

新型塔式太阳能热发电系统集成研究

袁建丽¹, 韩巍², 金红光², 张清峰¹

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100080)

Research on System Integration of a Novel Solar Tower Thermal Power Plant

YUAN Jianli¹, HAN Wei², JIN Hongguang², ZHANG Qingfeng¹

(1. North China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: Based on the actual condition to develop solar energy in China and method of synthetic cascade utilization of energy, a novel solar tower power system was proposed. The two-stage thermal storage technology was adopted by this new system. Solar energy was stored respectively according to its different energy level. Its operation mode was switched neatly. The simulation indicates that the solar thermal power peak efficiency of 1 MW power output was 10.6%, and the annual mean efficiency was 5.1%. The result shows that the key point to improve system performance is mainly due to choose right operation mode and boost the system. The conclusions will supply new schemes and methods for the development of solar tower power plant in China.

KEY WORDS: two-stage thermal storage; solar tower power thermal power plant; thermal system; system integration

摘要: 基于我国发展塔式太阳能的实际情况和能的综合梯级利用思路, 提出一种新颖的太阳能塔式热发电系统。新系统采用双级蓄热技术, 分级存储不同品位的太阳能; 同时具有多种运行模式, 可以灵活地切换。模拟计算表明, 1 MW 塔式太阳能热电站的峰值太阳能发电效率为 10.6%, 年平均发电效率为 5.1%。研究表明, 合理的运行模式和系统的规模化是提高太阳能热发电系统性能的关键所在。该文研究结果为我国塔式太阳能热发电提供了新的思路和方案。

关键词: 双级蓄热; 塔式太阳能热发电; 热力系统; 系统集成

0 引言

化石能源枯竭和环境日益恶化已经成为制约全球经济和社会发展的长期、重大瓶颈, 未来将影响到人类的生存状态。为了解决该问题, 一方面要大力开展节能与科学用能和努力发展化石燃料, 另

一个方面必须加速可再生能源的开发和利用。太阳能以其分布广泛, 储量丰富受到了广泛关注。大力开发利用太阳能, 将会改变我国能源短缺和不合理的能源结构, 使能源供应多样化, 同时可以解决环境污染问题。因此, 研究开拓太阳能热力发电系统成为当今能源动力领域研究的热点与前沿课题^[1-4]。

随着太阳能热发电技术和经济指标的进步, 以及全球化石燃料的逐渐枯竭和对减排 CO₂ 的要求, 太阳能热发电近 5 年来在全世界发展迅猛, 国际能源署预测 2003 年到 2010 年 7 年间全球新增太阳能热发电站的装机容量总共可达到 2 250 MW, 可大规模化的能源利用方式正在进入商业化成长期^[5-6]。显然, 利用太阳能热发电是开拓新能源资源, 保护地球环境, 实现人类可持续发展的重要途径^[7]。

基于这一研究背景, 结合中国目前发展太阳能热发电的实际情况, 提出了一种新型的塔式太阳能热发电系统, 并给出了塔式太阳能热发电系统设计的一般方法, 利用该方法进行系统结构设计和性能分析, 并对比研究了新系统在不同运行模式下的特性。

1 系统结构概念性设计和集成关键技术

1.1 系统结构设计概述

基于该研究背景, 参考国外塔式太阳能电站系统的特点, 并结合我国目前发展太阳能热发电的实际情况, 以及建立试验性电站的可行性, 提出了一种新型的太阳能塔式热发电系统, 如图 1 所示。该系统主要由蒸汽回路和蓄热油回路组成, 系统中的主要设备见表 1 所示。

