

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.11.007

冷热电三联供分布式能源系统研究进展

Advance in study on CCHP distributed energy system

孙思宇¹, 于成琪², 孙涛³, 李新建³, 卫奕⁴, 谭敬波², 张军涛²
SUN Siyu¹, YU Chengqi², SUN Tao³, LI Xinjian³,
WEI Yi⁴, TAN Jingbo², ZHANG Juntao²

(1. 华电电力科学研究院有限公司北京分院, 北京 100070; 2. 华电国际电力股份有限公司深圳公司, 广东 深圳 518000; 3. 华电广东佛山能源有限公司, 广东 佛山 528000;
4. 华电广东顺德能源有限公司, 广东 佛山 528000)
(1. Beijing Branch, Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Beijing 100070, China;
2. Shenzhen Company of Huadian Power International Corporation Limited, Shenzhen 518000, China;
3. Huadian Guangdong Foshan Energy Company Limited, Foshan 528000, China;
4. Huadian Guangdong Shunde Energy Company Limited, Foshan 528000, China)

摘 要:冷热电三联供(CCHP)系统是分布式能源系统的重要分支,因在能源利用、环境保护等方面的巨大优势而备受关注。在我国,冷热电三联供能源站尚处于起步阶段,为进一步推动其发展与应用,系统的经济效益、环保指标以及运行优化等至关重要。对近年来 CCHP 系统的主要研究内容进行了分类讨论,总结梳理了当前国内外学者在经济性分析、可再生能源、系统优化方面的研究成果,明确了当前的研究现状,指出了该研究领域现存的问题,为未来的研究方向提供参考。

关键词:冷热电三联供;经济性分析;可再生能源;系统优化

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2019)11-0026-06

Abstract: Combined cooling, heating and power (CCHP) system is an important branch of distributed energy system. It gains much attention for the significant advantages in energy utilization and environmental protection. CCHP is in starting stage, so the economic benefits, environmental benefits, and operation optimization are important for the promotion and application of the system. The main research objects of CCHP system in recent years are classified and discussed, and the research achievements in economic analysis, renewable energy, system optimization made by domestic and foreign scholars are presented in detail. The current status of the study is clarified, and the existing problems in this field are pointed out, which provides reference for research directions in future.

Keywords: CCHP; economic analysis; renewable energy; system optimization

0 引言

中国是世界上最大的能源消费国,能源消耗逐年增长,伴随而来的能源短缺问题也日益严重。在我国各类能源消耗中,煤炭仍占有绝对比重,但已呈逐年下降的趋势,天然气、可再生能源的比重逐年上升。为了应对能源短缺和严重的环境污染问题,清洁能源将占据越来越大的能源消耗比重,冷热电三联供(CCHP)系统可综合利用清洁能源,进一步减少大气污染物的排放。CCHP 作为一种新兴的能源供

应方式,其供能系统以小规模、模块化、分散式的方式布置在用户附近,大大降低了传输损耗,同时可作为集中式电网的补充,以减少对电网的依赖,保证供电安全;系统通过回收发电过程中产生的低温余热,有效实现能量的梯级利用,综合能源利用率可达 75% 以上。因此,发展 CCHP 系统对能源的高效利用和节能减排具有重要意义,近年来逐渐成为国内外学者的研究热点。

当前,针对 CCHP 系统研究的主要方向包括以下几个方面:(1)运用经济学原理,考量 CCHP 系统投资建设在经济可行性、运行成本等,指导企业决策,从而改善 CCHP 系统的经济性能;(2)提出新型

的基于可再生能源的 CCHP 系统,在保持高效供能的前提下进一步提高环保性能;(3)利用现场研究、数学建模仿真计算等方法进行 CCHP 系统设计和运行优化。本文从经济性分析、集成可再生能源、系统设计和运行优化几个角度对冷热电分布式能源系统的研究成果和现状进行总结,指出了当前研究与实际发展进程中的差距,对未来的研究方向进行了展望。

