

槽式太阳能热发电系统数值模拟研究

李博¹, 苑晔²

(1. 电力规划设计总院, 北京 100120; 2 西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

摘要:在我国西部适宜进行光热电站开发的两个地区,对典型配置的50 MW槽式太阳能热发电站进行了系统顾问模型(SAM)软件和Greenius软件的数值模拟计算,主要进行了储热时长优化及月发电量、年发电量、年利用小时数、光电效率等的计算,并将两个软件的计算结果进行了对比分析。结果表明,两个软件的计算结果差异并不明显,且差异来源可能为集热场热量输出模型以及汽轮机模块。

关键词:太阳能热发电;系统顾问模型软件;Greenius软件;数值模拟

中图分类号:TK 514

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2018)07-0014-04

0 引言

太阳能热发电技术是利用太阳光聚集能量,通过换热装置提供的蒸汽来驱动汽轮机组做功发电^[1-3]的技术,具有可储能、可调峰、可连续稳定发电、可集中规模化利用清洁能源的优点。与常规火电不同,太阳能热发电系统的经济配置受太阳能资源、聚光集热场规模、储热容量的影响较大,其中集热场投资可占系统投资50%以上。因此,合理优化太阳能热发电系统对节约投资和运行成本至关重要。一般来说,在开展太阳能光热项目前期阶段需借助电站仿真软件对聚光集热场规模、储热时间进行优化,得到发电量、成本电价等系统经济性数据的初步估计值,为项目提出初步可行性方案。

国内一些学者采用自主开发的计算程序对太阳能热发电系统进行了数值模拟^[4-5],主要是针对发电量的计算及技术经济指标的优化,但目前更多的还是采用免费商业化软件进行电站的优化工作^[1,6]。可用于对太阳能热发电系统进行技术经济性评估的免费商业化软件主要有美国可再生能源实验室(NREL)开发的系统顾问模型(SAM)软件以及德国宇航局(DRL)开发的Greenius软件。已公开发表的资料中多使用SAM软件进行太阳能热发电站的经济性配置研究,而对Greenius软件,目前尚未见到公开发表的研究。我国目前正在积极发展光热发电产业,对电站仿真软件的深入研究有利于为光热发电项目的开展提供更加可靠的依据。

鉴于以上考虑,本文利用SAM和Greenius两种电站仿真软件,选取我国西部适宜进行光热电站开发的地区,对50 MW典型配置的槽式太阳能热发电

系统^[7]进行数值模拟,重点考察月发电量、年发电量、年利用小时数、光电效率等关键经济性数据,探讨两个软件对槽式太阳能热发电系统模拟结果的差异,为光热发电系统的优化提供参考。

1 数值模拟研究条件

本文选取我国西部地区适合建设光热电站的两个地区,分别采用SAM和Greenius软件对典型配置的50 MW槽式太阳能热发电系统进行数值模拟,所模拟的太阳能热发电系统的配置见表1。集热场采用Euro Trough ET150型聚光集热器,每个集热器回路包含4个集热器组合(SCA),每个SCA长150 m,开口反射面积为817.5 m²,集热器回路的总采光面积可达3270 m²。采用Schott PTR70 2008型集热管,集热管外径为70 mm,吸收率为96%。传热介质采用导热油,集热场回路入口油温为293℃,出口油温为393℃。储热介质采用熔盐($w(\text{NaNO}_3) = 60\%$, $w(\text{KNO}_3) = 40\%$),空冷汽轮机主蒸汽压力为10 MPa,主蒸汽温度为383℃,这里忽略了管路的沿程温降,汽轮机设计效率为37.8%。