塔式太阳能吸热器中直接通入高压水, 高压水

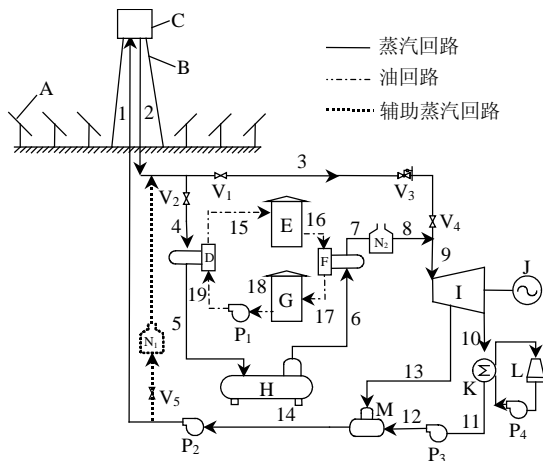


图1 塔式太阳能热发电系统流程图

Fig. 1 Diagram of solar tower thermal power plant system

表1 系统中的主要设备

Tab. 1 Main equipments in the system flowsheet

编号	名称	编号	名称
A	定日镜	M	除氧器
B	吸热塔	N ₁	蒸汽辅助锅炉
C	吸热器	N ₂	过热蒸汽辅助锅炉
D	蒸汽-油换热器	P ₁	油泵
E	高温蓄热罐	P ₂	给水泵
F	油-蒸汽换热器	P ₃	凝结水泵
G	低温蓄热罐	P ₄	冷凝水泵
H	低温蒸汽蓄热器	V ₁	阀门1
I	汽轮机	V ₂	阀门2
J	发电机	V ₃	减温减压阀
K	冷凝器	V ₄	阀门4
L	冷却塔	V ₅	阀门5

在吸热器中依次经过预热、蒸发和过热3个阶段，产生高温、高压的过热蒸汽。根据系统运行模式的不同，高温、高压过热蒸汽的去处有2个方案：第一，可以经过1个减温减压器V₃后调节蒸汽的参数，直接去动力子系统中汽轮机膨胀做功；第二，可以经过阀门V₂进入蓄热系统，首先和蒸汽-油换热器D交换过热蒸汽的高温显热，然后微过热的蒸汽进入低温蒸汽蓄热器中存储起来，这样经过高温和低温2级蓄热，可以高效地将所收集到的太阳能存储到蓄热子系统中，同时，也可以方便地将热量从蓄热子系统提取出来。其中高温蓄热部分使用耐高温的矿物油(不超过400℃)，在高温罐E和低温罐G中进行循环。

当系统中太阳能供应不足时，可以利用蓄热子系统中的能量产生蒸汽。首先从低温蓄热器H中经过减压阀闪蒸产生低温蒸汽，然后进入油-蒸汽换热器将低温蒸汽加热成过热蒸汽，再经过1个补燃锅炉N₂，将过热蒸汽加热到汽轮机入口蒸汽参数要求，再进入汽轮机做功。

上面所述的2种运行模式，称为半耦合模式，也即集热吸热子系统与蓄热子系统以及动力子系统相互之间既不是完全独立，又不是完全耦合在一起，吸热子系统中产生的高温、高压蒸汽与蓄热子系统产生的过热蒸汽既可以单独进入汽轮机，又可以平行地同时进入汽轮机。

动力系统中的其他部件和常规电站中的热力系统一样，由于该电站设计容量为1MW，汽轮机的设计参数很低，属于次中参数系列，回热系统只有一级，为除氧器。

经过除氧后的给水，直接进入吸热塔，这样系统在太阳能供应充足的情况下，整个系统可以不经蓄热系统直接运行。如果当系统启动或者夜间运行时，可以将给水直接送入辅助锅炉N₁，利用化石燃料燃烧提供能量，向系统供应蒸汽。

1.2 系统集成关键技术

提出的太阳能热发电系统不但满足系统稳定发电要求，而且兼顾了未来大型太阳能热发电系统所必需的关键技术。以下介绍其主要关键技术与特点。

1) 双运行模式的太阳能吸热器。

太阳能吸热器是太阳能热发电系统中的1个关键部件。利用太阳能吸热器产生高温高压过热蒸汽，是国际上先进的太阳能热发电主流方向之一，本研究紧跟国际技术发展趋势，利用双运行模式的太阳能吸热器产生高压过热蒸汽，既可以直接驱动汽轮机，又可以存储于蓄热罐中用以间接产生过热蒸汽。这不仅大大提高系统对太阳辐射不稳定不连续的适应性，更为今后大规模热发电技术的发展奠定了宽广的基础。

