

## 储能技术在太阳能分布式冷热电联供中的应用\*

杨昌儒<sup>1,2,3,4</sup>, 林仕立<sup>1,2,3</sup>, 宋文吉<sup>1,2,3†</sup>, 冯自平<sup>1,2,3</sup>

(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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 太阳能分布式冷热电联供是可再生资源和分布式能源的重要发展方向, 储能技术是解决其中并网稳定性和供需不平衡的关键。本文介绍了储能技术发展状况, 并针对太阳能分布式冷热电联供系统, 从系统结构和运行控制两方面出发, 分析了储能系统在各子系统中的应用及作用; 探讨了运行模式和控制策略的特点和差异性, 为太阳能分布式冷热电联供的推广以及储能技术的应用提供参考。

**关键词:** 储能技术; 分布式能源; 太阳能; 冷热电联供

**中图分类号:** TK02      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.02.008

## Application of Energy Storage Technology in Distributed Energy System for Cooling-Heating-Power Combined Cycle Driven by Solar Energy

YANG Chang-ru<sup>1,2,3,4</sup>, LIN Shi-li<sup>1,2,3</sup>, SONG Wen-ji<sup>1,2,3</sup>, FENG Zi-ping<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;  
2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;  
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;  
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle driven by solar energy is an important development direction of renewable energy and distributed energy, while energy storage technology is the key to solve problems of grid stability and supply & demand imbalance. In this paper, the development of energy storage technology is introduced, and the application and function of energy storage system in each subsystem are analyzed according to the system structure and operation control. The characteristics and differences of operation mode and control strategy are also discussed, to provide reference for the popularization of distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle driven by solar energy and the applications of energy storage technology.

**Key words:** energy storage; distributed energy; solar energy; combined cooling, heating and power (CCHP)

## 0 引言

国务院“十三五”科技创新规划明确提出发展清洁高效能源技术, 发展可再生能源大规模开发利用技术。太阳能分布式冷热电联供系统在利用太阳能资源的同时, 可充分满足用户能源多样化的需求, 对提高能源利用效率、改善能源消费结构具有重要意义, 是当前太阳能利用中受到广泛关注的主要形式<sup>[1]</sup>。

考虑到光照强度所引起的太阳能输出功率间歇

性波动以及用户侧能源消费的随机性, 将储能技术应用于太阳能分布式冷热电联供系统, 是解决系统不稳定、调节能源供需侧平衡的有效手段。根据储能介质特性, 储能技术包含储冷、储热、储电等多种形式; 根据储能作用环节, 储能系统可应用于能源供应侧、用户需求侧、能源输送过程, 涉及系统全部环节。同时, 从功能上看, 储能技术的意义还包括移峰填谷、缓解能源网压力、实现能量梯级利用等方面。因此, 合理利用储能技术, 是发展太阳能分布式冷热电联供的前提保障。

\* 收稿日期: 2016-12-07

修订日期: 2017-02-15

基金项目: 广东省科技计划项目(2015B050501008); 广州市科技计划项目(201509010018, 201509030005); 国家重点研发计划项目子课题(2016YFB0901405)

† 通信作者: 宋文吉, E-mail: songwj@ms.giec.ac.cn

本文基于太阳能分布式冷热电联供系统,从系统结构和运行策略两方面出发,探讨储能技术在系统各环节中的作用,分析各种控制策略的优劣性,为储能技术在太阳能分布式冷热电联供系统的应用提供参考。

## 1 储能技术发展现状

近年来,储能市场一直保持较快增长。美国能源部全球储能数据库 2016 年 8 月更新的数据显示,全球累计运行的储能项目装机规模 167.24 GW,运

行项目高达 1227 项。根据存储与应用的不同,储能技术主要分为发电与储热两种方向,以下将根据这两个方向结合太阳能的发展对储能技术进行介绍。

### 1.1 储电技术的发展

储电技术按存储机理可分为机械储能、电化学储能和磁储能三种。机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能;电化学储能包括各类蓄电池和液流电池;磁储能包括超级电容、超导磁储能等。表 1<sup>[2-4]</sup>介绍了各种储电技术的工作特性。

表 1 各种储电技术性能

Table 1 Performance of various energy storage technologies

名称	额定容量/MW	能量密度/(W·h/kg)	功率密度/(W/kg)	效率/%	寿命/次(放电深度 80%)
超级电容	$10^{-3} \sim 1.5$	0.2 ~ 10	$10^2 \sim 5 \times 10^3$	85 ~ 98	$10^3 \sim 10^5$
铅酸电池	$10^{-3} \sim 50$	35 ~ 50	75 ~ 300	60 ~ 95	$2 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$
钠硫电池	$10^{-3} \sim 400$	150 ~ 240	90 ~ 230	>86	$<3 \times 10^3$
锂离子电池	$<8 \times 10^{-2}$	150 ~ 200	200 ~ 315	90 ~ 100	$10^3 \sim 10^4$
飞轮	$10^{-3} \sim 10$	40 ~ 230	$>5 \times 10^3$	90	$10^4 \sim 6 \times 10^4$
超导磁储能	$5 \times 10^{-3} \sim 20$	1 ~ 10	$10^7 \sim 10^{12}$	80 ~ 95	$10^4 \sim 10^5$
压缩空气储能	$10 \sim 3 \times 10^2$	-	-	40 ~ 60	$8 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$
抽水蓄能	$10^2 \sim 2 \times 10^3$	-	-	60 ~ 70	$10^4 \sim 5 \times 10^4$

