

# 太阳能技术及其并网特性综述

张抒阳, 张沛, 刘珊珊

(美国电力科学研究院, 美国)

**摘要:** 太阳能是继风能之后又一个无污染、高效率的新能源, 有巨大的应用前景。文章介绍了光伏太阳能技术和热力太阳能技术的原理和特性。光伏太阳能技术通常以较小的规模在配电层面上使用, 而热力太阳能技术则以较大的规模在输电层面上使用。文章指出由于技术上差异所致两种太阳能接入电网策略不同之处。根据美国新能源发展的策略和经验结合中国的情况提出对中国太阳能技术发展的看法和建议。

**关键词:** 太阳能; 光伏太阳能; 热力太阳能; 并网

## Overview of Solar Energy Technology and Its Integration Issues

ZHANG Shuyang, ZHANG Pei, LIU Shanshan  
(Electrical Power Research Institute, USA)

**Abstract:** Solar is a new clean, highly effective renewable energy with tremendous application potentiality after wind. This paper introduces the principle and characteristics of photovoltaic (PV) electric and solar-thermal electric technologies. Photovoltaic electric technology is usually used in a smaller scale at distribution level while solar thermal electric technology is used in a larger scale at transmission level. It is pointed out that the integration strategies for these two kinds of solar technology are different due to their technical difference. Certain opinion and advice on the development of solar technology in China are presented based on the renewable energy strategy and experience in the USA as well as the situation in China.

**Key words:** solar; photovoltaic; solar-thermal; interconnection and integration

在北美地区, 网联光伏太阳能市场应用前景十分巨大, 据统计, 仅仅屋顶应用就要超过 500 000 MW, 加上地面应用之后的总量甚至要超过百万兆瓦。世界范围内光伏太阳能装机容量在 2006 年达到 1 744 MW 的新纪录, 比 2005 年同期增长 19%。显然, 太阳能应用具有巨大的前景。

### 1 太阳能技术

太阳能技术按照原理区分, 可以分为光伏太阳能和热力太阳能。两种技术原理不同导致它们应用范围不同<sup>[2]</sup>。

#### 1.1 光伏太阳能技术

光伏太阳能技术指利用封装在太阳能模块组件中的太阳能电池板产生能量的技术。光伏太阳能作为一个专业术语, 专指利用光伏太阳能电池板产生的电能<sup>[3]</sup>。光伏材料通常是高纯度硅, 可以把太阳能直接转换成电能。当阳光直射光伏材料时, 硅表面光子将会被激活进而产生可控的电流。可以把

数个光伏材料连在一起形成太阳能电池单元, 也可将它们连接成薄层, 从而形成单一太阳能大电池板。

光伏太阳能技术的应用通常与建筑物的设计结合, 可以安装于屋顶, 顶棚, 窗户和建筑物正面。这就是“高楼集成光伏技术”(building integrated photovoltaic)<sup>[4]</sup>。此外, 不需要使用硅的“薄膜技术”是近年来大量研究的热点。采用透镜和反射镜增加光照能量密度从而增加发电量的技术被称之为“集中光伏”(concentrating photovoltaic)<sup>[4]</sup>。

在山区的或者远离公共电网的建筑物, 光伏太阳能发电将会成为可行的电力能源。光伏太阳能发电可以与风力发电、柴油机发电、水力发电结合使用。对于这种远离公共电网的独立系统, 通常使用电池作为其储能装置。

#### 1.2 热力太阳能

热力太阳能技术也被称为集中太阳能技术(concentrating solar power, CSP)。这种技术通过配置多个不同镜像系统收集太阳能, 并使之转换成为

高温热能,通过一定渠道传送至在线发电厂。最终利用传统热变换技术发出电能。对于热力学太阳能技术,发电系统本质上由两部分组成:第一部分收集太阳能,转变为热能并储存;第二部分将热能转换为电能。

集中太阳能技术可以有多种容量,例如社区级别(10 kW)或者系统级别(100 MW)<sup>[4]</sup>。没有充足光照的时间(阴天或晚上)系统可以采用储能设备里的热能产生电能。系统在太阳能和电能之间的转换效率非常高。

随着温度的升高,不同形式的能量转换成为可能。到达600℃时,蒸汽叶轮有高达41%的效率。温度越高,汽轮的效率越高。在1100℃高温时,配合使用液体氟化物,多层叶轮系统可达到60%的热能效率。高温也使热存储的效率提高。因为此时单位重量的液体可以存储更多的能量。当然,高温系统需要对材料有更高的要求,成本也相应提高<sup>[6]</sup>。

