

# Development and Prospect of Combined Heat and Power Generation on Renewable Energy\*

Qiming Li<sup>1,2</sup>, Dawei Liu<sup>1</sup>, Wenbo Peng<sup>1</sup>, Shisen Xu<sup>1,3,4</sup>, Anjun Jin<sup>1,3#</sup>

<sup>1</sup>Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Engineering Research Center for Efficient and Clean Use of Low-Quality Fuel, Beijing

<sup>3</sup>China Huaneng Group, Beijing

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Coal-Based Clean Energy, Beijing

Email: #ajjin@hnceri.com

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2013; revised: May 16<sup>th</sup>, 2013; accepted: May 28<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Qiming Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The technology of combined heat and power generation on renewable energy (CHP-RE) is of positive significance for energy saving, environment improving and green economy. Solar energy, geothermal energy and biomass energy are the most potential renewable energies for large scale CHP. This paper introduced the CHP-RE development at home and abroad, and compared several main CHP-RE technologies. The CHP on geothermal energy is mature, while the CHP on solar energy, which can be used widely, is still in the stage of project demonstration and technology development. The photovoltaic-thermoelectric CHP, based on the comprehensive utilization of solar spectrum, will be the next hot topic in future. The CHP-RE cannot be promoted without smart grid. The sustainable community will lay the foundation for large scale utilization of CHP-RE, in which the needs of local energy are satisfied first and excess electricity can be sold to smart grid.

**Keywords:** Renewable Energy; CHP; Photovoltaic-Thermoelectric Generation; Smart Grid; Sustainable Community

## 基于可再生能源的热电联产技术发展现状和展望\*

李启明<sup>1,2</sup>, 刘大为<sup>1</sup>, 彭文博<sup>1</sup>, 许世森<sup>1,3,4</sup>, 金安君<sup>1,3#</sup>

<sup>1</sup>中国华能集团清洁能源技术研究院, 北京

<sup>2</sup>北京市低质燃料高效清洁利用工程技术研究中心, 北京

<sup>3</sup>中国华能集团, 北京

<sup>4</sup>煤基清洁能源国家重点实验室, 北京

Email: #ajjin@hnceri.com

收稿日期: 2013年4月27日; 修回日期: 2013年5月16日; 录用日期: 2013年5月28日

**摘要:** 可再生能源热电联产技术对于节能减排、改善环境以及实现绿色经济具有积极的意义。太阳能、地热能和生物质能是最具规模化潜力的热电联产可再生能源。本文介绍了国内外可再生能源热电联产技术的发展现状, 并对比了各技术的优劣。目前, 地热热电联产技术较为成熟, 而适应面更广的太阳能热电联产尚处于工程示范和技术开发阶段。基于太阳光谱综合利用的光伏-温差发电热电联产技术有望成为下一个研究热点。可再生能源热电联产技术的推广离不开智能电网, 而以满足本地用能需求为主, 多余电力出售给智能电网的可持续社区将为该技术的大规模推广奠定有力的基础。

**关键词:** 可再生能源; 热电联产; 光伏-温差发电; 智能电网; 可持续社区

\*本文得到了中国华能集团“千人计划”专项项目的资助、感谢北京市工程技术研究中心 NO: BG0083 的支持。

#通讯作者。

## 1. 引言

日益增长的能源消费，特别是煤炭、石油等化石燃料的大量使用，对环境和全球气候带来了巨大的影响，使得人类的可持续发展目标面临严峻威胁。全世界资源紧缺和能源成本持续增长使众多发达国家着眼于发展可再生能源，甚至将其提升到了关乎国家能源安全的战略地位。我国国家中长期科技发展纲要和“十二五”规划都把节能减排、积极发展新能源作为实现经济转型的重点。到 2020 年，我国的单位 GDP 二氧化碳排放量相比 2005 年将下降 40%~45%。实现了这一伟大目标，我国将迈进绿色经济时代。

当下，实质性的改变愈发显得迫在眉睫。2013 年 1 月下旬，连续出现的雾霾天气笼罩了我国北方，多个省市呈现中重度污染，一些工业城市的 PM<sub>2.5</sub> 数值甚至超过了监测设备的最大量程。严重的雾霾在短期内使得居民呼吸系统的发病率骤然提高，而长期污染带来的慢性病危害目前尚待评估。有专家提出警告，如果不对污染加以控制，到 2030 我国居民的肺癌发病率将出现井喷。除了气象因素，冬季北方燃煤供暖是导致雾霾的主要原因之一<sup>[1]</sup>。治理污染需要从根本上减少对燃煤供暖的依赖。