1 CCHP 系统的经济性分析

在冷热电分布式能源站的建设和投运生产全过程中,进行可行性研究、确定系统容量和运行策略时,能源站的经济效益是一个需要考虑的重要因素。影响经济效益的主要因素有设备投资成本、设备效率、燃料费用、上网电价、能源站的负荷率等。这些因素受地域影响而变化,且不同的研究人员用于评估经济绩效的标准也不尽相同,因此很难直接估算 CCHP 系统实际的经济效益。我国发电公司的发电成本一般只包括建设、安装成本(包括利息等)、运行成本(含人力、燃料、管理、维修等),CCHP 系统的投资回收期通常比传统的集中式电站长,经济性较差是当前限制 CCHP 系统发展的重要因素之一。

目前推动 CCHP 项目发展的主要方式是政策补贴扶持,《上海市天然气分布式供能系统和燃气空调发展专项扶持办法》规定,对分布式供能项目按照 1000 元/kW 给予设备投资补贴,对年平均能源综合利用效率达到 70% 及以上且年利用小时数在 2000 及以上的分布式供能项目再给予 2000 元/kW 的补贴。对燃气空调项目按照 200 元/kW 制冷量给予设备投资补贴。各地的补贴政策各不相同,针对天然气分布式能源,上海市的上网电价为 0.765 5 元/(kW·h),江苏省的楼宇式分布式机组上网电价为 0.784 5 元/(kW·h),但浙江省暂无政策补贴,上网电价为 0.415 3 元/(kW·h)。在无政策补贴的情况下,绝大多数天然气分布式项目难以盈利^[1]。在当前的考评模式下,CCHP 经济性较差的问题直接限制了其发展。因此,有学者指出,当对系统进行经济性分析时,应综合考虑包含环境因素的发电成本,以避免由于经济分析不全面的问题限制清洁能源的发展,从而使分布式发电的环境效益得到价值体现^[2-5]。

设备的冷/热负荷受当地气候条件影响显著,因此,即使是相同的 CCHP 系统,其经济效益也会因地理位置不同而有所不同。许多学者曾计算分析了 CCHP 系统在不同地域不同气候条件下不同分布式能源站的经济效益。文献[6]利用 Energy Plus 软

件,以某大型酒店为基准建筑,对 16 个不同气候区域的城市进行了逐时仿真,结果表明,在大部分气候条件下,混合运行模式的系统总效率高于“以热定电”和“以电定热”模式。文献[7]提出了一种在不同气候条件下基于运行成本、一次能源消耗率和二氧化碳减排率的 CCHP 系统运行优化方法,由于不同城市的建筑负荷、电力和燃料成本以及二氧化碳排放等因素的不同,其优化结果的趋势并不相同,虽然该优化模型适用于任何类型的建筑,但在实际操作过程中,需要对每种类型的建筑分别进行分析和评估。文献[8]以经济效益作为唯一指标,对我国哈尔滨、北京、上海、昆明、广州 5 个不同气候区域楼宇式冷热电分布式能源系统进行了可行性研究,结果表明,不同原动机在不同地区的适用性不同,分布式能源系统在上海的经济性和环保性方面表现最佳。

一些学者通过评估 CCHP 系统的投资回收期,以证明系统的经济可行性。文献[9]提出了不同原动机在不同工况下的 CCHP 系统方案,并验证了其经济可行性和投资回收期。文献[10]对比了 CCHP 系统在旧金山、波士顿和迈阿密 3 个城市办公楼的运行成本,对于迈阿密等天然气成本较高、电力成本较低的地区,投资回收期较高,不具有经济可行性。文献[11]对基于沼气和太阳能综合利用的 CCHP 系统进行了评估研究,验证了其在经济性能方面的优势,表明电价和天然气价决定年度运行成本,从而影响动态回收期,其中电价对投资回收期的影响较大,制冷价格对回收期的影响最小。