抽水蓄能与压缩空气储能受到地域因素的限制,并不适用于分布式能源系统。飞轮储能维护成本低、循环寿命长、噪声小、效率高、工作温度范围宽,但易受到重力和摩擦力影响产生空转<sup>[2]</sup>。超导磁储能具有响应速度快、转换效率高、功率密度大、寿命长等优点,且没有旋转机械部件和密封问题<sup>[5-6]</sup>。超级电容作为一种功率型储能技术,其能量转换率高、充电速度快、放电深度深、损耗少,可以针对太阳能系统的波动快速做出反应,弥补了传统电池反应慢的缺点,与电池搭配使用具有很大优势<sup>[7-8]</sup>。

蓄电池是应用最为广泛的储能技术,从早期的铅酸电池到近几年的锂离子电池,一直在不断发展,但也受到初期成本高、使用寿命短等因素的限制。美国 xtreme power 以可充电干电池作为储能元件,开发了 DPR 动态电源管理系统,主要应用于新能源整合,实现削峰填谷,该系统目前有 13 个微电网、风电、太阳能利用的应用项目,其中包括与杜克能

源合作的全球最大的 36 MW 风电储能项目。锂电池、钠硫电池储能系统在日本受到了关注和研究。汤浅、三菱等机构重点研发了具有大容量、大倍率的高性能锂离子电池,而钠硫电池则被日本列为政府资助的风力发电储能电源,其中以日本京瓷公司(NGK)为代表,其与东京电力公司合作,在本国日立自动化工厂安装了目前世界上最大的 NAS 储能系统,容量为 9.6 MW/57.6 MW·h。

### 1.2 储热技术的发展

储热技术在近十年发展很快,目前全球装机总量达 3.05 GW,在装机量上排名第二。根据存储机制的不同,储热技术可分为显热储热、潜热储热和化学储热三种。显热材料价格低,但是热容低,体积较大;潜热材料(相变材料)热容较高,能等温储热,但导热系数不大;化学材料能通过化学反应储热或释放大量的热,但受到反应复杂、稳定性不足和耐久度不高等因素的限制<sup>[9]</sup>。表 2<sup>[9-10]</sup>列举了部分储热技术的各项热力特性。

表 2 各种储热技术热力性能

Table 2 Thermal performance of various thermal storage technologies

储热方式	储热材料	比热容/[kJ/(kg·K)]	相变(工作)温度/	相变潜热/(kJ/kg)
显热储能	水	4.20	0 ~ 100	N
	岩石	0.84 ~ 0.92	1000	N
	金属铝	0.87	600	N
	金属镁	1.02	600	N
	氯化钠	0.85	200 ~ 500	N
相变储能	氯化钠	N	800	492.0
	氯化镁	N	714	452.0
	RT100(石蜡)	N	100	124.0
	RT110(石蜡)	N	112	213.0
	E117(无机物)	2.61	117	169.0
	A164(有机物)	N	164	306.0
	硝酸钠	N	307	172.0
	硝酸钾	N	333	226.0
	碳酸钠	N	854	275.7
	碳酸钾	N	897	235.8
	氢氧化钾	N	380	149.7
熔融盐	40%硝酸钾+60%硝酸钠	1.50	290 ~ 550	N
	Hitec	1.50	220 ~ 600	N
	HitecXL	1.40	120 ~ 500	N

注：N 表示数据不存在或未知。

储热材料的研究目前主要集中于显热储热材料和相变材料,尤以储热密度高、结构紧凑的高温相变材料为主<sup>[11]</sup>,其中各种混合盐类可以通过在中高温工作区域内调节不同盐类的配比,以此控制物质的熔融温度,该特性引起了众多学者的关注和研究<sup>[12-14]</sup>。

## 2 储能技术在太阳能冷热电联供系统结构中的应用

太阳能分布式冷热电联供系统一般由太阳能系统、燃烧动力系统、吸收式制冷系统等多个子系统构成,其系统拓扑如图 1 所示。在该系统架构中,由天然气驱动的燃气轮机主要作辅助供能用,在太阳能不足时补充供能;用户冷负荷则全部通过吸收式制冷机组提供,而不考虑使用电制冷机组进行补充供冷。以下将针对该太阳能分布式冷热电联供系统,对储能技术在各子系统环节的应用进行分析。

