

太阳能-地热能联合发电系统研究进展*

徐琼辉^{1,2,3}, 龚宇烈^{1,2,3†}, 骆超^{1,2,3}, 姚远^{1,2,3}, 陆振能^{1,2,3}, 马伟斌^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要: 将多种新能源联合开发利用, 使之能够取长补短, 是未来新能源发展的重要方向之一。世界第一座太阳能-地热能联合电厂已经建成发电, 与其相关的研究工作也已蓬勃开展。从已有的研究结果看, 太阳能和地热能主要有两种结合方式——以地热能为主的联合发电系统和以太阳能为主的联合发电系统; 研究内容主要围绕提高太阳能、地热能的利用效率, 增加系统发电量而展开, 根据系统处于稳态和非稳态时不同的运行特征, 评估系统的热力性能和经济性能, 指出保证系统长期稳定运行应考虑的问题。研究表明, 联合发电系统是一种比单一太阳能发电系统或者单一地热能发电系统更加优越的能源利用模式。

关键词: 太阳能; 地热能; 联合发电

中图分类号: TK51; TK52

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.05.011

Research Progress on Hybrid Solar-Geothermal Power Generation

XU Qiong-hui^{1,2,3}, GONG Yu-lie^{1,2,3}, LUO Chao^{1,2,3}, YAO Yuan^{1,2,3},
LU Zhen-neng^{1,2,3}, MA Wei-bin^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Developing and using combined new energy sources is an important direction of development for new energy in future. The first Hybrid Solar-Geothermal Power station has been built, and related research on this field has been carried out vigorously. According to the recent research progress, we know that currently there are two hybrid types, one is mainly based on geothermal energy, and the other is mainly based on solar energy. Conducted researches mainly focused on improving thermal efficiency of solar and geothermal energy, increasing generating capacity. And besides, the assessment studies of thermal performance and economic performance under steady state and unsteady state, and long-term stable operation of the system are also presented in many articles. The literature review indicate that hybrid power generation mode present more advantage in energy efficient use compared to the stand-alone mode.

Key words: solar energy; geothermal energy; hybrid power generation

0 前言

开发新能源是目前解决人类所面临的能源危机的根本途径。利用新能源最有效的方式就是发电, 如地热发电、太阳能发电、风力发电等。众所周知, 地热电站运行稳定、持续, 但是电站的建立受地热资源分布影响较大, 而且随着开采的持续, 资源品位衰退, 热效率不断下降; 太阳能到达地球表面的辐射的总量尽管很大, 但是能流密度很低, 如果要

收集到足够多的太阳能, 集热器的占地面积大, 成本高, 而且受太阳辐射强度影响, 发电不稳定。因此, 如果将太阳能和地热能联合起来发电, 就能够取长补短, 改善电站热力性能, 提高发电效率, 降低太阳能发电成本。

1 联合系统中两种能源的结合方式

在过去的几十年里, 研究者们对太阳能-地热能

* 收稿日期: 2015-12-29

修订日期: 2016-02-04

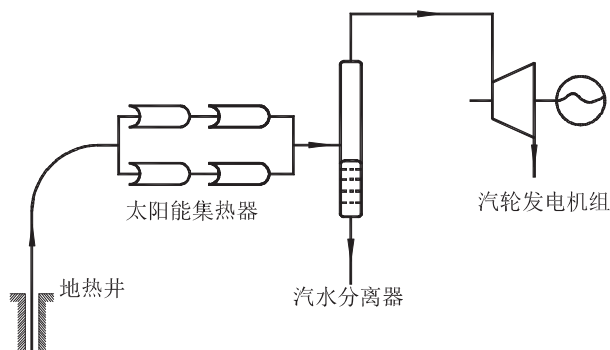
基金项目: 国家自然科学基金(51406212); 广东省科技计划项目(2013B091500059)

