

综合能源系统优化运行技术研究综述

骆钊¹, 刘德文¹, 沈鑫², 王钢¹, 喻品钦¹, 李钊¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明市 650500;

2. 云南电网有限责任公司计量中心, 昆明市 650051)

摘要: 综合能源系统(integrated energy system, IES)是未来能源消费方式的重要发展方向,对提升能源的综合用能效率和可再生能源的消纳将发挥越来越重要的作用。然而,由于 IES 中能源系统的高度耦合以及源-网-荷-储各个环节存在的不确定性,使得 IES 的动态过程极其复杂,给 IES 的优化运行带来巨大挑战。针对 IES 的优化运行问题,首先简要介绍了 IES 的概念,分析了其主要特点;其次总结和概括了 IES 运行基础信息感知、混合时间尺度动态协调优化调度体系及其求解算法三个方面的国内外研究现状,并指出了现有研究的不足之处;最后展望了 IES 优化运行未来的研究方向,为该方向的后续研究提供参考。

关键词: 综合能源系统(IES); 优化运行; 信息感知; 混合时间尺度

Review of Research on Optimal Operation Technology of Integrated Energy System

LUO Zhao¹, LIU Dewen¹, SHEN Xin², WANG Gang¹, YU Pingqin¹, LI Zhao¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Metering Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China)

ABSTRACT: Integrated energy system (IES) is an important development direction of energy consumption in the future, and will play an increasingly important role in improving the energy efficiency of integrated energy use and the consumption of renewable energy. However, due to the high coupling of energy system in IES and the uncertainty in each link of source-network-load-storage, the dynamic process of IES is extremely complex, which brings great challenges to the optimal operation of IES. This paper aims at the optimal operation of IES. Firstly, the concept of IES is introduced and its main characteristics are analyzed. Secondly, the research status in home and abroad on the basic information perception of IES operation, the dynamic coordinated optimization scheduling system with hybrid time scales and its solution algorithm are summarized, and the shortcomings of the existing research are pointed out. Finally, the future research direction is prospected. The results of this paper will provide a reference for the follow-up research of integrated energy system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholar (No. 51907084) and Applied Basic Research Foundation of Yunnan Province (No. 2101AT070080, No. 202101AT070610).

KEYWORDS: integrated energy system (IES); optimal operation; information perception; hybrid time scales

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2022)12-0003-12

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.12.001

0 引言

随着全球性能源资源短缺和环境污染,各国倡导大力发展绿色、低碳、可持续的能源^[1]。2020年,我国提出了力争2030年前实现碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和的节能减排目标,加速能源领域朝着低碳化方向发展^[2]。“双碳”背景下,能源系统的本

质特征在于高比例新能源的渗透,然而随着高比例新能源的接入,能源系统面临着能源利用率低、可再生能源难以消纳等难题^[3-4]。

在传统的能源系统中,各种能源耦合不紧密,不同的能源网络相对独立,如电网、交通网、热网、天然气网络等由不同的公司管理和运营,导致整体能源利用效率低^[5]。此外,随着风、光等可再生能源技术的快速发展,源荷两侧的能源多样化促进了能源系统的进一步耦合^[6]。因此,为了提高能源的总体利用效

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51907084); 云南省应用基础研究计划资助项目(2101AT070080, 202101AT070610)

<http://www.cepc.com.cn>

率和实现可再生能源的大规模开发利用,对多类能源互联集成和互补融合的需求日益迫切^[7]。在当前能源系统面临的新形势下,发展综合能源系统(integrated energy system, IES)势在必行。2014年习近平主席提出“四个革命、一个合作”的能源发展战略思想^[8],为 IES 的发展提供了政策支持。随着未来 IES 的发展,其能源子系统间的高度耦合以及系统中存在的各种不确定性给 IES 的优化运行带来诸多挑战,如何实现 IES 的优化运行,发挥其能源梯级利用和多能互补融合的优势,成为亟待解决的问题。

