

# Solar Thermal Power Generation Technology in a New Generation of Energy System Positioning

Jing Zhan, Zhifeng Wang\*

Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing  
Email: \*jingzhan126@126.com

Received: Dec. 25<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2018; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The energy revolution is an important driver of historical development. Every big leap in human productivity is accompanied by a revolution in energy production and consumption. The new round of energy revolution has begun to take shape. It will take the development of disruptive energy technologies as the main symbol and advance the human society to a brand new energy era characterized by efficiency, cleanliness, low carbonation and intelligence. Compared to other clean energy power generation methods, solar thermal power generation can turn the traditional power grid into a technology of energy Internet because of its unique advantages. The thermal power generation will play a key and key role in the energy Internet and will play a leading role.

## Keywords

A New Generation of Energy Systems, Renewable Energy, Solar Thermal Power Generation Technology, Positioning

---

# 太阳能热发电技术在新一代能源系统中定位的思考

詹晶, 王志峰\*

中国科学院电工研究所, 北京  
Email: \*jingzhan126@126.com

收稿日期: 2017年12月25日; 录用日期: 2018年1月4日; 发布日期: 2018年1月12日

---

\*通讯作者。

## 摘要

能源革命是历史发展的重要驱动力。人类生产力每一次大飞跃都伴随着一场能源生产和消费生产的革命。新一轮的能源革命已初露端倪, 它将以具有颠覆性的能源技术发展为主要标志, 把人类社会推进到以高效化、清洁化、低碳化、智能化为主要特征的全新能源时代。太阳能热发电相比于其它清洁能源发电方式因其独特的优势, 可以把传统电网变成能源互联网的技术, 光热发电将在能源互联网中充当核心、关键的角色, 并将起到主导作用。

## 关键词

新一代能源系统, 可再生能源, 太阳能热发电, 定位

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 新一代能源系统概述

由于化石能源使用带来的资源储量枯竭、环境污染、生态破坏等问题, 新能源的使用逐渐成为新时代的能源发展的主流, 逐渐取代化石能源。在以可再生能源、核能等清洁能源为主导的生产与消费中逐步建立可持续发展的新一代能源系统。2017 年上半年, 各类可再生能源发电新增装机 3700 万千瓦, 约占全部电力新增装机的 70%左右[1]。

所谓新一代能源系统, 是将能源的生产、传输、使用、存储和转换装置以及它们的信息、通信、控制和保护装置直接或间接连接的网络化物理系统[2]。

新一代能源系统在新能源革命的条件下, 在解决环境和能源问题驱动下实现电网的转型, 其中清洁能源发电占比有望超过 60%~70%, 而目前正处于从第二代电网向第三代电网过渡的阶段。与化石能源相比较, 新一代能源系统的主要特征有[3]: 新一代能源系统以电力为中心, 以电网为主干, 其目标是最大限度地开发和利用可再生能源, 将可再生能源和化石能源的综合利用率实现最大化的提升, 是新形势下第三代电网的概念向综合能源系统的扩展。在周孝信提出的新一代能源系统的构成中, 该系统由源端综合能源系统、受端综合能源系统以及能源输配网络三要素构成。

首先, 在源端综合能源系统方面, 主要以风电、太阳能发电(光伏和光热发电)为主, 同时配合可调节的火电、水电、储能、风光电制氢(甲烷)、就地消纳等方式建立源端多能互补网络, 解决可再生能源的波动性和弃风弃光问题, 实现大规模可再生能源电力向受端传输。