† 通信作者: 龚宇烈, E-mail: gongyl@ms.giec.ac.cn

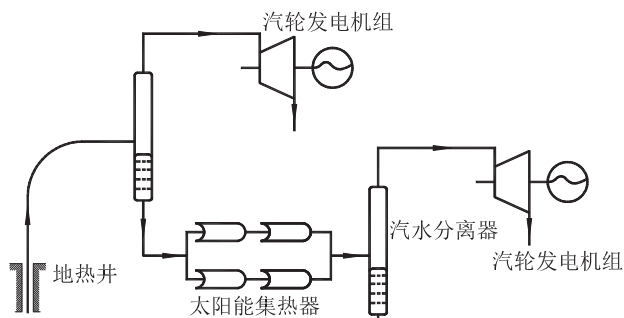
联合发电系统中两种能源的结合方式进行了诸多尝试，总的来说可以分为以下两类^[1-2]：

方式一，以地热能为主的联合发电系统（如图 1 ~ 图 3）。在常规的地热能发电系统中，由于地热水温度不够高，采用闪蒸或双工质发电时效率低下，造成地热资源的浪费。如果在已有的地热发电系统中增加一个太阳能集热装置，可以提高蒸汽产量或蒸汽温度，增加系统的发电量，也可以在保持系统发电量不变的前提下，降低地热水的质量流量，延长地热储层的使用寿命。

图 1a 在地热井和汽水分离器之间增加一个太阳能集热器，可以提高地热水的温度，增加蒸汽产量。图 1b 在第一个汽水分离器和第二个汽水分离器之间增加一个太阳能集热器，从第一个汽水分离器出来的地热水能够再次受热蒸发，增加蒸汽产量。图 2 在汽水分离器和汽轮机之间增加一个太阳能集热器，能够提高进入汽轮机的蒸汽温度，让饱和蒸汽变成过热蒸汽，提高系统发电量。图 3 中从冷凝器出来的冷凝液被太阳能集热器加热，再与地热井出来的地热水混合，可以提高混合液体的温度和蒸汽产量。



(a) 太阳能集热器位于地热井和汽水分离器之间



(b) 太阳能集热器位于两个汽水分离器之间

图 1 以太阳能集热器加热地热水的联合发电系统^[3]

Fig. 1 Power generation system using solar energy heat collector heating geothermal water^[3]

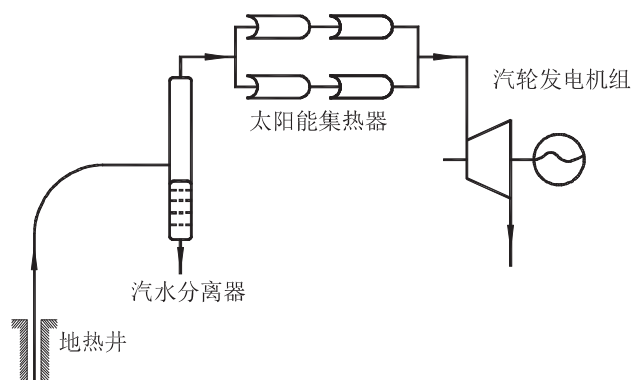


图 2 以太阳能集热器加热饱和蒸汽的联合发电系统^[3]

Fig. 2 Power generation system using solar energy heat collector heating saturated steam^[3]

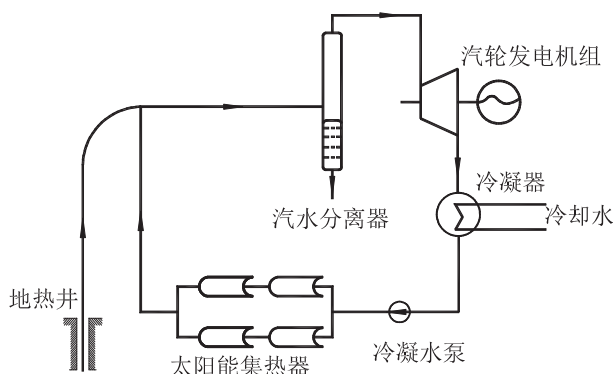


图 3 以太阳能集热器加热冷凝水的联合发电系统^[3]