目前，我国的供暖主要来源于火电厂和专门的热力公司。火电厂利用抽汽式汽轮机或背式汽轮机的抽汽或排汽，为工厂或居民提供不同压力的蒸汽。这种既生产电能，又使用蒸汽对用户供热的生产方式称为热电联产。较之分别生产电、热能的方式，热电联产更为节能。同样的原理还可以应用到太阳能、地热能等可再生能源上，从而实现高效率、无排放、零污染的可再生热电联产。

目前，太阳能、地热能和生物质能是最有潜力用于规模化热电联产的可再生能源。热电联产模式可以更加方便地进行能量的梯级利用，从而将可再生能源普遍较低的效率提高。相对只提供电能或热能的利用方式，热电联产模式将提高产能的灵活性，根据用户需求调配电能和热能的生产比例。热电联产将成为可再生能源一种新的商业模式，成本低、效率高和灵活运用这三大优势将进一步促进可再生能源的快速普及。

本文首先介绍了国内外一些典型的可再生能源热电联产的商业或示范工程案例，然后对比不同技术

路线的优势和劣势，提出对该技术未来发展的展望。作者单位中国华能集团清洁能源技术研究院的“千人计划”专家金安君博士团队，正在努力开发高效率且适合规模化推广的光伏-热电联产技术。该技术整合了光伏(PV)、温差发电(Thermoelectric)和热水生产等三种能量利用技术，太阳能利用率得到进一步提高。

## 2. 国内外发展现状<sup>[2-9]</sup>

### 2.1. 国外典型工程

除在实验室进行研究外，已有基于可再生能源的热电联产系统应用示范。

被称为能源之城的丹麦菲特立港，已成为可持续发展的模范城市(Lund2008)。全市计划使用可再生能源，2013 年实现 45% 以上的目标，2015 年底达到百分之百的能源独立。当前，热电联产是菲特立港城市能源系统的核心方法。菲特立港使用废物焚烧、沼气等进行热电联产，达到了 40% 的发电效率和 55% (含热量) 的热电联产效率。热电联产将满足私人住房和 70% 的工业热量需求，其余工业需求(工艺加热)将由生物质锅炉提供，个别房子的加热可来自太阳能和热泵的混合。该城市的地热资源约 40℃，可以提高以便使用吸热式热泵，该市还计划使用额外的压缩热泵以便利用热电联产电厂所产生的废气。

美国北卡罗莱纳州的 Applebee 饭店和卡罗莱纳中心银行进行了光伏-热水(PV/T)联产的商业示范。Applebee 饭店的太阳能 PV/T 系统，采用 32 块非晶硅电池组件代替饭店传统的砖瓦屋顶，该系统为用电高峰和应急照明提供电能，同时产生的热量用来加热水。卡罗莱纳州中心银行的 PV/T 系统安装在屋顶上，其光伏发电峰值功率为 2.7 kW，平均热效率可达 22.4%，在冬季可提供 3500 kWh 的预加热空气能量。欧洲委员会资助的 PV/T 示范工程，即英国的可再生能源服务办公综合楼，于 2003 年完工，是由建于 1930 年的孵化农场改建而成。共装有 45 m<sup>2</sup> 的 PV/T 系统，产生的电能输入电网，热能储存于一个水箱。

为进一步提高 PV/T 系统的发电效率，降低成本，可采用聚光光伏形式的热电联产系统(CPV/T)。美国达拉斯的 Hyatt 饭店和 Fort Worth 国际机场均安装有 25 倍聚光比的 CPV/T 示范系统，使用线聚焦的菲涅尔透镜进行聚光，系统的电力和热能的输出分别为 24

kW 和 120 kW。自 1982 年建成以来，一直稳定运行到 1992 年，为酒店中心多功能厅提供电力和热水。美国新墨西哥州 Albuquerque Sandia 的 40 倍聚光比的 CPV/T 示范系统，同样也是使用线聚焦的菲涅尔透镜进行聚光，可产生 22 kW 的电力和 70 kW 的热能。

## 2.2. 国内发展状况

国内相关的研究多集中在一些高等院校的实验室，近两年才有少量企业开发相关的装置。

中国科技大学季杰等人研究了光伏 - 太阳能热泵系统及多功能热泵系统的综合性能。光伏 - 太阳能热泵系统通过热泵循环，稳定了太阳能光热转换的输出温度，同时维持光伏板在较低的工作温度下工作，提高了光电转换效率。

