

基于可再生能源的冷热电联供系统集成配置与运行优化研究进展

李高潮¹, 卢怀宇², 孙启德³, 师进文², 刘富栋³, 李明涛²

(1. 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 北方联合电力有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

Research Progress in Configuration and Operation Optimization of Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Systems Based on Renewable Energy

LI Gaochao¹, LU Huaiyu², SUN Qide³, SHI Jinwen², LIU Fudong³, LI Mingtao²

(1. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 3. North United Power Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

ABSTRACT: The renewable energy based combined cooling, heating, and power system (RE-CCHP system) is a multi-energy complementary integrated energy system with comprehensive supplies of cooling, heating and power. The RE-CCHP is of great importance for large-scale utilization of renewable energy and protection of our environment, because it can significantly improve the energy efficiency and system reliability. This paper presents an overview of the main research progresses in the RE-CCHP system in recent years, summarizes the research results in integrated configuration, designs and operation optimization of the system, clarifies the current research status of the system and points out the essential issues to be address, and forecasts the future direction in this field.

KEY WORDS: renewable energy; combined cooling; heating and power; integrated energy system; multi-energy complementary

摘要: 基于可再生能源的分布式冷热电联供系统(RE-CCHP系统),以可永续利用的可再生能源作为能量输入,能借助太阳能、风能等的时空互补特性实现冷热电综合供应,显著提升能源利用效率和系统可靠性,因而对可再生能源的大规模高效利用和节能减排具有非常重要的意义。梳理了近年来RE-CCHP系统的主要研究进展,总结了RE-CCHP系统集成配置、设计和运行优化等几个方面的研究成果,明确了目

前冷热电联供系统的研究现状,指出了当前研究中亟待克服解决的问题,并对未来的发展方向做出了展望。

关键词: 可再生能源;冷热电联供;综合能源系统;多能互补

随着全球人口的持续增长和经济的飞速发展,世界能源消费急剧增长,由此而引起的全球变暖、环境污染等生态问题也日益严峻。寻找可再生、清洁无污染的替代能源已成为全球能源转型及实现可持续发展目标的重大战略举措^[1-6],也是我国面临的刻不容缓的紧迫任务。

以太阳能、风能、生物质能为代表的可再生能源,具有储量丰富、分布广泛、环境友好等优点^[7-13]。这类能源理论上可以满足全人类的能源需求,并在未来很长时间内不会枯竭。然而,与稳定可控的化石能源相比,这些可再生能源资源分散,受气候、时间、季节等因素变化明显,在供给侧的二次能源产出方面呈现出不稳定、不连续、成本过高、效率低下^[14-20]等问题;这已成为制约可再生能源大规模推广应用的主要难题^[21]。

基于可再生能源的冷热电联供系统(renewable energy based combined cooling, heating and power system, RE-CCHP),可以实现太阳能、生物质能、风能、地热能等可再生能源与天然气等化石能源的耦合互补,显著提升能源利用效率和系统可靠性^[22-31]。通过多能系统协调优化,在能源供应端,这一联供系

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1505400)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFB1505400).

统可以充分利用不同可再生能源在时空上的互补特性,发挥不同能源的优势和潜能,实现多能互补、能源梯级利用,减少传统化石能源的使用;在负荷需求端,由于靠近用户侧,该系统也可以充分利用物联网、大数据和人工智能等技术提高对负荷的预测与调控,提升用户参与综合需求响应能力。此外,借助可再生能源电解水和氢燃料电池发电,RE-CCHP 系统技术的发展也将为“氢能”时代的到来打下良好的基础。因此,发展 RE-CCHP 系统,对可再生能源的大规模高效利用和节能减排意义重大,是解决能源短缺和环境污染两大问题的最有潜力的途径之一。

本文聚焦于 RE-CCHP 系统集成配置与运行优化,对近年来的研究成果和发展趋势进行了分析总结。

1 RE-CCHP 系统集成配置

传统的 CCHP 系统,利用天然气作为一次能源,通过燃气-蒸汽联合循环发电满足电力负荷的需求,利用低品位余热满足热负荷的需求,并采用热驱动设备制冷来满足冷负荷的需求^[32]。然而,在 RE-CCHP 系统中,太阳能、风能、生物质能、地热能等一次能源,其各自的特点与转换利用方式均有很大的差异,因而要结合各自的特点进行合理的转换和系统集成,以有效利用不同能源间的互补特性。典型的 RE-CCHP 系统配置构架如图 1 所示。

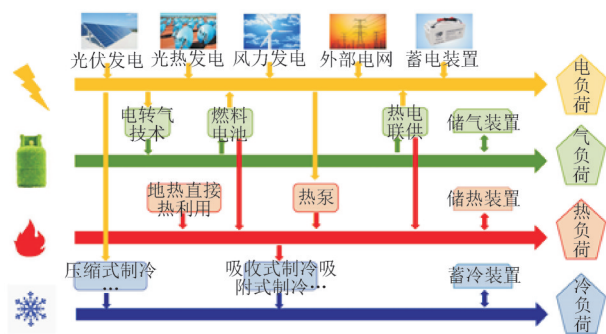


图 1 典型的 RE-CCHP 系统架构图
Fig.1 The schematic diagram of typical RE-CCHP systems

1.1 电力供应

RE-CCHP 系统的电力供应系统,主要由可再生能源发电实现,包括太阳能光伏发电、太阳能光热发电、风力发电等不同的发电形式。RE-CCHP 系统中不同的可再生能源的发电形式、优缺点与适用地区如表 1 所示。

表 1 不同可再生能源发电技术对比

Table 1 Comparison of different renewable energy generation technologies

可再生能源发电技术	优势	劣势	适用地区
太阳能发电	光伏发电 ^[33] 安全可靠,无噪声,无污染排放,能源质量高,建设周期短	太阳辐射能量密度小,占地面积大,受气候影响大,光伏板制造过程不环保	不受资源分布地域的限制,可利用建筑屋面的优势,较适合于太阳能丰富且土地面积广阔地区,尤其是西北大部分地区以及华北的少数地区
	光热发电 ^[34] 电能质量优良,可无障碍并网,可储能,可调峰,实现连续发电	核心技术不成熟,项目工程多处于试验示范阶段	
生物质发电 ^[35]	电能质量好,可靠性高	建设和运营成本较高,技术开发能力和产业体系薄弱	适用于农业、林业、畜牧业发达,有充足生物质原料且相对集中于收集地区
风力发电 ^[36]	技术相对成熟,风能设施多为非立体化设施,可保护陆地和生态	可能干扰鸟类,风力不稳定,有噪音污染,转换率低	适用于无屏障、顺风、风力密度均匀且风向不多,年平均风速较大地区
地热能发电 ^[37]	可再生,分布广泛,蕴藏量大,单位成本低,建设时间短	资金投资大,受地域限制,热效率低,所流出的热水含有很高的矿物质,造成地热水有害成分污染、热污染	拥有地热资源的地区,其中高温对流型地热资源最佳

为了利用不同可再生能源的互补特性协调优化,可再生能源发电通常需要耦合。例如风电-光伏耦合互补系统就比独立的风电或者光伏系统提供更可靠的电力。不同发电系统按照耦合方式划分有直流耦合、交流耦合、混合耦合 3 种^[38]。