Fig. 3 Power generation system using solar energy heat collector heating condensation water^[3]

方式二，以太阳能为主的联合发电系统，地热水加热进入太阳能集热器前的工质（如图 4）。因为地热水的温度一般会低于太阳能集热器所能达到的温度，因此在太阳能发电系统中，地热水只能给从冷凝器出来的工作流体提供热量，提升进入太阳能集热器的流体温度，提高太阳能集热器的产汽量和蒸汽温度，增加系统的发电量。

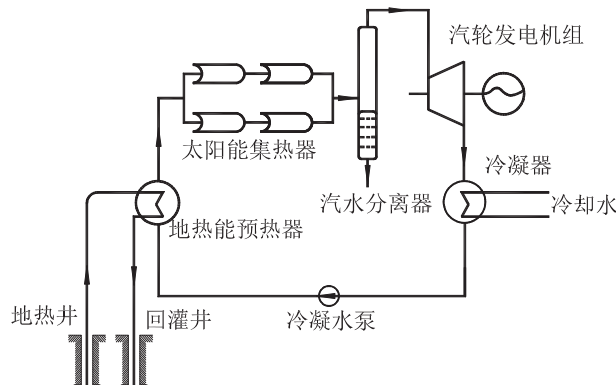


图 4 地热能加热太阳能发电系统中的冷凝水

Fig. 4 Geothermal energy heating condensation water in solar power generation system

2 研究方法

世界首座太阳能-地热能联合发电站于 2012 年在美国内华达州法伦镇 (Fallon Town in Nevada) 建成。该电站采用了传统水热技术, 在已建成的斯蒂沃尔特 (Stillwater) 地热电站附近安装了 89 000 多块太阳能电池板, 使得电站发电总量达到 59 MW, 比原来单一的地热电站增加了 26 MW, 可以为数以千计的家庭提供充足的电力。



图 5 斯蒂沃尔特太阳能-地热能联合发电站
Fig. 5 Stillwater Hybrid Solar-Geothermal Power Generation

虽然首座太阳能-地热能联合发电站已经建成, 在工程应用上已经取得了成功, 但是从所查到的公开发表的文献可知, 对联合发电系统的研究主要以数值模拟^[4-5]为主, 具体研究结果见下文阐述。

目前关于太阳能-地热能联合发电系统的数值模拟工作都是以 Aspen Plus^[6]为研究平台而展开的。Aspen Plus 是公认的标准大型通用流程模拟软件, 软件内部所含的精确的物性模型、数据以及合理的质能守恒状态方程组, 不仅能够模拟太阳能-地热能联合发电系统内部的热力性能和经济指标, 还能够为系统性能的优化提供可靠的帮助。

3 研究现状

世界上有许多阳光充足的地区地热能也很丰富, 两种能源联合发电可以在一定程度上弥补单一电站的缺陷, 因此 2006 年以墨西哥 Cerro Prieto 地热田为基础提出了太阳能-地热能联合发电系统。

国际上, 学者们主要分析了基于有机朗肯循环的太阳能-地热能联合发电系统的技术性和经济性, 分析了环境温度、太阳辐射强度等对系统参数的影响, 分析了对亚临界、超临界地热电站实施联合发电改造的可行性, 比较了联合发电系统、单一太阳能发电系统、单一地热能发电系统的发电量和发电成本。

在我国, 除了研究已有的闪蒸地热与槽式太阳能联合发电系统^[7]、双工质地热与槽式太阳能联合发电系统^[8], 还提出了以卡琳娜循环为基础的联合发电系统^[5]。

具体研究内容主要集中在以下几个方面:

(1) 太阳能-地热能联合发电系统的结构对系统效率的影响

在前文的结合方式中已经提到, 太阳能集热器引入地热能发电系统时, 有多个位置可以选择。GREENHUT 等^[4]对图 1a 和图 2 这两种基本结构进行了比较, 结果表明, 图 1a 的热效率比图 2 高 50% 以上, 因此, 在实际操作中, 图 1 两种结构运用得比较多, 因为这两种结构对原有发电系统的发电量影响十分明显。GREENHUT 等^[4]和 ZHOU 等^[9]的研究结果表明: 增加了太阳能集热器以后, 系统的发电量明显增加, 但是因为受日照时间、太阳辐射强度、集热器受热面积大小等的影响, 发电量的增量各不相同, 少的可以增加 10% 左右, 多的可以使发电量比以前翻倍甚至更多^[9]。

因此, 太阳能-地热能联合系统要优于单一的太阳能发电系统或单一的地热能发电系统。

(2) 太阳能集热器的结构及其与太阳辐射的相对位置变化对系统蒸汽产量的影响

目前在太阳能-地热能联合发电系统中所用到的太阳能集热器都是抛物线型槽式集热器。LENTZ 等^[10]已经指出, 利用该种集热器直接产生蒸汽, 热效率最高可达 70%。然而, 由于昼夜更替和四季变化, 集热器的热效率和蒸汽产量都在不断变化^[11]; 一般情况下, 夏季产汽量高, 冬季产汽量低^[12]。

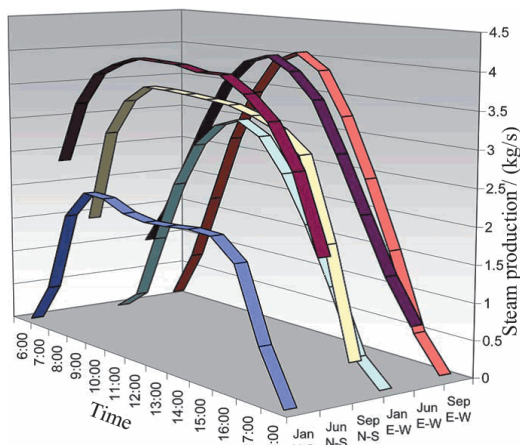


图 6 太阳能集热器南北向或东西向摆放时联合发电系统蒸汽产量随时间的变化^[10]

Fig. 6 Steam production by N-S alignment and E-W alignment^[10]

LENTZ 等^[10]的研究表明,集热器的蒸汽产量受其摆放方位的影响。由图 6 可知,集热器的方位可以改变一天中的最高产汽量,如 E-W 向摆放时最高产汽量高于 N-S 向;而且也可以使一天中的产汽量比较均匀,如 N-S 向摆放时白天有一大半的时间产汽量基本不变。因此可以根据当地的电力需求为集热器选择合适的摆放位置。

(3) 太阳能-地热能联合发电系统热力性能分析

评价一个发电系统热力性能的基本指标包括净发电量、热效率等^[13]。图 7 显示,联合系统的发电量高于原来的单一发电系统,只是因为太阳能集热器的面积不同,增加的数量不同而已。图 8 表明,联合系统的热效率高于单一热源发电系统,因此太阳能-地热能联合发电系统对有效热源的利用有增益作用。

ZHOU 等^[9]为了评价联合发电系统的热力性能,引入了另一个基本的评价指标——品质因数 F_y , 利用每年的发电总量来比较联合系统与单一地热能发电系统、单一太阳能发电系统的电力输出性能。其基本定义式为:

$$F_y = \frac{W_{hy}}{W_{sy} + W_{gy}} \quad (1)$$

其中, W_{hy} 、 W_{sy} 、 W_{gy} 分别表示联合发电系统的年发电量、单一太阳能系统的年发电量、单一地热能系统的年发电量。

如果 $F_y > 1$, 则说明联合系统的热力性能优于单一太阳能发电系统和单一地热能发电系统。

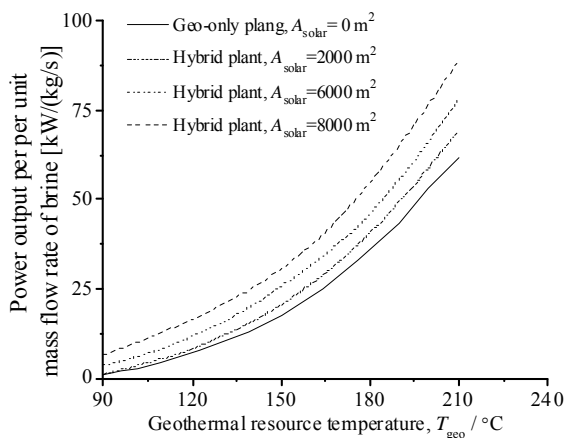


图 7 联合发电系统中地热储层温度对单位发电量的影响 (环境温度 31℃, 太阳辐射量 1 000 W/m²)^[9]

Fig. 7 Effect of geothermal reservoir temperature on the power output per unit mass flow rate of brine of a hybrid power plant ($T_{air} = 31^\circ\text{C}$; solar DNI = 1 000 W/m²)^[9]

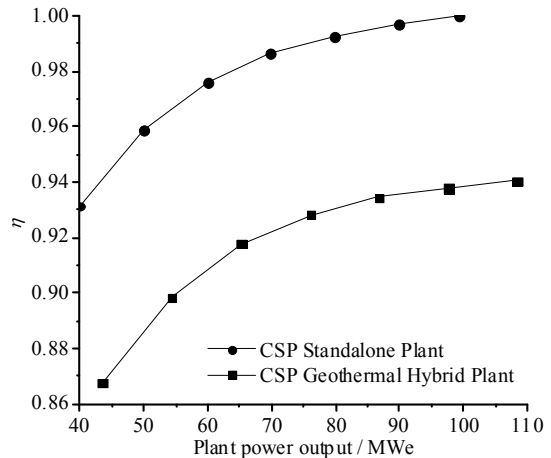


图 8 联合发电系统和单一太阳能发电系统热效率随输出功率变化的函数^[14]

Fig. 8 Thermal efficiency as a function of output power variation in a hybrid solar-geothermal power generation and a stand-alone solar thermal plant^[14]

图 9 和图 10 的结果显示,在槽式太阳能蒸汽朗肯循环发电系统 (STSRES) 和槽式太阳能有机朗肯电力系统 (STORES) 中,联合系统的电力输出性能随着地热储层温度的升高而增加,随着太阳能集热面积的增加而增加,但不是所有的联合系统都优于单一能源发电系统。因此为了保证联合系统高效可行,应根据地热储层温度确定太阳能集热器的面积,再根据集热器的面积和储层温度确定系统设备的型号和规格。

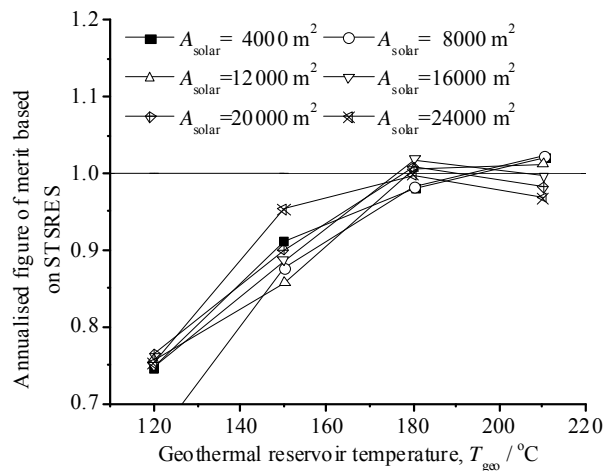


图 9 在 STSRES 系统中,年度品质因数与地热储层温度、太阳能集热面积的函数关系图^[9]

