

· 专题一:双清论坛“分布式能源中的基础科学问题” ·

多能源互补分布式能源的研究基础与展望^{*}

杨勇平^{**} 段立强 杜小泽 王晓东 徐超

华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206

[摘要] 基于第233期双清论坛关于多能互补分布式能源系统基础研究的学术研讨,本文分析了分布式能源系统的发展现状、未来发展趋势及我国发展分布式能源系统面临的困境和挑战,凝练了发展多能源互补分布式能源系统亟需解决的三个关键科学问题,分别是多能源互补的能质能势理论;多能互补的协同转化与能势耦合机制;多能互补的源—荷变化规律与主动调控机制。提出了未来5~10年分布式能源发展的重点资助方向及建议。

[关键词] 分布式能源;多能互补;储能;系统集成;能源梯级利用;能质能势

能源与环境问题是长期以来制约我国经济社会发展的“瓶颈”,发展先进供能系统是实施我国节能减排战略的重大需求,关系到美丽中国的建设。分布式能源系统是位于或临近负荷中心,但不以大规模、远距离输送电力为主要目的,能够满足环保要求的发电系统或有电能输出的多联产供能系统^[1,2],兼具高效、环保、经济、可靠和灵活等特点。它可将传统“源—网—荷”间的刚性链式连接转变为便于调控的源—荷柔性连接,是集中式供能系统不可或缺的补充,对于国家能源的安全起到至关重要的作用,是实施国家安全战略的重要举措。近年来,委内瑞拉、乌克兰、纽约、伦敦的大停电事故更加凸显了分布式能源系统的重要性。我国2014年政府工作报告中首次提出“发展智能电网和分布式能源”,把发展分布式能源提升到国家战略高度。发展多能源互补分布式能源能满足国家能源结构调整与节能减排的战略需求。分布式能源系统具有燃料多元化的特点,不仅可以采用天然气、氢气为燃料,还可以利用太阳能、生物质等可再生能源,实现其就地生产、就地消纳。与可再生能源结合的多能源互补的分布式能源系统处于能源可持续发展前沿,是我国实现能源可持续发展的必由之路。

围绕“分布式能源中的基础科学问题”,2019年5月7~8日,国家自然科学基金委员会工程与材料



杨勇平 华北电力大学教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,国家首批“万人计划”中青年科技创新领军人才。现任华北电力大学校长,中国工程热物理学会副理事长,国务院学科评议组成员,国家能源专家咨询委员会委员。主要研究领域为火力发电节能理论与方法、电站空冷技术、先进能量系统集成与优化、多能源互补系统等。作为首席科学家主持2项国家“973计划”项目及国家自然科学基金创新群体项目等多项国家级和电力行业重大重点科研项目。已发表SCI论文240余篇,获国家科技进步二等奖2项,教育部科技进步一等奖2项。

科学部、化学科学部与政策局联合召开了第233期双清论坛,邀请了来自全国各高等院校、中国科学院各科研院所和海外知名大学等24个单位的38位专家学者。与会专家对当前分布式能源发展的现状、趋势,以及相关科学问题进行了系统的梳理,并探讨了前沿研究方向和科学基金的资助战略。

1 分布式能源发展现状、趋势和挑战

传统分布式能源系统多以燃气机组、余热锅炉、吸收式制冷为主,通常以天然气作为燃料,在提供电能的同时,也满足用户的冷热需求。但是,由于微小型动力循环效率低,以燃气轮机或内燃机作为原动机的传统分布式能源系统效率低,在容量较小时尤为突出。此外,燃料直接燃烧的燃料化学能利用方

收稿日期:2020-03-30;修回日期:2020-05-09

^{*} 本文根据第233期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者,Email: yyp@ncepu.edu.cn

式不可逆损失大,从根本上导致了传统的分布式能源系统能量利用效率低。

分布式能源系统未来有更多种能源选择。它可以利用包括天然气、氢气、风能、太阳能、生物质能、地热能等多种能源,还可以与余热、余气等能源形式耦合互补。由于利用的能源形式不同,未来分布式能源系统形式更加多样,设计差异大。

引入风能、太阳能等可再生能源的多能互补的分布式能源系统,一方面可以解决风能、太阳能等可再生能源的波动性和间歇性问题,另一方面也可减少传统分布式能源的化石能源消耗。此外,采用固体氧化物燃料电池或质子交换膜燃料电池为原动机的新型分布式能源系统由于其发电效率高、燃料适应性强(如固体氧化物燃料电池)、效率受系统发电容量影响较小、产物环保等特点受到众多学者关注。