1.1.1 直流耦合

在以直流耦合发电的混合可再生能源系统中,各不同的可再生能源系统在直流发电之后,可通过直流/直流转换器或者直接连接到直流母线上;交流发电系统中,则可通过一个交流/直流转换器连接到直流母线上。直流负载直接从直流母线取电,交流负载则通过一个直流/交流转换器取电。储能系统可以通过双向转换器连接在直流母线上,并提供直流负载的需求侧响应^[39]。

1.1.2 交流耦合

交流耦合包括工频交流耦合和高频交流耦合。在工频交流耦合系统配置中,交流发电系统通过交流/交流转换器或者直接连接到工频交流母线

上,直流发电系统则通过直流/交流转换器馈入同一交流母线。负载端可以直接连接到此交流母线。对直流负载而言,这样的配置也能够通过交流/直流转换器进行供电^[40]。

1.1.3 交直流混合耦合

这种耦合方式存在直流母线和交流母线。交流发电电源直接馈入交流母线,而直流发电则通过合适的功率电子转换器与直流母线相连。这种配置方式能够减少转换损失,因此相比于单一的直流耦合或者交流耦合方式,能够减小系统成本,提高系统效率。然而其系统复杂,相应的能源管理策略也更为复杂^[41]。

在不同的耦合配置中,直流耦合由于易于集成并且没有谐波和无功功率等电能质量问题,因而已成为综合能源系统最流行的配置。

此外,冷热电联供的电力供应系统通常还与外部电网相连,以确保在可再生能源系统无法满足本地负荷需求的情况下保障供能,并在可再生能源发电高于本地负荷需求的情况下向电力公司出售额外的电力。

1.2 热(冷)供应

供热系统包括一次能源制热系统及其他的能源转换设备。一次能源制热包括太阳能制热、风力制热、地热直接热利用等。此外还可能含有电加热、热泵等电制热设备作为供热系统的保障。供冷系统则通常通过能源转换设备来实现。最常见的是电制冷(蒸汽压缩制冷系统)。除此之外,还有热驱动制冷(包括吸收式制冷、吸附式制冷)、动力驱动制冷(喷射式制冷)等方式^[21,33,42]。

1.3 储能系统

储能技术可以解决可再生能源密度低、不稳定、不连续等问题,保证能源系统的供需平衡。因而储能系统是提升能源利用效率、提高系统可靠性的重要组成部分。

储能技术种类繁多,根据能量存储原理的不同,可以分为物理储能、电气储能和储热技术3种^[43-45]。作为最传统的储能方式之一,抽水储能以其简单方便利用率高等优点,直到如今仍被广泛应用。此外,常见的物理储能方式还包括压缩空气储能等。作为比较新兴的储能技术,电气储能在这些年发展迅速。电气储能方式繁多,有代表性的有电池储能、超导储能、电气弹簧储能等。储热的方式有很

多,比较常用的是显热储热、潜热储热、化学储热等。这些技术不仅原理各异,而且其他方面也有巨大不同,在技术成熟度、储能容量、循环寿命、储能效率、制造成本、安全性、可靠性、应用领域等方面也存在较大差别。不同的储能系统的特性比较如表2所示。

表2 不同储能技术对比

Table 2 Comparison of different energy storage technologies

分类	技术	优点	缺点	技术成熟度
物理储能 ^[43]	抽水蓄能	容量大,成本低	场地特殊,要求水资源充足,地质,地形条件合适	商业化应用
	压缩空气储能	容量大,寿命长	场地特殊,需要储气空间	市场示范
	飞轮储能	功率密度高	能量密度低,成本高	实验室研究
电气储能 ^[44]	超级电容储能	寿命长,效率高	低能量密度,仅限直流	实验室研究
	铅酸电池	成本低,效率高	寿命短,铅需回收	商业化应用
	液流电池储能	容量大	能量密度低	市场示范
	锂电池储能	容量大,效率高	成本高,安全系数低	市场示范
储热技术 ^[45]	超导磁储能	功率密度高	成本高,能量密度低	实验室研究
	热化学储能	安全无毒,热损小	一次投资大	实验室研究
	熔盐储能	传热好,效率高	易出现过热	市场示范
	冰蓄冷	能量密度较大	运行效率低,成本高	市场示范
	热/冷水蓄能	能源利用率高	能量密度低	商业化应用

目前,最经济的储能技术依然是传统的物理储能技术,包括抽水蓄能和压缩空气储能。相比于其他储能技术,物理储能在面对大容量的可再生能源储能时成本更低。这类方法主要用于供电系统的调峰、填谷、调相等。电化学电池储能技术虽然目前优势并不明显,但是发展势头迅猛。其从早期的铅酸电池、镍氢电池为主,发展到如今以锂离子电池为主,液流电池等多种技术共同发展应用的格局^[46-47]。

在我国投运储能项目中,抽水蓄能具有单个项目容量大、运用范围广泛等特点,因而累计装机规模也最大。不过在新增的储能项目中,电化学储能所占比例最大,增长幅度也最大。可以预见我国未来5年电化学储能将继续维持高增长态势。

1.4 典型 RE-CCHP 工程

由于 RE-CCHP 系统的优点,除了在学术界备受关注外,不同的国家也在积极开展相关示范工程应用实践。

美国目前拥有 6 000 多座分布式冷热电联供系统。在这些工程中,麻省理工学院的冷热电联供系统、马里兰大学的冷热电联供系统、普林斯顿大学的冷热电联供系统较为典型。以马里兰大学的冷热电联供系统为例,研究人员对马里兰大学冷、热、电负荷特性进行了深入调研,以余热利用效率和楼宇能源需求为优化目标,进行了综合能源规划。项目核心是楼宇冷热电联产(buliding combined heat power, BCHP)工程。系统配置为一台 BCHP(包括微型燃气轮机和吸收式制冷机)机组、供冷供热网络、供电网络以及楼宇负荷,能够提供 23RT 冷量和 75 kW 的电功率。整个系统仅发电端消耗燃料,制冷机利用燃气轮机尾气余热转换为冷和热^[39-40]。

目前美国在理论研究、产品研发及应用技术等方面最为成熟,在冷热电联供系统已经取得瞩目成就。由于全球能源转型和可持续发展需要,美国也一直在发展可再生能源冷热电联供技术。2018 年 12 月,美国与以色列开展了 BeamSemiconductors(以色列)+BannerSolar(美国)工程项目,旨在开发具有千兆位潜力的无线应用 60 Hz 的“有源相控阵”模块,适用于自主式光伏发电设施和储能系统^[35-36]。该项目仍在进行,但是它的立项证明了冷热电联供系统仍旧有巨大的发展空间^[21,38]。

日本的能源极其匮乏,90% 以上的能源需要依赖进口,因此日本是最早开始发展冷热电联供系统技术的亚洲国家。为了可持续发展,日本最早提出了智能社区联盟(Japan smart community alliance, JSAC),即实现社区范围内的能源信息综合调度,融入氢能供应网络,实现供电、供热、天然气和氢能的多能源互联^[33,39]。在近些年,日本能源工业着力研究了城市内部广域分散的低品位热能,通过构建区域热网提高了余热有效利用的可能性。

日本能源贸易工业部拟达成在 2030 前分布式冷热电联供系统发电量占总发电量 1/5 以上。这个目标的基础是日本已经建设完成 7 800 座分布式冷热电联供系统,代表工程有日本东京新宿区的区域冷热电联供系统、东京丰洲码头区域智能能源网络项目和日本柏叶智慧城市等。其中,日本柏叶智慧