现在市场上有三种集中太阳能技术,分别是盘式/斯特林引擎太阳能技术、太阳能槽式聚光反射镜和太阳能塔。盘式系统的模块化特性使得它可以方便应用于各种小系统<sup>[7]</sup>。盘式太阳能系统可以单独应用,或者是连接成盘式聚光器系统,进而运用在大容量兆瓦级别的场合。聚光塔和槽式反射镜适合应用在系统连接级别(30~300 MW)的大容量场合。槽式反射镜被证明是可行的新技术,也是目前最为成熟的热力学太阳能技术。太阳能聚光塔技术具有低成本,高效率热能存储的特点,可以为高利用率的分布式太阳能发电系统服务。此时需要把接收器中的液体加热到1500℃,再当作发电机或者热能储存系统的能量来源。

在太阳能与电能的转换成本和效率上,相比槽式系统,太阳能塔和盘式系统具有很大的优势。所有的技术中,盘式/斯特林引擎太阳能系统效率最高,平均转换率高达30%。槽式太阳能系统具有20%的效率。太阳能光伏电池只有不到10%的效率<sup>[10]</sup>。

## 2 太阳能基本特性

### 2.1 地理特性

太阳能相对于风能或其他新能源具有自身的优势<sup>[9]</sup>。将一块适合太阳能发电的区域和一块适合风力发电的区域相比较,发出同等功率,太阳能电站占地面积只需风力发电场占地的1/5。但是,建立太

阳能发电站的土地就不能作为其他用途。最适合建立太阳能发电站的地方是沙漠等只有很少或者没有植物的炎热区域。

### 2.2 时间特性

太阳能的一大优势就是在时间上与负荷需求吻合很好,特别是在夏天。太阳能有效地减少了对传统发电机发电量的需求,同时也减少了燃料的使用和废气的排放。

#### 2.2.1 小时变化(云遮时间)

在光照资源丰富的地区,特别在夏季,云遮时间非常地少。理论上也可以预测云变化。丹麦的一项风力研究表明,在系统具有10%的风力发电机后,尽管每个风机的地理环境各不相同,电能输出仍然可靠。由于对于太阳能提前单个小时的预测,甚至提前一天的预测都非常地准确,所以由于云遮引起的太阳能不连续问题得到进一步缓解。

尽管可以预测云层的变化,云层仍然为一些太阳能发电站的运行带来困难。例如,当云层以带状形式移动,或者高度分散,使得太阳能接收器只能获得断点状或片段状的阳光。当这种情况维持几个小时时,为运行带来的问题更为严重。太阳光照总量减少的并不多,但是太阳能接收板输出热能频繁的变化会给太阳能发电站的运行操作带来压力。即使带有储能设备或者与天然气发电系统混合使用的槽式系统或太阳能塔,总输出也会比预期的减少。在这种情况下,太阳能电站可能不能把能量传递到电力系统。

#### 2.2.2 日变化

在西南部的沙漠,日能量变化不均的问题得到很大程度的缓解。这是因为在最需要电力的夏季,夜晚很短,在黄昏与凌晨之间仅有1/3的电能被消耗。但与此同时,由于电能需求在夜间的某几个小时相对来说也比较高,仍要求系统可以通过燃料或者热能存储装置提供在非光照时间的发电量。

不同于光伏系统,热力太阳能系统可以在没有阳光时候提供电能。光伏太阳能系统把太阳能直接转换为电能输出。热力太阳能系统首先把光照转换为热能,然后通过热动力循环产生电能。对于热动力循环,无论热能直接来自于太阳能或者来自于热能存储装置,甚至加热器,都对系统输出没有影响。

尽管如此,太阳能输出与负荷增长相吻合。夏季是电力需求最大的季节,太阳能的输出也达到最

大。相反, 由于热循环的效率在夏季降低, 传统热力学发电站(天然气, 煤, 核发电站)的输出会下降约 10%。因此, 太阳能电站和传统热力学发电站可以互为补充。

### 3 太阳能并网特性

和风能一样, 相对于传统发电机来说, 太阳能具有独特的并网特性。我们知道夜间不能利用太阳能, 并且太阳能系统的表现很大程度上受天气的不确定性所影响, 即太阳能具有不连续性的特征。而现代能源系统通常建立在能源的连续性上。另一方面, 太阳能发电机并网步骤和风力发电机并网步骤类似。但是无论光伏太阳能还是热力太阳能发电机都具有风力发电机所不具备的储能装置。这种结构使得太阳能并网技术具有不同于风力并网技术的特殊静态和动态效应。