1.1 分布式能源系统的发展现状

(1) 国外发展现状

美国是分布式能源发展最早的国家(1978年)^[3],截至2016年已建成6000座分布式能源电站,预计2020年分布式电站装机的总容量达到1.87亿千瓦,占全国总装机容量29%,目前已发展到多能互补分布式能源阶段^[4]。

日本分布式能源项目以热电联产和太阳能光伏发电为主,装机容量约3600万千瓦,占全国总装机容量的13.4%。日本计划在2030年前达到分布式发电量占总发电量20%的目标。截至2019年4月,日本已通过Ene-Farm项目安装30万个家用燃料电池—微型热电联供单元,在商业上取得了极大的成功。

欧盟分布式能源发展处于世界领先水平,德国预计2020年前投资30000个项目,总装机达到277万千瓦,使燃气分布式发电量翻一番,达到全国总发电量的25%。英国通过大量激励政策扶持联供系统的发展,已建成1000余座分布式冷热电联供系统。截至2019年4月,欧盟通过Ene-field和PACE等项目安装1万个燃料电池—微型热电联供单元,将在2022年增至10万个。

(2) 国内发展现状

我国的分布式能源起步较晚,截至2019年底,我国天然气分布式装机容量约2400万千瓦,主要分布在京津唐、长三角和珠三角地区。比如广州大学城、上海浦东机场,北京燃气集团调度中心大楼、上海黄浦中心医院等。预期到2020年天然气分布式发电容量达到5000万千瓦,在目前基础上翻一

番。从发展质量上而言,区域分布式能源项目较多还是在热电联产层面,没有考虑冷热电三联供和多能互补。

1.2 分布式能源系统的未来发展趋势

(1) 受节能减排政策的影响,能源供应由传统能源驱动向可再生能源驱动转变。

传统分布式能源系统多是化石能源间的互补,存在燃料燃烧过程焓损失大等问题,而目前可再生能源效率低、成本高、大规模利用困难等问题仍难以解决,二者集成则可以实现双赢,成为新的发展方向。多能互补和储能技术分别是传统能源转换和解决可再生能源间歇性的重要研究方向。

(2) 在能量转化方面,能量传递与转化过程更加新颖、复杂和多向。

储能实现能量跨时间的传递,智能电网集中式与分布式跨空间的能量传递,传递方向趋于多向互动;考虑到内燃机、燃气轮机等热功转换系统热功转换效率随系统容量减小而降低,由热功转化向包括光电转化、化学能改质、电化学转化等的更多能量转化形式转变是未来的发展方向。电化学过程、热化学过程、热声转化过程等使得分布式系统更加高效环保。目前质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池等电化学转化设备已经初步实现商业化。

(3) 储能分布式能源系统中将扮演越来越重要的角色。

分布式能源系统存在能量的间歇性、分布不均匀以及波动性大等特点。储能系统可以解决发电功率和负荷功率之间、不同类型电源响应时间之间的不匹配问题,增强可再生能源的可调度性,提高分布式能源系统的供能质量、稳定性和运行效益。

针对锂电池储能技术,降低成本及提高寿命是未来发展方向。而对于化学储能装置,依托电化学转化实现新能源电力制氢、甲烷及液体燃料;依托热化学转化实现高品位热能的高效存储是两个重要发展趋势。

(4) 在能源需求方面更加多元化。

传统固定应用的冷、热、电负荷波动特性较为稳定,负荷预测技术成熟。但由于移动应用(电动、氢/混合动力汽车,车载应急电源、可移动冷—热—电联供)及化工原料需求的增加,负荷波动加剧,需求倾向于多元化。因此,对多能互补分布式能源系统不稳定性、可再生能源的输入及用户负荷的精准预测和评估成为了设计多能互补分布式能源系统的前提^[5]。

(5) 不断涌现的多种以不同能源为核心的新型高效分布式能源概念系统。

① 基于氢气(单元化的低温燃料/电解电池)的高效冷热电联供系统^[6]

氢气在多能互补分布式能源中既可以作为清洁能源,又可以作为储能介质,与燃料/电解电池结合后可灵活调节分布式能源系统能源产品(冷、热、电、氢)输出比例,更好匹配用户用能特性。单元化燃料与电解电池(使用温度 80~250℃)可有效降低成本。但由于该系统对氢气的依赖,稳定的氢气来源和安全、经济、高效的储氢设备是该系统的实施难点。