城市工程于 2016 年获得了“LEED 认证”,标志着柏叶街区建设达到了世界顶级环境水平。该系统利用太阳能、甲烷气体、地源热泵发电以及发电厂供电进行交直流耦合供电,采用大容量蓄电池进行调峰,利用二氧化碳与水反应转化为甲烷和乙烯,实现了节能减排的目标^[33]。

最近 10 年,我国已建设了 40 多个以冷热电联供系统为主的天然气分布式能源项目,且主要集中在北京、上海等发达城市^[32]。近年来,我国冷热电联供综合能源系统也在朝着多能源互补、多技术联合的方向发展。到目前为止,我国主要示范工程包括北京延庆县主动配电网、上海迪士尼度假区示范工程、天津中新生态城示范项目以及崇明岛示范工程等。近期完成度较好的示范工程为山东大学牵头的 863 项目“基于生物质气的分布式冷热电联供系统”。2018 年 9 月,该项目顺利通过验收。根据专家评定,该项目在高效稳定制气、高效生物质气内燃发电机组、微型燃气轮机改造、分布式冷热电联供系统优化配置与控制等方面取得了重要进展^[37-38]。

该项目采用了沼气和天然气为主、太阳能为辅的交流耦合方式供电,优化了新型溴化锂吸收式双效制冷机组制冷,选取了空气源热泵供暖。为了系统的良好运行,研究者研发了多变量相空间重构和卡尔曼滤波的冷热电联供系统负荷预测方法。根据系统负荷的不同,将运行时间划分为供暖季、供冷季、过渡季,在不同季采取主动优化运行策略设计,并且使用小生境粒子群多目标优化算法对系统进行能量管理方法优化^[41,45]。

从以上工程实例可知,积极发展可再生能源为基础的多元互补冷热电联供系统(RE-CCHP 系统),既顺应世界能源转型的发展趋势,也能为实现可持续发展目标作出贡献。

2 RE-CCHP 系统设计与运行优化

RE-CCHP 是多能互补的综合能源系统。系统协同优化是提高系统能效、降低成本和减少温室气体排放的最核心的问题。从系统设计和系统运行方面来考虑,包括最优设计、最优调度、最优管理和最优控制等多方面的协同优化。而最为关键的则是系统配置优化与运行策略优化。下面将从优化问题分类、优化问题模型与算法、RE-CCHP 容量配

置和运行优化进展分别进行介绍。

2.1 RE-CCHP 系统优化问题分类

RE-CCHP 系统设计与运行优化,就是借助最优优化理论和技术,研究合理地选择相关设计或运行技术参数,从众多可行的方案中寻找出既能安全可靠地满足要求,又能有效降低运行成本或者提升系统效率的优化方案。

RE-CCHP 系统的一般优化模型可抽象为在约束条件下对目标函数进行求解决策变量的问题。对于不同的优化模型,其输入参数、决策变量、目标函数以及约束各不相同。

通过近年来对 RE-CCHP 系统优化相关的研究,可以发现单目标优化研究的问题大致有技术先进性目标、经济性目标、环境友好性目标等几类。表 3 列出了 RE-CCHP 系统优化的不同的优化目标。技术先进性目标主要有可靠性最大化、寿命最大化、整体效率最大化等;经济性目标有支出的成本(运营成本、初始启动成本、能源供应成本)最小与获得的收益最大等;环境友好性目标有碳排放量最小化、污染物排放最小化等。

表 3 RE-CCHP 系统优化问题分类
Table 3 Different optimization objectives of RE-CCHP systems

优化问题类别	优化目标
技术经济性	可靠性最大化、寿命最大化、整体效率最大化
经济性	收益最大化、运营成本最小化、投资成本最小化、燃料成本最小化
环境友好性	碳排放量最小化、废物排放最小化

另一方面,RE-CCHP 系统在不同场景下进行决策时,除了单一优化目标外,往往还需要同时考虑许多其他目标。受限于算法以及计算能力,目前同时考虑的多目标优化通常为 2~3 个优化目标的组合。然而需要注意的是,在多目标优化时,有些目标是相互矛盾的,有些多目标彼此之间没有任何直接关系。例如,收入最大化和有害排放量的最小化相冲突,而有害排放最小化和系统的可靠性却没有直接关系。所以多目标优化需要针对具体的系统配置,结合实际情况,选取出主要优化目标组合。

2.2 RE-CCHP 系统优化模型

由于 RE-CCHP 系统具有多能源耦合约束与多维度动态特性,根据线性相关程度等特征,系统的设计与运行优化问题可分为线性规划模型、非线性

规划模型、混合整数线性规划模型、混合整数非线性规划模型等几类。从本质上来讲,RE-CCHP 系统优化是一个非凸的、混合整数的、非线性的多目标的问题。现阶段常用的算法主要有传统决定性算法与现代元启发算法两类。

传统的最优化方法,如线性规划、非线性规划等决定性算法,最早被用于 RE-CCHP 系统优化中。这些决定性算法将非线性问题模型近似转化一系列的线性问题,再对这些线性问题采用内点法等方法,并调用 CPLEX 或者 GAMS 等工具进行求解。然而,把非线性问题转化为线性问题,可能会因可行解超出原来的可行域,或者因为最优化方向偏离问题,而无法达到全局最优。此外,随着系统配置和运行机制越来越丰富和复杂,传统的决定性算法在解决 RE-CCHP 系统中复杂的混合整数非线性规划问题时表现出了一定的局限性。

现代元启发算法包括遗传算法^[48-51]、模拟退火算法^[52]、粒子群算法^[53-54]等。相较于传统算法,该类算法求解速度更快,具有较好的收敛性和搜索性,且算法简单易行,天然具有适于并行计算的特点。近年来在 RE-CCHP 系统优化方面,凭借其能够有效地克服传统算法的局限性的优势,现代元启发算法的应用越来越广泛。

遗传算法是通过模拟生物进化机制来提出的,其主要包括选择、交叉和变异 3 个步骤^[51]。因为遗传算法用了群体搜索的策略以及个体间信息交换,所以遗传算法可以解决传统的算法所无法解决的困难问题。但同时,由于其计算步骤复杂,计算速度远远慢于动态规划法,而且其耗费大量时间计算后的结果也并不准确,通常只是一个近似值。故遗传算法主要用于对复杂的问题进行优化。

模拟退火法是受到金属退火过程的启发而提出的一种通用概率演算法,常被用来解决复杂组合优化问题^[52]。金属加热变成液体,分子将做随机运动,原来停留在能量局部最小值位置的原子也会离开原来的位置随机移动,最终会有极大可能找到比原来能量更低的位置。现如今,模拟退火法已经成为了一种通用的优化算法,广泛应用于许多的工程实际中,如控制工程、生产调度、机器学习等领域。

粒子群算法由 Kennedy 和 Eberhart 等模拟鸟类捕食行为提出的一种群体智能算法^[53-54]。和模拟退火算法相似,粒子群算法也是从随机解出发,通过

适应度来评价解的品质。其算法是通过追随当前搜索到的最优值,并进行代际迭代寻找全局最优解。粒子群算法相对于模拟退火算法更容易实现,因为粒子群算法没有“交叉”和“变异”操作,大大简化了计算量。和遗传算法相比,粒子群算法求解非线性规划问题时搜索的范围宽,会获得更大的可行域,适应能力很强,得到最优解的置信度更高,对问题的限制较少,找到最优解的可能性大。并且其天然的并行特征使得计算的速度也更快。基于以上优点,自算法提出以来很快引起了学术界的重视,并且在解决实际问题中展示了其优越性。因而这类算法也在 RE-CCHP 系统优化领域得到了广泛的应用。RE-CCHP 系统优化模型比较如表 4 所示。