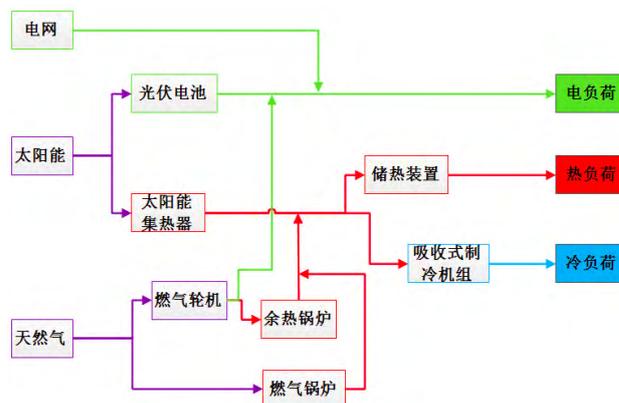


图 1 太阳能分布式冷热电联供系统

Fig. 1 Distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle driven by solar energy

### 2.1 储能技术在太阳能系统的应用

太阳能的利用可分为光伏和光热两种。光伏技术是通过光伏电池直接把太阳辐射能转化为电能。光热技术是把太阳辐射作为热源,将其热能用于供热和制冷,或者进行光热发电,实际中一般包括三种

用途：一是把热能直接用于建筑供暖或制冷；二是集中生产高温以加热工质做功发电；三是集中热量用于催化化学燃料反应，提高工质燃烧发电效率<sup>[15-20]</sup>。

由于新能源入网容易对大电网带来扰动，光伏发电并网系统需要配套相应的储能模块，这一方面能够解决光伏输出的间歇性、不稳定性等问题，另一方面也能使光伏电池保持在最佳工作点附近运行，提高系统转换效率<sup>[21-22]</sup>。应用于光伏并网的储能模块，一般以铅酸电池或者锂电池等电化学储能器件作为其基本单元，蓄电池工作过程包含以下特点：(1) 太阳能不足时蓄电池放电，太阳能充足时对蓄电池充电，充电方式属于循环、浮充混合作；(2) 充电率非常小，平均充电电流一般为  $C/50 \sim C/100$ ；(3) 放电电流小，放电时间长，频率高，容易形成过放电；(4) 一次充电时间短，蓄电池常处于欠电状态；(5) 与光伏系统配备的储能装置一般处于露天状态，工作环境比较恶劣<sup>[23]</sup>。

针对太阳能光热系统，储能技术在光热发电的应用与上述光伏发电较为相似；而在光热供热或制冷方面，储能技术则主要通过储热方式，用以调节太阳能在时间尺度上的平衡性，例如解决夜间或者阴雨天太阳能供热不足的问题。按存储时间划分，储热技术可分为长期储热和短期储热。长期储热旨在把夏季吸收的热量存储起来在冬季使用，虽然理论上能满足 100% 的用户需求，但成本过高而且缺乏有效手段；而短期储热一般以几天作为一个周期，虽然只能满足不到 60% 的用户需求，但相比常规燃料仍具有较大竞争性<sup>[24]</sup>。

## 2.2 储能技术在燃烧动力系统的应用

燃烧动力系统主要是指分布式能源系统中常用的柴油发电机、燃气轮机、微燃机、燃料电池等，其一般具有以下特点：(1) 非常接近终端用户；(2) 容量很小，一般为几十千瓦到几十兆瓦；(3) 能独立运行或者并网，一般接在 380 V 或 10 kV 线路上<sup>[25]</sup>。燃烧动力系统通过与太阳能相结合，可实现 24 小时不间断的能源供应，而储能技术是其中保持系统稳定性的关键因素。

从供电角度看，储能技术在燃烧动力系统的应用主要起到过渡作用。在太阳能因环境因素改变而导致输出变化时，由于柴油发电机、燃气轮机等设备响应速度较慢，此时需要储能装置提供电能，以满足负荷对快速响应的需求，维持发电/负荷动态平

衡<sup>[26-27]</sup>。从上述需求可知，燃烧动力系统的应用要求储能系统具备容量大、响应快等特点，因此目前应用最广的储能装置是蓄电池储能系统，但蓄电池存在初投资高、功率密度小等诸多问题<sup>[3]</sup>。

从供热角度看，燃气轮机等设备燃烧发电时释放的余热不仅可以用于回热以提高工作效率，其中低品位热能的排气、蒸汽还可用于供热供暖。燃气轮机排气温度一般为  $400 \sim 600$  ，能够满足大多数的供暖需求<sup>[28]</sup>。同时，由于燃烧动力系统工作时长，输出稳定，可按需工作，实际中较少装配储热系统，目前应用较多的储热装置为储热水箱或者蓄热水池，其成本低廉且具有清洁环保的优势。在我国西北或者个别缺水地区，也可采用地下储热方式，通过使用地源热泵等技术，把土壤作为储热材料，结合太阳能集热技术实现季节性长期储热<sup>[29-31]</sup>。