② 基于碳基气液燃料(可逆固体氧化物电池)的高效冷热电联供系统^[7]

可逆固体氧化物燃料电池(使用温度 650~850℃)以甲烷等碳基气体液体作为燃料,具有高效、燃料灵活、热电(冷)联产、寿命长等特点,其独特的陶瓷材料体系可同时保证高效发电与电解。此外,该系统可通过存储电解产生的氢气与燃料燃烧产生的 CO₂ 反应生成的甲烷等碳基燃料来实现 CO₂ 回收。与基于氢气的高效冷、热、电联供系统相比,碳基气液燃料存储、输运和开发的成本更低,同时可实现二氧化碳循环利用,减少碳排放。

③ 高比例可再生能源驱动的多能源领域互联互通的分布式能源系统

集成区域内多种能源供应以应对电力、交通、化工、供热等日益增加的多元需求。以电化学转化装备为核心的“能源路由器”,可实现电网、气网双向交互,连接不同能源领域应对对可再生能源的不确定性。

(6) 与泛在电力物联网深度融合进一步提升分布式能源系统性能

在系统控制方面,与泛在电力物联网深度融合,依靠“互联网+”,集各类分布式电源、储能设备于一体,通过智能管理和协调控制,最大化地提高分布式能源的效率,同时减少对大电网的影响^[8]。将分布式发电融入能源互联网,通过开展配售电、热、冷等业务,成立区域售电、售热、售冷一体化能源服务公司,实现发、配、售一体化,实现区域综合能源服务,满足用户多样化和定制化的需求。

1.3 我国发展分布式能源系统存在的困境和挑战

(1) 经济性依然不容乐观

主要体现在核心设备靠进口,投资成本大、回收周期长、设备运行及燃料成本过高(国内天然气发电成本是煤炭发电成本的 2~3 倍)^[9],机组性能与用

户用能特性匹配不完善等方面。我国目前还难以实现分布式能源成套设备的自主生产,关键设备和控制系统尚需进口,设备购置费用约占到分布式能源系统固定投资成本的 60%左右。同时,由于本地化的经验丰富的工程师比较稀缺,天然气分布式能源项目设备安装及调试费用也很大,安装及调试成本会占到设备总成本的 20%左右。

(2) 相关核心技术有待突破,核心装备需国产化但研发周期长

天然气分布式能源系统涉及多个技术领域,有待提升的技术体现在电网技术(智能电网)和核心装备上。天然气分布式能源系统的核心设备主要包括燃气轮机,余热锅炉,压缩式制冷,吸收式制冷,蓄冷、蓄热设备以及控制系统和设备。所有这些设备中,目前国内在技术上还与国外有较大差距的主要是燃气轮机的制造、超低温制冷系统和大面积集中供冷系统的控制、微型燃机的离心压气机和旋转材料等方面。其中,燃气轮机设备国内研究力量不足,现在市场上 90%以上机组是从国外进口,需进一步提升核心设备的国产化程度。国产燃料电池性能寿命与国外差距显著。

(3) 机组或系统设计 with 用户用能特性不匹配

分布式冷、热、电联产系统往往近用户设置,极易受用户冷、热、电需求变化的影响,系统设计容量与实际负荷的适配度存疑,动力和制冷设备经常大幅度偏离额定工况,运行小时数低,导致系统全工况性能显著降低,年节能率不高。同时,由于区域用能特性(电、热、冷等负荷)随区域类型变化大,模块化设计系统难以同时满足不同用能特性,定制化系统设计可能成为未来主流,但会增加设计成本。

2 多能源互补分布式能源的关键科学问题

面向高效、清洁和低碳的分布式能源系统的国家重大需求,从领域渗透与学科交叉的角度,针对目前分布式能源系统节能率低的科技难题,以多能源互补的能势匹配的清洁能源生产为突破口,以能的综合梯级利用理论研究为主线,探索研究多能源互补的分布式能源系统中能的综合梯级利用、高效能量转换、余热利用、能量储存和变工况调控的原理与方法。具体的科学问题包括以下三个方面。