表1 50MW槽式太阳能热发电系统配置

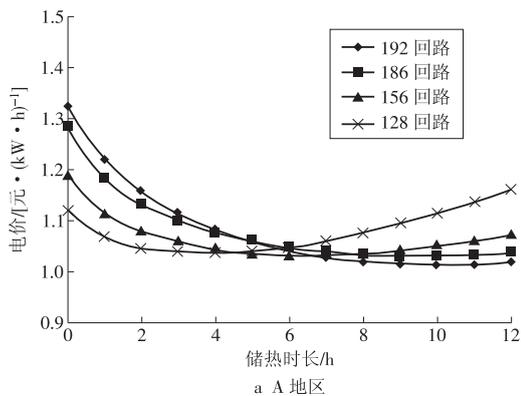
项目	配置情况
集热器	Euro Trough ET150
集热管	Schott PTR70 2008
传热介质	导热油
储热介质	熔盐
汽轮机效率/%	37.8
回路入口油温/℃	293
回路出口油温/℃	393

太阳辐射量具有随机性,根据各年的太阳辐射量数据来计算相关的工程设计参数,其结果会有很

大的误差。根据多年的气象数据得出具有代表性的太阳辐射数据,建立工程代表年,以充分反映长期的太阳辐射变化规律。工程代表年通过整理多年光资源数据,得到具有典型代表性的光资源数据,并以此为依据对太阳能光热电站进行设计。根据气象资料,A 地区的设计年用太阳法向直接辐射(DNI)值为 $1847.9 \text{ (kW} \cdot \text{h)/m}^2$,B 地区的设计年用 DNI 值为 $1877.9 \text{ (kW} \cdot \text{h)/m}^2$ 。软件中两个地区的设计点 DNI 值均为 900 W/m^2 。

2 不同镜场规模的储热时长优化分析

首先采用 SAM 软件对 A,B 地区的镜场规模和储热时长进行优化。优化计算的前提是电网调度不受限制,汽轮发电机组能满负荷发电则满负荷发电。图 1 为 128,156,186,192 回路数下,A,B 地区的成本电价随储热时长的变化曲线。从图 1 可以发现,两个地区在不同镜场规模条件下的储热时长优化分析曲线变化趋势一致。在特定镜场规模条件下,成本电价随储热时间的增加,呈现先降低后升高的趋势,存在一个最优储热时间,使得成本电价最低。当储热时长较小时,提高镜场规模会增加成本电价,是不经济的,但当储热时长增加时,提高镜场规模会降低成本电价,使得电站运行更加经济。



从图 1 不难看出,192 回路时系统技术经济性最优,A,B 地区的最优成本电价分别为 $1.020, 1.025 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)}$,对应的储热时间均为 9 h。这里需要指出,由于目前国内尚没有已经投运的商业化太阳能热发电站,本文只对各系统设备的成本进行初步核算和估计。

3 SAM 计算和 Greenius 计算对比分析

为了清楚地表示出 SAM 和 Greenius 计算结果的差异,图 2 给出了 192 回路条件下,成本电价随储热时长变化曲线的 SAM 和 Greenius 计算对比。从图 2 可以发现,A,B 地区的 SAM 和 Greenius 计算结果相似,成本电价变化趋势类似,均呈现先降低后增加的趋势,两个软件的计算结果均显示最优储热时长为 9 h。Greenius 计算的 A,B 地区的成本电价分别为 $1.044, 1.023 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)}$,与 SAM 计算得到的 $1.020, 1.025 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)}$ 相比,差异在 3% 以内,这说明 SAM 和 Greenius 的经济性评价模型计算结果基本一致。

下面以镜场规模为 192 回路为例,考察不同地区、不同储热时长工况下,两个软件的月发电量计算差异。图 3 所示为 192 回路下,储热时长分别为 9, 10, 11 h 的 A 地区月发电量计算结果。两种计算