## 2.3 储能技术在吸收式制冷系统的应用

太阳能制冷系统主要采用方式包括朗肯循环、吸收式制冷循环和除湿制冷循环<sup>[32]</sup>。由于吸收式制冷具有对热源温度要求低、结构紧凑、维护方便等特点，在太阳能制冷领域备受关注，目前应用最多的是单效和双效溴化锂吸收式制冷。单效溴冷机的热源温度一般为  $80 \sim 100$  ，双效溴冷机的热源温度为  $140 \sim 160$  左右，十分适合在太阳能中低温范围的应用<sup>[33]</sup>。为解决阴雨天或夜间太阳能不足的问题，保证系统持续运行，储能技术在太阳能制冷系统同样必不可少。

由于太阳能吸收式制冷的制冷系数较低，制冷范围一般在 0 以上，常用于空气调节而不在冷库冷藏中使用，所以较少在系统冷端采用蓄冷技术，而是在系统热端采用储热技术以实现系统优化。同时，由于常用的吸收式制冷工质为水-溴化锂，因此热量的存储更多地采用显热储热、冰或者相变储热等方式。其系统一般工作原理如图 2 所示<sup>[32]</sup>，即在太阳能集热装置与吸收式循环之间设置储热装置，把太阳能吸收的热量以及其他过程所产生的余热和废热收集起来，为吸收式制冷循环充当热源使用。

从系统特点分析，夏季时段太阳能充足，吸收式制冷量大，同时冷负荷所需也较大；冬季时段太阳能不足，吸收式制冷效率低，但此时冷负荷需求也较小，由此可见太阳能吸收式制冷是符合季节变化的制冷系统，所以在太阳能吸收式制冷中很少采用跨季节的大型储热系统。

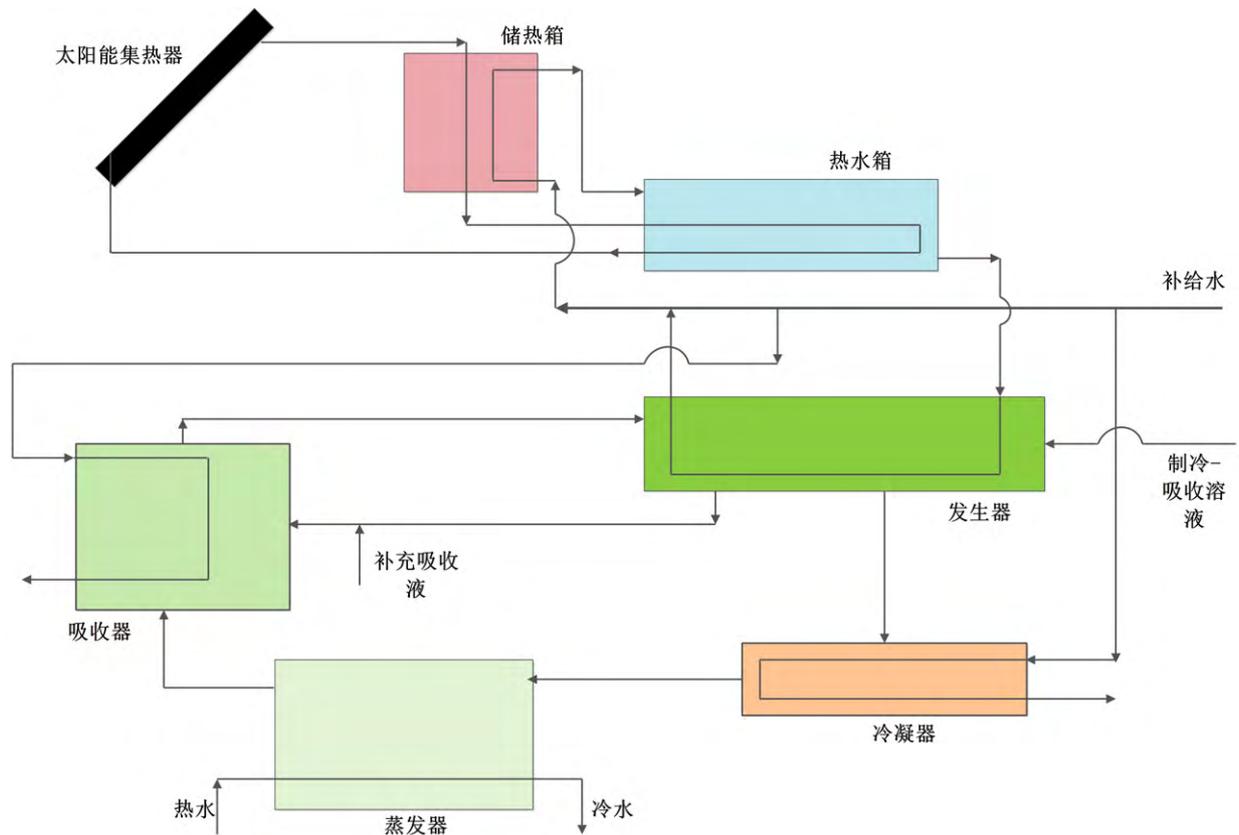


图 2 具有热能储存单元连续式太阳能吸收式冷却系统的设计

Fig. 2 Design of continuous solar absorption cooling system with thermal energy storage unit