#### 3.1 热力太阳能系统并网特性

关于热力太阳能系统的结构和原理已经在前文介绍过了。热力储能系统比电力储能系统(电池)成本低得多。通常采用具有高比热容的材料作为媒介, 比如水、泥土和石头<sup>[10]</sup>。设计良好的系统可以降低高峰能源需求, 同时把能源需求转向非高峰时间。通过采用融盐作为媒体, 我们能够在高温下存储太阳能。盐是高效的媒介, 因为盐具有不易燃、无毒、低成本、高比热容的特征, 可以在和传统电力系统兼容的温度下传递热能。通过这种方法, 高峰期发电和日常发电都能通过太阳能得到满足, 也能更方便地部署以煤和天然气为燃料的发电站。

热力学太阳能储能系统与电网系统通过传统发电机连接。发出的电能质量高, 波动小, 对传输系统冲击小。同时热力学太阳能发电机无功功率可控, 能保证系统动态电压的稳定。另一方面, 恒速风力异步发电机无功功率消耗不可控, 故一般需要在系统中加入灵活交流输电(FACTS)装置, 例如静止无功补偿器, 补偿无功消耗, 保持电压稳定。同时恒速风力发电机不具备能量缓冲装置, 风能的波动可能直接传送到电网, 对电网冲击大。对于变速风力发电机来说, 通过分离解耦控制有功功率和无功功率, 保持电压稳定。同时变速转子在一定程度上能作为波动能量的“缓冲”装置, 对电网冲击较小。

热力学太阳能系统同时也能提供良好的动态频率支持和低电压穿越功能(low voltage ride

through)。在此过程中储能装置相当于一个后备能源。一方面稳定输出, 使得电压波动减小; 另一方面, 发电机的电气量始终系统同频, 增加了对系统的惯性转量支持。

#### 3.2 光伏太阳能系统并网特性

光伏太阳能系统利用可重复充电的电池储存多余的电能。铅酸电池的主要优点是技术成熟、加工方便、价格便宜, 是最常用的一种。对于离线应用的电池, 应当保证 3~5 天的容量, 而且不能超过容量的 50%, 从而减少循环次数, 增加使用寿命。

带有电池储能的光伏太阳能系统把光伏模块和电池连接, 再接负荷。白天时, 光伏模块对电池充电。需要供电时, 电池对负荷供电。在此系统中, 需要采用充放电控制器。它是一个简单的电力设备, 能保证充电电池运转正常, 有效地防止蓄电池过充电或过放电, 延长使用寿命。

为了使得从电池流出的直流电转为交流电, 必须使用逆变器。尽管在把电能从直流转换为交流的过程中损失了一部分能量, 逆变器使得光伏电能与传统电厂发出的交流电特性一致, 供给日常运转的交流设备、照明、和其他电力设备。通过采用净计量政策, 单个用户可以在白天向电网卖出多余的电能, 而在夜晚使用来自电网的电能。

太阳能电池通过光照产生的直流电可以驱动电力设备或者为电池充电。此时需要利用逆变器把直流电转换成交流电。普通逆变器和网联逆变器的区别是后者还能保证输出电流的相位与电网保持一致。这种特性使得单个用户可以把多余的能量(太阳能, 风能, 等等)反馈给电网。根据用户对功率和电压的不同要求, 制成太阳能电池的组件可以单个使用, 也可以将数个太阳能电池组件经过串联(以满足电压要求)和并联(以满足电流要求), 形成供电方阵提供更大的电功率。

制造电池需要额外的成本和维护费用, 电池系统效率也会随着使用时间的上升而不断下降, 通常只能运行 5~10 年。由此可见, 光伏太阳能系统需要频繁的向电力系统吸收或释放能量, 所以要求光伏太阳能系统具有强大的升降调节能力。由于光伏太阳能系统不具备无功功率调节的性能, 需要在系统中增加独立的无功补偿装置。光伏太阳能系统也不能对系统提供转动惯量的支持, 使得系统需要增加额外的储能装置满足稳定动态频率的要求。

在低负荷时段对电价监控发现一个现象：电价可能落到燃煤发电厂操作成本之下，在每年负荷需求量最低时段甚至降到零以下。造成这种现象有很多原因，取决于当地和当时系统的条件。其中最重要的一个原因是极低的负荷需求。电力公司不遗余力地使电厂电站发电量超过最低负荷需求，同时保证电厂运行的连续性以避免重新启动的成本。发电厂在基本上运行非常不利，可能造成以低于成本的价格出售电能。