表 4 RE-CCHP 系统优化模型比较

Table 4 Comparison of different optimization models for RE-CCHP systems

优化模型	优势	劣势
混合整数线性规划 ^[55]	快速求解凸可行域线性约束问题,大部分情况可得到全局最优解	求解成本高,对于差别较小以及连续的求解目标能力有限
混合整数非线性规划 ^[56]	简化复杂问题,可得到多个优化解,优于 MILP	需要进行多次迭代
动态规划 ^[57]	可将一个问题拆分为多个子问题并且逐次求解	多次递归运算
粒子群算法 ^[53]	在优化以及扩散问题中表现良好	计算过程复杂
遗传算法 ^[51]	基于种群的进化代数,收敛良好,适合多个领域	需要确定交叉与突变参数以及停止准则参数

对于多目标模型,其求解主要有 2 种途径,其一是设置权重系数将多目标模型通过加权方法整合为单目标优化问题,其二是基于帕累托前沿(Pareto frontier)思想通过 NSGA-II、MOPSO、NBI 等多目标智能优化算法进行求解。后者无需权衡各目标的比重大小,且比一般的智能优化算法具有更好的寻优能力。而且由于多目标优化问题中的单个目标可能会相互冲突,最优解通常不是单一的,而是一组由帕累托最优解组成的集合。因此,更多的研究者也开始采用帕累托多目标优化方法。

2.3 RE-CCHP 系统优化研究进展

2.3.1 单目标优化

2017 年, Wang H Z 团队^[58]发展了一种广义分支定界方法,将多目标运行问题转化为一系列强约束单目标优化子问题,并且该系列问题可通过强化萤

火虫算法有效求解。同年, Jiang Z 团队^[59]建立了综合能源系统的经济性优化模型,该模型在传统需求-响应调度的基础上,将用户的冷、热、电的需求作为广义需求侧的目标,同时考虑了冷热电联供机组在多种能源资源上的差异以及功率输出特性。同年, Li G Q 团队^[60]提出了 RE-CCHP 系统优化调度策略。他们对天然气系统进行了建模,将其安全约束融入到优化调度模型中,推导了天然气系统的移位因子矩阵,量化各节点供气量和负荷对通过管道的气体流量的影响,使管道流量方程线性化,并以 RE-CCHP 系统运行总成本最小作为优化模型的目标函数,将模型转化为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题,以提高计算效率,见表 4。

2018 年, Gao B T 团队^[61]利用合作博弈的原理,协同优化各能源系统,以获得最小日运行成本。同年, Dong X F 团队^[62]提出了一种基于冷热电联供的电-气能源系统优化规划模型。他们考虑了电力线路和输气管道的规划和运行,并把冷热电联供系统作为电气系统的耦合枢纽,通过多阶段规划和多场景分析,使系统总成本最小。此外,该团队还考虑了增加可再生能源发电的情况,如风力发电和光伏发电。Huang H 团队^[63]也于 2018 年针对 RE-CCHP 系统,采用混合整数线性规划方法,有效提高了能源供应的经济性。

2019 年 Shen X 团队^[64]基于能源集线器(energy hub, EH)模型,建立了拥有冷电热三联供、燃气锅炉、集中式制冷站的区域综合能源系统模型。根据历史的多能负荷数据,利用混合整数规划模型求解,得到了成本最小的运行方式。Li Yajing 团队^[65]于 2019 年建立了最小碳排放量的低碳经济调度模型。Ge S Y 团队^[66]则提出了一种考虑需求侧冷、热、电负荷不确定性的鲁棒规划方法,以优化区域综合能源系统。该方法首先建立了区域联合冷热电联供、电空调机组和燃气锅炉的能量枢纽模型,并采用了可调区间的方法描述负荷的不确定性,形成区域 RE-CCHP 系统的鲁棒规划模型,最后将鲁棒规划模型转化为凸混合整数规划模型,然后进行求解。

2020 年, Zhou S Y 团队^[67]提出了一种多区域优化调度模型,以实现多个区域之间的电气互补。该团队采用混合整数线性规划(MILP)得到了系统调度最优解。Liu W X 团队^[68]首先基于不同电价方案

和区间概率对负荷曲线进行优化。其次,结合设备的优化配置和运行策略,建立了最小成本目标的两层协同调度模型,通过比较其经济性得到了最优电价方案。

通过分析近年的研究进展可知,单目标优化具有其独特的优势。随着技术的发展,单目标优化的研究区域在不断增大,考虑的变量逐步增多,模型由静态升级为动态,优化的目标也有所改变。近几年的主要研究集中于碳排放量最低、经济性最优、成本最低等。同时,也有研究者将多目标优化转换为单目标优化,以此来节约计算成本。

2.3.2 多目标优化

在基于冷热电联供的综合能源系统中,可优化的目标较多,但是限制于算法以及计算机的运行能力,目前可同时考虑的优化目标为2个或者3个。随着时间的推移,越来越多的研究者开始采用多目标优化的方法调度系统。

2016年,Jia C 团队^[69]基于随机约束规划,建立了能源系统多目标协调规划的双层规划模型。在这个模型中,综合考虑了经济、能源、环保等因素。在上层目标函数中实现了年度成本最小化,优化了分布式能源的配置;在下层目标函数中,考虑了微型透平的调度以及其中损失的成本。该模型采用了精英策略遗传算法和粒子群算法进行求解。

2017年,Wang H Z 团队^[58]建立了 RE-CCHP 系统运行的原始多目标优化模型,使综合能源系统(integrated energy system, IES)的运行成本、一次能源消耗和二氧化碳排放量达到最小,并将公用电网的功率损耗和电压幅值偏差降至最低。针对 IES 的多目标运行问题,该团队提出了一种新的帕累托优化算法—多目标强化萤火虫算法(multiobjective strength firefly algorithm, MOSFA)。

2018年,Cao J 团队^[70]提出了一种基于 Nataf 变换的自修正粒子群优化算法的求解模型。该模型通过对随机量进行转换,形成了满足耦合关系并接近实际值的样本矩阵,且动态地修正了粒子惯性权重,最终建立了冷热电联供系统的综合收益模型。同年,Long T 团队^[71]提出了一种基于模型预测控制的优化调度策略。该策略考虑了源侧、负荷侧两侧的可调度资源,首先对系统中的设备单元和供能网络进行了数学模型的建立,然后在模型中引入了综合能量效率指标,使优化结果更加合理。

2019年,Fang Y 团队^[72]考虑到 RE-CCHP 系统与电力转换设备的互补性,提出了设备配置策略,构建了一体化供能系统。该策略以 IES 年总成本最低为优化目标,结合了能源供应的可靠性约束,进而建立了设备配置双层优化模型,并采用差分进化算法进行求解。同年,Li Y J 团队^[73]结合各种能源转换和储能设备,以最优年总费用最省、一次能源消耗量最低、CO₂ 排放最少为目标函数,通过逐步分解建模的方式,建立了多能互补的超结构模型,协调了能源生产系统、能源转换系统和储能系统各子系统的能源供需约束及能源流动关系。