2) 双级蓄热流程结构。

蓄热储能是太阳能热发电系统中的另一关键技术。在本方案中采用了不同工质的双级蓄热流程在国际上还未见报道。双级蓄热就是将太阳能收集到的热量根据品位进行分级存储，高温热量由高温蓄热器存储，中温部分由低温蓄热器存储；蓄存热量释放时，高温蓄热器用于蒸汽的过热过程，而低温蓄热器用于蒸汽的发生过程，相互独立。双级蓄热的优势主要有：蓄热工质选择更加合理，高温蓄热器可以选择矿物油、熔盐、混凝土等作为蓄热工质，低温蓄热器可以选择水作为蓄热工质，双级蓄热方法可以大幅减小熔盐等价格昂贵的蓄热工质的使用量，也使高温蓄热罐体的体积大幅减小，降

低了投资。蓄热器功能独立，2 个蓄热器工作条件稳定，避免了单一蓄热器中蓄热和放热过程的复杂控制环节。技术风险小，高温蓄热器的热容量仅为低温蓄热器热容量的 20% 左右，在我国高温蓄热技术还不成熟的条件下，可以大幅降低蓄热技术给系统带来的风险，同时促进我国高温蓄热技术的研究与应用。

3) 多冗余的过热蒸汽供应保障体系。

本系统方案采用 3 重过热蒸汽供应保障系统：太阳能吸热器直接产生过热蒸汽，蓄热罐产生过热蒸汽以及辅助锅炉产生过热蒸汽等。这不仅为本示范电站的安全运行提供了可靠的保证，而且对多能源混合发电系统(太阳能加其他能源)的技术途径进行了探索。

2 系统模拟和特性分析

2.1 系统模拟思路

2.1.1 塔式太阳场能量转换流程

对于塔式太阳能热发电系统，主要由以下几个子系统组成：太阳能集热子系统、吸热与输送热量子系统、蓄热子系统、蒸汽发生系统、动力子系统和发电子系统。前 2 部分简称为太阳场，是太阳能热发电技术的核心。与常规的电站相比较，太阳能电站利用太阳能为系统提供能量，而常规电站是利用化石能源。因此，研究太阳能转化为热能这一能量转化过程是非常有必要的，不仅对于电站的设计和结构形式起着关键作用，而且影响着电站系统的性能以及运行控制方式等。本文重点研究前 2 个子系统，并进行了能量平衡分析，对这一过程中能量转化和利用进行全面分析，并建立对应的计算模型，为塔式太阳能热发电系统的设计提供指南。

图 2 为塔式太阳场的能量平衡示意图，太阳能

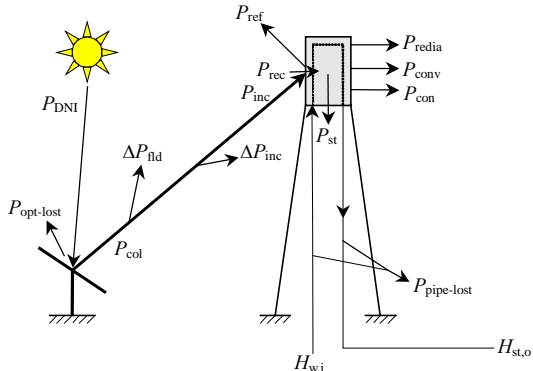


图 2 太阳能场能量转化与传递过程

Fig. 2 Energy conversiton and transfer of solar field

首先经过双轴跟踪的定日镜群反射，将光线汇聚到吸热塔顶部的吸热器表面，经过能量转换后，太阳能转化为热能，被吸热器中的工质吸热，并利用管道将工质携带的能量输送和传输到塔底部，进行下一个子系统能量转化和利用。

