering CO., LTD., Beijing 100120, China;

2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A modelling study on 100 MW parabolic trough solar thermal power plant is conducted using THERMOFLEX. The simulation of continuous operation process is proposed during summer and winter solstice. In this simulation, the operation parameters, such as HTF flow rate, temperature, dispatch proportion, defocus percentage and hot tank level are adjusted based on the variation of measured *DNI* value and meteorological condition. The temperature, pressure and mass flow rate of the main steam remain stable to keep the plant steady running. The performance parameters and fluid working parameters are calculated. The calculation results show that the aperture *DNI* varies greatly between summer solstice and winter solstice. The cosine effect is the main factor lead to the aperture *DNI* decreasing at the winter solstice midday. The operation and performance parameters between the two typical days are obviously different.

Keywords: solar energy; solar power plants; dynamic simulation; operation parameter; performance simulation