3 存在的问题与展望

3.1 不确定性条件下的系统优化

RE-CCHP 系统的设计与运行优化会受到很多不确定性因素的影响,面临许多不确定因素,例如可再生能源发电的随机性、冷热电负荷不稳定性、能源价格、市场环境变化等。这些因素将直接影响系统设计和运行的精确性和可靠性,因而给系统设计与运行带来了非常大的挑战。尽管目前开展了一些不确定性敏感性分析,但尚未形成完整的优化体系。因此,亟需在不确定性条件下对 RE-CCHP 系统开展优化研究,提高 RE-CCHP 系统的鲁棒性和适应性。

3.2 出力与负荷预测

可再生能源发电(或制热)的出力预测与用户负荷预测是 RE-CCHP 系统实现运行优化的基础,其预测准确度直接影响系统协调的优化^[74-82]。出力与负荷预测可以依据能耗负荷、经济、社会、气象等历史数据,通过寻找各有关因素对能耗负荷的影响规律得到实现^[83-92]。例如太阳能光热发电与光伏发电,其发电出力主要受到太阳辐照度、气温等天气因素的影响^[93-101]。当前国内外相关领域的研究也主要聚焦于发电量与天气因素之间的关系。其中,预测方法分为传统的物理模型预测方法以及机器学习预测方法。针对历史数据详尽的场景,可利用深度神经网络,支持向量机,随机森林法等机器学习的新手段,对出力和负荷未来发展情况进行预测,将有效提高预测精度,为系统的协调运行优化提供指导。

3.3 基于瞬态仿真及实时数据的运行优化

目前,RE-CCHP 系统的运行策略研究大部分

是基于设计初期的供应与需求分析。然而,项目实际运行过程中,可再生能源发电(或制热)的出力、用户的冷热电负荷需求变化受到多种因素的影响,很可能偏离设计参数,给系统运行带来潜在风险。

在出力与负荷实时在线预测的基础上,若能基于瞬态仿真模型和实时运行数据实现实时在线优化,则可以指导 RE-CCHP 系统的运行,显著提高系统性能。事实上,基于物联网和大数据,从运行现场采集得到的数据已经能够做到准确、真实和及时。在瞬态仿真模型的基础上,基于这些数据进行的优化也更为可靠。此外使用数据驱动优化算法,有望降低出力和负荷预测的误差,有效应对天气等不确定性因素造成的波动。总之,基于瞬态仿真及实时数据的运行优化是 RE-CCHP 系统优化发展的重要方向。

4 结论

RE-CCHP 系统,能够结合太阳能、风能等可再生能源和传统能源的优势,实现多能互补、冷热电的综合供应和能源梯级利用,有利于能源利用效率和系统可靠性的显著提升。因而 RE-CCHP 系统在改善能源服务质量,促进可再生能源的大规模高效利用和节能减排方面具有广阔的发展前景。采用最优化方法在 RE-CCHP 系统设计和运行优化方面进行协同优化是实现上述目标的关键。本文从 RE-CCHP 系统集成配置、设计和运行优化问题、优化模型对这一领域进行了概述和总结。不确定性条件下的系统优化、出力与负荷预测、基于实时数据的运行优化是这一领域重要的研究前沿,在“云大物移智”时代,有望有力地促进 RE-CCHP 系统协同优化,前景可期。

参考文献

- [1] 汪雅静,马益平,王吉庆,等.双馈式风电机组直接电压控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(2):172-177.
WANG Yajing, MA Yiping, WANG Jiqing, et al. Study on voltage control strategy of doubly fed wind turbine[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 172-177.
- [2] 赵炜,姚喜梅,张小青.用于光伏发电系统直流侧的电涌保护器研究[J].电瓷避雷器,2019(4):17-21.
ZHAO Wei, YAO Ximei, ZHANG Xiaoqing. Research of SPDs on DC side of PV system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):17-21.
- [3] 杨蒙,陈洁,闫亚玲,等.基于滑动滤波和模糊控制的风电储能能量管理[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):196-201.
YANG Meng, CHEN Jie, YAN Yaling, et al. Energy storage management of wind power based on sliding filtering and fuzzy control[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6):196-201.
- [4] 钟浩,周倩,张春阳,等.基于耗散功率转归分量的风电系统有功实时调度[J].高压电器,2019,55(1):149-156.
ZHONG Hao, ZHOU Qian, ZHANG Chunyang, et al. Active power real-time scheduling of wind power system based on input component of dissipation power[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1):149-156.
- [5] 王奇,刘翠平,王雅平,等.考虑风电接入的交直流互联电网输电通道功率优化分配[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):174-181.
WANG Qi, LIU Cuiping, WANG Yaping, et al. Optimal power allocation of transmission channels in AC-DC interconnected power grid considering wind power access [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 174-181.
- [6] 王继拓,王万成,陈宏伟.基于回归-马尔科夫链的光伏发电功率预测[J].电测与仪表,2019,56(1):76-81.
WANG Jituo, WANG Wancheng, CHEN Hongwei. Photovoltaic power generation forecasting based on regression-Markov chain[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 76-81.
- [7] 纪蔚涛,任永峰,云平平,等.储能型直驱式风电场联合 STATCOM 的多模式无功协调控制[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(5):97-104.
JI Weitao, REN Yongfeng, YUN Pingping, et al. Multi mode reactive power coordination control of storage-based direct-driven wind farm combined with STATCOM[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5):97-104.
- [8] 施广全,张义军,陈绍东.基于传输线理论的风电场雷电流传输过程研究[J].电瓷避雷器,2020(6):1-7.
SHI Guangquan, ZHANG Yijun, CHEN Shaodong. Study on the transmission process of lightning current in wind farms based on transmission-line theory[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6):1-7.
- [9] 热孜古丽·买买提,陈洁,田小壮,等.基于风电储能系统的功率平抑策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,