现有针对 CCHP 系统的经济性评价方式与传统电站的方式基本相同,并不能体现 CCHP 系统的优越性及其全部价值。因此,需要将当前的评价方式进行适当改善以尽量实现客观全面的评价。一方面,可以将 CCHP 系统在减少传输损耗、污染物减排等方面的经济效益合理量化;另一方面,将系统评价的专业术语和评价标准尽量统一,从而客观、全面地反映对比不同系统的性能。目前已有许多学者利用优化技术以提高 CCHP 系统的经济效益,针对此方面本文在第 3 节会有相关文献的介绍和更深入的讨论。

2 基于可再生能源的 CCHP 系统

可再生能源是缓解化石能源危机,实现节能减排的重要途径。但由于其存在不稳定、不连续、能量密度低等特点,单独利用可再生能源系统往往可靠性较差,可再生能源与化石能源的综合利用能够使系统的经济性和节能减排效益最大化。目前有效应

用于 CCHP 系统中的可再生能源主要包括太阳能、生物质能、风能等。

2.1 太阳能

太阳能以其清洁、无污染、零成本、易获取,且取之不尽、用之不竭的优点成为最具有发展前景和利用价值的可再生能源之一,其利用方式包括光热利用、光伏发电、光化利用和光生物利用等。由于联供系统多用于为建筑物或工业园区供能,其规模相对较小,而太阳能易于与建筑结合,所以光伏发电、光热利用与 CCHP 的结合最先受到人们的关注,成为研究热点^[12-13]。

光伏发电是光能—电能的转化技术,其系统构成简单,适于任何规模的电力生产,但效率较低。光热利用是通过集热器将太阳辐射能收集起来,进而通过介质的相互作用转换成热能加以利用,根据温度可分为低温($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中温($\geq 100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中高温($\geq 300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高温($\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)利用,常见的利用方式包括太阳能热水器、太阳能制冷、太阳能热发电等。其中,太阳能热水器是一种理论和技术都十分成熟且成本低廉的利用方式,太阳能制冷方式包括吸收式、吸附式和喷射式,当前技术最为成熟且应用最多的是吸收式。太阳能热发电是辐射能—热能—电能的转化技术,目前商业化程度还较低,其整个系统的成本较高。由于太阳能的不稳定性和不连续性,且受环境因素影响较大,通常将太阳能作为一种补充能源与其他系统集成^[14-16]。

文献[17]利用太阳能热和化学回热驱动甲醇分解以生成合成气,作为以内燃机为原动机的 CCHP 系统的燃料。系统在设计工况下的一次能源利用率、烟效率和太阳能净发电效率分别达到 80.55%、42.18% 和 24.66%,并且能够满足夏季典型日某办公楼的冷热电负荷需求。文献[11]以西藏拉萨的天气数据为基础,提出了综合利用沼气和太阳能的 CCHP 系统,该系统在太阳能资源丰富的污水处理厂、养鸡场、牛奶厂等具有很大的应用潜力。文献[18]以亚特兰大某酒店为例,对太阳能冷热电联产系统进行了仿真研究,采用粒子群算法优化设计参数,并通过仿真对比了 5 种不同运行策略下系统的性能。系统性能最佳时的一次能源节约率、二氧化碳减排率和年度总成本节约率分别为 36.15%、53.73% 和 4.16%。文献[19]设计了一种集成太阳能和有机朗肯循环的制氢、发电、供暖/制冷、淡水净化的多联产系统,并通过热力学分析研究了各设备和整个系统的综合能源利用率、烟效率和烟损率。结果表明,太阳能集热器和有机朗肯循环蒸发器的烟损率最高。文献[20]提出了由甲醇液

体预热单元、太阳能吸收/反应单元、产物分离与储存单元、冷热电产品输出单元 4 部分组成的集成太阳能与清洁燃料热化学互补的 CCHP 系统。采用抛物槽式双轴跟踪镜场提高了太阳能热化学效率,冬季的太阳能热化学效率从 20% 提高到了 69%,从而提高了太阳能净发电效率。文献[21]设计了一种以内燃机为原动机,同时利用太阳能集热器加热热水的 CCHP 系统,研究了系统在不同工况下的热力学性能并与传统天然气 CCHP 系统对比。