IES 是未来能源消费方式的重要发展方向,受到国内外研究人员的广泛关注。然而在 IES 综合能源高效利用、多能源优化协调等方面研究和实践相对较少,未能全面体现 IES 带来的经济效益和社会效益,尤其是在提升多能源整体利用效率方面的研究和实践力度还不够。

基于此,针对 IES 优化运行问题,本文综述了 IES 优化运行技术的研究现状。首先简要概括 IES 的概念和特点;其次总结了 IES 基础信息感知、混合时间尺度动态协调优化调度体系和混合时间尺度动态协调优化调度体系求解算法三个方面的现有研究成果,并分析了现有研究的不足之处。值得注意的是,IES 优化运行基础信息感知是混合时间尺度动态协调优化调度的基础,求解方法是解决措施;最后展

望了未来的研究方向。

1 综合能源系统概念和特点

1.1 综合能源系统概念

IES 以电、气、冷、热多个能源子系统耦合互补为主要特征,在源侧整合多种能源资源,实现不同能源系统之间的统一规划、统一调度、优化运行和互补互济,在有效提升能源利用效率的同时促进可再生能源的消纳,进而实现节能减排。典型的 IES 如图 1 所示,该 IES 由配电子系统、天然气子系统、供冷/热子系统等供能网络相互耦合互连而成,并以能源转换、分布式储能、主动配电网等技术为核心,在能源传输、分配、转换和平衡上起着“承上启下”的作用。

在能源类型上,IES 源侧整合风、光等可再生能源,并利用其互补特性,实现能源梯级利用,促进清洁能源的消纳;荷侧实现供电、供气、供冷、供热的一体化,满足用户对多类能源的需求。在设备类型上,IES 中包含风电机组、光伏等分布式发电设备,燃气机组、电转气设备、电制冷机、吸收式制冷机、电锅炉等能源转换设备,蓄电池、蓄热槽、冰蓄冷等储能设备。

1.2 综合能源系统特点

相比于传统能源系统,IES 具有以下特点:

1) 不同能源网络各有不同的建模、分析和控制方法以及具有显著不同的动态过程。IES 耦合电、气、

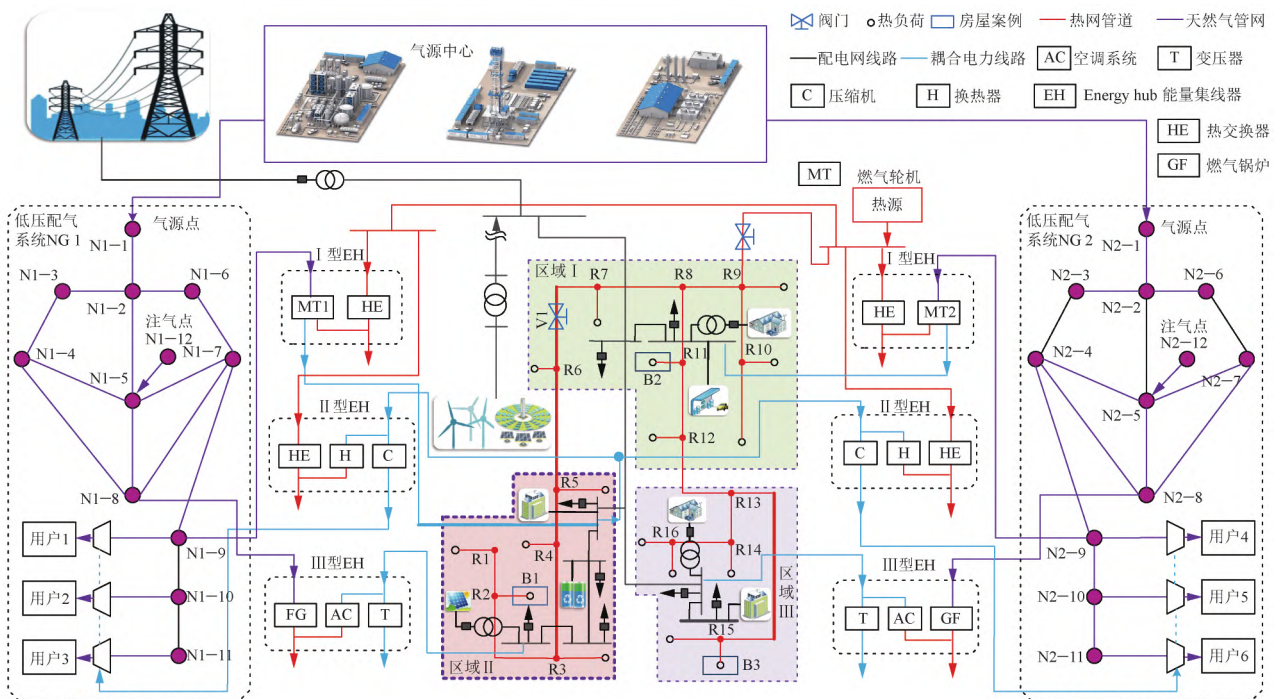


图 1 综合能源系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of an integrated energy system

冷、热多个能源网络,不同能源网络物理特性差异较大,其模型和分析方法分属不同物理学范畴。此外,电网中电能以电磁波形式传播,速度为光速,而热网由于热惯性,其传输相对较慢。这意味着 IES 中各能源网络到达稳态的时间相差较大。

2) 不同能流系统分属于不同的管理主体。IES 中,用户的供电、供气、供冷和供热由不同公司和管理主体负责,存在信息隐私、操作差异、目标差异等行业壁垒^[7]。

3) 以电网为核心,与热网和气网高度耦合。IES 中的各能源网络通过燃气机组、热电联供机组、电转气设备和电热泵等耦合设备相联系,解决了传统能源系统耦合不紧密的问题。随着耦合设备的大量接入,IES 发展成为一个以电网为核心,高度耦合热网和气网的多能源耦合系统。

此外,IES 涉及的理论与技术基础包括物理、化学、材料科学、控制科学、人工智能技术、优化理论和经济学原理等,属于多学科、多领域交叉的范畴;在空间尺度上,IES 可分为区域级、园区级和用户级 IES,不同层级的 IES 所侧重的部分和能源间的耦合程度各不相同;在关键技术层面,IES 涵盖了多能发电技术、多能输送技术、能量转换技术和储能技术等,如图 2 所示。

2 IES 优化运行技术研究现状分析

IES 作为近年来电力领域的研究热点,国内外学者已开展大量研究,然而 IES 存在多种能源形式、多种能源转化环节、多种运行方式以及多样性的用户用能需求,给研究工作造成困难。就 IES 优化运行而言,它涉及很多方面,本文主要综述综合能源系统运行基础信息感知、综合能源系统混合时间尺度动态协

调优化调度体系和混合时间尺度动态协调优化调度体系求解三个方面的内容。

2.1 IES 优化运行基础信息感知

IES 优化运行的核心基础是对系统运行基础信息进行充分的感知,以支撑系统整体的建模、分析和能量的合理优化管理,然而负荷和可再生能源的波动性、冷/热/电/气的耦合性、多能源之间的多时间尺度互补特性等给构建系统运行基础信息感知带来极大难度。虽然国内外不乏有大量关于综合能源系统运行基础信息感知的文章,但是就目前的研究成果而言,已有的系统运行基础信息感知需要从精确性、有限复杂度、统一集成性等方面进行完善。IES 具有独特的运行特性:分布式发电设备、耦合设备及储能设备三类设备的运行状况分析以各自的数学模型为基础,并且耦合设备的输入、输出为异质能源;作为高度耦合的能源系统,IES 各能源子系统通过耦合设备相联系,并且相互影响;IES 的优化运行是实现源侧与荷侧在不同时间尺度上能源互补的基础。