Fig. 9 Annualised figure of merit based on STSRES configuration as a function of geothermal reservoir temperature and solar aperture area^[9]

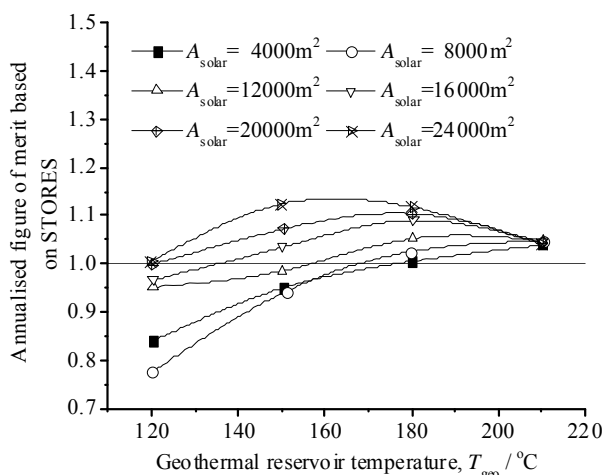


图 10 在 STORES 系统中, 年度品质因数与地热储层温度、太阳能集热面积的函数关系图^[9]

Fig. 10 Annualised figure of merit based on STORES configuration as a function of geothermal reservoir temperature and solar aperture area^[9]

(4) 太阳能-地热能联合发电系统稳态和非稳态的研究^[15]

在一个联合发电系统中, 集热器吸收太阳能的数量会随着时间而不断改变, 因此在有太阳能提供能量时, 系统各参数 (如环境温度、蒸汽产量、蒸汽温度、蒸汽压力、发电量、发电效率等) 都在随着时间而改变, 这是非稳态过程^[16]。如果在晚上或阴雨天, 地热能成为唯一的热源, 系统各参数就不会随着时间而改变, 这是稳态过程^[17]。

联合发电系统中, 稳态和非稳态是交替存在的, 对系统设备是一个极大的考验^[18], 因此, GREENHUT^[1]提出了在一个系统中采用两套发电机组的方案, 分别在有太阳能和无太阳能时使用。

稳态过程的研究有利于大家了解联合发电系统运行的基本特征, 其研究结果对于保证非稳态过程安全高效运行具有一定的指导意义。

图 11 分析了不同模式的热力循环系统中, 净发电量与太阳能集热系数之间的关系。由图可知, 在同一个联合系统中, 饱和流体要优于过热流体, 发电量更多。因为过热流体做功会使得汽轮机出口温度增加, 要达到相同的冷凝效果, 必须消耗更多的额外功率, 增加了冷凝器的负担。这一研究结果在文献[4]中也得到了证实。

因此不论联合系统是稳态运行还是非稳态运行, 都应该尽量让工作流体保持在饱和状态, 避免出现过热蒸汽^[19]。

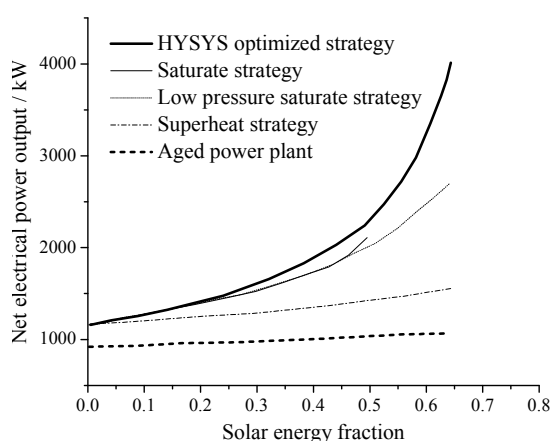


图 11 热力循环运行模式对联合发电系统净发电量与太阳能集热系数关系的影响^[9]

Fig. 11 Influence of operating strategy on the net electrical power output of a hybrid power plant as a function of the solar energy fraction^[9]

(5) 系统的防腐防垢问题^[13]