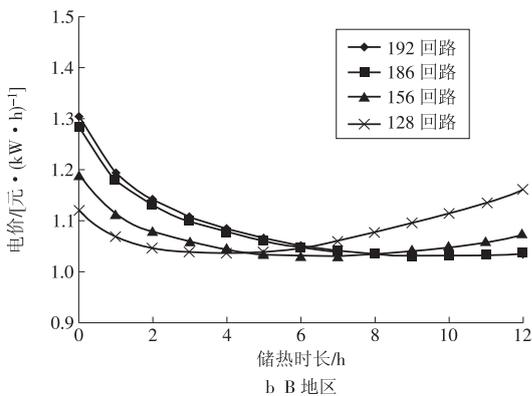


图 1 成本电价随储热时长的变化曲线

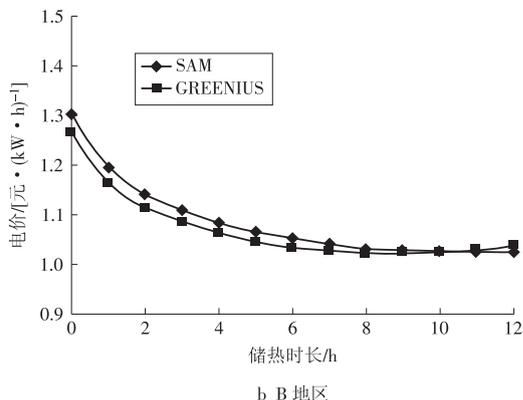
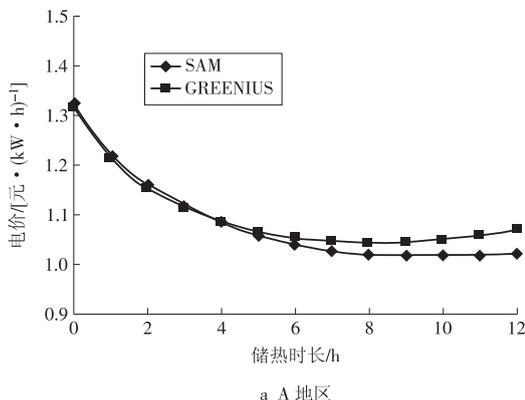


图 2 192 回路下成本电价随储热时长变化曲线的 SAM 和 Greenius 计算对比

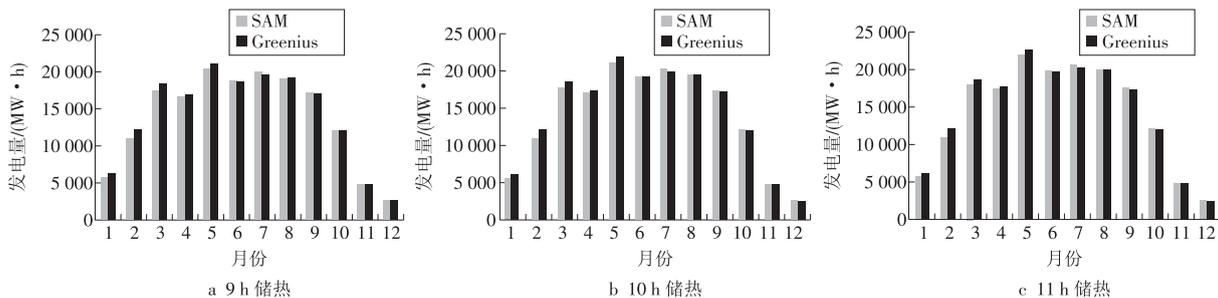


图 3 192 回路下 A 地区月发电量

方法的计算结果均表明 5 月的发电量最高;SAM 计算得到的 1~5 月的月发电量明显低于 Greenius 的计算结果,SAM 计算得到的 6,7 月的月发电量高于 Greenius 的计算结果,其他月份两个软件的计算结果基本一致。总体来说,两个软件的月度发电量计算结果差异并不明显。

图 4 所示为 192 回路下,储热时长分别为 9, 10, 11 h 的 B 地区月发电量计算结果。两种计算方法的计算结果均表明 5 月的发电量明显高于其他月份;SAM 计算得到的 3 月发电量明显高于 Greenius 的计算结果,两个软件计算得到的 2 月的发电量基本一致,除了这两个月份以外,其他月份,SAM 的计算结果明显低于 Greenius 的计算结果。此外,通过对比图 3 和图 4 发现,由于 B 地区的资源优于 A 地