- 40(4):188-192.
REZIGULI · MAIMAITI, CHEN Jie, TIAN Xiaozhuang, et al. Study on power stabilization strategy based on wind energy storage system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4):188-192.
- [10] 吕中宾,白航,杨晓辉,等.某交流特高压线路风偏分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1):170-177.
Lü Zhongbin, BAI Hang, YANG Xiaohui, et al. Analysis of one UHVAC transmission line windage yaw[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1):170-177.
- [11] 王乃进,韩松.低压系统电压约束下光伏发电准入容量确定的简化解析式研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):171-176.
WANG Naijin, HAN Song. Study on simplified analytical formulas for calculating permitted capacity of photovoltaic generation in low voltage system under voltage constraints [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):171-176.
- [12] 王婉婷.雷电过电压对风-光混合发电系统的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(5):176-182.
WANG Wanting. Study on the influence of lightning overvoltage on wind-photovoltaic hybrid power generation system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020 (5):176-182.
- [13] 王亚旭,李凤霞,苏猛.风光发电系统中模拟电机特性的储能优化控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):158-164.
WANG Yaxu, LI Fengxia, SU Meng. Energy storage optimization control for simulating motor characteristics in wind- solar generation system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):158-164.
- [14] 朱鑫要,赵静波,刘建坤,等.双馈风电场经混合串补外送系统次同步振荡特性[J]. 高压电器, 2019, 55(5):194-200.
ZHU Xinyao, ZHAO Jingbo, LIU Jiankun, et al. SSO characteristics of doubly fed wind farm integrated by hybrid series compensator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):194-200.
- [15] 朱鑫要,赵静波,刘建坤,等.双馈风电场经混合串补外送系统次同步振荡特性[J]. 高压电器, 2019, 55(5):194-200.
ZHU Xinyao, ZHAO Jingbo, LIU Jiankun, et al. SSO characteristics of doubly fed wind farm integrated by hybrid series compensator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):194-200.
- [16] 张陵,李君芝,杨金成,等.风电汇集地区次同步振荡控制系统的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3):199-207.
ZHANG Ling, LI Junzhi, YANG Jincheng, et al. Research on subsynchronous oscillation control system for wind power integration areas[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3):199-207.
- [17] 蔡晖,彭竹弈,吴晨,等.海上风电场运用柔性直流方式并网的无功控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):153-157.
CAI Hui, PENG Zhuyi, WU Chen, et al. Study on reactive control of flexible DC method reactive power in offshore wind farms[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):153-157.
- [18] 齐方方,王海云,常鹏.含风电的混合直流输电并网系统暂态特性分析[J]. 高压电器, 2019, 55(5):201-206.
QI Fangfang, WANG Haiyun, CHANG Peng. Analysis on transient characteristics of hybrid DC transmission connected- grid system with wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):201-206.
- [19] 王亚旭,李凤霞,苏猛.风光发电系统中模拟电机特性的储能优化控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):158-164.
WANG Yaxu, LI Fengxia, SU Meng. Energy storage optimization control for simulating motor characteristics in wind- solar generation system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):158-164.
- [20] 刘青,徐宏璐,李杰.基于STATCOM/BESS的风火打捆系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):165-170.
LIU Qing, XU Honglu, LI Jie. Study on sub synchronous oscillation suppression strategy of wind thermal power bundled transmission system based on STATCOM/BESS[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):165-170.
- [21] RAHUL S, Varinder Goyal. A hybrid model of solar-wind - biomass power generation system: A review[C]// 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). New Delhi, India, 2015: 1201-1203.
- [22] 赵炜,姚喜梅,张小青.用于光伏发电系统直流侧的电涌保护器研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(4):17-21.
ZHAO Wei, YAO Ximei, ZHANG Xiaoqing. Research of SPDs on DC side of PV system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):17-21.
- [23] 王琪,张长征,舒泳皓.含光伏电源的新型电气化铁道电能质量调节器[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4):88-93.

- WANG Qi, ZHANG Changzheng, SHU Yonghao. Novel power quality conditioner for electrified railway containing PV power[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4):88-93.
- [24] 竺庆茸, 李晗, 李先允, 等. 含光伏的主动配电网非对称故障条件下对并网点电压影响的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 101-106.
- ZHU Qingrong, LI Han, LI Xianyun, et al. Research on active distribution network and network effects on nonsymmetrical voltage fault conditions with PV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 101-106.
- [25] 钟运平, 陶飞达, 杨夏, 等. 计及不确定性的含分布式光伏配电网削峰效益评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4):170-175.
- ZHONG Yunping, TAO Feida, YANG Xia, et al. Peak load efficiency evaluation of distribution network with distributed photovoltaic considering uncertainty[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 170-175.
- [26] 舒立春, 兰斯琦, 蒋兴良, 等. 涂覆光电混合涂料复合绝缘子延缓覆冰效果研究[J]. 高压电器, 2020, 56(4):55-61.
- SHU Lichun, LAN Siqi, JIANG Xingliang, et al. Study on the anti-icing effect of photoelectric hybrid coating applied to composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):55-61.
- [27] 裴星宇, 甘德树, 柯清派, 等. 基于改进PI+重复控制的光伏逆变器谐波抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4):183-187.
- PEI Xingyu, GAN Deshu, KE Qingpai, et al. Harmonic suppression method of photovoltaic inverter based on improved PI and repetitive control[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4):183-187.
- [28] 陆善婷, 杨敏红, 程军照. 含高渗透率分布式光伏的实用型配电网无功电压控制技术研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 115-120.
- LU Shanting, YANG Minhong, CHENG Junzhao. Practical reactive power and voltage optimization method for active distribution network with high penetration distributed PVs[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 115-120.
- [29] 李秀俊, 邹旻昊, 周力行. 考虑负荷不确定性的分布式光伏电源最大准入功率的计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2):181-186.
- LI Xiujun, ZOU Minhao, ZHOU Lixing. Calculation of maximum penetration power of distributed photovoltaic power supply taking into account load uncertainty[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 181-186.
- [30] 张志, 周浩. 基于交错控制的三电平升压型DC/DC光伏控制器研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 129-134.
- ZHANG Zhi, ZHOU Hao. Research on three-level boost-type DC/DC photovoltaic controller based on interleaved control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 129-134.
- [31] FEI Xiangchen, XU Jianqun, LI Zhaoyu, et al. Research on improved CCHP system based on comprehensive performance evaluation criterion[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 672-674: 1873-1878.
- [32] CHEN Xiuwen, ZHENG Puyan, YUAN Yanzhou, et al. Study on thermodynamic evaluation index of combined cooling heating and power (CCHP) System[J]. Advanced Materials Research, 2013, 614-615:36-40.
- [33] UMAR H R, MAHMOUD S, JOAKIM M, et al. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120:106003.
- [34] YAO Jiandong, ZHENG Zhaoqiang, YANG Guowei. Layered tin monoselenide as advanced photothermal conversion materials for efficient solar energy-driven water evaporation[J]. Nanoscale, 2018, 10(6): 2876-2886.
- [35] 浙江省电力学会农村电气化专业委员会, 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院. 浙江生物质发电产业发展情况调查研究报告[J]. 农电管理, 2020(8): 37-42.
- Expert Committee on Rural Electrification of Zhejiang Society for Electric Power, State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic Research Institute. Research report on the development of biomass power generation industry in Zhejiang[J]. Agricultural Power Management, 2020(8): 37-42.
- [36] 靳晓锴. 助力乡村振兴全力打造综合能源服务智慧农业项目建设[J]. 农电管理, 2020(8): 61-62.
- JIN Xiaokai. Promoting rural revitalization to build an integrated energy service smart agriculture project[J]. Agricultural Power Management, 2020(8): 61-62.
- [37] 李天舒, 王惠民, 黄嘉超, 等. 我国地热能利用现状与发展机遇分析[J]. 石油化工管理干部学院学报, 2020, 22(3): 62-66.
- [38] 乔林思杭. 基于全寿命周期理论的光储电站容量配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