其次, 在受端综合能源系统方面, 主要面向用户不同能源需求, 采取热电冷联供、主动配电网和可再生能源微网等方式, 大幅度地提高能源利用效率和用能安全。

再次, 在能源输配网络方面, 主要是电力网和管网两个渠道, 包括源端的互补网络、传输网络和配送网络。

因此, 电网将面临新的挑战, 成为新能源大规模电力输送的分配源端, 需要灵活高效地将可再生能源并网传输融入到电力发展中。

但是新一代能源系统的发展需要克服我国长期存在的各类能源计划单列、条块分割, 缺乏有效的能

源市场配置等系统性缺陷[2]。

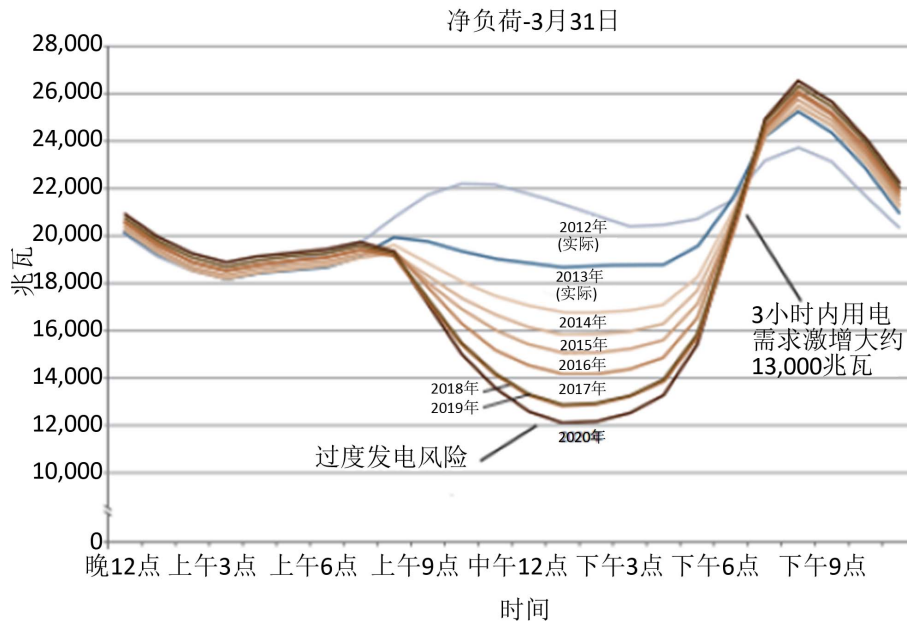
新一代能源系统的运行顺畅需要克服和解决所面临的瓶颈问题，即参与系统运行的资源如何配置，如何灵活应对运行中的问题。我们可以考虑将不同类别的资源进行交替使用，在不同时间段或者阶段发挥不同资源的不同优势以保证能源系统的顺利运行。以太阳能资源为例，晴天时间段太阳能辐射资源较为丰富可以稳定能源系统中的电力输出，其他时间辐射资源不稳定或者缺乏的时候，则可以采用平时储蓄的太阳能光热资源保证电力的稳定输出，在不同时间段进行调峰以满足目前市场的调峰需求。

以美国加州的鸭形曲线为例，如图 1。因光伏发电系统的大量导入，出现了白天发电量超过用电量，但在傍晚太阳能发电停止时，电力需求却急剧上升，填补这种巨大的供需缺口变得困难。这里的“供给量”是指电力公司的大规模集中型发电站供给的电力量；“实际电力需求”是指，整体用电量减去与消费侧的配电网并网的分散型光伏及风力等发电量之后的电力需求[4]。

根据图 1 可以看出，问题在于电力购买量应该等于需求量，和傍晚以后急剧上升的高峰需求要在短时间内满足出现了时间和需求的交错。在不同可再生能源交替使用的情况下、在不同时间段可以满足用户侧的使用需求，不会因为某一可再生资源的供给不稳定而影响用户侧的使用。如何调节供给侧和需求侧在不同时间的需求矛盾呢？太阳能热发电技术及其储热技术不仅可以保证供电的稳定性、平滑性还能降低发电成本，是保证新一代能源系统运作顺畅的最优选择。

## 2. 太阳能热发电及其特点

太阳能热发电也称为聚焦型太阳能热发电(Concentrating Solar Power, CSP)，利用抛物形或碟型镜面的聚焦作用将太阳能的热量收集起来，通过换热装置提供高温高压蒸汽，然后按常规方式发电，即利用高温高压蒸汽推动朗肯循环汽轮机发电。太阳能热发电是一种完全清洁的发电方式，较之传统的化石燃



