

塔式熔盐电站发电效率影响因素研究

谢昱卓, 李 刚

(兰州交通大学机电技术研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用 SAM 软件对青海中控德令哈二期 50 MW 熔盐电站进行仿真模拟, 研究了太阳能直接辐射量 (DNI)、DNI 波动程度、单塔装机容量和吸热塔数量对发电效率的影响, 并根据该电站的真实运行数据进行对比分析。结果表明, DNI 是发电量的最大影响因素, 同等条件下年均 DNI 值越大, 波动越小, 发电效率越高; 在 10~200 MW 之间, 单塔装机容量对发电效率影响不大, 但大装机容量会使得单位面积投资降低; 多塔聚光的型式会使得单位建设成本增高, 单机容量大规模化是目前全球太阳能热发电站的发展趋势。

关键词: 塔式熔盐电站; 发电效率; 影响因素; DNI

Analysis of factors affecting power generation efficiency of tower type molten salt power station

XIE Yuzhuo, LI Gang

(Mechatronics T&R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: SAM software is used to simulate the 50 MW molten salt power station of Qinghai central control Delingha phase II. The effects of direct solar radiation DNI, fluctuation degree of DNI, single tower installed capacity, number of heat absorbing towers and other factors on the power generation efficiency are studied, and the real operation data of the power station are compared and analyzed. The results show that DNI is the biggest influencing factor of power generation. Under the same conditions, the larger the average annual DNI value is, the smaller the fluctuation, the higher the power generation efficiency is; between 10 MW and 200 MW, the installed capacity of single tower has little effect on the power generation efficiency, but the large installed capacity will reduce the investment per unit area; the multi tower concentrator type will increase the unit construction cost, and the large-scale single unit capacity is the current development trend of global solar thermal power generation station.

Key words: tower type molten salt power station; power generation efficiency; influencing factors; DNI

0 引言

2021年, 中央研究了实现“碳达峰、碳中和”的基本思路和主要举措, 提出要构建清洁、

主体的新型电力系统。习近平总书记提出, 2030年风电、太阳能发电总装机容量达12亿kW^[1-2]。风电光伏为主的新能源在实现一次能源绿色清洁低碳转变的同时, 也给电力系统在安全、稳定和

国家自然科学基金 (71861021)、甘肃省高等学校科研项目资助 (2018C-10)

调节能力等方面带来了新的问题。光热发电通过大量反射镜以自动聚焦的方式将太阳直射光聚集起来加热工质,产生高温高压的蒸汽,蒸汽驱动汽轮发电机组发电。区别于传统煤电,光热发电是无污染、低碳和可再生的清洁能源;区别于光伏、风电等清洁能源,光热发电因具备大容量、低成本的储能系统,其发电过程连续、稳定,并可随时响应电网的调度。

现阶段的光热发电(CSP)形式主要有塔式、槽式、菲涅尔及碟式四种类型^[3]。塔式太阳能发电出力稳定、可靠,且调节性能要远优于煤电机组^[4-5],可以替代煤电机组承担电力系统的基础负荷,或作为调峰机组承担电力系统的高峰负荷。通过其调节作用,可有效降低系统中风电的弃风率和光伏的弃光率,对提高电力系统中的可再生能源发电比重起到很好的作用。

国内外学者对于提高塔式熔盐电站的发电效率方面研究较少,且大多没有真实运行数据的支撑。文献[6]根据塔式太阳能系统的结构特点,确定了光热配套电站方案;文献[7]对传热储能系统进行建模仿真,有利于高效利用太阳能资源,降低建设及运行成本,提高发电效率。文献[8]提出了一种新型太阳能热电联产(CHP)系统,该系统结合了由太阳热和废热驱动的吸收式热泵(AHP),以提高太阳能的利用率和系统发电量。文献[9]对带有储热的100 MW中央接收器太阳能热电站进行设计与性能优化,可以有效地利用它来满足沙特阿拉伯王国(KSA)的可再生能源目标。可以看出,对于太阳能直接辐射量(DNI)和装机容量对塔式熔盐电站的选址影响目前还不够深入,且不具有普适性,需要进一步研究。

本文将采用SAM软件^[10]对青海中控德令哈二期50 MW塔式熔盐热发电站(下文简称德令哈电站)进行模拟,并在此基础上分析该电站的真实数据,总结出DNI、气候稳定度、单塔装机容量和吸热塔数量等因素对电站发电效率的影响。