防腐防垢一直是地热发电系统所必须解决的问题。加入太阳能集热器以后, 蒸汽产量增加, 地热水的温度或浓度也会相应改变, 因此联合发电系统仍然需要解决设备腐蚀性问题, 延长使用寿命。目前解决地热系统防腐防垢问题通用的做法是将地热回水的温度控制在某个饱和温度点以上, 防止水中的杂质沉积; 也可以改变系统的 PH 值或者安装电子除垢器来防止结垢。

GREENHUT^[1]和 LENTZ 等^[3,10]认为, 图 3 中经过太阳能集热器的水是从冷凝器出来的蒸汽冷凝水, 杂质的浓度非常低, 几乎为零, 所以不会在集热器内引起任何结垢问题。同时从集热器出来的纯净流体与刚从井里抽出来的地热水混合, 不仅能够提高混合流体的温度, 而且能够降低混合流体的浓度, 对即将流经的设备起到较好的保护作用^[13]。

(6) 太阳能-地热能联合发电系统的经济性评价
热力性能评价不能完全体现联合发电系统的可行性, 因此还应该增加经济性评价来组成一个完整的评估体系。

根据当前经济分析中常用的方法, ZHOU 等^[9]得到计算联合发电系统发电成本的关系式:

$$L = \frac{E \times AF + Ex}{W_y} \quad (2)$$

$$L_s = \frac{E_s \times AF + Ex_s}{W_{hy} - W_{gy}} \quad (3)$$

其中, 式(2)适用于太阳能和地热能各部件设备同时设计同时建造的全新的联合发电系统; 式(3)适用于在已有地热能电站的基础上增加太阳能集热器及其辅助设备, 改造得到的联合发电系统; E 表示投资资本; W_y 表示联合系统每年的净发电量; E_x 表示系统的运营和维护成本; E_{x_s} 表示太阳能领域的运营和维护成本; AF 表示年金因子, 其表达式为 $AF = i / (1 - 1 / (1 + i)^T)$, i 表示金融利率, T 表示系统的使用寿命。比较改造前后的发电成本, 可以确定建立联合发电系统在经济上是否可行。

KROTHAPALLI 等^[20]的研究结果表明: (1) 系统改造的成本主要用于太阳能集热器, 约占总成本的 80%; (2) 联合系统的发电成本低于单一地热能电站, 每发一度电的成本降低约 50%; (3) 在不同结构的联合系统中, 太阳能充当预热器时发电成本更低; (4) 随着储层温度的升高和集热器面积的增大, 发电成本会降低, 这一点与品质因数的分析相一致。

4 结 语

太阳能-地热能联合发电是新能源开发利用的一种新形式, 代表了未来能源利用的新方向。目前, 对该系统的研究不仅仅停留在理论研究阶段, 还付诸了工程实践, 但是现阶段的研究还只是已有设备技术的简单堆砌, 不能完全满足系统对设备的特殊要求, 因此未来的研究方向主要集中在以下几个方面:

(1) 联合发电系统的功率是随时间变化的, 因此有研究在同一系统中安装了两套发电机组^[1,4], 分别在白天和晚上发电。这种方法费用高, 占地面积大, 系统维护、保养困难, 因此研发变功率发电机组, 满足不同时段对机组性能的要求, 是必须解决的关键技术问题;

(2) 太阳能、地热能的品位不同, 要将相差较大的两种能源高效结合于同一系统, 必须发展完善联合发电系统的耦合技术, 使二者能和谐统一;

(3) 地热储层的温度各不相同, 不同温度的地热能与太阳能相结合, 其联合发电的方式应该如何选择是未来的一个重要研究方向。

参考文献:

[1] GREENHUT A D. Modeling and analysis of hybrid geothermal-solar thermal energy conversion systems[D].