**Figure 1.** Duck curve (Daily electricity supply and demand forecast shows that due to the solar energy and wind power, the California power grid is undergoing a new change, that is, net load at midday drops, and in the evening increases sharply to form a peak. This phenomenon is called “Duck curve”)

**图 1.** 鸭型曲线图(每日电力供需预测显示，由于太阳能和风能的加入，加州电网正在出现新变化，即日间用电净负荷下降，傍晚出现急剧攀升的负荷尖峰。这种现象因其形状被称为“鸭形曲线”)

料发电, 太阳能热发电利用太阳热能来制造蒸汽, 取代了化石燃料电站通过燃烧煤炭燃油等制造蒸汽的方式, 因此不会产生污染。太阳能热发电的工作温度 250℃~1000℃, 包括塔式、槽式、碟式、菲涅尔式四种技术类型。太阳能热发电可采用直接和间接(两回路循环)两种热力循环。前者是直接将接受装置产生的蒸汽(高温气体)驱动汽(燃气)轮机发电; 后者是通过主系统热循环过程中的热交换加热辅助系统内的工质者是直接将接受装置产生的蒸汽(高温气体)驱。太阳能热发电通过储热功能稳定及平滑其所出电量, 以保证供电侧和需求侧的供需和谐。2016 年全球太阳能热发电累计装机 5017 MW, 在建装机容量不低于 500 MW, 其中美国、西班牙为传统市场, 南非、中东和中国是新兴市场。2017 年 2 月和 8 月, 摩洛哥 160 MW 装机 Noor1 槽式电站、南非 100 MW 装机 Xina 槽式电站分别并网发电。

我国市场 2016 年新增装机量为 10.2 MW, 包括 12 月 26 日并网发电的敦煌 10 MW 熔盐塔式电站, 10 月 12 日并网投运的甘肃阿克塞 800 米熔盐槽式示范回路, 装机 200 kW。德令哈 10 MW 熔盐塔电站于 2016 年 8 月 20 日并网发电, 因为该项目是 10 MW 水工质塔式电站的改造工程, 所以这一新增装机不列入 2016 年的新增装机统计。中科院电工所 2016 年 7 月完成 1 MWth 塔式熔融盐集热部分的改造, 2017 年 6 月建成 1 MW 槽式集热系统。截至 2016 年底, 中国太阳能光热发电累计装机容量达到 28.3 MW。

2016 年 9 月国家能源局发布《关于建设太阳能热发电示范项目的通知》, 给出热发电的标杆电价为 1.15 元/千瓦时, 极大推动了我国太阳能热发电的快速发展。能源局公布了首批太阳能热发电示范项目共 20 个, 包括 9 个塔式电站、7 个槽式电站和 4 个线性菲涅尔式电站, 累计装机 1350 MW。

太阳能热发电作为一种清洁能源的绿色利用方式, 相比于其他能源利用方式, 太阳能热发电有其独特的发展优势。

首先, 资源用之不竭。太阳能资源取之不尽, 用之不竭。全国陆地面积接受的太阳能辐射能约为 17,000 亿吨标准煤, 其中年日照时数大于 2200, 年辐射总量高于 5000 MJ/m<sup>2</sup> 的太阳能资源丰富或较丰富的地区面积较大, 主要包括: 内蒙古西部阿拉善盟和鄂尔多斯地区、甘肃西部河西走廊、青海、西藏、以及新疆的哈密和吐鲁番地区, 约占全国总面积的 2/3 以上, 具有良好的太阳能利用条件。特别是人口密度稀少又具有一定水资源的甘肃河西走廊, 青海、西藏等地区, 更具有发展大规模的太阳能热发电站的潜力。太阳能资源要优于风能、生物质能、地热能、海洋能等可再生能源(表 1)。而在可开发利用的地域方面, 也较地热能、海洋能等能源利用方式更广阔。

其次, 对环境的影响非常小。太阳能热发电的整个发电过程不会对外产生污染物和温室气体, 较常规化石燃料能源发电是一种清洁能源利用形式。同时, 在资源利用的开发过程中, 其对生态环境也不会产生破坏和影响, 相比较风能、水能、地热能、海洋能等具有环境友好的优势。