2.1 多能源互补的能质能势理论

能量转化既包括能量数量的变化又包含能质的变化,也是热力学第一、第二定律的内涵;而能源转化效率的高低则取决于能质损失(作功能力损失)的

大小,而能量转化的方向和速率,这取决于能量势差的大小,也就是能质变化的原因,这是能源转化的本质与客观规律。在多能互补系统中,与单一化石能源不同,有化石燃料、热能及太阳能、风能等可再生能源的输入,能量转化的方向和速率取决于它们之间的能势差。化石能源可以用能质与焓的比值表示,热能的能势可以用卡诺循环效率来表示。目前,可再生能源的能势表征亟待研究。基于多种能源能势表征基础上,探究能量转化过程品位的变化规律,揭示多能互补过程不可逆损失,进而指导多能源之间的互补与能势耦合。

传统的热功转换研究,受制于卡诺循环效率限制。多能互补分布式能源系统研究尝试突破卡诺定理框架,寻求新理论和方法。主要分为三个层面的探索(如图1所示)。

(1) 输入化石燃料与可再生能源具有不同的能势,通过多能互补、能势耦合,实现可再生能源的提质增效,同时减少化石能源能质损失。

(2) 通过燃料化学能的新型转化方式,有序释放化学能,减小了热功转换过程的能质的损失。

(3) 通过燃料化学能与热能的逐级释放,以电、热、冷的形式实现能量的梯级利用。

因此多能互补能势耦合,实现能的梯级利用是当前多能互补分布式能源系统的关键科学问题。

2.2 多能互补的协同转化与能势耦合机制

多能互补系统协同转化与能势耦合机制包括三部分内容:

(1) 太阳能与化石燃料实现协同转化:在多能互补的源头,如何实现化石能源与可再生能源的源头互补至关重要。以天然气与太阳能为例,如图2所示,天然气与太阳能通过热化学转化,将400℃中温太阳能提升到氢燃料、合成气的化学能,降低系统

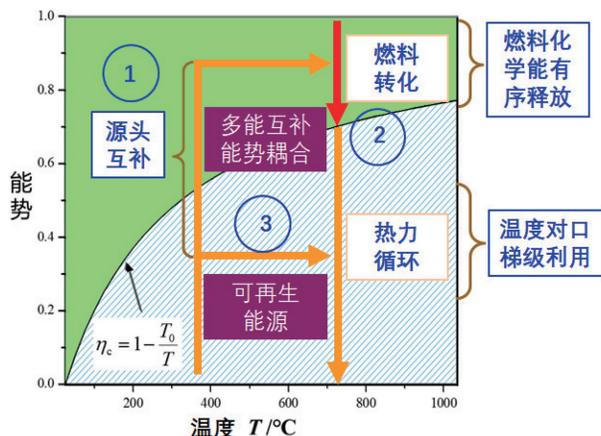


图1 多能源互补分布式系统互补原理

能质损失,同时实现燃料化学能源头节能与太阳能提质增效。而太阳能能势、燃料化学能能势、燃料转化 Gibbs 自由能品位、热能品位的相互关系对于多能源协同转化至关重要。为此,揭示太阳能与化石燃料光热化学协同转化耦合机制就尤为重要。

(2) 混合动力实现能势匹配:包括多元化燃料(输入端可包括天然气、合成气和氢气等燃料)通过燃料电池(如固体氧化物燃料电池及熔融碳酸盐燃料电池)以及微型燃气轮机混合动力能势匹配,进而揭示多元化混合动力系统能效提升机制。

(3) 热化学储能实现提质增效:中高温热化学储能能质提升机制,通过热化学储能传热、传质及化学反应协同强化,实现热能品位提升(如图3所示);研究热化学储能过程调控机制,灵活匹配分布式系统需求,实现能量梯级利用。

2.3 多能互补的源—荷变化规律与主动调控机制

多能源互补的分布式系统,具有可再生能源和化石能源输入,太阳能等可再生能源兼具周期性和随机多时间尺度波动特性。而多元化的用户需求也会受社会活动和环境气象条件影响,兼具周期性和随机波动特征。在理解系统跨时间尺度输入、输出负荷动态特性的基础上,需要揭示化石能源与可再生能源的全工况能质互补特性与匹配规律,多能互补输入和冷热电负荷的惯性时间尺度及其动态特性。这是多能互补分布式能源系统调控的关键基础。