- [39] SHU Yimbiao, CHEN Guoping, ZHAO Yu, et al. Characteristic analysis of UHVAC/DC hybrid power grids and construction of power system protection[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3 (4): 325-333.
- [40] AXEL D, BRUCE O, ASTLEY H, et al. Land- use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon[J]. GCB Bioenergy, 2012, 4(4):372-391.
- [41] WANG Ying, ZHANG Yan, LIU Mei, et al. Study on comprehensive evaluation system and method of AC-DC hybrid system[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Sanya, China, 2020, 510 (2): 022019.
- [42] CAO Xiaoling, ZHANG Nan, YUANYanping, et al. Thermal performance of triplex- tube latent heat storage exchanger: simultaneous heat storage and hot water supply via condensation heat recovery[J]. Renewable Energy, 2020, 157: 616-625.
- [43] WU Xin, WEN Feng, ZHAO Haiyan. Recent progress in the synthesis of graphene/CNT composites and the energy- related applications[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 55: 16-34.
- [44] OPATHELLA C, AYMAN E, AMR A M, et al. Optimal scheduling of merchant- owned energy storage systems with multiple ancillary services[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020(7): 31-40.
- [45] LING Haoshu, HE Jingdong, XU Yujie, et al. Status and prospect of thermal energy storage technology for clean heating[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9 (3): 861-868.
- [46] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18,369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review of studies on the flexible and safe operation of renewable energy microgrids using energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):1-18, 369.
- [47] 杨琳,张晓寒,PANG Chengzong,等.电池储能附加阻尼控制抑制风电场次同步谐振[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):182-188.
YANG Lin, ZHANG Xiaohan, PANG Chengzong, et al. Suppression of subsynchronous resonance of wind farm by battery charging supplementary damping control[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 182-188.
- [48] 唐滢松,曾宪文,梁振,等.基于矢量匹配法和遗传算法的杆塔接地阻抗频域特性分析[J].电瓷避雷器,2019 (5):105-110.
TANG Yingsong, ZENG Xianwen, LIANG Zhen, et al. Frequency domain analysis of tower grounding resistance based on vector matching and genetic algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5):105-110.
- [49] 郑嘉龙.基于非线性规划遗传算法的并网逆变器LCL滤波器参数优化研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40 (5):146-150.
ZHENG Jialong. Study on parametric optimization of LCL filter of grid- connected inverter based on nonlinear programming genetic algorithm[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5):146-150.
- [50] 林胤戎,龙云波.基于微分遗传算法的支柱绝缘子最优设计[J].电瓷避雷器,2020(3):237-242.
LIN Yinrong, LONG Yunbo. Optimal design of post insulator based on differential genetic algorithms. Evaluation of MOV power loss based on ANFIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3):237-242.
- [51] MEHDI A, RAYMOND C, NASIMUL N, et al. A multi- population, multi- objective memetic algorithm for energy- efficient job- shop scheduling with deteriorating machines [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 157: 113348.
- [52] 吴愁.考虑能耗的单机批调度问题及其算法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [53] 殷树刚.多能互补条件下的用电负荷需求响应策略研究[D].北京:中国电力科学研究院,2017.
- [54] 张竣淇,冯婷婷,陈永刚.一种基于类电磁粒子群混合算法的无功补偿优化方法[J].电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5):61-65, 73.
ZHANG Junqi, FENG Tingting, CHEN Yonggang. An optimization method of reactive power compensation based on hybrid algorithm of electromagnetic- like and particle swarm optimization[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5):61-65, 73.
- [55] TYLER P, NATASHIA B, DIEGO P, et al. A Criterion space method for biobjective mixed integer programming: the boxed line method[J]. Inform Journal on Computing, 2020, 32 (1): 16-39.
- [56] ZHANG Xiaofeng, SUI Guifang. Quantum- behaved particle swarm optimization for mixed- integer nonlinear programming[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (9): 49-50, 82.
- [57] 史江兰.基于驱动因素和关键部门的中国“能源-水-经济”多目标协同管理策略研究[D].北京:中国地质大学,

- 2020.
- [58] WANG Huaizhi, ZHANG Rongquan, PENG Jianchun, et al. GPNBI-inspired MOSFA for pareto operation optimization of integrated energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151: 524-537.
- [59] JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (6): 260-267.
- [60] LI Guoqing, ZHANG Rufeng, TAO Jiang, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power[J]. Applied Energy, 2017, 192: 408-419.
- [61] GAO Bingtuan, LIU Xiaofeng, CHEN Chen, et al. Economic optimization for distributed energy network with cooperative game[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10 (5): 17.
- [62] DONG Xiaofeng, QUAN Chao, JIANG Tong. Optimal planning of integrated energy systems based on coupled CCHP[J]. Energies, 2018, 11 (10): 27.
- [63] HUANG He, LIANG Dapeng, ZHEN Tong. Integrated energy micro-grid planning using electricity, heating and cooling demands[J]. Energies, 2018, 11 (10): 20.
- [64] SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (7): 34-41.
- [65] LI Yajing, TANG Wenhui, WU Qinghua. Modified carbon trading based low-carbon economic dispatch strategy for integrated energy system with CCHP[C]// IEEE Milan PowerTech. Milan Italy, 2019:1-6.
- [66] GE Shaoyun, LIU Xiaou, GE Lukun. Planning method of regional integrated energy system considering demand side uncertainty[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2019, 20 (1): 12.
- [67] ZHOU Suyang, ZHUANG Wennan, WU Zhi, et al. Optimized scheduling of multi-region gas and power complementary system considering tiered gas tariff[J]. Energy, 2020, 193: 197-221.
- [68] LIU Wenxia, HUANG Yuchen, LI Zhengzhou, et al. Optimal allocation for coupling device in an integrated energy system considering complex uncertainties of demand response[J]. Energy, 2020, 198: 13.
- [69] JIA Chen, BAI Muke, ZHANG Chao, et al. Optimal configuration of user side integrated energy system based on chance constrained programming[M]. New York: IEEE, 2016: 433.
- [70] CAO Junbo, CHAO Daixu, LIU Shuang, et al. Comprehensive profit model of IES-CCHP considering the coupling and randomness of power, gas and heat[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30 (6): 16-22.
- [71] TAO Long, ZHENG Jinghong, ZHAO Wenzhi, et al. Optimization strategy of CCHP integrated energy system based on Source-Load coordination[C]//2018 international conference on power system technology. IEEE: New York, USA, 2018: 1781-1788.
- [72] YI Fang, LIU Wenxia, LI Zhengzhou, et al. Collaborative optimal configuration of electric power conversion equipment and CCHP equipment in IES considering variable working condition[C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Beijing China, 2019:284-289.
- [73] LI Yajun, ZHANG Ren. Study on the operation strategy for integrated energy system with multiple complementary energy based on developed superstructure model[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43 (13): 6951-6969.
- [74] 马永翔,孙荔伟,闫群民,等.基于双馈风力发电系统的无功补偿优化研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(4):152-156,163.
MA Yongxiang, SUN Liwei, YAN Qunmin, et al. Study on reactive power compensation optimization based on doubly-fed wind power generation system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 152-156.
- [75] 曹洪亮,王杭烽,项峰,等.基于浪涌抗扰度试验的风电机组压力传感器防雷优化[J].电瓷避雷器,2019(2):59-62.
CAO Hongliang, WANG Hangfeng, XIANG Feng, et al. Optimization of pressure sensor lightning protection of wind turbine based on surge immunity test[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2):59-62.
- [76] 孙泽伦,陈洁,滕扬新,等.基于混合储能平抑风电波动的负反馈分层模糊控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(4):176-182.
SUN Zelun, CHEN Jie, TENG Yangxin, et al. Negative feedback hierarchical fuzzy control strategy based on hybrid energy storage wind power fluctuation suppression [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4):176-182.
- [77] 邓皓,崔双喜,孙彦萍,等.孤岛微网中风光储混合建模及仿真研究[J].高压电器,2019,55(10):141-147.
DENG Hao, CUI Shuangxi, SUN Yanping, et al. Study on