**Table 1.** Developable China's renewable energy resources [5]

**表 1.** 中国可再生能源资源可开发量[5]

种类	资源可开发量
太阳能	17,000 亿 tce
风能	10 亿千瓦, 其中陆地 3 亿千瓦 经济可开发 4.0 亿千瓦 技术可开发 5.4 亿千瓦
水能	
生物质发电	3 亿吨秸秆+3 亿吨林业废弃物
生物质能	
液体燃料	5000 万吨
沼气	800 亿立方米
地热能, 不包括中低温	600 万千瓦

再次, 太阳能热发电出电平滑。由于发电原理不同, 太阳能热发电出力特性优于光伏、风电的出力特性。特别是通过蓄热单元的热发电机组, 能够显著平滑发电出力, 减少小时级出力波动。根据不同蓄热模式, 可不同程度提高电站利用小时数和发电量、提高电站调节性能。另外, 太阳能热发电通常通过补燃或与常规火电联合运行改善出力特性, 使其可以在晚上持续发电, 甚至可以稳定出力承担基荷运行。

最后, 在接入电网方面具有很大的灵活性。带有蓄热和补燃装置的太阳能热发电站不同于其他如风电、光伏这样的波动电源, 蓄热装置可以平滑发电出力, 提高电网的灵活性, 弥补风电、光伏发电的波动特性, 提高电网消纳波动电源的能力。同时, 带有蓄热装置的太阳热发电系统在白天把一部分太阳能转化成热能储存在蓄热系统中, 在傍晚之后或者电网需要调峰的时候用于发电以满足电网的要求, 同时也可以保证电力输出更加平稳和可靠。而光伏发电是由光能直接转换为电能, 其多余的能量只能采用电池储存, 技术难度和造价远比太阳能热发电仅需蓄热要大得多。因此, 易于对多余的能量进行储存, 以实现连续稳定的发电和调峰发电, 是太阳能热发电相对于风电、光伏等可再生能源发电方式一个最为重要和明显的优势, 有利于稳定电力系统运行, 也容易被电网所接受。另外, 由于太阳热发电是通过产生过热水蒸气带动汽轮机发电, 与传统火力发电方式相同, 不会对电网产生不利的影 响, 同时还能提供无功功率, 是与现有电力系统友好的发电方式。

太阳能热发电也存在一些不足, 如其必须利用太阳的直射辐射将太阳能反射聚焦到吸热器上, 但直射辐射易受大气中尘埃、水汽等颗粒的影响, 对电站所在地的辐照条件要求较高。并且目前太阳能热发电主要以大规模集中式开发为主, 建设电站所需的土地面积较大, 在分布式应用中存在很大的困难。

### 3. 太阳能热电联供

常规的冷热电联供技术是提高能源利用率的有效手段, 但是仍然不能完全解决消耗化石能源存在污染的问题。以太阳能作为热源驱动冷热电联供则能从根本上解决这一问题。

利用太阳能加热工质, 驱动热力机械循环做功发电的过程中释放大 量余热, 这部分余热可以驱动余热制冷装置, 也可以直接用来供热。与光伏发电相比, 热动力发电系统结构紧凑, 转换效率较高, 而且余热可以直接利用, 不需要再进行一次能源的转化。

太阳能热发电热电联供系统主要由: 1) 聚光集热系统; 2) 换热系统; 3) 发电系统; 4) 储热系统; 5) 辅助能源系统组成。考虑到经济性, 其中储热系统储存的热量作为供热的热源。非采暖期汽轮机组正常运行。采暖期提高机组背压并开启调节抽气加热循环冷却水到 120℃, 利用循环冷却水作为供热热源。白天聚光集热系统所产生的热量全部进入汽轮发电机组做功发电, 汽轮机排汽热量的 1/3 用于直接供热, 2/3 进入储热系统进行储热, 以供夜间供热和采暖需求。

以北京市延庆大汉太阳能热发电站系统运行为例, 太阳能热电联供系统, 利用蒸汽蓄热罐中存储的热量, 为延庆太阳能热发电基地提供 3500 m<sup>2</sup> 的采暖热负荷, 如图 2 所示, 红线部分为采暖系统运行部分。