- Cambridge, Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [2] ZHOU C, DOROODCHI E, MUNRO I, et al. A feasibility study on hybrid solar-geothermal power generation[C]//New Zealand geothermal workshop 2011 proceedings. Auckland, New Zealand: [s.n.], 2011.
- [3] LENTZ Á, ALMANZA R. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy[J]. Solar energy, 2006, 80(10): 1290-1295. DOI: 10.1016/j.solener.2006.04.010.
- [4] GREENHUT A D, TESTER J W, DIPIPO R, et al. Solar-geothermal hybrid cycle analysis for low enthalpy solar and geothermal resources[C]// Proceedings world geothermal congress 2010. Bali, Indonesia: [s.n.], 2010.
- [5] 周刚, 倪晓阳, 李金锋, 等. 不受地理位置限制的地热和太阳能联合发电系统[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(3): 394-398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2383.2006.03.018.
- [6] KIM W, CHOI J, CHO H. Performance analysis of hybrid solar-geothermal CO₂ heat pump system for residential heating[J]. Renewable energy, 2013, 50: 596-604. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.020.
- [7] 张丽英, 翟辉, 代彦军, 等. 一种地热与太阳能联合发电系统研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1086-1091. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2008.09.007.
- [8] 年越, 刘石. 地热与太阳能联合发电系统热力性能分析[J]. 热力发电, 2014, 43(9): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2014.09.001.
- [9] ZHOU C, DOROODCHI E, MOGHTADERI B. An in-depth assessment of hybrid solar- geothermal power generation[J]. Energy conversion and management, 2013, 74: 88-101. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.014.
- [10] LENTZ Á, ALMANZA R. Solar-geothermal hybrid system[J]. Applied thermal engineering, 2006, 26(14/15): 1537-1544. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.12.008.
- [11] GHASEMI H, SHEU E, TIZZANINI A, et al. Hybrid solar-geothermal power generation: Optimal retrofitting[J]. Applied energy, 2014, 131: 158-170. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.010.
- [12] ASTOLFI M, XODO L, ROMANO M C, et al. Technical and economical analysis of a solar- geothermal hybrid plant based on an organic Rankine cycle[J]. Geothermics, 2011, 40(1): 58-68. DOI: 10.1016/j.geothermics.2010.09.009.
- [13] MIR I, ESCOBAR R, VERGARA J, et al. Performance analysis of a hybrid solar-geothermal power plant in Northern Chile[C]//World renewable energy congress 2011. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2011: 1281-1288. DOI: 10.3384/ecp110571281.
- [14] 朱家玲. 太阳能-地热能混合发电系统优化初探[C]//首届中国太阳能热发电大会论文集. 敦煌: 天津大学地热中心, 2015: 727-762.
- [15] LENTZ A. Geothermal-solar hybrid system in order to increase the steam flow for geothermic cycle in Cerro Prieto, Mexico[C]//Geothermal resources council 2003 annual meeting. USA, 2003: 543-546.
- [16] ZHOU C, DOROODCHI E, MOGHTADERI B. Figure of merit analysis of a hybrid solar-geothermal power plant[J]. Engineering, 2013, 5: 26-31. DOI:10.4236/eng.2013.51b.

- [17] 冉鹏, 张树芳, 李国有. 太阳能-地热联合闪蒸发电方法探讨[J]. 新能源研究与利用, 2005(3): 27-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5523.2005.03.009.
- [18] BOGHOSSIAN J G. Dual-temperature Kalina cycle for geothermal-solar hybrid power systems[D]. Boston: Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [19] AYUB M, MITSOS A, GHASEMI H. Thermo-economic analysis of a hybrid solar- binary geothermal power plant[J]. Energy, 2015, 87: 326-335. DOI: 10.1016/j.energy.2015.04.106.
- [20] KROTHAPALLI A, GRESKA B. Concentrated solar thermal power[D]. USA: Florida State University, 2011.

作者简介:

徐琼辉 (1978-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事地热能利用过程中流体流动和传热研究。

龚宇烈 (1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地热利用的能量转换技术研究。