### 2.4 太阳能技术应用现状

目前太阳能的利用主要以太阳能光伏技术和太阳能热利用技术为主，特别是光伏技术，在近年来得到快速发展。《中国新能源发电分析报告 2016》数据显示，全球光伏组件价格近 6 年下降近 80%，2015 年全球大型光伏电站度电成本约为 0.126 美元，中国大型光伏电站度电成本约为 0.109 美元。除了大型光伏电站之外，分布式电站和与建筑结合的太阳能光伏发电系统也得到起步并发展迅速。表 3<sup>[34]</sup>为我国已建成的部分建筑集成光伏系统 (building integrated photovoltaic system, BIPV) 并网发电项目。

太阳能热利用技术包括太阳能热水器、太阳能建筑 (太阳能采暖空调) 太阳能热发电等。其中热水器是太阳能热利用技术领域商业化程度最高、推广应用最普遍的技术，其他技术多数处在示范阶段。我国是世界上太阳能热水器最大生产国和消费国，2013 年我国太阳能热水器保有量为 3.1 亿 m<sup>2</sup>。20 世纪 80 年代国际能源组织 (International Energy Agency, IEA) 组织 15 个国家的专家对太阳能建筑技术进行联合攻关，欧美发达国家纷纷建造综合利

表 3 建筑集成光伏系统并网发电项目

Table 3 BIPV grid project

地点	功率 / kW	建成时间
深圳世博园	1000	2004 年
北京路灯中心大楼	140	2004 年
北京首都博物馆	300	2005 年
科技部办公楼	43	2005 年
中关村软件园	60	2005 年
北京交管局法培中心	80	2006 年
国家发改委办公楼	100	2006 年
奥运主体育场 (鸟巢)	100	2008 年
奥运游泳馆 (水立方)	50	2007 年
奥运国家体育馆	100	2008 年
北京南站	400	2008 年
广州南站	253	2010 年
保定电谷广场商务会议中心	500	2009 年
广州电视塔	20	2010 年
虹桥临空经济园区科技产业楼	57	2010 年

用太阳能示范建筑。试验表明,太阳能建筑节能率大约 75%左右,已成为最有发展前景的领域之一。太阳能热发电技术同其他太阳能技术一样,在不断完善和发展,但其商业化程度还未达到热水器和光伏发电的水平。太阳能热发电正处在商业化前夕,根据国际能源署太阳能热发电和热化学组织(Solar Power and Chemical Energy Systems)统计,截至 2016 年 2 月底,全球在建太阳能热发电站装机容量约 1.4 GW。

### 3 运行模式及控制策略

太阳能分布式冷热电联供系统同时具备分布式能源与冷热电联供的特点,其工作运行方式和控制策略也基本与这两类系统相似。一般情况下,分布式能源系统存在并网、离网两种工作模式,而冷热电联供系统则按照以热定电或以电定热的控制策略运行。本节通过分析储能技术在分布式能源与冷热电联供系统上的应用,探讨其在太阳能分布式冷热电联供系统的运行方式和控制策略。

#### 3.1 储能运行模式

太阳能分布式冷热电联供系统按照分布式能源的运行方式可分为三种类型:独立运行、并网不售电、并网售电。储能系统在其中起到了稳定供电、改善系统经济性、提高分布式发电机组可调度性等作用,在不同类型运行中各有特点<sup>[35-39]</sup>。

##### 3.1.1 独立运行

独立运行模式(也称孤岛运行),是指供能系统完全与电网、热网隔离,独立地为用户提供能源。该运行模式要求系统自身能够长期稳定地输出,考虑到太阳能系统的间歇性以及负荷功率的不确定性,为保证输出电能质量和系统安全稳定,必须配备相应的储能装置。

蓄电池作为典型的能量型储能器件,在分布式能源系统较为常用,其具有单体容量大、价格相对较低的优势,但充放电速率较慢、循环次数少,且最大输出功率小,实际应用中系统将配置多组电池模块并联以满足功率需求,这导致储能系统存在较大的容量冗余,经济性较差<sup>[40-41]</sup>。而超级电容作为功率型储能器件,具有输出功率大、充放电速率快、循环寿命长等特点,与蓄电池充放电特性具有良好的互补性<sup>[8]</sup>。因此,由蓄电池与超级电容组合的混