1 模拟电站建立

SAM(System Advisor Model)是由美国国

家可再生能源实验室(NREL)开发的一款面向可再生能源领域的性能效率仿真和经济模型评估软件^[11]。主要有电站性能预测和经济分析两大功能。在电站性能模型中,SAM软件提供了电站厂址的太阳能光资源、镜场(集热器)布置、吸热器设置、储热系统设置和汽水动力循环参数等光热发电站全过程的设计参数选择^[12]。

本文根据德令哈电站的实际运行情况进行仿真模拟,且不设置补燃系统。该电站建设在北纬37.22°、东经97.23°的青海省德令哈市,风速为 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,典型气象年DNI可达 $2\,043 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ 。该电站部分基础数据如表1所示。

表1 电站部分基础数据

Tab. 1 Some basic data of power station

指标	数据
地点	青海省德令哈市
装机容量/MW	50
储热时长	7 h 熔盐储热
占地面积/ km^2	2.47
吸热塔高度/m	200
镜场反射面积/ m^2	542 700
熔盐用量/t	10 116
蒸汽参数	13.2 MPa, 540 °C
设计年发电量/GW	146
开工日期	2017年3月15日
建成日期	2018年12月30日

软件模拟值与实际值对比如表2所示,实际运行数据从2019年7月26日~2020年7月25日,期间累计DNI为 $2\,013.3 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$,累计实际发电量为 $121.818 \text{ GW}\cdot\text{h}$ 。将实际DNI值输入软件进行模拟,可知年均发电量、占地面积软件的模拟值和实际值的偏差较小(3%以内),证明SAM软件模拟结果的准确性。模拟参数设置将在下文中继续沿用,仅改变特定待分析参数数值,以得出准确结论。

表2 模拟与实际值对比

Tab. 2 Comparison of simulated and actual data

指标	模拟值	实际值	偏差(%)
年均发电量/ $\text{GW}\cdot\text{h}$	125.00	121.82	2.61
占地面积/ km^2	2.38	2.47	3.64

2 发电效率影响因素分析

发电效率指的是电站整体性能评价的关键性指标。发电效率 PR_E 公式为

$$PR_E = \frac{PDR}{P}$$

式中，PDR为测试时间间隔内的实际发电量； P 为测试时间内的输入太阳能。

对于塔式熔盐光热电站，影响因素主要有太阳能直接辐射量（DNI）、DNI波动程度、装机容量和塔数量^[15-17]，本文将主要对以上几点进行研究。

2.1 DNI值影响分析

太阳能直接辐射量（DNI）数值直接影响对于整体系统表现的精准分析和CSP电站整个生命周期的经济回报，因此对DNI数据的质量以及可靠性把握至关重要。将NREL全国太阳年辐射数据库中青海德令哈的气象数据下载并导入至SAM软件，排除其他因素的影响，仅改变DNI值，观察发电量的变化。

图1为不同DNI值对发电效率的影响曲线。由图1可得，发电效率随着DNI值增大而增大。分析可知，DNI值是光热电站选址考虑的首要因素，是影响发电效率的关键。按照国家能源局发布的《关于组织太阳能热发电示范项目建设的通知》，场址太阳直射辐射（DNI）量不应低于 $1\,600\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此拟建光热电站之前首先要收集区域气象站数据作为分析基础，并优选年DNI较高的地点建站。

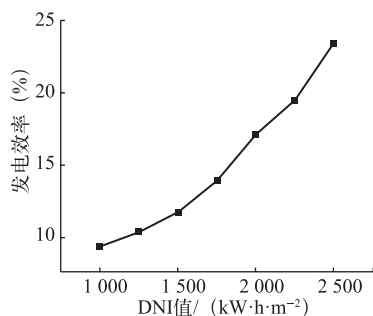


图1 不同DNI值对发电效率的影响

Fig. 1 The influence of different DNI values on power generation efficiency

2.2 DNI波动程度影响分析

DNI波动会导致吸热器出现连续起停状况。吸热器长期工作在高热流、非稳态的工况下，易因较大热应力的交替变化而导致结构破坏与寿命下降^[15]，所以为保证全厂运行的稳定，提高热效率以及降低运行成本，就需保证DNI值的稳定性^[16]。