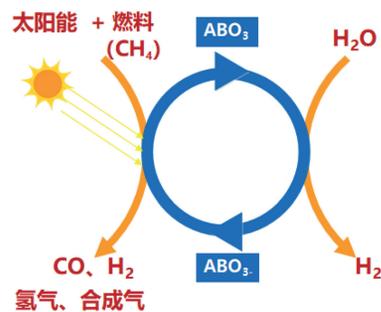


图2 太阳能与天然气热化学协同转化原理

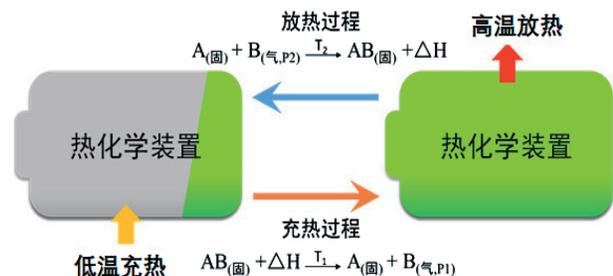


图3 中高温热化学储能能质提升原理

深入研究多能互补能量转化传递过程对系统稳定性的影响机制,有效利用化石能源能量转化传递环节迟滞性和变工况特性,实现用户负荷相匹配的电/冷/热输出。揭示基于多能互补分布式能源系统中化石能源协同转化过程环节迟滞性和变工况特性的主动调控机制,借助储能过程实现源—荷解耦,以及协同转化过程的过程匹配与变工况调节,在满足用户负荷需求的前提下,进行系统全工况能效最优的主动调控(如图 4 所示)。

3 已有研究基础

在国家自然科学基金委员会和国家科技部、教育部等部门项目资助下,从理论研究、关键技术研发、典型系统构建等开展研究^[10-12],极大地推动了我国分布式能源系统的发展。

(1) 分布式能量系统集成理论和设计框架研究^[13]

在集成理论的研究上,提出了“多源输入,综合互补;品位对口,梯级利用;多元输出,分配得当”的集成思路和设计原则,充分体现分布式能量系统本质特征。集成原理如图 5 所示。

“多源输入”指输入分布式能量系统的能源可能不止一种,有油或天然气等不可再生能源,也会有太阳能、生物质等可再生能源,不同能源在利用过程中能量释放品位不同,温度等级不同,因而当有多种能源输入到分布式能量系统中时,要合理分配,按照各种能源的特点、品位,分别集成到系统的不同部位,各能源之间进行有效的互补集成,取长补短。

“综合互补”可以是不可再生能源之间、不可再生能源与可再生能源之间以及可再生能源之间的互补集成。不可再生能源与可再生能源之间的互补可以减少分布式能量系统对化石能源的依赖并充分利

用可再生能源;还可以是可再生能源利用方式之间的互补集成,如太阳能—风能—水能互补集成分布式能量系统,这样互补集成可以克服太阳能、风能、水能各自单独使用时的缺陷,提高供电可靠性和供电质量。

基于以上集成思想和框架,可以构建从常规分布式能量系统(如冷、热、电联供系统)到集成储能系统、可再生能源利用以及污水资源化处理的广义分布式能量系统。

(2) 分布式能源系统评价准则研究^[14-16]

以分布式能量系统的经济性、可靠性、污染物指标以及 CO₂ 排放指标作为分项评价指标,建立了分布式能量系统综合性能评价体系,采用模糊识别的方法对分布式能量系统进行研究,来评价分布式能量系统的优劣。案例分析结果表明此方法是可行的。当然,当所选取的分布式能量系统的分项指标更多些,考虑得更全面时,综合评价的结果会更准确。

经济性指标:采用动态经济分析的方法,计算全寿期内各种供能方式的总费用。

供电可靠性指标:采用统计的方法,得出各供电方式的可靠性数据。

污染物指标:在满足同样需求的前提下,分别计算各种供能方式的污染物排放量,这里的污染物主要是指 SO₂ 和 NO_x,污染物的排放量取两种污染物的排放量之和。

CO₂ 排放指标:考虑 CO₂ 减排的压力,所以将各种供能方式的 CO₂ 排放量单独作为评价指标。

基于以上综合评价思路和方法,对于可集成于分布式能量系统中的压缩空气蓄能电站进行了综合评价研究,通过容量效益、能量转换效益、环保效益和动态效益等进行综合性量化评价研究。

(3) 典型分布式能量系统研究和发电系统优化研究^[17-21]