合储能装置目前在分布式能源与微电网领域中备受关注。

针对混合储能系统运行模式,当外部功率发生较大变化时,首先通过超级电容进行能量吸收或者释放,以此抑制能量快速变化所引起的线网波动;与此同时,结合蓄电池功率特性,逐步将超级电容承担的负荷转移到蓄电池。这一方面可以平滑蓄电池的输出,减少快速充放电对电池寿命的影响,另一方面也解决了超级电容能量密度低、不适宜长时间输出的问题<sup>[42-44]</sup>。因此,当太阳能分布式冷热电联供系统处于孤岛运行模式时,由蓄电池和超级电容组成的混合储能系统可以更好地满足功率和能量的双重需求,有效提高了系统的稳定性和经济性。

##### 3.1.2 并网不售电

并网不售电模式(也称并网不上网),是指系统与电网相连接,在太阳能输出不足时负载直接从电网调电使用,而在太阳能输出富余时太阳能供电系统并不向电网供电出售,而是储存在储能装置或直接消耗掉,可根据实际需求选择是否采用辅助供暖装置。

在并网不售电工作模式下,由于无须考虑系统输出对电网产生的冲击,储能装置更多起到存储富余能量和平衡用户需求与电费价格关系的作用,其充放电状态一般由两种工况决定:(1)在太阳能充足而负荷需求不高时,太阳能系统向储能装置充电;反之,在夜间等太阳能不足而又是用电高峰时,储能装置放电以满足负荷需求。(2)在电网电价低谷时,从电网取电向储能装置充电;在电价高峰时,储能装置放电以减少负荷对电网电力的消耗,从而有效利用峰谷电价差,降低了用户电费。在并网不售电运行模式下,储能技术能够灵活地调节太阳能冷热电联供系统、电网与用户之间的供求关系,在不改变用电习惯的前提下有效利用了太阳能资源,减少了用电费用,可提高系统使用的经济性<sup>[45]</sup>。

##### 3.1.3 并网售电

并网售电模式(也称并网上网),指系统与电网相连接,在太阳能输出不足时负载直接从电网调电使用,在太阳能输出富余时太阳能供电系统向电网供电出售,即分布式系统在电网中既是用电负荷又是供电源。这使得供电体系从单电源辐射状分布变为节点型网络状分布,是分布式能源与微电网技术的最大特色之一。

在并网售电运行模式下，储能技术对电网、分布式电源和用户侧有着不同的作用。对电网而言，储能技术可以有效发挥调峰、调频、调压等辅助服务功能。对于分布式电源侧，一方面当大量的分布式能源并网时，必定会引起电网的频率产生波动和导致部分节点电压升高，储能技术可以有效发挥调节作用，抑制电压过高，改善电网的配电质量；另一方面储能技术也可以增强系统功率的可调度性。在太阳能分布式冷热电联供系统中，常使用最大功率跟踪算法以充分利用太阳能，这将导致系统输出功率仅取决于自然条件而缺少可调度性。利用储能技术可实现一定时间上的输出功率调整，从而使系统具备一定程度的可调度性<sup>[46]</sup>。对于用户侧，除了可以实现削峰填谷的作用，储能技术还能在停电时为用户提供用电保障，发挥不间断电源的作用；而具有发电能力的用户还能将生产的电能出售给其他用户使用，在缓解电网用电高峰期供电压力的同时带来了经济上的收益<sup>[47-48]</sup>。

### 3.2 储能控制策略

太阳能分布式冷热电联供尚未建立系统的控制方法，当前的研究常借鉴冷热电联供系统的控制方式，使用以热定电和以电定热的控制策略。然而，这两种控制策略并未涉及储能系统的利用，并不适合于储能系统在太阳能分布式冷热电联供上的运行控制。因此本文从分布式能源与新能源的角度出发，以电池和超级电容所组成的混合储能系统为例，参考新能源分布式系统中关于储能技术的控制方法，为结合了储电、储热等多种储能技术在太阳能分布式冷热电联供上应用的控制策略的研究提出一个可行性方向。

基于电池与超级电容的混合储能系统，目前仍处于研究阶段，混合储能系统的拓扑结构主要有直接并联、超级电容和 DC/DC 并联、电池和 DC/DC 并联以及双 DC/DC 结构<sup>[49]</sup>。上述四种拓扑结构中，以电池和 DC/DC 变换器并联作为拓扑结构的混合储能系统得到了更为广泛的研究，提出了各种用于提高混合储能系统整体性能和使用寿命的控制策略。GLAVIN 等<sup>[50]</sup>针对光伏发电系统中的超级电容蓄电池混合储能系统，基于电池荷电状态 SOC 和负荷缺失率研究了电池 SOC 工作区间优化问题。丁明等<sup>[51]</sup>采用模糊控制方法对混合储能系统进行功率优化分配，降低了可再生能源输出功率的波动程度。

吴红斌等<sup>[52]</sup>通过建立最优潮流模型，对分布式电源的配电网进行最优控制，实现降低成本、网损和环境污染的目的。基于遗传算法的多目标优化方法也在混合储能系统中得到研究<sup>[53]</sup>。中科院舒杰等<sup>[54]</sup>将遗传算法应用到可再生能源能源分布式微网电源规划中，以能量平衡控制和成本效益为目标实现了微网电源模型的最优求解。