图2为全年模拟DNI波动情况。6~9月平均DNI值最高，但波动最大；当年10月~次年5月平均DNI值降低，但波动相对平缓。

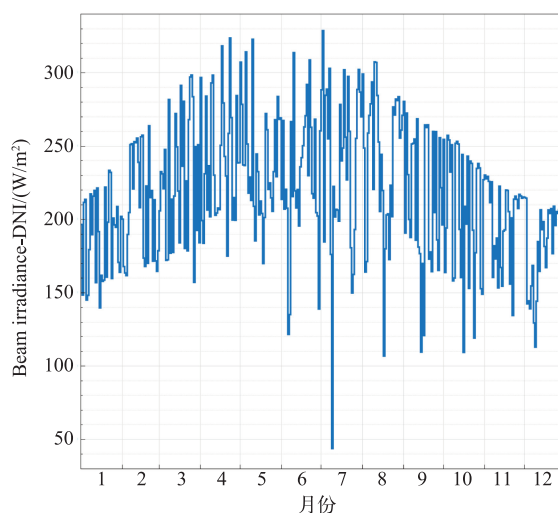


图2 全年DNI波动情况

Fig. 2 Simulation of DNI fluctuations throughout the year

图3为月平均发电效率，当年11月~次年2月发电效率较高，6月~8月效率较低。

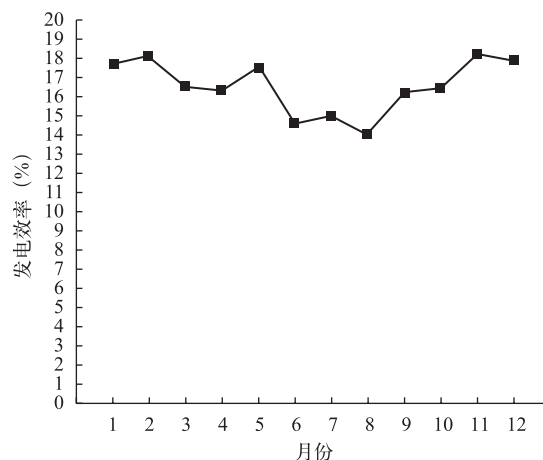


图3 月平均发电效率

Fig. 3 Average power generation efficiency in months

分析可知,平均DNI值高的月份,发电效率有可能最低。数值大且稳定的DNI值才能够有效提高电站发电效率。

表3为2020年10月15日德令哈电站运行真实数据,为了证明DNI波动对发电效率的影响,取起动期、平稳运行期和停止运行期三个运行状态,观察3 h内的能量损失情况。

表3 德令哈电站在不同运行状态下的数据对比

Tab. 3 Data comparison of Delingha power station under different operating conditions

(a) 起动期数据

时间	DNI /W·m ⁻²	镜场投入 能量 /MW	镜场最大 能量 /MW	镜场最大与投 入能量差值 /MW	能量差值占 投入百分比 (%)
7:30	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7:50	99.82	0.88	10.63	9.75	91.71
8:10	366.61	6.94	57.77	50.83	87.99
8:30	528.84	14.22	107.74	93.52	86.80
8:50	640.06	120.62	151.39	30.77	20.32
9:10	719.57	171.27	187.20	15.93	8.51
9:30	779.39	190.16	216.15	25.99	12.02
9:50	826.82	208.18	239.29	31.11	13.00
10:10	867.02	221.88	257.96	36.08	13.99
10:30	894.84	228.43	271.47	43.04	15.85

(b) 平稳运行期数据

时间	DNI /W·m ⁻²	镜场投入 能量 /MW	镜场最大 能量 /MW	镜场最大与投 入能量差值 /MW	能量差值占 投入百分比 (%)
11:30	943.74	238.94	297.10	58.16	20.32
11:50	955.36	235.39	303.14	67.75	22.35
12:10	962.77	234.74	307.36	72.62	23.63
12:30	969.25	236.21	310.65	74.44	23.96
12:50	975.30	230.26	313.32	83.05	26.51
13:10	970.37	231.39	311.94	80.55	25.82
13:30	971.83	232.24	311.96	79.72	25.55
13:50	952.64	229.75	304.97	75.23	24.67
14:10	949.44	230.31	302.51	72.20	23.87
14:30	940.91	228.38	297.86	69.47	23.32

(c) 停止运行期数据

时间	DNI /W·m ⁻²	镜场投入 能量 /MW	镜场最大 能量 /MW	镜场最大与投 入能量差值 /MW	能量差值占 投入百分比 (%)
16:00	869.30	215.11	260.09	44.97	17.29
16:20	842.52	211.51	246.20	34.69	14.09
16:40	803.29	195.69	226.57	30.88	13.63
17:00	761.87	179.21	203.63	24.42	11.99
17:20	708.57	165.30	175.08	9.78	5.59
17:40	623.27	132.13	137.02	4.90	3.57
18:00	492.47	29.29	88.70	59.42	66.98
18:20	309.42	5.82	40.35	34.53	85.58
18:40	51.91	0.04	4.28	4.23	99.02
19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