以某办公大楼为例,分析了该大楼分别采用分

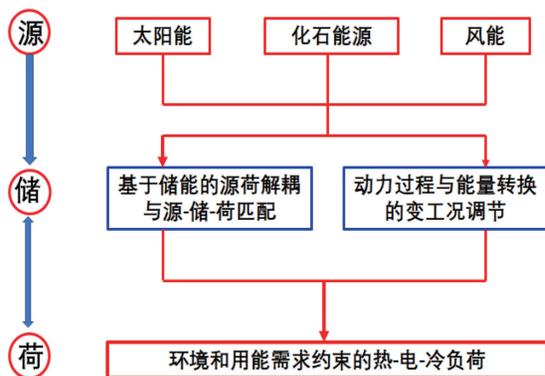


图 4 多能互补分布式系统主动调控原理

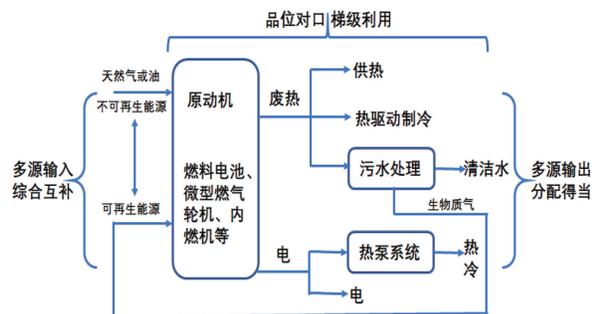


图 5 分布式能源系统集成原理简图

布式能量系统方案 and 传统供能方案的经济性。在现有的电力市场条件下通过改变机组造价和天然气价格等,对分布式能量系统进行了敏感性分析,进一步分析了分布式能量系统具有的经济性优势,论证了它与大电网供电的相互补充关系。通过分析与大电网联接的可控分布式发电与大电网的供电年费用,建立了与大电网联接的可控分布式发电经济性判断模型和最优备用容量模型,在合理利用经济判断的基础上,对分布式发电的备用容量进行了优化。案例计算表明,模型正确可行,具有较强的适用性。

设计了以微燃机为核心的冷热电联供系统并建立了该系统变工况性能分析模型。结合具体算例,对该联供系统在采用“以冷(热)定电”的模式下变工况运行时的热力性能进行了计算分析,得出了通过改变发电功率、回热度、补燃量调节冷热负荷时系统热力性能变化的相关规律,指出了提高联供系统变工况性能的方法。

基于总能系统集成思想,研究了采用回注蒸汽措施对回热型微燃机性能影响,并结合具体算例进行了计算分析。研究表明,回热循环与回注蒸汽循环可以互补,匹配关系良好,通过回注蒸汽可使回热型微燃机的效率与比功均得到显著提高。同时揭示了回热与回注蒸汽两者整合优化的基本规律:在回热度一定时,发电效率随着回注比增大而增大,在某点效率达到最大值,超过此点时,效率开始下降;在回热度不同时,回热度越大回注蒸汽后可达到的最大效率值越高。

(4) 分布式能源站示范—双源可逆型供暖(空调)系统的理论和实验研究^[22-24]

以“单耗分析”理论为基础,建立了针对以天然气为燃料的分布式热、电、冷三联产系统的两种常见运行模式下的多热源、多冷源的燃料单耗模型和成本单耗模型,并利用该模型进行了案例计算,计算结果能够清楚地表明系统各个环节(设备)燃料附加单耗的分布,并对计算结果进行了分析,为今后系统设备节能降耗,系统优化运行奠定了基础。

双源方案的供暖原理如图6所示。在双源供暖空调站设置热电联产发电机组,它是由发电机和任一型式适合热电联产的热机构成。这一热电联产机组产出热能和作为中间产品的电能。搭建了以内燃机为原动机的分布式能量系统实验平台,并与生物质气化系统相连,除了供热、供冷实现了双源特征外,使得能量输入端也实现了双源。因而又形成了

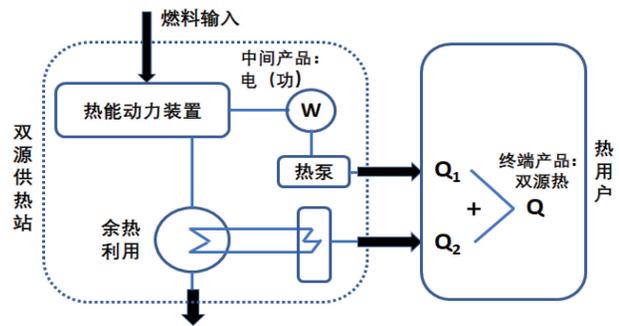


图6 双源方案的供暖原理

双燃料源互补的系统。

4 重点发展方向及建议

基于上述分析,本文总结出未来重点研究方向及建议。

4.1 重点研究方向

(1) 分布式能源系统与能源网络的多尺度建模及全工况协同集成理论;