2.1.2 塔式太阳场中各部分能量定义

1) 太阳能集热子系统。

太阳能直射强度 ϵ_{DNI} ，这部分能量直接投射到太阳场中的定日镜面上，假定定日镜的总面积为 A ，则投射到定日镜的能量也即太阳场所接收太阳辐射能为

$$P_{DNI} = A\epsilon_{DNI} \quad (1)$$

经定日镜反射后的能量 P_{col} ，主要与定日镜的反射率 ρ_{ref} 和定日镜的清洁度 η_{clc} 有关，即

$$P_{col} = P_{DNI}\rho_{ref}\eta_{clc} \quad (2)$$

考虑到太阳能光线倾斜方向投射到定日镜表面所造成的余弦损失、定日镜之间由于几何布置所造成的阴影和遮挡等光学损失、整个镜场中的定日镜由于检修和损坏等因素产生的可用率、以及反射光线传输中由于空气透射所造成一部分能量损失，于是，定义定日镜场的场效率为

$$\eta_{fld} = \eta_{cos}\eta_{sb}\eta_e\eta_{tr}\eta_{ava} \quad (3)$$

式中： η_{cos} 为余弦因子； η_{sb} 为阴影遮挡因子； η_e 为空气透射因子； η_{tr} 为定日镜的跟踪精度因子； η_{ava} 为定日镜的可用率^[8-12]。

2) 太阳能吸热、输送热量子系统。

投向吸热器上的能量 P_{inc} ，收集到的太阳能辐射能投射向位于吸热塔上面的吸热器。另外太阳能光线为非平行光线，造成一部分光线投射不到吸热器上面，该影响因素用拦截因子 η_{int} 来衡量，于是有

$$P_{inc} = P_{col}\eta_{fld}\eta_{int} \quad (4)$$

进入吸热器的能量 P_{rec} ，由于被吸热器表面反射会损失一部分能量，实际上进入吸热器的能量将受到吸热器表面反射率 ρ_{rec} 的影响，考虑到该因素有

$$P_{rec} = P_{inc}(1 - \rho_{rec}) \quad (5)$$

吸热器所吸收的能量，也即被吸热器中的吸热工质所吸收的能量，该能量也即有用能量，由于吸热器处于高温下不可避免地会产生辐射热损失，同时由于受到风速和支架导热等影响，存在着一定的对流损失和导热损失：

$$P_{st} = P_{rec} - P_{redia} - P_{conv} - P_{con} \quad (6)$$

当吸热工质从高塔顶部传输下来,较长的管路会发生一部分能量损失,于是有

$$\Delta H = H_{st,o} - H_{w,i} = P_{st} - P_{pipe-lost} \quad (7)$$

2.1.3 塔式太阳能热发电的热力计算

首先,根据给定的塔式电站设计容量和参数计算整个系统中其他参数。对于1个设计容量为 P_e 的塔式太阳能热电站,根据发电电子系统和动力子系统的系统结构确定该部分热容量大小;由动力系统的热力参数来计算朗肯循环效率 $\eta_{Rankine}$,假定发电机效率为 η_{ele} ,可以得到动力部分所需要的额定热负荷为

$$P_{th} = \frac{P_e}{\eta_{Rankine} \eta_{ele}} \quad (8)$$

如果系统中存在着蓄热子系统,需要经过多个换热器,在蓄热和放热过程中存在着能量损失,假定蓄热系统的热效率为 η_{ts} ,蓄热子系统大小是由系统的蓄热时间确定,蓄热系统的大小反映了系统的负荷调节能力,如果系统的设计蓄热时间为 N 小时,则蓄热子系统的热容量为

$$P_{ts} = \frac{P_{th}}{\eta_{ts}} N \quad (9)$$

实际上,太阳能热电站中集成了蓄热子系统后,太阳场所能收集到的太阳热能往往要大于动力子系统所需的热量,将其中过量的能量存储到蓄热子系统中,满足电站的调节负荷需求。一般地,设计工况下,吸热子系统所能收集到太阳能能量与朗肯循环系统所需要的热量之比定义为太阳倍数 ε_{SM} ,太阳倍数的大小决定了整个太阳能电站的容量因子 ε_{CF} 大小和蓄热子系统大小,通常是通过技术经济比较,优化后求得1个太阳倍数 ε_{SM} ,于是可得到吸热子系统的容量:

$$P'_{rec} = P_{th} \varepsilon_{SM} \quad (10)$$

整个电站的容量因子 ε_{CF} 不仅受到电站系统结构和参数的影响,同时受到电站的运行模式和电站所在地气象参数,以及当地电网负荷的影响,计算方法为:电站的年实际发电量除以电站以额定工况全年运行的发电量,或是太阳能电站年实际满负荷发电小时数除以8760h。