厦门多科莫太阳能科技有限公司于 2010 年开发了 PV/T 相关的一些系统，采用的是反射镜聚光的方式，聚光比较低，仅为 5 左右，光伏电池板与换热装置是叠层结构，最高可提供 50℃ 的热水，整个系统的太阳能利用效率约 45%，造价约 20 元/W。

## 3. 可再生能源热电联产的技术路线

### 3.1. 地热 - 热电联产技术<sup>[10,11]</sup>

地热发电，是利用液压或爆破碎裂法将水注入到岩层中，产生高温水蒸气，然后将蒸汽抽出地面推动涡轮机发电，而后经冷凝器成为凝结水回灌地下。一眼底部直径 25 厘米的井每小时可生产 20~80 万公斤的地热水与蒸汽。由于水温的不同，5~10 眼井产出的蒸汽可使一套发电装置产出 55 兆瓦的电。

地热发电分为蒸汽型和热水型两大类。地热蒸汽发电又分一次蒸汽法和二次蒸汽法两种。一次蒸汽法直接利用地下的干饱和(或稍具过热度)蒸汽，或者利用从汽、水混合物中分离出来的蒸汽发电。二次蒸汽法是将一次汽水分离出来的高温热水进行减压扩容生产二次蒸汽，和一次蒸汽分别进入汽轮机发电。地热热水发电也分为两类：闪蒸发电和中介介质发电。闪蒸发电是将抽出的地热水先送至闪蒸器，一部分水闪蒸为蒸汽，进入汽轮机发电。中介介质发电则是将热水送至一台热交换器，用以加热工作介质，后者通常是低沸点的有机化合物，如异丁烷或异戊烷。工作介质气化后的蒸汽驱动涡轮机发电。

可以看出无论是哪种类型的地热发电，在工质蒸汽推动涡轮机后都要经过冷凝设备降温以进行下一次循环，这和一般火电厂是类似的。因此，地热发电也可以方便地改进为地热热电联产，实现集中或分布式的热电联供。

### 3.2. 光伏热电联产技术<sup>[2,4,5]</sup>

当太阳光照射到光伏电池板上时，只有能量大于其半导体材料禁带宽度的部分光子能量可以转化为电能，主要是在可见光及紫外波段附近的能量，此外能量不仅不能转化为电能，还会变为废热造成光电转化效率下降，尤其是红外波段所引起的热效应。针对这个问题，太阳能光伏/光热综合利用技术应运而生。太阳光直接入射光伏电池板，能量一部分转化为电能，另一部分则转化为电池板本身的热能，设计热能利用设备，安装于电池板的背面，对这部分废热进行利用，不仅降低了光伏板的温度，同时还提高了整个系统的太阳能利用效率。纯光伏发电的热电联产原理比较简单，即利用光伏电池受照射后的温度升高来加热热水。目前，国外已有光伏热电联产系统的应用示范，大多是与建筑物结合使用，光伏电池板提供电能，其背面的换热器为建筑物供热。

光伏热电联产技术分为非聚光型和聚光型。非聚光型热电联产系统的供热密度通常是低于 800 W/m<sup>2</sup>，温度不超过 40℃，只能用于居民热水供应或热泵式空调。同时，为了保证供热功率，换热器的面积较大，成本相应较高。聚光型热电联产系统由于高聚光比(可以达到 500 倍以上)的效果，热流密度可以达到数百千瓦以上，适用范围更加广泛，发电和供热效率也更高，但聚光型热电联产系统的技术门槛和运行维护成本均高于非聚光型。

### 3.3. 光伏 - 热电 - 供热联产技术<sup>[4-6,12]</sup>

采用分光形式的光伏 - 热电 - 供热联产是近些年提出的一种可再生能源热电联产技术，目前中国华能集团的金安君博士课题组正在进行该技术的研发和推广。如图 1 所示，所谓分光形式，是考虑到光伏电池板仅能利用可见光波段附近的能量，因而采用光学的方法，将太阳光分为两路，一路是光伏板可利用的波段，另一路则是产生热量的波段。这种形式将光伏单元和光热单元分离，很大程度上缓解了光伏系统