基于此,本文详细介绍关于多能源核心设备建模及交互转换接口、多能源单元及网络之间的耦合特性与交互作用机理、多能源之间的多时间尺度互补特性的国内外研究现状。

1) 多能源核心设备建模及交互转换接口。IES 中的核心设备包括联产设备(燃气轮机/内燃机)、新能源(光伏电源/氢燃料电池)、储能设备(蓄电池/蓄热槽/蓄冰槽)、能源耦合设备(压缩机/水泵)等,由于设备建模是大多数技术研究的基础,故目前国内外对上述核心设备的建模研究已较为成熟^[9-20]。文献[9]建立天然气供气流量调整模型,并分析了该模型对系统供气流量的波动性的影响。文献[10]提出了包括电力电子转换器、风机、热电联产设备、热交换器

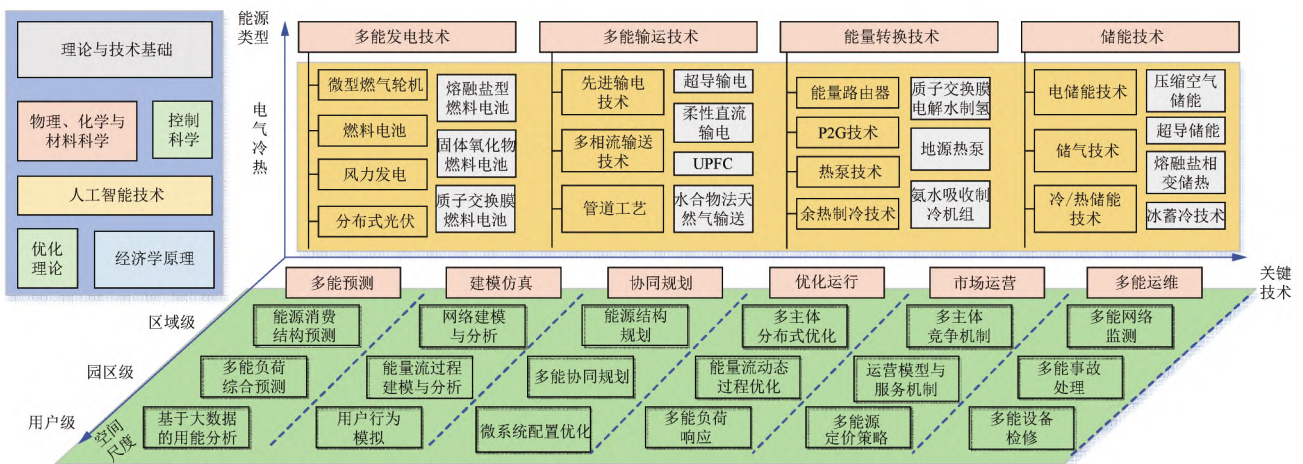


图 2 综合能源系统关键技术
Fig. 2 Key technologies of integrated energy system

<http://www.cepc.com.cn>

和热泵等设备的分布式能源站模型。文献[11]提出的能源集线器(energy hub, EH)模型将多种能源的供给和需求通过能源中心进行转换交互,并通过全局优化得出最佳的能源供给方式。文献[12]考虑到气网的慢动态特性,提出了电-气互联综合能源系统的多时段暂态能量流仿真模型,并分析了天然气系统的稳态模型与暂态模型在短时间尺度存在的差异性。文献[13]通过分析电采暖锅炉及集中供热系统的蓄能特性,提出了热电互联综合能源系统的优化调度模型,该模型有助于减少弃风量和降低热电联产机组的煤耗。文献[14]在对热网热损方程进行线性化处理的基础上,建立了含有热网的多区域综合能源系统混合整数线性规划模型,并分析了天然气价格的影响。文献[15]针对当前集中供热管网规划方法不适用于冷热联供的区域型IES的问题,提出了一套基于集中质量调节运行模拟的IES供能管网管径优化设计方法,该调节方式根据当前时刻负荷比最大的用户负荷情况调节综合能源站的供水流量和温度,较好地贴近用户负荷曲线。文献[16]介绍了能源集线器的基本概念及其建模方法,给出了典型的能源集线器建模示例。文献[17-19]从核心设备建模、多能源传输网络模型和交互转换接口等角度对综合能源系统运行基础信息进行感知,并对核心设备、能源传输网络进行了线性化处理。在上述文献中,尽管对综合能源系统内核心设备的建模研究以及交互转换接口研究取得了较大的进展,但尚未建立涵盖多种接口形式、考虑多能源传输网络、体现多能源耦合关系的统一集成的基于能源集线器的核心设备模型库。