太阳能热电联供系统, 利用蒸汽蓄热罐中存储的热量, 为延庆太阳能热发电基地提供 3500 m<sup>2</sup> 的采暖热负荷。图 2 中, 红线部分为采暖系统运行部分。热负荷按 40 W/m<sup>2</sup> 计算, 则采暖热负荷为

$$Q = 40 \text{ W/m}^2 * 3500 \text{ m}^2 * \frac{24 \text{ h}}{1000} = 3360 \text{ kWh}$$

表 2 中的数据表明: 当太阳辐照大于 500 W/m<sup>2</sup> 时, 可以实现太阳能热发电热电联供, 即在满足 8 小时热发电要求的同时, 利用蒸汽蓄热罐储存的热量, 满足 24 小时的采暖需求。当太阳辐照大于 200 W/m<sup>2</sup> 时, 吸热器产生的高温蒸汽直接进入 到蒸汽蓄热罐中, 满足园区内 24 小时的采暖需求。当太阳辐照小于 200 W/m<sup>2</sup>, 利用蒸汽蓄热罐与辅助锅炉的方式来满足 24 小时的采暖需求。



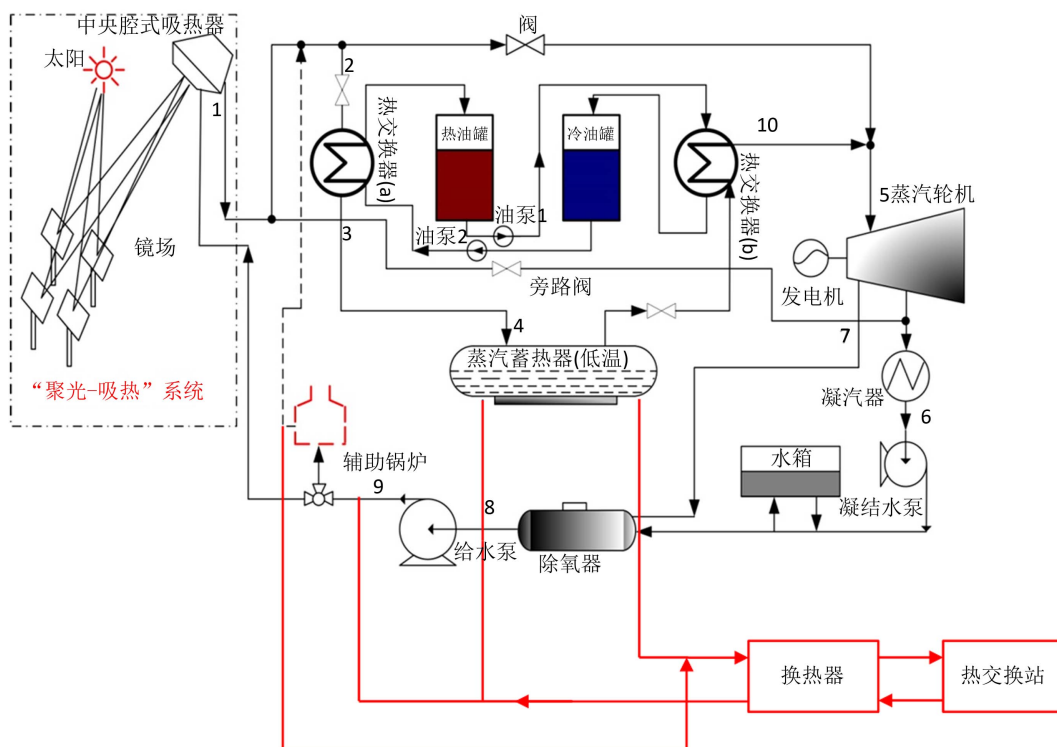


Figure 2. Power and Thermal co-generation diagram of solar thermal power  
图 2. 太阳能热发电热电联供运行图

Table 2. Thermal load of receiver output with different irradiation  
表 2. 不同辐照条件下吸热器的输出热负荷