2.2 生物质能

生物质是仅次于煤炭、石油、天然气的第 4 大能源,是唯一可转化为液体燃料的可再生能源,用于向发电设备提供一次能源,从而产生电能并回收热能,类似于以化石燃料驱动的 CCHP 系统^[22],但在其利用过程中的空气污染物排放较少。生物质燃料的利用有多种方法,如直接燃烧、发酵、热解、气化等,其中气化是常用于 CCHP 系统的利用方式。生物质气化是将固体或液体生物质燃料转化为气体燃料或合成原料气,具有污染物排放量较低、能量转换效率较高等优点。

文献[23]采用试验的方法研究了当量比对上吸式秸秆气化炉气化特性的影响。在试验工况下,最佳气化当量比为 0.25~0.30,气化区平均温度在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$,气化煤气的低热值(LHV)平均可达 5.98 MJ/m^3 ,产气率为 $1.68\text{ m}^3/\text{kg}$,气化效率为 73.30%。该项研究为气化炉在 CCHP 系统中的应用提供了试验基础。文献[24]通过仿真模拟研究了关键参数对集成了生物质气化炉的 CCHP 系统性能的影响,当温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力为 30 标准大气压(atm)时,气化炉能够产出 LHV 为 5.665 MJ/m^3 的合成气,气化效率为 77.00%。整个 CCHP 系统可以实现较低的 CO_2 和 SO_2 排放,综合能源利用率和产气量分别为 75.43% 和 $2.47\text{ m}^3/\text{kg}$ 。

将生物质合成气加入天然气中进行混合燃烧,是一种简单易行的提高 CCHP 系统性能的方式,这种方法适用于以天然气为燃料的原动机,如燃气轮机、内燃机、微燃机等。文献[25]提出了一种以内燃机为原动机,利用生物质合成气和天然气混合燃烧的 CCHP 系统。当天然气与生物质合成气的体积混合比例由 0 增加到 1 时,系统的综合能源利用率从 70.00% 提高到 79.50%,烟效率从 21.9% 提高到 35.6%。

虽然化石燃料的加入有助于改善系统性能,同时也会增加化石能源的消耗,为克服这一问题,可通过集成高效原动机或其他可再生能源的方法解决。文献[26]提出了将生物质部分气化与地源热

泵耦合的热电联产系统,通过地源热泵更好地利用中低温烟气,热电联产系统的综合能源利用率和系统效率分别达到 72.12% 和 40.13%。文献[27]提出了一种由生物质气化炉、固体氧化物燃料电池、双效吸收式制冷机、余热锅炉组成的冷热电联供系统,并进行了能效分析和烟分析,其中生物质燃料在生物质气化炉进行气化,生成的合成气作为固体氧化物燃料电池(SOFC)的燃料加以利用。系统的最大烟效率为 37.92%,CO₂ 排放量为 20.37 t/(MW·h),与单独的 SOFC 系统相比,烟效率提高 49.88%,CO₂ 排放量下降 64.02%。

2.3 风能

风能是目前可再生能源中技术最成熟、最具有商业化发展前景的一种能源,具有蕴量巨大、分布广泛、无污染等优点^[28-31]。目前国内风电的装机容量很大,但因其能量密度低、供能不稳定等缺点,风电机组的弃风率也很高,学者关于由风能驱动 CCHP 系统的研究较少。在 CCHP 系统中,风力发电可以直接满足负荷需求,也可以通过蓄热式电锅炉间接满足供热和制冷负荷需求。