由表3可知,设备起停期间的DNI值波动较大,使得太阳能损失增加。设备起动期损失的太阳能(能量差值占投入能量百分比)在8.51%~100%之间,平均损失能量为42.02%;设备停止运行期损失的太阳能在3.573%~100%之间,平均损失能量为41.77%;设备平稳运行期损失的太阳能在20.320%~26.507%之间,平均损失能量仅为23.99%。

综上所述,DNI波动情况对发电效率有很大影响。在年均DNI相同时,相对稳定的地区发电效率更高。

2.3 单塔装机容量影响分析

塔式熔盐光热电站有单塔和多塔两种形式,目前国内外更倾向于单塔形式(大多在50~100 MW之间)。南澳大利亚政府批准兴建世界最大的单塔光热发电项目,耗资6.5亿美元,装机容量为150 MW。本节模拟了10 MW、50 MW、100 MW、150 MW和200 MW单塔单汽轮机型太阳能热发电站,不考虑多塔与汽机循环效率的影响。

图4为单塔装机容量对吸热塔高度和发电效率的影响。由图4可知,吸热塔高度随着装机容量的增大而增大,且斜率逐渐减小;在10~200 MW的装机容量范围内,发电效率受影响较小,仅变化1.7%;单塔最优装机容量为50 MW。

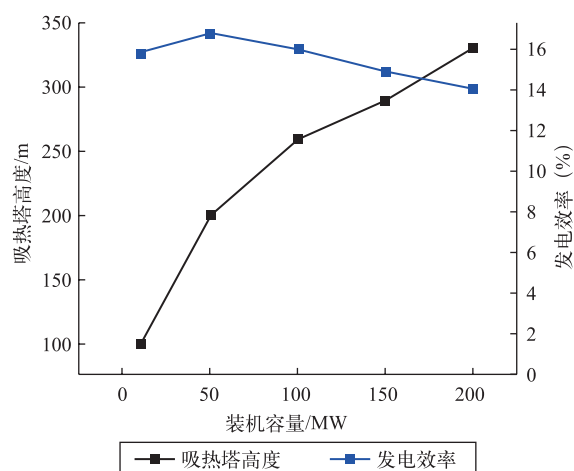


图4 单塔装机容量对吸热塔高度和发电效率的影响

Fig. 4 Influence of installed capacity of single tower on height of heat absorbing tower and power generation efficiency

图5为单塔装机容量对定日镜数量与电站占地面积的影响图。由图5可知,装机容量与定日镜数量呈正相关,且曲线斜率随着装机容量增大而增大;电站占地面积曲线近似为半个开口向上的抛物线。

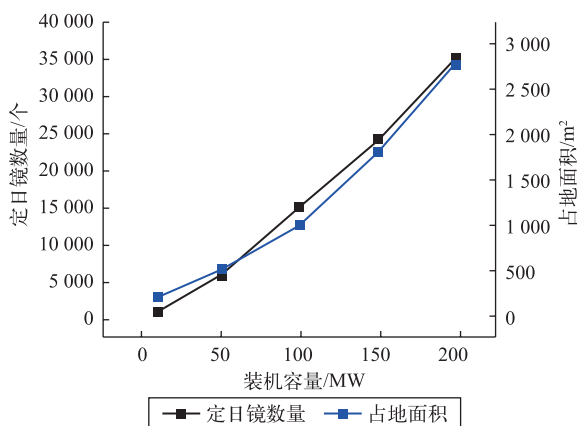


图5 单塔装机容量对定日镜数量与电站占地面积的影响

Fig. 5 Influence of installed capacity of single tower on the number of heliostats and the area of power plant

由于软件模拟较为理想化,无法考虑一些外部因素的干扰。实际状态下,当容量不断增加时,定日镜数量与占地面积增长速度变快,使得定日镜抗风能力下降,光斑漂移与能量损失增加,单位面积土地的发电量下降,发电效率降低。分析认为:①装机容量增加会使得定日镜到吸热器的距离变远,反射光线被近地面的气体与灰尘等颗粒物散射的比例增加,造成一定的能量损失;②由于光线反射到定日镜的准确率存在一定误差,距离增大会使得误差增大,一部分光线聚集到吸热塔外,造成能量损失。

综上所述,在所模拟的容量范围内,电站发电效率受单塔装机容量的影响不大。但装机容量增加会使得定日镜数量、电站占地面积和吸热塔高度增加,建设成本升高。要提高发电效率的同时兼顾经济性,就需要比较单塔大容量与多塔小容量的优劣。