储能技术在太阳能分布式系统中的控制策略，主要以适应太阳能输出特性，减少系统波动，调节能量平衡以达到优化系统效率、降低成本的目的。这种方式对储电、储热等储能在太阳能分布式冷热电联供系统中的应用具有很大的参考意义。

## 4 结 论

储能技术是解决可再生能源供能和分布式能源并网问题的关键。本文针对储能技术（包括储电、储热和储冷）在太阳能分布式冷热电联供系统的应用，从系统结构和运行控制两方面出发进行了探讨和分析，结果表明储能技术在太阳能分布式冷热电联供系统中具有增加太阳能输出可调节性、保障系统稳定性、削峰平谷、平衡供求关系、实现不间断供能等作用，可为太阳能分布式冷热电联供的应用与推广提供重要的技术支撑。

### 参考文献：

- [1] 戴雨辰, 陈飞, 李宏顺, 等. 太阳能驱动的冷热电联供系统研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(9): 68-78. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.09.012.
- [2] MAHLIA T M I, SAKTISAHDAN T J, JANNIFAR A, et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 33: 532-545. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.068.
- [3] 田军, 朱永强, 陈彩虹. 储能技术在分布式发电中的应用[J]. 电气技术, 2010(8): 28-32. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2010.08.008.
- [4] 程华, 徐政. 分布式发电中的储能技术[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1609.2003.03.021.
- [5] DECHANUPAPRITHA S, SAKAMOTO N, HONGESOMBUT K, et al. Design and analysis of robust SMES controller for stability enhancement of interconnected power system taking coil size into consideration[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2009, 19(3): 2019-2022. DOI: 10.1109/TASC.2009.2018492.
- [6] JUNG H Y, KIM A R, KIM J H, et al. A study on the operating characteristics of SMES for the dispersed power generation system[J]. IEEE transactions on

- applied superconductivity, 2009, 19(3): 2028-2031. DOI: 10.1109/TASC.2009.20184953.
- [7] THOUNTHONG P, RAEL S, DAVAT B. Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2009, 24(1): 247-255. DOI: 10.1109/TEC.2008.2003216.
- [8] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 87-91. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2009.02.020.
- [9] TIAN Y, ZHAO C Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications[J]. Applied energy, 2013, 104: 538-553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051.
- [10] 李永亮, 金翼, 黄云, 等. 储热技术基础(1)——储热的基本原理及研究新动向[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(1): 69-72. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.01.007.
- [11] 韩瑞端, 王泮浩, 郝吉波. 高温蓄热技术的研究现状及展望[J]. 建筑节能, 2011, 39(9): 32-38. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2011.09.009.
- [12] ZALBA B, MARÍN J M, CABEZA L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied thermal engineering, 2003, 23(3): 251-283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
- [13] KENISARIN M, MAHKAMOV K. Solar energy storage using phase change materials[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2007, 11(9): 1913-1965. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.005.
- [14] 叶锋, 曲江兰, 仲俊喻, 等. 相变储热材料研究进展[J]. 过程工程学报, 2010, 10(6): 1231-1241.
- [15] LEWIS N S, CRABTREE G, NOZIK A J, et al. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, April 18-21, 2005[R]. US Department of Energy Office of Basic Energy Science, 2005.
- [16] WANG J F, DAI Y P, GAO L, et al. A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy[J]. Renewable energy, 2009, 34(12): 2780-2788. DOI: 10.1016/j.renene.2009.06.010.
- [17] WANG J F, ZHAO P, NIU X Q, et al. Parametric analysis of a new combined cooling, heating and power system with transcritical CO<sub>2</sub> driven by solar energy[J]. Applied energy, 2012, 94: 58-64. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.01.007.
- [18] 苏亚欣, 费正定, 杨翔翔. 太阳能冷热电联供分布式能源系统的研究[J]. 能源工程, 2004(5): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3950.2004.05.006.
- [19] 郭栋, 隋军, 金红光. 基于太阳能甲醇分解的冷热电联产系统[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1621-1624. DOI: 10.3321/j.issn:0253-231X.2009.10.001.
- [20] BOYAGHCHI F A, HEIDARNEJAD P. Thermodynamic analysis and optimisation of a solar combined cooling, heating and power system for a domestic application[J]. International journal of exergy, 2015, 16(2): 139-168. DOI: 10.1504/IJEX.2015.068216.
- [21] Bopp G, Gabler H, Preiser K, et al. Energy storage in photovoltaic stand-alone energy supply systems[J]. Progress in photovoltaics: research and applications, 1998, 6(4): 271-291. DOI: 10.1002/(SICI)1099-159X(199807/08)6:4<271::AID-PIP223>3.0.CO;2-P.
- [22] TOLEDO O M, FILHO D O, DINIZ A S A C. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: a review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(1): 506-511. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.007.
- [23] 陈维, 沈辉, 邓幼俊. 太阳能光伏应用中的储能系统研究[J]. 蓄电池, 2006, 43(1): 21-27. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0847.2006.01.005.
- [24] DINCER I. Evaluation and selection of energy storage systems for solar thermal applications[J]. International journal of energy research, 1999, 23(12): 1017-1028. DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(19991010)23:12<1017::AID-ER535>3.0.CO;2-Q.
- [25] 胡学浩. 分布式发电与微型电网技术[J]. 电气时代, 2008(12): 77-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-453X.2008.12.029.
- [26] BAROTE L, WEISSBACH R, TEODORESCU R, et al. Stand-alone wind system with Vanadium Redox Battery energy storage[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov: IEEE, 2008: 407-412. DOI: 10.1109/OPTIM.2008.4602441.
- [27] 王健强. 第五讲: 并网光伏发电系统[J]. 电力电子, 2009(4): 45-49.
- [28] 林汝谋, 金红光, 蔡睿贤. 以燃气轮机为核心的多功能能源系统基本形式与构成[J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(1): 1-10, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2889.2006.01.001.
- [29] 黄晟辉, 赵大军, 马银龙. 太阳能跨季节地下储热技术[J]. 煤气与热力, 2010, 30(12): 29-31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2010.12.009.
- [30] GAO L H, ZHAO J, TANG Z P. A review on borehole seasonal solar thermal energy storage[J]. Energy procedia, 2015, 70: 209-218. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.117.
- [31] XU J, WANG R Z, LI Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage[J]. Solar energy, 2014, 103: 610-638. DOI: 10.1016/j.solener.2013.06.006.
- [32] AGYARKO L B, MANSOORI G A. Solar absorption cooling with alkanes as phase change energy storage medium[C]//Proceedings of AIChE Spring National Meeting. Chicago, IL: AIChE, 2011.
- [33] 赵明海, 洪仁龙, 陶海臣, 等. 溴化锂吸收式制冷机在太阳能领域的应用与前景[J]. 流体机械, 2014, 42(6): 84-86, 40. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2014.06.018.
- [34] 路宾, 郑瑞澄, 李忠, 等. 太阳能建筑应用技术研究现状及展望[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2013.10.004.
- [35] ROBERTS B P, SANDBERG C. The role of energy storage in development of smart grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1139-1144. DOI: 10.1109/jproc.2011.2116752.
- [36] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty[J]. IEEE transactions on power systems, 2011, 26(3): 1651-1658. DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2089541.
- [37] WADE N S, TAYLOR P C, LANG P D, et al. Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a