文献[32]构建了以太阳能光伏发电机组、风力发电机组和燃气轮机为原动机的 CCHP 系统,其供热模块包括太阳能集热器、储热罐和蓄热式电锅炉,当太阳能辐射不足时,以储热罐为热源,蓄热式电锅炉通过消耗风能以提供热能。针对该 CCHP 系统建立了基于能源、经济、环境的多目标运行优化模型,对比分析了所提出的 CCHP 系统与燃气轮机驱动的 CCHP 系统的运行性能,随着制冷机制冷系数(COP)的提高、天然气价格的降低以及风电和光伏设备成本的降低,新型 CCHP 系统的性能将得到改善。文献[33]建立了耦合风力发电的 CCHP 系统优化模型,使日常运行成本较低。文献[34]提出了一种以光伏模块、风力涡轮机和 SOFC 为原动机的新型 CCHP 系统,采用共约束多目标粒子群优化算法优化系统设备配置,并通过伊朗的一家酒店验证系统的可行性。结果表明,与普通的分产系统相比,新系统可分别减少化石燃料燃烧 99.62% 和污染物排放 99.72%。

集成可再生能源的 CCHP 系统的一系列研究充分验证了系统在一次能源节约、污染物减排等方面的优越性,可再生能源与化石能源互补、多种可再生能源互补的供能方式已成为当前研究热点,使不同能源相互配合,优势互补,同时提高系统的可再生能源利用率。虽然多种能源互补的耦合方式会增加系统成本,但其节能环保效益将大幅提高。在研究基于可再生能源的 CCHP 系统过程中,大多还停留在

仿真模拟阶段,因此,可以已投运能源站或示范项目为基准,通过实际运行数据验证理论研究的可行性。根据当前建设情况,可以增加基于太阳能或生物质的 CCHP 系统的研究和工程化推进。

3 系统设计和运行优化的方法

优化系统设计和运行方式是提高 CCHP 系统能效、降低成本和减少污染物排放的关键要素之一。下面将讨论文献中用于 CCHP 系统配置和运行策略的先进优化算法。

3.1 系统配置及设备容量优化

CCHP 系统的机组配置和设备容量选择主要遵照“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”的原则,合理进行电力、供冷、供热设备的配置,做到按需供给、适时匹配,以达到成本、一次能源消耗量和污染物排放相对平衡的理想状态。

优化系统配置是 CCHP 系统研究的重要组成部分,利用数学模型确定最优系统配置和设备容量是目前最常用的方法之一,优化算法包括规划方法(线性规划、非线性规划、线性整数规划、混合整数线性规划、混合整数非线性规划等)和智能优化方法(粒子群优化、蚁群算法、遗传算法及其他进化算法等)。目前大多数研究采用遗传算法或以遗传算法为基础耦合其他方法对数学模型进行求解^[35]。由于遗传算法采用简单的、固定不变的进化策略,在复杂应用场合的效果并不理想,各国的研究人员针对传统的遗传算法进行了改进,提出了以基本遗传算法为核心的各种算法,如混合遗传算法、多种群遗传算法、自适应遗传算法、免疫遗传算法、交互式遗传算法、非支配排序遗传算法(NSGA)及其改进算法 NSGA-II 等^[36]。可以看出,遗传算法是国内外研究 CCHP 系统模型的一种成熟的计算方法。

文献[37]针对某热电联产系统在不同气候条件下的应用,以能源、经济和环境(3E)的评价指标作为目标函数,采用多目标的非支配排序遗传算法(NSGA-II)优化 CCHP 系统配置和设备容量,而后利用层次分析法对不同气候下各种不同原动机的系统配置进行比较分析。结果表明,在确定合适的 CCHP 系统时,技术类型比气候条件更重要。文献[38]以经济与环保为目标,建立了考虑冷热电存储和年运行模拟的较为完整的能源站设备容量优化模型,采用改进多目标粒子群-单纯形算法对能源站的设备容量进行了优化,并以广州某商住混合区为实例验证了方法的有效性。

3.2 运行策略优化

传统的运行策略分为“以电定热”“以热定电”

和“基本负荷运行”3种,但在此运行策略下系统往往无法达到其最佳性能,不能充分发挥 CCHP 系统的优势,因此需要利用先进的优化算法有效地确定 CCHP 系统的最优运行策略,以达到使运行成本、一次能源消耗和/或污染物排放最小化的目标。