2.2 系统性能分析

2.2.1 系统总体性能评价指标

评价太阳能热发电系统总体性能的参数主要有:电站的年发电量、峰值太阳能发电效率、年平均太阳能发电效率、容量因子等。

1) 电站的年发电量 $P_{e,a}$,由于太阳能电站的不稳定性和受到太阳能供应的间歇性,需要对电站的发电量在一年内进行累计,即

$$P_{e,a} = \int_a P_e dt \quad (11)$$

2) 峰值太阳能发电效率 η_{max} ,也即系统发电效率的最大值:

$$\eta_{max} = \left(\frac{P_e}{\varepsilon_{DNI} A} \right)_{max} \times 100\% \quad (12)$$

3) 年平均太阳能发电效率,定义为1年内电站的发电量除以年太阳能收集量:

$$\eta_a = \frac{P_{e,a}}{A \times \int_a \varepsilon_{DNI} dt} \times 100\% \quad (13)$$

2.2.2 系统关键参数确定

对该系统进行了热力计算,确定了系统中关键节点的参数,如表2所示。

表2 系统流程中关键节点参数
Tab. 2 Parameters of key nodes in the system flowsheet

状态点	工质	温度/°C	压力/10 ⁵ Pa	流量/(kg/h)
1	水	107	27.5	5 770
2	蒸汽	400	25	5 770
3	蒸汽	400	25	5 770
4	蒸汽	400	25	5 770
5	蒸汽	261.4	25	(5 770)
6	蒸汽	224	24.3	(5 770)
7	蒸汽	320	23.8	(5 770)
8	蒸汽	390	25	(5 770)
9	蒸汽	390	25	(5 770)
10	蒸汽	39	0.073	4 790
11	水	39	0.073	4 790
12	水	39.4	27.5	4 790
13	蒸汽	210	3	980
14	水	107	27.5	5 770
15	矿物油	350	1.2	(8 387)
16	矿物油	350	1	(8 387)
17	矿物油	240	1	(8 387)
18	矿物油	240	1	(8 387)
19	矿物油	240	1.5	(8 387)

注:括号内的数字为蓄热系统解耦模式下的流量,其中矿物油的比热取1883J/(kg·°C)

电站的太阳倍数 ε_{SM} 设计为1.2,吸热器中蒸汽流量为5770kg/h,出口蒸汽温度为400°C,吸热器的热效率为85%。在设计点,电站所在地区的年太阳能辐射量为1509(kW·h)/m², ε_{DNI} 取国际上通用设计值1000W/m²,根据这些已知条件,对电站热力系统进行设计,计算了一些关键设备的容量,并对电站进行能量平衡计算^[13-16]。其他详细参数见表3。

表 3 电站的设计参数
Tab. 3 Design parameters of the solar tower power plant

年太阳能辐射/ (kW·h)/m ²	设计点辐射强度/(W/m ²)		设计点功率/MW		太阳能倍数		塔高/m		定日镜数量/ (定日镜反射面积/m ²)	
1509	1000		1.0		1.2		100		100/100	
定日镜年平均 反射率/%	投射到反射面上的能量		反射到吸热器上总能量		传递给工质的能量		送到汽轮机的能量		净发电量	
	设计点/ MW	年平均/ (GW·h)	设计点/ MW	年平均/ (GW·h)	设计点/ MW	年平均/ (GW·h)	设计点/ MW	年平均/ (GW·h)	设计点/ MW	年平均/ (GW·h)
92	10	15.1	6.82	9.75	5.80	6.92	5.74	6.57	1.06	0.77

2.2.3 塔式电站的系统性能估算

对所设计的电站进行了系统性能估算，得出初步的性能结果，见表 4，该电站的峰值太阳能发电效率为 10.6%，而年平均发电效率仅为 5.1%，主要是由于该电站的容量较小，太阳能场和吸热塔之间不是最优匹配，汽轮机入口参数较低，对应的朗肯循环效率低等多种原因造成的。