针对不断增加的太阳能，有许多方法和技术可消耗过多的能量。分布式负荷就是其中的一种。它具有“双重燃料”的特性。通过这种特性，当过量的太阳能能源导致电价下跌时，分布式负荷停止使用天然气，而转向电能使用。一个具有前景的分布式负荷是“插头式混合动力电动车”。它可以在夜间充电供白天消耗。当然，能源存储技术是对新能源不连续性质的“最终”解决方法。储存单元不仅能够吸收多余的太阳能，也降低了对传统发电的依赖性，增加了整个电力系统的灵活性。针对新能源的不连续特性，采用多种发电技术联合的战略将会是最经济的解决方案。

## 4 结 语

根据美国新能源发展的策略和经验结合中国的情况，作者对中国太阳能行业技术发展提出了以下看法和建议。

从技术的角度来看，目前中国的太阳能的主要规模集中在在太阳能热水器，大约占到全球市场的50%，而在光伏太阳能和热力学太阳能上几乎没有规模，要大力支持自主研发新一代太阳能发电技术，保证在未来的新能源竞争中立于不败之地。

从政策层面看，美国政府鼓励新能源，尤其是风能和太阳能的应用。大部分州实行了“新能源组合标准”（renewable portfolio standards）。各州根据自身不同的地理条件，自然环境以及工业的发展情况，在规定的期限内，把新能源在所有能源中所占的比例提高到某个程度。对于地理条件出众的加利福尼亚州和佛罗里达州，这个政策大大刺激了太阳能的发展。中国是仅次于美国的全球第二大能源市场，政府应制定鼓励新能源发展的政策，各省可根据政策和自身的特点制定可再生能源的发展策略。

从系统的规划来看，美国各大 ISO 都做了“新

能源接入”的可行性分析。在配电网的构架，输电电网的规划上从系统的稳定性和可靠性的角度做了充分的研究。同时美国开放的市场政策，鼓励新能源参与市场竞争，为新能源的发展营造了良好的外部环境。中国应对自身的新能源资源进行研究，在各省制定可再生能源的发展策略基础上，省、网电力公司应制定新能源接入电网的可行性分析及系统改造升级计划。

## 参考文献：

- [1] PATEL M R. Wind and Solar Power Systems Design, Analysis, and Operation[M]. Second Edition. USA: CRC Press, 2006.
- [2] PEDIGO S, NAHAN R, MOON S, et al. Planning Strategic Communications and Outreach for the Solar Program[C]// 2004 DOE Solar Energy Technology Program Review Meeting, Denver, Colorado, U.S.A., October 25, 2004.
- [3] Solar Electric Power Association. Solar Electricity Basics[EB/OL]. <http://www.solarelectricpower.org/index.php?page=basics>.
- [4] Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, Solar Energy Technologies Program[EB/OL]. <http://www1.eere.energy.gov/solar/photovoltaics.html>.
- [5] Wikipedia. Net Metering[EB/OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Net\\_metering](http://en.wikipedia.org/wiki/Net_metering).
- [6] Wikipedia. Solar Thermal Energy[EB/OL]. [http://wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_energy](http://wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy).
- [7] Anonymity. Solar Thermal Overview[EB/OL]. [www.hcs.harvard.edu/~hejc/apers/Solar%20Jan07/solar\\_thermal\\_overview.pdf](http://www.hcs.harvard.edu/~hejc/apers/Solar%20Jan07/solar_thermal_overview.pdf).
- [8] LEITNER A. Fuel From the Sky: Solar Power's Potential for Western Energy Supply[Z]. USA: The National Renewable Energy laboratory (NREL), 2002.
- [9] DENHOLM P, MARGOLIS R. Very Large-Scale Deployment of Grid-Connected Solar Photovoltaics in the United States: Challenges and Opportunities [C]//Solar 2006, Denver Colorado, July 8, 2006.
- [10] Wikipedia. Solar Energy[EB/OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)[EB/OL].
- [11] Anonymity. National Renewable Energy Laboratory [EB/OL]. <http://www.nrel.gov/gis/solar.html#maps>.

收稿日期：2008-06-24

## 作者简介：

张抒阳（1984），男，北京人，美国电气电子协会学生会会员，硕士，研究方向为新能源规划与运行，电力系统稳定性和控制等；

张沛（1972），男，北京人，美国电气电子协会电子高级会员，美国电力科学研究院（EPRI）系统运行规划部经理，博士，研究方向为概率方法在电力系统运行规划的应用，电力系统稳定性和控制，电力系统可靠性等（e-mail）PZhang@epri.com；

刘珊珊（1978），女，江苏人，博士，美国电力科学研究院（EPRI）高级项目工程研究员，研究方向为电力系统的动态数据驱动应用系统，概率方法在电力系统运行规划的应用，电力系统稳定性和控制，现代电力系统恢复控制等。