2.4 吸热塔数量影响分析

太阳岛是塔式太阳能热发电站完成光-热能量转换的系统,包括定日镜、镜场控制系统、吸热器和吸热塔。目前我国太阳岛造价为3 600~

4 000元/kW,总额占电站建造成本的55%以上,且随着装机容量不断增大,太阳岛成本所占的比例也越来越高^[17],其他成本如熔盐管道、熔盐泵的比例降低。

国内外一些学者提出,为了提高电站整体效率而选择多塔聚光的形式。这没有考虑到塔之间的连接成本与管道内部熔盐的问题,由于熔盐泵和熔盐管道的价格十分昂贵,若采用多塔聚光,则需要增加大量塔之间的连接成本;管道和熔盐泵运行时间有限,设备起停期间与外界温度剧烈变化均会严重影响管道寿命。由此就会导致建设投资剧增,成本电价上涨。

综上所述,虽然小装机容量吸热塔发电效率高,但是多塔汇集的成本将远大于增加装机容量所带来的损失。装机容量大的吸热塔虽然整体投资增加,但单位面积投资降低,单机容量大规模化是目前全球太阳能热发电站的发展趋势。

3 结束语

本文通过SAM软件模拟、实际数据分析了青海中控德令哈二期50 MW塔式熔盐热发电站,DNI值、DNI波动程度、单塔装机容量和吸热塔数量对发电效率的影响。结论如下:

1) DNI值是影响发电效率的关键,年均DNI值越大,发电效率越高。

2) 仅根据年均DNI值来对电站发电效率进行判断是片面的,还需要考虑当地的DNI波动程度。在年均DNI相同的情况下,选择DNI相对稳定的地区,可以更有效地提高发电效率。

3) 电站发电效率受装机容量的影响不大(10~200 MW),单塔最优发电效率为50 MW。但建设成本会随着装机容量的增大而增大,需要综合考虑建设成本和运维成本。

4) 装机容量大的吸热塔虽然整体投资增加,但单位面积投资降低,单机容量大规模化是目前全球太阳能热发电站的发展趋势。**EA**

参考文献

[1] 王鑫. 中国争取2060年前实现碳中和[J]. 生态经

- 济, 2020, 36(12): 9-12.
- [2] 徐韶峰. 拥抱碳中和, 助力构建电网低碳可持续未来[N]. 经济参考报, 2020-11-30(007).
- [3] SIVA SAI R, GOVERDHAN REDDY B. Types of solar thermal power plants[J]. Indian Journal of Power and River Valley Development, 2020, 69(2).
- [4] QIN Jiyun, HU Eric, LI Xiaohua. Solar aided power generation: a review[J]. Energy and Built Environment, 2020(1): 11-26.
- [5] Rodrigo Milani, Lilia Caiado Couto, Rafael Soria, et al. Promoting social development in developing countries through solar thermal power plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246.
- [6] 贾亚晴. 塔式太阳能光热配套电站系统仿真研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [7] 李浩. 塔式太阳能热发电传热储能系统建模与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [8] LI Xing, WANG Zhifeng, YANG Ming, et al. Modeling and simulation of a novel combined heat and power system with absorption heat pump based on solar thermal power tower plant[J]. Energy, 2019, 186.
- [9] PRAVEEN R P. Performance analysis and optimization of central receiver solar thermal power plants for utility scale power generation[J]. Sustainability, 2019, 12(1).
- [10] BLAIR N, DOBOS A, FREEMAN J, et al. System advisor model - SAM 2014.1.14: general description[R]. NREL/TP-6A20-61019, 2016.
- [11] National Renewable Energy Laboratory(NREL). System Advisor Model(SAM) General Description [R/OL]. [2018-05-04]. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70414.pdf>.
- [12] 韩磊, 雷少博, 朱琳. 基于SAM的塔式太阳能热发电站建模及分析[J]. 山西电力, 2019(5): 38-44.
- [13] 付鹏, 王宁玲, 乔加飞, 等. 塔式光热发电系统性能分析与评价[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 53-60.
- [14] 曹传胜. 塔式太阳能热发电站性能的影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 223-228.
- [15] 丁路, 奚正稳, 何杰, 等. 塔式熔盐吸热器结构设计、计算及工艺制造特点简析[J]. 东方电气评论, 2019, 33(2): 61-66, 70.
- [16] 王沛, 李嘉宝, 赵亮, 等. 塔式太阳能熔盐吸热器传热特性及烟分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3605-3614.
- [17] 李心, 赵晓辉, 李江烨, 等. 塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 84-88.

作者简介



谢昱卓

谢昱卓(1996—), 女, 研究生, 研究方向为塔式光热电站控制系统。

(收稿日期: 2021-04-15)