DNI(W/m <sup>2</sup> )	吸热器输出热负荷(kWh)	采暖所需热量(kWh)	辅助锅炉提供热量(kWh)
700	13,440	3360	0
600	9600	3360	0
500	7680	3360	0
400	5760	3360	0
300	3840	3360	0
200	2880	3360	480
100	1920	3360	1440

由以上的分析可知，通过与太阳能热发电站联合，实现热电联供，提高可再生能源的利用率，同时减少采暖期间的常规能源使用量，在采暖季节达到节能减排，减低 CO<sup>2</sup> 排放量的目的。

#### 4. 太阳能热发电在新一代能源系统中的战略地位

太阳能热发电在新一代能源系统中优于其他可再生能源发电技术就在于其储热优势，而且还可以根据需求(用户、电网)进行调节电站的出力(发电量)并进行热电联供。

##### 4.1. 太阳能热发电优势

第一，就发电过程中的能量转换方式而言，风电是风能 - 功 - 电，光伏是太阳能 - 电，太阳能热发

电是太阳能-热能-功-电,而用户侧需求的和可直接利用的能量主要是热能和电能。比较可知,在三种可再生能源发电技术中,只有太阳能热发电中产生的能量可直接与用户需求侧直接响应,如此可减少不必要的能量转换环节,提升能源利用效率。

第二,就可再生能源发电普遍存在的输出电力波动问题而言,储能是唯一的解决途径。但对于风电和光伏,其储能主要是将已然生产出的电能通过抽水、压缩空气、蓄电池等方式储存起来,然后在需要的时候又通过反向过程将对应的能量利用起来进行发电,这整个过程经历了电-对应储能形式能量种类(势能、化学能等)-电的转换,不可避免地会导致能量数量的浪费和能量品质的降低。此外,抽水蓄能和压缩空气蓄能的地域限制、蓄电池的成本限制等都妨碍了其广泛应用。但对于太阳能热发电,由于能量转换过程中多出来的热环节,其可以直接将发电过程中富余的热量存储起来,然后在需要利用的时候运用储存的热能发电,起到了良好的“削峰填谷”作用,平抑电力输出波动,使得输出电力稳定、连续、方便利用。储热是太阳能热发电区别于风电、光伏和其它可再生能源发电的独特优势。

第三,就可再生能源电力的控制和调度而言,由于风能和光伏储能上的限制,其可控性可调度性严重受限,导致当用户侧就地消纳能力不足时出现严重的弃风弃光现象,如近几年来“三北地区”供暖期间严重的弃风弃光现状。而太阳能热发电因其储热的独特优势,使其电力连续,且可在时域上移动,可控性和可调度性大大增强。

第四,就可输出的能量种类而言,风能和光伏输出的主要是单一的电能,而太阳能热发电除了电能,还可利用发电过程中的热能进行拓展应用。如太阳能建筑采暖、太阳能制冷、太阳能热化学制氢(化学能),囊括热能、冷能、化学能和电能四个由低到高层次品味的能量。由此,太阳能热发电使得能源清洁利用、能量调度和能量多品味利用、能量品味对口利用成为可能。

第五,就发电的经济性而言,由于目前国内的太阳能热还处于初步阶段,所以相比于风电和光伏,其经济型还不是很明显,但可以从技术成熟度、大型化和商业化之后的成本大幅下降作为着眼点,此外,太阳能热发电除了能量来源方面(镜场和集热场)与常规火电不同之外,其余功-电的子系统与火电完全相同,有成熟的设备和技术可资利用,也是体现其经济性的重要方面。

第六,就经济财政方面而言,国家发展改革委发出《关于太阳能热发电标杆上网电价政策的通知》,核定太阳能热发电标杆上网电价为每千瓦时 1.15 元,并明确上述电价仅适用于国家能源局 2016 年组织实施的示范项目。同时鼓励地方政府相关部门对太阳能热发电企业采取税费减免、财政补贴、绿色信贷、土地优惠等措施,多措并举支持太阳能热发电产业发展。因此,太阳能热发电电价可采取实行时段电费制度,对夜间的过剩电力给予较低的定价,鼓励部分消费群体在低峰时段用电,进而分担用电压力。并制定需求响应计划,保障电网的稳定,以促进需求侧多使用可再生能源发出的电力。领域内制定储能补贴电价机制和辅助服务定价机制,引导新能源发电企业配置储能,减少弃风、弃光,提升电网调峰调频能力,促进新能源消纳。