- modeling and simulation of the wind/PV/storage hybrid in islanding micro-grid system[J].High Voltage Apparatus, 2019,55(10):141-147.
- [78] 黄孚远,温步瀛,方日升,等.兼顾安全与经济的高风电渗透率局部电网无功控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(4):157-163.
HUANG Fuyuan, WEN Buying, FANG Risheng, et al. A reactive power control strategy for highly wind power penetrated regional grids considering safety and economy [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019,40(4):157-163.
- [79] 陈晴,薛源,王克,等.用于海上风电并网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J].高压电器,2019,55(4):178-184.
CHEN Qing, XUE Yuan, WANG Ke, et al. Research on overvoltage and insulation coordination of flexible DC system for offshore wind farm integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(4):178-184.
- [80] 姜龙杰,孔深,王远东,等.考虑季节性冻土因素的风电场接地系统设计[J].电瓷避雷器,2019(5):133-138.
JIANG Longjie, KONG Shen, WANG Yuandong, et al. Design of wind farm grounding system considering seasonal frozen soil factors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5):133-138.
- [81] 萨妮耶·麦合木提,王海云,张强,等.基于虚拟惯量控制的风电电力系统电压稳定性研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(3):182-188.
Saniye · Maihemuti, WANG Haiyun, ZHANG Qiang, et al. Study on voltage stability of wind power system based on virtual inertia control[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019,40(3):182-188.
- [82] 王梦琦,李晓明,李文臣,等.含风电的电力系统不对称故障后机电恢复特性修正方法研究[J].电测与仪表,2019,56(2):16-23.
WANG Mengqi, LI Xiaoming, LI Wenchen, et al. Research on mechatronics restoration method after asymmetric faults of wind power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(2):16-23.
- [83] 何柳,粟时平,罗雪莲,等.风电并网暂态电能质量扰动的检测与识别[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):221-226.
HE Liu, SU Shiping, LUO Xuelian, et al. Detection and identification of transient power quality disturbance of wind power grid-connection[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020,41(1):221-226.
- [84] 刘引弟,刘会强,邢华栋,等. STATCOM 抑制低频振荡及稳定电压在风电场中的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):18-25.
LIU Yindi, LIU Huiqiang, XING Huadong, et al. Study on the application of suppressing low frequency oscillation and stabilizing voltage by STATCOM in wind farm[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020,41(2):18-25.
- [85] 庄文兵,章涵,王建,等.新疆750 kV特高压输电线路沿线地形及大风特征时空分析[J].高压电器,2019,55(1):190-196.
ZHUANG Wenbing, ZHANG Han, WANG Jian, et al. Temporal and spatial analysis of terrain and wind characteristics along 750 kV UHV transmission lines in Xinjiang[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(1):190-196.
- [86] 周歧斌,王振兴,边晓燕,等.风电场内集电线路雷击过电压的研究与防护[J].电瓷避雷器,2019(6):31-36.
ZHOU Qibin, WANG Zhenxing, BIAN Xiaoyan, et al. Research and protection of lightning overvoltage of collection line in wind farm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6):31-36.
- [87] 闫群民,李玉娇,张田.并网双馈风机PCC电压质量分析及控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):152-157.
YAN Qunmin, LI Yujiao, ZHANG Tian. Analysis of PCC voltage quality and study of control strategy for grid-connected doubly-fed wind power generator[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020,41(2):152-157.
- [88] 孙利朋,蒋正龙,赵纯,等.覆冰实验均匀风场形成方法研究[J].高压电器,2019,55(4):185-192.
SUN Lipeng, JIANG Zhenglong, ZHAO Chun, et al. Study on uniform wind field formation method in icing experiments[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(4):185-192.
- [89] 杨琦,李岚,赵荣理,等.基于模糊控制虚拟电阻的双馈风力发电机低电压穿越励磁控制[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):158-163.
YANG Qi, LI Lan, ZHAO Rongli, et al. Low voltage ride through excitation control for doubly-fed wind generator based on fuzzy control virtual resistance[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020,41(2):158-163.
- [90] 付盼,胡庆林.基于聚类分析的风电场多机等效建模方法研究[J].高压电器,2019,55(4):198-204.
FU Pan, HU Qinglin. Research on multi-machine

- equivalent modeling method of wind farm based on cluster analysis[J].High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):198-204.
- [91] 梁富光.丘陵地区大型陆上风电场接地测量研究[J].电瓷避雷器, 2019(6):78-84.
LIANG Fuguang. Grounding measurement study on onshore wind farm in hilly area[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6):78-84.
- [92] 任冲,程林,樊国伟,等.考虑风电预测及电压分布的风电场无功设备协调控制优化研究[J].电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2):175-180.
REN Chong, CHENG Lin, FAN Guowei, et al. Study on coordination control optimization of reactive power equipment of wind farm considering wind power prediction and voltage distribution[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2):175-180.
- [93] 苗长越,王维庆,王海云,等.光伏接入对系统小干扰稳定的影响研究[J].高压电器, 2019, 55(7):211-215.
MIAO Changyue, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research of the influence of photovoltaic access on small disturbance stability of the system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7):211-215.
- [94] 徐波,陈昌旺.基于虚拟电阻的三相无变压器光伏并网逆变器漏电流抑制方法[J].电测与仪表, 2019, 56(2):64-69.
XU Bo, CHEN Changwang. Virtual resistance method for leakage current suppression in three-phase transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2):64-69.
- [95] 宋宪可,樊艳芳,刘群杰,等.基于功率信号判别的光-储-燃直流微网协调控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3):197-204.
SONG Xianke, FAN Yanfang, LIU Qunjie, et al. Study on DC microgrid coordination control strategy of optical-storage-fuel based on power signal discrimination[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3):197-204.
- [96] 周步祥,杨常.基于实时计算光伏系统等效阻抗的自适应距离保护[J].电测与仪表, 2019, 56(5):89-93.
ZHOU Buxiang, YANG Chang. Adaptive distance protection based on equivalent impedance of real-time calculation PV system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5):89-93.
- [97] 朱训君,王宾,李海雨,等.基于改进粒子群算法的农村配电网分布式光伏选址定容研究[J].电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):206-214.
ZHU Xunjun, WANG Bin, LI Haiyu, et al. Study on distributed photovoltaic location and capacity selection of rural distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):206-214.
- [98] 王云,罗映红,赵腾跃,等.光伏并网逆变器自抗扰二自由度内模控制策略[J].电测与仪表, 2019, 56(6):127-132.
WANG Yun, LUO Yinghong, ZHAO Tengyue, et al. Two-degree-of-freedom internal model control strategy based on-ADRC for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6):127-132.
- [99] 闫群民,王俊杰,朱娟娟,等.随机光照强度下光伏阵列的MPPT控制研究[J].电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5):192-197.
YAN Qunmin, WANG Junjie, ZHU Juanjuan, et al. Study on MPPT control of photovoltaic array under random light intensity[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5):192-197.
- [100] 吴登盛,王立地,刘通,等.基于神经网络的光伏阵列多峰MPPT的研究[J].电测与仪表, 2019, 56(7):69-74.
WU Dengsheng, WANG Lidi, LIU Tong, et al. Research on multi peak MPPT of PV array based on neural network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7):69-74.
- [101] 贺素霞,乐丽琴,宇卫.光伏电站暂态特性仿真与分析[J].电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6):168-173.
HE Suxia, YUE Liqin, YU Wei. Simulation and analysis for transients of PV power station[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6):168-173.

收稿日期:2020-10-05。

作者简介:

李高潮(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为汽轮机及辅机系统节能技术;

卢怀宇(1998—),女,本科,硕士研究生,研究方向为光催化制氢;

孙启德(1973—),男,硕士,工程师,研究方向为火电厂热力系统及集中供热;

师进文(1981—),男,博士,副教授,研究方向为再生能源转化与利用、新能源材料、光催化;

刘富栋(1982—),男,硕士,工程师,研究方向为火电厂汽轮机节能技术;

李明涛(1981—),男,通信作者,博士,副教授,研究方向为综合能源系统建模、仿真与优化。

(编辑 冯露)