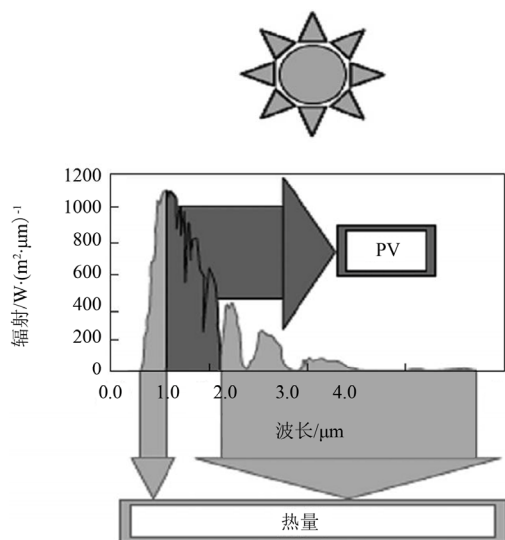


Figure 1. Schematic of solar spectrum splitting utilization  
图 1. 分波段利用太阳能的概念示意图

的热管理问题，产生的热量品质也相对较高。

光伏-热电-供热联产系统中，热电发电也即温差发电，是利用材料的赛贝克效应进行发电的技术，具有持久耐用、安静无振动以及安全无污染等优点。温差发电冷端安装换热器，实现供热功能。为进一步提高系统的发电效率，降低成本，可采用聚光光伏发电的方式，最大程度的提高电池的光电转换率，尽可能减少光伏电板的使用面积。

2005年，武汉理工大学张清杰教授所领导的团队与日本航空宇宙技术研究所等试验成功了国际上首台千瓦级热电-光电复合发电实验系统。2008~2010年期间，进一步建成了国际上首台5 kW级太阳能热电-光电复合发电分布式电站系统。系统采用分光形式，光热这一部分能量采用热电芯片来发电，整个系统的发电效率约21.8%，热电芯片的效率约5%左右，但系统不具有供热功能。该技术的成功开发为光伏-热电-供热联产提供了基础及技术参考。

### 3.4. 技术路线对比

对上述几种可再生热电联产技术进行比较，如表1所示<sup>[4,7,13,14]</sup>。

## 4. 未来的发展趋势和展望

### 4.1. 存在的问题和改进方向

尽管可再生能源热电联产具有一定的经济和社

会效益，但该技术本身还并不成熟，目前存在的主要的技术问题和相应的改进方向包括：1) 能源利用效率主要是发电效率较低，产能的经济性在短时间内无法与传统火电的热电联产技术相竞争。这一点某种程度上是由可再生能源本身的特性所决定的，但新技术和新材料的出现可以将差距不断降低；2) 供电和供热比例的智能分配技术还不成熟。火电在冬季供热高峰时，可以适当调整发电比例保证供热的能力，而可再生能源热电联产技术目前主要还是“靠天吃饭”，即在确定的地理、自然和气象条件下发电和供热能力可调节的范围较窄，还不能可靠的满足各类需求。对于这个问题，在结合光伏和温差发电的热电联产技术中，可通过改变分光模式，实现供电和供热的智能化调节。

在未来的商业化推广过程中，还有可能受到一些外部条件的制约，主要包括：1) 可再生能源热电联产技术缺乏国家和行业标准以及相关的政策支持，投资风险大，不利于技术的大规模推广；2) 受地理条件的限制，并不是所有可再生能源资源充足的地方都有热电联产的需求，而热量又不适于远距离输送；3) 并网输电存在困难，随着智能电网技术的发展和普及，信息这一问题会得到解决。

### 4.2. 智能电网整合以及可持续社区模式<sup>[15]</sup>

可再生能源热电联产技术的广泛推广离不开智能电网的普及。智能电网(smart power grids)，也被称为“电网2.0”，它是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上，基于先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用，实现电网可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标。智能电网的三大主要意义之一就是适应并促进清洁能源发展。电网将具备机组功率预测和动态建模、低电压穿越和有功无功控制以及常规机组快速调节等控制机制，结合大容量储能技术的推广应用，对清洁能源并网的运行控制能力将显著提升，使清洁能源成为更加经济、高效、可靠的能源供给方式。建设坚强智能电网可以显著提高电网对清洁能源的接入、消纳和调节能力，有力地推动清洁能源的发展。