第七,太阳能热发电就其优势所在能量转换环节中多出来的高温热能,通过对高温热能的存储和多样化利用,可以实现连续热能、冷能、化学能和电能的四个层次的多品味能量输出,且储能还使得其在时域上可移动、可调度,所以光热发电已经具有了多能互补供应的基础条件。但想要更好地参与和实现多能互补,还需要加强对用户侧的响应、明晰不同用户侧的需求,然后通过能量供应与需求的匹配来进行多能互补系统的设计,其中核心关键在于建立能源网络、建立最佳的能量品味、种类对应,实现能量的最高效利用。太阳能热发电在新一代能源系统中将处于主导地位,可以从电力市场上、技术支持上、经济财政管理方面对其所面临的发展瓶颈问题进行阶段性的解决。

#### 4.2. 太阳能热发电在新一代能源系统中的战略地位

太阳能热发电在新一代能源系统中,凭借可储热、可调峰、可连续发电的优点,近年来已经成为国

际新能源领域开发应用的热点。太阳能热发电商业化、规模化的产业应用,对推动能源革命、促进能源安全、调整能源结构、改善生态环境等具有十分重要的意义。太阳能热发电将是新一代能源系统发展的核心。

在源端综合能源系统方面,主要以风电、太阳能发电(光伏和热发电)为主,同时配合可调节的火电、水电、储能、风光电制氢(甲烷)、就地消纳等方式建立源端多能互补网络,解决可再生能源的波动性和弃风弃光问题,实现大规模可再生能源电力向受端传输。其次,在受端综合能源系统方面,主要面向用户不同能源需求,采取热电冷联供、主动配电网和可再生能源微网等方式,大幅度地提高能源利用效率和用能安全。再次,在能源输配网络方面,主要是电力网和管网两个渠道,包括源端的互补网络、传输网络和配送网络。因此,电网将面临新的挑战,成为新能源大规模电力输送的分配源端,灵活高效地将可再生能源并网传输融入到电力发展中。因此,太阳能热发电技术及其储热技术不仅可以保证供电的稳定性、平滑性还能降低发电成本,是保证新一代能源系统运作顺畅的最优选择。

首先,太阳能资源用之不尽,为我国未来能源供应和能源安全提供基本保障。太阳能热发电不仅可以解决光伏发电的间歇性缺点,提供基础电力支撑,还有巨大的成本下降空间。在全球低碳经济与新能源革命的大趋势下,太阳能热发电极有可能成为我国未来清洁发展最大的替代能源。

其次,太阳能属于洁净能源,太阳能热发电站运行过程不存在污染物排放,可直接替代化石燃料,有利于环境保护、减少温室气体排放和雾霾污染。电站建成后,可减少地表土壤所接收到的辐照量,减缓地表风速,降低地表水分蒸发量,有利于植被生长,改善生态环境。

再次,太阳能热利用可推动风电、光伏发电良性发展。太阳能热发电通过成本相对低廉的储热装置,可成为电力系统友好型电源,既可以承担基荷,也具备较为灵活的调峰能力,将成为未来电网的主力电源。光热发电与光伏发电、风电配套建设,能够显著缓解光伏和风电的出力波动,大幅提高电力系统的消纳能力,减少弃风、弃光矛盾。

第四,从拉动国内经济和相关产业发展来看。太阳能热发电的产业链条较长,涉及钢材、铝材、玻璃、水泥、矿料、电料、耐火、保温、机电、机械、电子等十几个行业产业。大规模发展光热发电,能够有效带动上述产业发展,成为经济发展的新支点。因此,光热发电既是一种清洁能源供应方案,更可以增加就业、带动传统产业,推动新兴产业的发展。