2) 多能源单元及网络之间的耦合特性与交互作用机理。目前,国内外在综合能源系统内部耦合关系和交互作用机理方面已取得部分研究成果,文献[20]提出的考虑冷热电需求耦合响应的园区综合能源系统优化运行模型能够提高系统运行的灵活性,并促进分布式可再生能源的消纳。文献[21]研究了含光伏阵列的分布式热电联产系统的耦合问题,并且还包含了热管网的特性分析。文献[22]研究了冷热电联供系统的模型,将风力发电与超级电容器相结合,使用PSCAD搭建仿真模型,研究了“源-储”之间的交互机制。文献[23]研究了光-风、光-柴油机等互补发电系统的特性,证实了互补发电系统能够以最小的成本获得最大的电能输出,比单独发电系统更具优势。文献[24]提出了一种考虑区域供热网络储热特性的线性热-电联合调度方法,协调电力-区域热力系统短时优化运行,提升电力系统调度灵活性以适应大

规模风电随机接入。文献[25]在分析综合能源园区的需求侧用户互补聚合响应模型和传输侧热能传输延时模型的基础上,提出了一种运营商两阶段短期优化调度策略。文献[26]研究了供热系统中的热惯性,建立了热网传输时延模型及房屋蓄热模型,并提出了考虑热惯性的综合能源系统优化模型,证明了利用供热系统热惯性可有效提升系统运行经济性,显著降低凌晨及夜间时段弃风量。文献[20-26]对多能源的耦合特性进行分析,但未能全面对各能源单元和子系统的耦合关系进行全面深入的探讨;已有研究针对不同能源之间的交互特性进行分析,但未从数学角度深入研究各能源之间的交互机理。

3) 多能源之间的多时间尺度互补特性。充分挖掘多能源之间的互补潜力是提高可再生能源消纳能力和系统经济性的有效途径。文献[27]针对气电联合系统中天然气系统和电力系统运行时间尺度不同的问题,提出了一种可以考虑天然气系统动态过程的气电联合系统多时段优化运行模型,并分析了天然气系统和电力系统运行时间尺度上的差异性。文献[28]考虑风电资源的时空互补性来提高多能源之间的互济能力,针对可再生能源与热电联供混合微网的能量协调优化,基于对可再生能源、微型燃气轮机以及储能等典型分布式能源的功率响应特性分析,提出多时间尺度的能量协调优化方法。文献[29]分析美国天然气与电力系统之间的交互影响,考虑了天然气管道运行约束的电力风险评估和考虑风电随机性的电力机组日前调度等内容。文献[30]基于电网和天然气管网的稳态模型,分别构建了优化调度模型,通过松弛能量流的概念,作为两种能源网络协调优化调度的手段。文献[31]考虑了能源站电、热能间的多能互补特性,对供能网络布局以及能源站的数量、位置和设备容量配置进行规划。文献[32]在考虑风电接入、天然气网络和水电系统间影响的基础上,研究了电力系统机组组合问题。文献[33]提出了计及综合需求响应的IES多能协同优化调度策略,并分析了综合需求响应对电、气、冷、热多能协同互补的影响。文献[34]提出了一种能量感知优化策略,通过对复杂约束进行降阶处理,实现最大限度降低系统用能功耗。文献[34]考虑分布式集中供热及供冷系统的储能特性,提出了一种基于能源资源的区域综合能源系统协调优化调度模型,通过分析并网和离网两种场景,证明其有效性。文献[27-34]在分布式风光互补、电气热能源的互补利用方面已有一定的研究基础,但未从供-用-储各环节入手,研究电、气、热各能源的之间的互补互济及协同消纳能力。