文献[39]按照电、烟气、蒸汽、水和空气 5 种能量传递方式进行分类,采用集中母线的方式搭建了 CCHP 微网系统的基本构架并建立了系统日前动态经济调度的 0-1 混合整数线性规划模型,从而实现了 CCHP 系统的优化调度。文献[40]在综合考虑能源价格、二氧化碳排放、一次能源消耗以及天气条件等因素的情况下,引入了一种新的性能曲线方法,并将其对应的整体最优部分负荷作为优化 CCHP 系统最优运行方式的基础,而无需复杂的系统模型构建和数值优化过程。

目前的优化运行研究大多是从供能侧角度出发,文献[41]从供能侧和负荷需求侧控制的角度对 CCHP 系统的综合优化运行问题进行了研究,建立了包含经济、能源和环境等多方面运行成本的优化调度模型,并利用遗传算法对系统各设备出力进行了优化求解。文献[42]通过构建基于瞬时系统模拟程序(TRNSYS)与 Matlab 的联合优化仿真平台,引入遗传算法求解得到 CCHP 系统内燃机日逐时最优工况,并详细分析了主要设备出力及各经济成本的变化情况。

CCHP 系统的设备配置和运行策略优化是相辅相成、相互影响的,一个运行良好的能源站不仅需要合理的配置,更需要与之相匹配的运行策略,因此许多学者在研究过程中进行了整体协同优化,为避免单一评价指标的片面性,大多采用多指标的综合评价进行优化。文献[43]从能效分析、经济运行和环境效应的角度对 CCHP 系统的设计和运行进行了优化,以多属性综合评价决策和多目标优化决策分析为理论基础,采用指标权重法和模糊优选法对不同运行策略的 CCHP 系统进行了综合性能评价。文献[44]基于粒子群算法,分别以一次能源利用率最高、CO₂ 排放量最少、年运行成本最低为目标,对设备选型、设备容量和运行策略进行了优化。文献[45]在系统设备已定的条件下,建立了综合考虑能源、经济和环境效益的多目标优化模型,利用遗传算法对 CCHP 系统进行了设备容量和运行模式的优化。

当前用于系统设备配置和运行策略的优化算法多种多样,以智能算法为基础的多目标优化方法已成为研究热点并取得了可观的研究成果。然而,与基于可再生能源的 CCHP 系统研究类似,优化算法在实际操作控制过程中的效果和性能也同样未得到

有效验证,特别是在运行策略的优化方面。除此之外,在针对多目标的综合评价方面,不同学者对评价指标的权重分配不尽相同,还需进一步研究以形成合理可靠的实施标准。

4 结论

本文对近年来 CCHP 系统涉及经济性分析、可再生能源、系统优化和热经济学分析方面的研究成果进行了梳理归纳,虽然目前在上述领域已取得了显著进展,但根据目前的研究现状和 CCHP 领域的实际发展现状,今后的研究与开发还需重点解决以下问题:

(1)将 CCHP 系统在技术、节能、环保方面的效益进行量化,使其得到相应的价值体现,由此提高电力工作者和决策者对分布式能源优越性的认识,以推动相关能源政策的落实。能源政策的鼓励和实质性支持能够弥补 CCHP 系统在经济性方面的不足,从而推动 CCHP 项目的发展。

(2)目前文献中已经介绍了大量具有前瞻性的基于可再生能源的 CCHP 系统和详细的优化算法,但大多停留在理论分析、建模模拟阶段,在能源站的设计、建设、运行过程中并没有得到有效应用。因此,还需通过在能源站的应用效果来证明新系统或优化算法在操作控制系统中的性能,利用试验数据验证理论研究成果的有效性。

(3)不同的文献用于评估 CCHP 系统的专业术语和评价标准差异导致不同 CCHP 系统之间的对比困难,因此,还需对专业术语和评价标准进一步统一,以有效减少含义上的混淆,在不同研究工作中进行更公平合理的比较。

参考文献:

- [1]蔡洁聪,韩高岩,国旭涛,等.浙江省天然气分布式能源发展及建议[J].浙江电力,2019,38(1):25-29.
- [2]钱科军,袁越,石晓丹,等.分布式发电的环境效益分析[J].中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
- [3]邵旭峰.区域型分布式能源燃气轮机机组选型分析[J].华电技术,2018,40(1):65-67,70.
- [4]刘锋.燃气分布式能源站环保管理要点和关键环节探析[J].华电技术,2017,39(12):70-72,76.
- [5]姜东桥,孙晓旭,孔飞,等.某燃气分布式能源站环境影响分析[J].华电技术,2017,39(8):64-66.
- [6]SMITH A D, MAGO P J. Effects of load-following operational methods on combined heat and power system efficiency[J]. Applied Energy, 2014, 115: 337-351.
- [7]CHO H, MAGO P J, LUCK R, et al. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary en-

- ergy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme [J]. *Applied Energy*, 2009, 86 (12): 2540 – 2549.
- [8] REN Hongbo, ZHOU Weisheng, GAO Weijun. Optimal operation of distributed energy systems for building complexes in different climate zones in China [J]. *Applied Energy*, 2012, 91 (1): 156 – 165.
- [9] ABBASIM, CHAHARTAGHIM, HASHEMIAN S M. Energy, exergy, and economic evaluations of a CCHP system by using the internal combustion engines and gas turbine as prime movers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 173: 359 – 374.
- [10] AHNH, FREIHAUT J D, RIMD. Economic feasibility of combined cooling, heating, and power (CCHP) systems considering electricity standby tariffs [J]. *Energy*, 2019, 169: 420 – 432.
- [11] SU Bosheng, HAN Wei, CHEN Yi, et al. Performance optimization of a solar assisted CCHP based on biogas reforming [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 604 – 617.
- [12] 赵振东. 太阳能冷热电联供系统多目标优化设计与运行研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [13] 布鲁斯·安德森, 黄湘, 孙海翔, 等. 新型布雷登塔式太阳能热发电系统 [J]. *发电技术*, 2018, 39 (1): 37 – 42.
- [14] WANG Jiangfeng, DAI Yiping, GAO Lin, et al. A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34 (12): 2780 – 2788.
- [15] 范洁, 杜凤丽, 孙建朝. 太阳能热发电最低投资定量分析 [J]. *华电技术*, 2018, 40 (10): 69 – 72.
- [16] 肖黎明. 设备衰减率对太阳能光伏发电利用小时数的影响分析 [J]. *华电技术*, 2017, 39 (12): 67 – 69, 72.
- [17] LIU Taixiu, LIU Qibin, LEI Jing, et al. Solar-clean fuel distributed energy system with solar thermochemistry and chemical recuperation [J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 380 – 391.
- [18] YANG Gan, ZHAI Xiaoqiang. Optimization and performance analysis of solar hybrid CCHP systems under different operation strategies [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 327 – 340.
- [19] FATIH Y. Thermodynamic performance evaluation of a novel solar energy based multigeneration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 429 – 437.
- [20] 方娟, 刘启斌, 刘泰秀, 等. 集成太阳能热化学过程的冷热电联产系统 [J]. *工程热物理学报*, 2018, 39 (10): 2118 – 2123.
- [21] 王江江, 杨颖. 基于太阳能利用的天然气冷热电联供系统热力性能研究 [J]. *热能动力工程*, 2017, 32 (5): 111 – 117, 141.
- [22] 严陆光, 顾国彪, 贺德馨, 等. 中国电气工程大典: 可再生能源发电工程 (第 7 卷) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [23] WANG Hairong, YAN Jianbo, DONG Liang. Simulation and economic evaluation of biomass gasification with sets for heating, cooling and power production [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 360 – 368.
- [24] 赵京, 魏小林, 李森, 等. 上吸式秸秆气化炉中当量比对气化特性的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37 (S1): 118 – 122.
- [25] WANG Jiangjiang, MAO Tianzhi, SUI Jun, et al. Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas [J]. *Energy*, 2015, 93: 801 – 815.
- [26] LI Hongqiang, ZHANG Xiaofeng, LIU Lifang, et al. Proposal and research on a combined heating and power system integrating biomass partial gasification with ground source heat pump [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 145: 158 – 168.
- [27] GHOLAMIAN E, ZARE V, MOUSAVI S M. Integration of biomass gasification with a solid oxide fuel cell in a combined cooling, heating and power system: A thermodynamic and environmental analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41 (44): 20396 – 20406.
- [28] 陈江华, 周钰, 徐杰彦, 等. 分布式能源与冷热电联产 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [29] 陈靖, 江婷, 徐静静, 等. 天然气冷热电蒸汽联产系统经济性分析 [J]. *华电技术*, 2018, 40 (11): 68 – 71.
- [30] 余莉. 浅析楼宇式天然气分布式供能系统的开发与设计 [J]. *华电技术*, 2018, 40 (5): 73 – 74.
- [31] 景卫哲, 刘洋, 田宇娣. 计及预测误差的冷热电联供系统成本计算方法 [J]. *华电技术*, 2017, 39 (5): 1 – 6.
- [32] JU Liwei, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China [J]. *Energy*, 2016, 111: 322 – 340.
- [33] LI Guoqing, ZHANG Rufeng, JIANG Tao, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power [J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 408 – 419.
- [34] SOHEYLI S, SHAFIEI M M H, MEHRJOO M. Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC-MOPSO algorithm [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 375 – 395.
- [35] LU Shilei, LI Yuwei, XIA Hongwei. Study on the configuration and operation optimization of CCHP coupling multiple energy system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 177: 773 – 791.
- [36] 高媛. 非支配排序遗传算法 (NSGA) 的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [37] ABBASI MH, HOSEYN S, MOHAMMAD T. A methodology to obtain the foremost type and opti- (下转第 56 页)