区,因此 B 地区 5—9 月的月度发电量明显高于 A 地区该时间段的月度发电量。

表 2、表 3 给出了 A, B 地区电厂经济性指标参数的计算结果。从表 3 可以发现,在考察的 3 种储热时长工况下,SAM 计算的 A 地区年发电量、年利用小时数及光电效率均低于 Greenius 的计算结果。在储热时长为 9, 10, 11 h 的工况下,年发电量差异为 1.8%, 1.5% 和 1.2%。从表 4 可以发现,在考察的 3 种储热时长工况下,SAM 计算得到的 B 地区年发电量、年利用小时数及光电效率也低于 Greenius 的计算结果。在储热时长为 9, 10, 11 h 的工况下,年发电量差异为 2.7%, 2.6%, 2.3%, 差异随着储热时长的增加而减小。这说明在不同的地区以及不同储热时长工况下,SAM 计算得到的技术经济性指

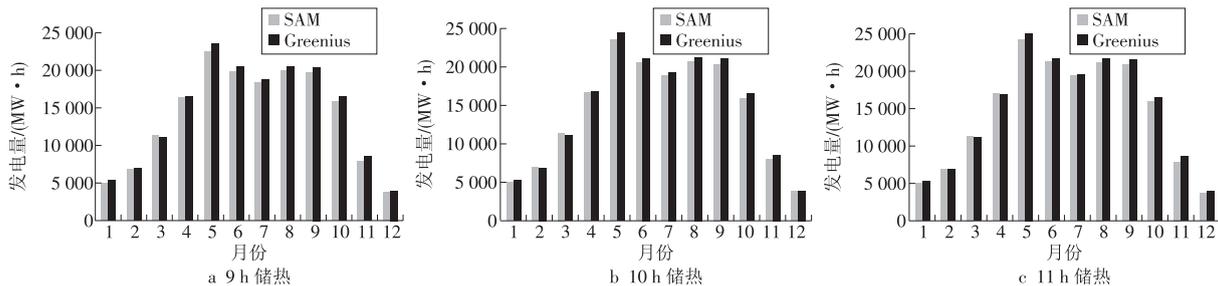


图 4 192 回路下 B 地区月发电量

表 2 A 地区电厂经济性指标参数计算结果对比

储热时长/h	SAM 计算结果			Greenius 计算结果		
	年发电量/(MW·h)	年利用小时/h	光电效率/%	年发电量/(MW·h)	年利用小时/h	光电效率/%
9	165 758	3 315	14.29	168 832	3 376	14.56
10	169 189	3 384	14.50	171 755	3 435	14.80
11	172 145	3 443	14.84	174 220	3 484	15.02

表 3 B 地区电厂经济性指标参数计算结果对比

储热时长/h	SAM 计算结果			Greenius 计算结果		
	年发电量/(MW·h)	年利用小时/h	光电效率/%	年发电量/(MW·h)	年利用小时/h	光电效率/%
9	167 713	3 354	14.23	172 435	3 449	14.63
10	171 444	3 429	14.54	175 939	3 519	14.92
11	174 970	3 499	14.84	178 887	3 578	15.17

标均低于 Greenius 计算得到的结果。

接下来,以 A 地区 9 h 储热工况为例进行进一步分析可能造成年发电量计算结果差异的原因。SAM 计算得到的集热场输出用于做功发电的能量为 450 725 MW · h,而 Greenius 计算得到的这一数据为 478 610 MW · h,两者相差 5.8%。本文采用了成熟的商业化集热器和集热管,两个软件对跟踪精度、吸收效率、余弦损失、端部损失等参数设定是一致的,且导热油的回路进、出口温度也设定一致,但导热油在回路中的流量流速、集热管散热损失等参数在两个软件中的设定均有差异,这有可能导致散热量计算的差异,从而导致镜场输出热量存在差异。