- future smart grid[J]. Energy policy, 2010, 38(11): 7180-7188. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.045.
- [38] SWIDER D J. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2007, 22(1): 95-102. DOI: 10.1109/TEC.2006.889547.
- [39] HARTIKAINEN T, MIKKONEN R, LEHTONEN J. Environmental advantages of superconducting devices in distributed electricity-generation[J]. Applied energy, 2007, 84(1): 29-38. DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.04.011.
- [40] 彭思敏, 曹云峰, 蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 38-43.
- [41] RYDH C J, SANDÉN B A. Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: performance and energy requirements[J]. Energy conversion and management, 2005, 46(11/12): 1957-1979. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.10.003.
- [42] ZHOU H H, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE transactions on power electronics, 2011, 26(3): 923-930. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2095040.
- [43] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
- [44] DOUGAL R A, LIU S, WHITE R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2002, 25(1): 120-131. DOI: 10.1109/6144.991184.
- [45] 侯健敏. 多因素影响的中国分布式能源并网策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [46] 黎永华. 结合储能的并网光伏发电对电网的调峰作用分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2012.
- [47] MISHRA A, IRWIN D, SHENOY P, et al. Scaling distributed energy storage for grid peak reduction[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Future Energy Systems. Berkeley, California, USA: ACM, 2013: 3-14. DOI: 10.1145/2487166.2487168.
- [48] MOHD A, ORTJOHANN E, SCHMELTER A, et al. Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge: IEEE, 2008: 1627-1632. DOI: 10.1109/ISIE.2008.4676896.
- [49] ANDERSSON T. Alternative energy storage system for hybrid electric vehicles[D]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2004.
- [50] GLAVIN M E, HURLEY W G. Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Solar energy, 2012, 86(10): 3009-3020. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.005.
- [51] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
- [52] 吴红斌, 蔡亮. 基于改进 Tabu 搜索算法的含分布式电源配电网最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2012.09.014.
- [53] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[M]//Schoenauer M, Deb K, Rudolph G, et al. Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 849-858. DOI: 10.1007/3-540-45356-3\_83.
- [54] 舒杰, 张先勇, 沈玉梁, 等. 可再生能源分布式微电网电源规划方法及应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 675-680.

#### 作者简介：

杨昌儒 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事冷热电复合储能技术研究。

宋文吉 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大规模储电系统及其控制技术研究。