结合了智能电网，以能源本地利用为核心优势的可再生能源热电联产技术，将有望在我国复制已经在

**Table 1. Comparison of CHP-RE technologies**  
**表 1. 可再生能源热电联产技术路线比较**

技术名称	地热	光伏		光伏/热电
		非聚光	聚光	
原理	利用蒸汽或其它低沸点介质推动汽轮机发电, 冷凝段供热	太阳光全谱用于光伏效应发电, 通过电池背板的热交换器对外供热		紫外和可见光用于光伏发电, 红外光用于塞贝克效应发电和供热
联产效率	>60%	>50%	>60%	>60%
地理限制	临近地热资源	无	无	无
装机成本 (电 + 热)	取决于地热资源的品质, 4 元/W 左右	<6 元/W	<10 元/W	<10 元/W
热量品质	取决于地热资源的品质, 一般属于低	低	中	高
成熟度	商业化程度具备一定规模	已商业化, 程度较低	示范工程	技术开发阶段

欧美发达国家(特别是北欧)开始流行的可持续社区节能模式。可持续社区是智能电网用电服务在城市社区生活的具体应用。智能用电社区是采用光纤复合电缆通信或电力线载波通信等先进技术, 构造覆盖社区的通信网络, 通过用电信息采集、双向互动服务、社区配电自动化、电动汽车有序充电、分布式电源运行控制、智能家居等技术, 对用户供用电设备、分布式电源、公用用电设施等进行监测、分析、控制, 提高能源的终端利用效率, 为用户提供优质便捷的双向互动服务和“三网融合”服务, 同时可以实现对社区安全防护等设备和系统进行协调控制。

可以畅想在未来的可持续社区中, 太阳能、地热能等可再生能源驱动的热电联产系统首要满足本地居民的生活热水、冬季供暖和夏季空调(热泵)需求, 同时提供生活用电, 多余的电力卖给电网, 在社区附近消耗。由于智能电网的存在, 热电联产降低了远距离输电和输热所带来的电网和管路成本, 将可再生能源的经济效益进一步放大。

## 5. 总结

以可再生能源为基础的热电联产技术对于节能减排、环境改善以及实现我国绿色经济的目标具有深远的积极意义。目前地热热电联产技术已经成熟商业化, 而适应面更广的太阳能热电联产尚处于工程示范和技术开发阶段。基于太阳光谱综合利用的光伏-温差发电热电联产技术有望成为下一个研究热点, 目前中国华能集团正在开展相关的研发工作。可再生能源热电联产技术的推广离不开智能电网的支持, 而以满足本地需求为主, 多余电力出售给智能电网的未来可

持续社区将为该技术的大规模推广奠定了有力的基础。

## 参考文献 (References)

- [1] 宇霄, 专家详解雾霾天气原因: 污染物排放量大是根本[URL], 2013.  
<http://news.enorth.com.cn/system/2013/01/15/010524708.shtml>
- [2] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik and S. K. Tyagi. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1383-1398.
- [3] Y. G. Deng, J. Liu. Recent advances in direct solar thermal power generation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2009, 1(5): 052701.
- [4] 倪明江, 骆仲泱, 寿春晖等. 太阳能光热光电综合利用[J]. *上海电力*, 2009, 1: 1-7.
- [5] T. T. Chow. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 2010, 87(2): 365-379.
- [6] D. J. Yang, H. M. Yin. Energy conversion efficiency of a novel hybrid solar system for photovoltaic, thermoelectric, and heat utilization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(2): 662-670.
- [7] A. Pascal, E. Wolfgang, F. Hubert, et al. PVT roadmap: A European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. *The 6th Framework Programme*, 2006.
- [8] 王科, 崔文智, 李隆键等. 聚光型太阳能电热联用系统研究进展[J]. *太阳能*, 2007, 8: 27-32.
- [9] 赵佳飞, 骆仲泱, 蔡杰聪等. 太阳能电热联产技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(17): 114-121.
- [10] 高学伟, 李楠, 康慧. 地热发电技术的发展现状[J]. *电力勘测设计*, 2008, 3: 59-62.
- [11] 罗德兰 洪恩, 李克文. 世界地热能发点新进展[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 60-66.
- [12] 蔡永华. 太阳能热电-光电复合发电系统效率模型与性能优化[D]. 武汉理工大学, 2009.
- [13] 我国首个地热发电补贴政策出台探讨[URL], 2013.  
[http://www.cbcsd.org.cn/themes/Energy\\_Climate\\_Change/14044.shtml](http://www.cbcsd.org.cn/themes/Energy_Climate_Change/14044.shtml)
- [14] 地热发电技术应用[URL], 2012/2013.  
[http://www.giec.ac.cn/tp/201204/t20120419\\_3558588.html](http://www.giec.ac.cn/tp/201204/t20120419_3558588.html)
- [15] W. W. Clark II. *Sustainable communities: Toward energy independence and carbon neutral communities*. New York: Spring Press, 2009.