误,缩短了调试周期,保证了大型储能电站项目的顺利投运。

参考文献:

[1] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.

[2] 李建林,田立亭,来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):15-25.

[3] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.

[4] 汪海蛟,江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):126-135.

[5] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):8-16.

[6] 笃峻,叶翔,王长瑞,等. 智能变电站设计配置一体化功

.....

(上接第 31 页)mal size of the prime mover of a CCHP system for a large-scale residential application[J]. Applied Thermal Engineering,2018,135:389-405.

[38] 管霖,陈鹏,唐宗顺,等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术,2016,40(10):2934-2941.

[39] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.

[40] FARIDODDIN A S, VLADIMIR M. Novel performance curves to determine optimal operation of CCHP systems[J]. Applied Energy,2018,226:1009-1036.

[41] LI Miao,MU Hailin,LI Nan,et al. Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling heating and power) system[J]. Energy,2016,99:202-220.

[42] 胡荣,张宓璐,李振坤,等. 计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行[J]. 电网技术,2018,42(3):

能规范研究及工具开发[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):85-89.

[7] 孙一民,裴愉涛,杨庆伟,等. 智能变电站设计配置一体化技术及方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):70-74.

[8] 纪陵,李忠明,蒋衍君,等. 智能变电站二次系统仿真测试和集成调试新模式的探索和研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(22):119-123.

[9] 智能变电站调试规范:Q/GDW 689—2012[S].

[10] 朱林,陈金富,段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报,2009,24(10):147-151.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

赵龙(1978—),男,河南新乡人,高级工程师,从事配电自动化及储能系统开发工作(E-mail:zhaolong@sznari.com)。

岳义博(1995—),男,甘肃定西人,工程师,从事储能系统开发工作(E-mail:yueyb@sznari.com)。

715-721.

[34] 魏大钧,张承慧,孙波. 计及变负荷特性的小型冷热电联供系统经济优化运行研究[J]. 电网技术,2015,39(11):3240-3246.

[35] 赵峰,张承慧,孙波,等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3785-3793.

[36] 胡荣,马杰,李振坤,等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术,2017,41(2):418-425.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

孙思宇(1989—),女,河北保定人,工程师,工学硕士,从事分布式能源方面的研究工作(E-mail:sunsiyu1989@126.com)。