表 4 系统性能估算结果

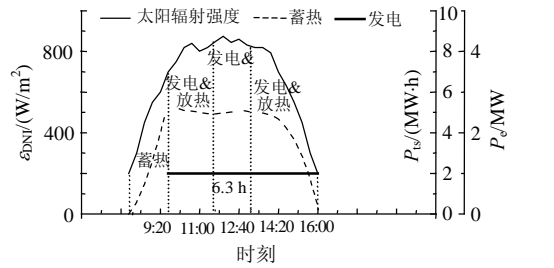
Tab. 4 Evaluation results of sytem performance

项目	数值
电站容量/MW	1.0
镜子反射率/%	93
场效率/%	78
镜场清洁度/%	94
吸热器效率/%	85
蓄热效率/%	99
光热转换效率/%	57
热转功效率/%	21
峰值发电效率/%	10.6
厂用电率/%	12
ϵ_M	1.2
镜场面积/m ²	10 000
ϵ_{CF}	0.088
ϵ_{DNI} /(W/m ²)	1 000
年平均发电效率/%	5.1

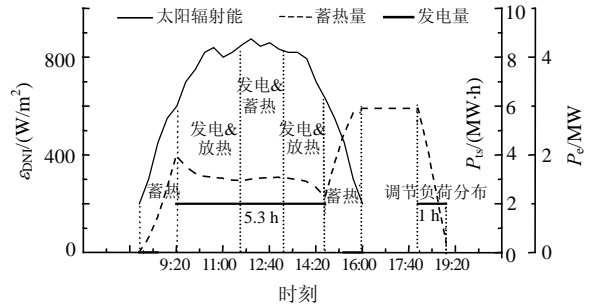
2.3 不同运行模式下系统性能

为了研究太阳能电站在不同运行模式下系统输出的特性规律，也即研究电站蓄热子系统 and 发电子系统之间在不同运行模式下的输出特性。这里，假定某一天气象输入数据(如图 3—4 所示)，之后研究系统在解耦模式和非解耦模式下的运行特性，以及蓄热子系统的不同运行模式对系统性能的影响。

其中，图 3 反映了相同太阳能输入下，系统的调节负荷特性，系统的运行模式为完全解耦模式。根据系统的设计，该太阳能电站的蓄热系统可以保证电站在没有太阳能输入时，电站可以满足负荷发电 1 h，同时考虑到蓄热子系统可以用来增强电站的调节负荷能力。从图 3 可知，在该气象条件下，电站可以满足负荷发电 6.3 h，图 3(a)中蓄热系统充满

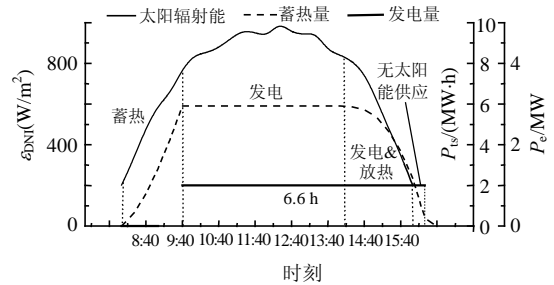


(a) 先蓄热再发电

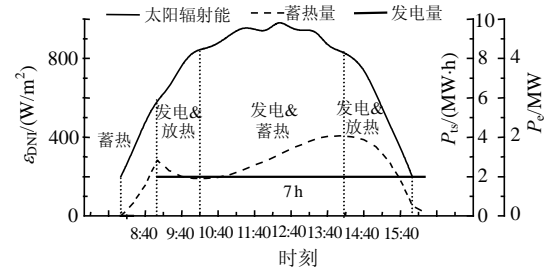


(b) 边蓄热边发电

图 3 相同太阳能输入下，系统的调节负荷性能
Fig. 3 Load dispatch characteristics at the same solar energy input



(a) 先蓄热再发电



(b) 边蓄热边发电

图 4 相同太阳能输入下，蓄热运行模式对系统性能的影响
Fig. 4 Influence of thermal storage operation mode on the system performance at the same solar energy input