镜场输出用于做功发电的能量包含两部分,一部分直接进入汽轮机做功发电,另一部分则进入储热系统准备发电用。Greenius 计算得到的储热系统储放热量为 4 340 MW · h, SAM 计算得到的该数值为 4 250 MW · h,差异较小。通常情况下,储热系统的效率均设定为 99%,因此可以判定储热系统的热损失不会是发电量计算差异的来源。在汽轮机模块方面,Greenius 的输入参数需写入特定的输入文件中,计算矩阵需要根据具体的机组参数、换热介质的进出口温度、额定背压等信息输入,因此,不同的机组可能会产生的不同的计算矩阵,且机组循环效率随负荷变化,也就是说不同负荷工况的循环效率不同。而 SAM 的汽轮机模块设定为具有一次再热的朗肯蒸汽循环系统,其循环效率与换热流体的流速、温度及背压条件都有关系。在 SAM 界面中,输入以上信息的额定值,系统会自动匹配最优的汽轮机系统和空冷或湿冷系统,进行非设计工况下的计算。

因此,根据以上分析可以发现,Greenius 和 SAM 在技术经济指标计算方面的差异主要来源于聚光集热场热量输出计算以及汽轮机模块。

4 结论

本文利用 SAM 和 Greenius 两种电站仿真软件,

(上接第 13 页)

参考文献:

- [1]唐耀华,刘海宝,朱峰,等.基于软测量技术的双进双出磨煤机入炉煤量计算[J].仪表技术与传感器,2012,(5):27-29.
- [2]赵志丹,韩吉亮,练领先,等.配置双进双出磨煤机的超临界机组控制策略优化[J].热力发电,2013,42(11):16-20.
- [3]万文军,刘浩,黄卫剑,等.双进双出磨煤机过程参数动态特性建模[J].热力发电,2015,44(11):58-61.
- [4]李明.双进双出磨煤机的料位检测及优化控制[D].沈

选取我国西部适宜进行光热电站开发的地区,对 50 MW 典型配置的槽式导热油太阳能热发电系统进行了数值模拟,重点考察了发电量、年利用小时数、光电效率等关键经济性数据,探讨两个软件对槽式太阳能热发电系统进行模拟时的差异。

在 192 回路的储热时长优化计算中, SAM 和 Greenius 软件的计算结果相似,最优储热时长的计算结果一致。在相同工况下,两个软件计算得到的月发电量差异并不明显。SAM 计算得到的年发电量、年利用小时数和光电效率的结果低于 Greenius 的计算结果。分析发现,这种差异可能来源于镜场热量输出计算以及汽轮机模块。由于目前我国尚未有建成的商业化太阳能热发电机组,未来仍需要用实际运行数据对两个软件的相关模型进行验证。

参考文献:

- [1]李然,封春菲,田增华.槽式太阳能热发电站系统配置的经济性分析[J].电力勘测设计,2015(1):71-75.
- [2]杨映,刘晓光.碟式太阳能热发电跟踪系统的建模与仿真[J].中国电力,2014,47(7):104-107.
- [3]陈静,刘建忠,沈望俊,等.太阳能热发电系统的研究现状综述[J].热力发电,2012,41(4):17-22.
- [4]冯云岗,崔云,蒋浩.槽式太阳能光热系统发电量计算研究[J].电力与能源,2016,37(1):93-97.
- [5]田素乐.槽式太阳能热发电系统性能分析[D].济南:山东大学,2012.
- [6]赵明智,张晓明,宋士金,等.槽式太阳能热发电系统太阳倍数和蓄热时长的选取方法研究[J].太阳能,2015(6):50-54.
- [7]HERRMANN U, KELLY B, PRICE H. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants[J]. Energy, 2004, 29(5):883-893.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

李博(1987—),女,河北廊坊人,高级工程师,从事火电及太阳能热发电技术研究(E-mail:boli@eppei.com)。

阳:沈阳工业大学,2004:1-71.

- [5]刘珍明.双进双出钢球磨煤机控制方式的探讨[J].青海电力,2005,24(3):15-17.
- [6]王燕妮,梁彦鸿,王鹏.双进双出磨煤机控制系统分析[J].陕西电力,2010,38(3):5-7.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

许伟强(1982—),男,河南漯河人,工程师,工学硕士,从事大型热控系统调试及热工自动控制技术的研究及应用工作(E-mail:86153352@qq.com)。