第五,是增强我国在相关领域的国际话语权和标准规则制定权。建设具有自主知识产权的光热示范电站,制定相关标准和规程、规范,形成技术体系后规模化发展,可以带动光热发电装备产业化、规模化,进一步降低设备造价和发电成本,还可以“走出去”,增强我国光热技术在国际上的话语权和竞争力。

## 5. 储热与电网

储能技术属于柔性输电技术范畴,在分布式电源并网的应用中配套大规模储能装置,可以解决发电与用电的时差矛盾及间歇式可再生能源发电并网对电网安全和稳定性的影响。储能技术作为提高智能电(微)网对可再生能源发电兼容容量的重要手段和实现智能(微)网能量双向互动的中枢和纽带,是智能(微)网建设中的关键技术之一。

储能技术可以在电力系统中增加电能存储环节,使得电力实时平衡的“刚性”电力系统变得更加“柔性”,特别是平抑大规模清洁能源发电接入电网带来的波动性,提高电网运行的安全性、经济性和灵活性。进而即提升供电侧的供电稳定性及平滑性,也给予了用户侧稳定用电的安全性保证。

储热系统的接入可有效降低太阳能热发电系统的平准化发电成本 LCOE,随着储热系统的日益成熟,其在太阳能热发电中扮演的角色越来越重要。



对于储热系统, 其投资成本(capital cost)主要包括储热介质成本、储热罐等容器成本、管道和保温成本、基建成本、以及仪器和控制成本。

对于储热介质, 因为所用数量巨大, 所以材料的价格一般采用批发价。潜热储热系统一般采用封装或者罐内盘管的配置形式。而封装的成本可占到封装相变储热系统总成本的约 15%。而罐内盘管系统比封装相变系统的 PCM 堆积密度更大, 可以降低罐体成本和传热流体成本。但是为了达到更高的换热效率, 需要很大的盘管表面积, 这使得管的成本近似于储热介质的成本。

储热罐体的成本主要由储热系统的具体形式(单罐或者双罐)以及所采用的罐体材料决定。一般来讲, 罐体的成本占系统总成本的 15%到 30%。

目前, 对于发展最成熟的双罐熔融盐储热系统, 所报道的投资成本为\$27/kWh。截至 2020 年, 而由美国能源部发起的 Sunshot 计划要求, 截至 2020 年, 对于接入 CSP 电站的储热系统需进行优化设计, 使得循环(火用)效率高于 95%, 储热投资成本低于\$15/kWh, 且放热时长至少 6 h。管道和保温成本一般约为\$0.642/kWh, 仪器和控制成本一般约为\$0.151/kWh。目前蓄电池的一次投资是 1 千瓦时 1500 元, 3 年寿命, 循环 500~800 次。

这些投入成本乘以 1.3 以囊括建设成本, 然后分别乘以 1.1 和 1.07 以囊括工程/监察成本和应急成本。

太阳能热发电是具有经济和技术竞争力的可再生能源发电技术, 在我国新一代能源系统中具有光明的前景和重要地位。我国太阳能热发电处于技术示范和商业化起步阶段, 第一批示范项目正在建设中。是一个崭新的能源产业, 未来十年是一个重要的机会之窗, 在此期间, 我国将逐步掌握太阳能热发电关键装备和系统的设计、制造和继承能力, 建立较为完善的、具有中国特色的太阳能热发电产业链条, 在光照资源较好地区建立一批规模化商业电站, 推动太阳能热发电成为能够承担峰值负荷和基本负荷, 成为真正具有竞争的清洁能源电力之一。

## 参考文献 (References)

- [1] 国家能源局. 可再生能源进入规模化发展新阶段, 新增装机约占全部的 70%[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2017-07/21/c\\_1364\\_61109.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-07/21/c_1364_61109.htm), 2017-8-28.
- [2] 周孝信. 构建新一代能源系统的构想[J]. 电器工业, 2015(9): 1-4.
- [3] 周孝信. 能源革命下的新一代能源系统[J]. 国家电网, 2015(8): 58-60.
- [4] PJM Interconnection. Compliance Pathways Economic and Reliability Analysis. <http://www.pjm.com/documents/reports.aspx#clean>, 2016.
- [5] 王志峰, 等. 太阳能热发电站设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)