后, 电站动力部分才启动运行, 发电部分一直处于 1 MW 的负荷下运行, 而蓄热系统处于蓄热与放热同步进行状态, 直到蓄热量为 0, 系统停止发电。而图 3(b) 不同于图 3(a) 的地方在于当蓄热系统的蓄热量达到某一值时, 就开始发电, 这样可以有效地调节系统中的能量分配, 也即当太阳能供应太多或者不足时, 有蓄热系统调节, 然而, 这个最佳点需要经过运行和计算确定。在图 3(b) 运行模式下, 当下午太阳能供应不足时, 蓄热系统仅仅蓄热, 然后将所存储的热量用于晚上发电, 以满足电网负荷的需求。从图 3 的简单计算示意, 充分体现了太阳电站在解耦模式下运行时, 蓄热子系统的运行模式对系统输出特性的影响, 同时, 也说明蓄热系统的加入可以调节电站的负荷输出。

图 4 对比了在不同的蓄热量时开始发电, 对系统发电量的影响。由图 4(a) 可知, 该系统在太阳能供应的情况下, 蓄热系统已经充满, 浪费了多余的能量, 而图 4(b) 中由于在蓄热系统没有充满的情况下启动系统, 可以充分利用太阳能, 同时实现了蓄热系统对太阳能波动的缓冲作用, 2 者相比较, 后者可以多发电 0.4 h。

从前面的简单算例可以得知, 系统的运行模式对系统有重大影响, 而本文所设计的塔式太阳能电站具有多种运行模式, 可以灵活地切换, 这样, 在不同的气象条件下, 系统能够在对应的模式下运行, 实现发电量最大化。

3 系统展望和前景

受到我国技术条件和运行经验的限制, 对塔式太阳能热发电系统进行方案设计时, 以保证可靠发电为优先考虑原则, 太阳能集热系统和发电系统完全解耦, 它们之间的能量传递依靠蓄热系统。当积累一定运行经验后, 可以将太阳能集热系统和发电系统耦合在一起(采用系统预留方案), 延长系统运行时间, 提高年平均发电效率。本文基于 1 MW 塔式太阳能热发电系统, 汽轮机入口蒸汽参数较低, 导致整个系统效率偏低。如果发电规模能够提高, 例如提高到 100 MW, 汽轮机入口蒸汽从 390 °C 提高到 535 °C, 发电效率有较大幅度提高(21%左右)。

太阳能是一种清洁、丰富的可再生资源, 太阳能在我国以及全世界都是最丰富和可广泛获取的可再生能源形式。它的大量使用, 将改变我国能源

短缺, 能源结构不合理的现状, 使能源供应多样化, 同时可以解决环境问题。我国太阳能资源丰富, 特别是沙漠戈壁空地资源丰富, 有条件发展大规模太阳能热发电, 这对满足我国的部分电力需求具有极大的潜力, 应当加以发展。太阳能塔式热发电技术已经完成了实验室探索阶段, 正在向商业化迈进。西班牙、美国、德国、以色列、意大利、澳大利亚、日本、韩国等国家都投入了大量的资金和人力进行研究, 取得了大量的科研成果, 已先后建立了十几座塔式太阳能热发电站。研究及实际运行表明, 太阳能塔式热发电是实现大功率发电、替代常规能源最为经济的手段之一, 有可能给紧张的能源问题带来革命性的解决方案。

本研究为我国发展太阳能热发电技术将起到推动作用, 通过小型化试验示范电站, 探索太阳能塔式发电系统的特性规律, 可以有效地填补我国在这方面的空白, 同时有助于积累相关先进技术的经验, 为我国发展大型太阳能热发电系统奠定坚实基础。在借鉴国外先进的塔式发电技术的基础上, 建立适合我国国情的塔式太阳能热发电系统, 研制具有自主知识产权的发电技术, 为今后在中国大规模发展太阳能热发电提供技术支持和保障。

4 结论

1) 本文提出了新型的太阳能塔式热发电系统, 采用双级蓄热技术, 将收集到的太阳能根据能量品位的高低进行分级存储, 这样不仅有利于蓄热系统的设计和蓄热工质的选择, 而且高效地存储了能量, 实现了热能利用中的“温度对口, 梯级利用”原则。另外, 该系统具有多种运行模式, 可以灵活地切换, 实现系统输出的最优, 同时考虑到多能源供应, 保证电站在没有太阳能供应的情况下, 可以稳定地运行。