(2) 化学能梯级定向协同转化;

(3) 太阳能能质与能势匹配及全光谱耦合利用;

(4) 分布式能源系统能量的高效传输与存储;

(5) 储热材料性能强化与储热过程优化;

(6) 界面能质传递与电化学耦合;

(7) 多能互补系统与能源网络的能势匹配与能量梯级利用;

(8) 冷热电多能流集成机理、全工况动态特性与多目标协同优化控制;

(9) 基于大数据机器学习的分布式能源系统优化及性能预测;

(10) 分布式能源利用中的机制和政策驱动。

4.2 建议

(1) 高度重视我国分布式能源研究现状与国家能源生产和消费变革对我国分布式能源研究提出的新要求。根据我国分布式能源研究现状,整合国内研究队伍,发扬我国分布式能源研究工作大力协作、共同攻关的优良传统,组织攻克关键难点问题,为我国实施节能减排战略,构建清洁低碳、安全高效的能源体系奠定基础。

(2) 根据分布式能源涵盖了材料、物理、化学、力学、热学、机械、电力、电子等多个学科的基础研究与应用研究的特点,国家自然科学基金委员会从全局出发布置一些与分布式能源基础研究紧密相关的关键难点问题攻关,以期尽快获得一批突破性

的成果。

(3) 充分考虑我国分布式能源研究的特点,并结合分布式能源基础研究的重要性和长期性,利用相关项目持续支持,获取一批高水平的研究成果、培养形成一支高水平的分布式能源研究团队,对我国在分布式能源乃至整个能源领域的研究起到积极的推动作用。

5 结 语

基于本次双清论坛,本文梳理出分布式能源基础研究的关键科学问题,总结了我国在分布式能源领域已具备的研究基础,并提出了未来重点研发方向,以及在研究资助模式、学科交叉和研究组织方面的相关建议。分布式能源系统的发展,有赖于瞄准国际学科前沿,针对清洁燃料高效电化学生产利用、热化学储热理论、多能互补系统中多种能量耦合机制和多情景多模式多能互补分布式能量系统的最优设计方法等核心科学问题开展深入、系统的研究,进而为新型分布式能源系统的发展提供理论和技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 杨勇平,徐二树. 分布式能量系统. 现代电力, 2007, 24(5): 72—76.
- [2] 杨勇平. 分布式能量系统. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [3] 邢磊,王宇博. 美国分布式能源发展现状与启示. 化学工业, 2015, 33(10): 7—10.
- [4] 金东,马宪国. 国内外分布式能源的发展. 上海节能, 2017, 4: 177—180.
- [5] Ma WW, Fang S, Liu G, et al. Modeling of district load forecasting for distributed energy system. Applied Energy, 2017, 204: 181—205.
- [6] Paul B, Andrews J. PEM unitised reversible/regenerative hydrogen fuel cell systems: State of the art and technical challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 585—599.
- [7] Zhang XW, Chan SH, Li GJ, et al. A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, 2010, 195(3)(SD): 685—702.
- [8] Zhang XS, Yu T, Xu Z, et al. A cyber-physical-social system with parallel learning for distributed energy management of a microgrid. Energy, 2018, 165: 205—221.
- [9] 陈飞. 中国天然气分布式能源发展现状及建议. 石油石化节能, 2016, 6(12): 59—62.
- [10] 金红光,隋军,徐聪,等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150—3160.
- [11] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计. 电网技术, 2018, 42(06): 1687—1696.
- [12] 董福贵,张也,尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3214—3223.
- [13] Duan LQ, Yang YP, Xu ES, et al. Theoretical study on integration mechanism of distributed energy system. international conference of ECOS, Greece-Athens, 2006, 7: 1285—1294.
- [14] 刘殿海,杨勇平,杨昆,等. 分布式能量系统的综合评价. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 382—384.
- [15] 刘文毅,杨勇平. 压缩空气蓄能电站综合效益评价研究. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 373—375.
- [16] 刘文毅,杨勇平,宋之平. 用于分布式能量系统的微型压缩空气蓄能(SCAES)系统性能计算与优化. 工程热物理学报, 2006, 27(6): 93—96.
- [17] 毕庆生,宋之平,杨勇平. 分布式能量系统在我国未来20年能源发展战略中的机遇、方式和地位. 可再生能源, 2005, 121(3): 1—5.
- [18] 刘殿海,杨勇平,杨昆等. 分布式发电优化配置. 工程热物理学报, 2006, 27(z1): 9—12.
- [19] 刘殿海,宋之平,杨勇平,等. 分布式能量系统的案例分析. 华北电力大学学报, 2006, 33(1): 67—71.
- [20] 和彬彬,杨勇平,段立强. 微型燃气轮机冷热电联供系统变工况性能研究. 热能动力工程, 2008, (6): 58—62 + 132—133.
- [21] 和彬彬,段立强,杨勇平. 回注蒸汽型微型燃气轮机系统研究. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 1—5.
- [22] 毕庆生,宋之平,杨勇平,等. 分布式冷热电三联供系统的“单耗分析”模型研究. 工程热物理学报, 2007, 28(6): 905—908.
- [23] 宋之平. 一种值得关注的城市天然气消费方式双源可逆供暖(空调)系统. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 181—184.
- [24] 杨勇平. 分布式能量系统. 北京: 化学工业出版社, 2011.