2) 模拟分析表明, 该 1 MW 塔式太阳能热电站的峰值太阳能发电效率为 10.6%, 年平均发电效率为 5.1%。

3) 通过对系统在不同运行模式下的性能进行分析, 表明该系统具有多种运行方式, 需要进一步的优化和比较, 可以实现最优的系统性能。

4) 本文提出的塔式太阳能电站转换过程和热力计算原则为今后同类电站提供了参考, 同时也为我国塔式太阳能热发电的发展提供了新思路和方案。

参考文献

- [1] Cassedy E S. 可持续能源的前景[M]. 1 版. 段雷, 黄永梅, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002: 9-31.
Cassedy E S. Prospects for sustainable energy[M]. 1 Edition. Duan Lei, Huang Yongmei, Translation. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 9-31(in Chinese).
- [2] 中国科学院能源战略研究组. 中国能源可持续发展战略专题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-10.
Chinese Academy of Energy Strategy Study Group. Strategy research on China's energy sustainable development[M]. Beijing: Science Press, 2006: 1-10(in Chinese).
- [3] 杨敏林, 杨晓西, 林汝谋, 等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程, 2008, 23(3): 221-229.
Yang Minlin, Yang Xiaoxi, Lin Rumou, et al. Solar energy-based thermal power generation technologies and their systems[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(3): 221-229(in Chinese).
- [4] Gregory J K, Daniel J A, Charles W L. Insights from the operation of solar one and their implications for future central receiver plants[J]. Solar Energy, 1991, 47(1): 39-47.
- [5] 周凤起, 周大地. 中国中长期能源战略[M]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 251-256.
Zhou Fengqi, Zhou Dadi. China's long-term energy strategy [M]. Beijing: China Planning Press, 1999: 251-256(in Chinese).
- [6] 蔡睿贤, 金红光, 林汝谋. 能源动力系统与环境协调相容的难题, 100 个交叉科学难题[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 366-371.
Cai Ruixian, Jin Hongguang, Lin Rumou. Problems of coordination of energy power systems compatible with the environment, one hundred interdisciplinary science challenges[M]. Beijing: Science Press, 2005: 366-371(in Chinese).
- [7] 赵玉文. 21 世纪我国太阳能利用发展趋势[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 73-77.
Zhao Yuwen. Development trends of China's solar energy in 21century[J]. Electric Power, 2000, 33(9): 73-77(in Chinese).
- [8] Enermodal. Cost reduction study for solar thermal power plants [R]. Ontario: Marbek Resource Consultants Ltd., 1999.
- [9] Mary J H. Solar two performance evaluation methodology [C]//Proceedings of the ASME Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century Conference, Maui, Hawaii, 1999.
- [10] Fletcher E A. Solar thermal processing: a review[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(2): 63-74.
- [11] Gregory J K. Economic evaluation of solar-only and hybrid towers using molten-salt technology[J]. Solar Energy, 1998, 62(1): 51-61.
- [12] Manuel R, Reiner B, James E P. An update on solar central receiver systems, projects, and technologies[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(2): 98-108.
- [13] Basil F A. Theoretical study of main factors affecting the heliostat field design of tower power plant[J]. Energy Conversion and Management, 1990, 30(2): 101-106.
- [14] Tyner C, Gregory J K, Prairie M, et al. Solar power tower development: recent experiences[C]//8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies: Solar Thermal Power Stations and Solar Chemistry, Cologne, Germany, 1996: 196-216.
- [15] Hugh E R, Gregory J K. An evaluation of molten-salt power towers including results of the solar two project[R]. 2001.
- [16] Wilfried G. PHOEBUS: international 30 MW solar tower plant[J]. Solar Energy Materials, 1991, 24(1): 82-94.



袁建丽

收稿日期: 2010-05-28。

作者简介:

袁建丽(1980), 男, 工学硕士, 2004 年毕业于重庆大学动力工程学院电厂热动专业, 获学士学位, 2007 年毕业于中国科学院工程热物理研究所热能工程专业, 获硕士学位, 主要从事太阳能热发电研究和火力发电厂系统性能研究, yuanjianli888@126.com。

(责任编辑 张媛媛)