Research Foundation and Prospect on Distributed Energy System with the Complementation of Multiple Energy Sources

Yang Yongping* Duan Liqiang Du Xiaoze Wang Xiaodong Xu Chao
School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206

Abstract Based on the academic discussions of the 233rd Shuangqing Forum on fundamental research of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources, this paper analyzes the development status, future development trend of distributed energy systems and challenges of developing the distributed energy system in our country, further identifies three key scientific problems to be solved for enhancing the complementation of multiple energy sources that includes the energy quality and energy potential theory, the collaboration conversion and energy potential integration mechanism, the variation rules of source-load and active regulation mechanism of the complementation of multiple energy sources, and proposes key funding directions and suggestions of the next 5 to 10 years.

Keywords distributed energy; multi-energy complementation; energy storage; system integration; cascaded utilization; energy quality and energy potential

(责任编辑 张强)

· 成果快报 ·

我国学者在焦亡抗肿瘤免疫机制研究方面取得进展

在国家自然科学基金项目(批准号:81788101)等资助下,北京生命科学研究所/清华大学生物医学交叉研究院邵峰教授团队与北京大学化学与分子工程学院刘志博教授团队合作,在焦亡促进抗肿瘤免疫效应及相关机制研究等方面取得进展,相关研究成果于2020年3月11日和4月17日分别以“生物正交系统揭示焦亡抗肿瘤免疫功能(A bioorthogonal system reveals antitumour immune function of pyroptosis)”、“细胞毒性淋巴细胞颗粒酶A水解消皮素B促进靶细胞焦亡(Granzyme A from cytotoxic lymphocytes cleaves GSDMB to trigger pyroptosis in target cells)”为题,在《自然》(*Nature*)、《科学》(*Science*)上发表。论文链接:<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2079>、<https://science.sciencemag.org/content/early/2020/04/15/science.aaz7548.long>。

细胞焦亡(pyroptosis)是一种新型细胞死亡形式。最初,该过程被认为是依赖于半胱氨酸蛋白酶(caspase)1/4/5/11的活化发挥天然免疫抗感染作用。研究团队通过揭示焦亡本质及其发生机制,将焦亡定义改写为“依赖于消皮素(Gasdermin)蛋白家族形成质膜膜孔的可调控细胞死亡”。研究发现,Gasdermin蛋白家族是细胞焦亡的直接执行蛋白,活化caspase通过切割Gasdermin蛋白释放出具有结合膜磷脂上膜打孔活性的结构域,从而诱发细胞焦亡。其中,焦亡相关的caspase自剪切活化位点为P10亚基N端。

该团队通过应用肿瘤原位可控激活细胞焦亡技术,证实细胞焦亡可高效诱导机体产生抗肿瘤免疫活性,阐明了细胞毒性淋巴细胞诱发焦亡的确切机制(颗粒酶A-消皮素B途径,GZMA-GSDMB通路),在体证实了GZMA-GSDMB通路活化具有增强anti-PD1的抗肿瘤免疫效应。

这些研究为开展肿瘤靶向精准医疗、靶向药物开发以及应用于肿瘤研究中的相关新技术提供了重要依据。

(供稿:医学科学部 冷玉鑫 张凤珠)

* Corresponding Author, Email: yyp@ncepu.edu.cn