2.2 IES 混合时间尺度动态协调优化调度体系

IES 包含电网、气网、冷网和热网多个异质能源网络,各能源网络具有不同的动态过程,到达稳态所需的时间相差较大,难以实现 IES 在同一时间尺度下的优化调度。此外,IES 中存在的负荷和可再生能源等不确定性因素和储能等灵活性资源使得 IES 实际调度中必然存在调度误差。围绕上述难点,为了降低 IES 中的不确定因素对系统调度的影响,并提高 IES 的灵活性,混合时间尺度动态协调优化调度模型应运而生,其框架如图 3 所示。该框架包括日前调度计划、日内动态协调优化和实时反馈策略三个时间尺度,能够在实现 IES 准确调度的前提下提高 IES 运行的经济性、灵活性和能源综合利用效率,并降低气体排放量。

国内外学者在 IES 混合时间尺度优化调度方面亦进行了大量有益探索。文献 [35] 基于 IES 用户预测误差、设备响应特性和调度可靠性,提出一种考虑能量特性差异的混合时间尺度经济调度策略,以实现 IES 更灵活、平稳地调度。文献 [36] 建立了包含混合分辨率建模与混合指令周期的综合能源系统混合时间尺度运行优化框架,兼顾源/荷侧的多重不确定性,以实现电、气、热异质能流网络和设备协同运行。文献 [37] 提出了一种基于供需博弈交互的混合时间尺度能源优化调度模型,并采用基于自适应参考点的大规模多目标鲸鱼优化算法求解。文献 [38] 提出了综合考虑长短期互补特性的综合能源系统协调优化框架,并通过一个多能源互补基地验证了利用风电、光伏、水电互补的特点,共同利用各类能源资源,可以有效提高能源资源的利

用率。

就目前而言,计及电/热/气网络的 IES 优化调度模型,以及通过多时间尺度优化调控策略削弱各能源网络出力不确定性带来的不利影响和相应的求解算法研究尚且较少,同时对能源网络中各设备动态特性建模未进行深入研究,无法适应综合能源系统现实的应用需求。

2.3 IES 混合时间尺度动态协调优化调度体系求解

IES 混合时间尺度动态协调优化调度模型具有负荷随机扰动、能源流分属不同的管理主体等特点,其求解过程异常复杂。基于此,现有研究借助鲁棒优化技术和博弈论来求解模型。

2.3.1 鲁棒优化

IES 中源-网-荷-储各个环节均存在不确定性因素。风、光等可再生能源的随机性、间歇性等特性使得风、光等可再生能源发电出力具有不确定性,以及电、气、冷、热负荷的需求不确定性给系统优化带来挑战。如何处理不确定性给系统优化运行带来的影响,对 IES 发挥多能互补、能源梯级利用优势有着极为重要的意义。现有研究关于 IES 中的不确定性处理方法主要有随机优化、鲁棒优化、模糊优化和区间优化^[39]。本文主要介绍鲁棒优化的内容。

针对 IES 混合时间尺度动态协调优化调度模型中可再生能源发电出力和负荷随机扰动引起的不确定性,基于鲁棒优化技术可保证当不确定变量在给定不确定集内任意变化时,所得鲁棒最优解均能满足系统运行需求。鲁棒优化模型开展的相关研究如表 1 所示。

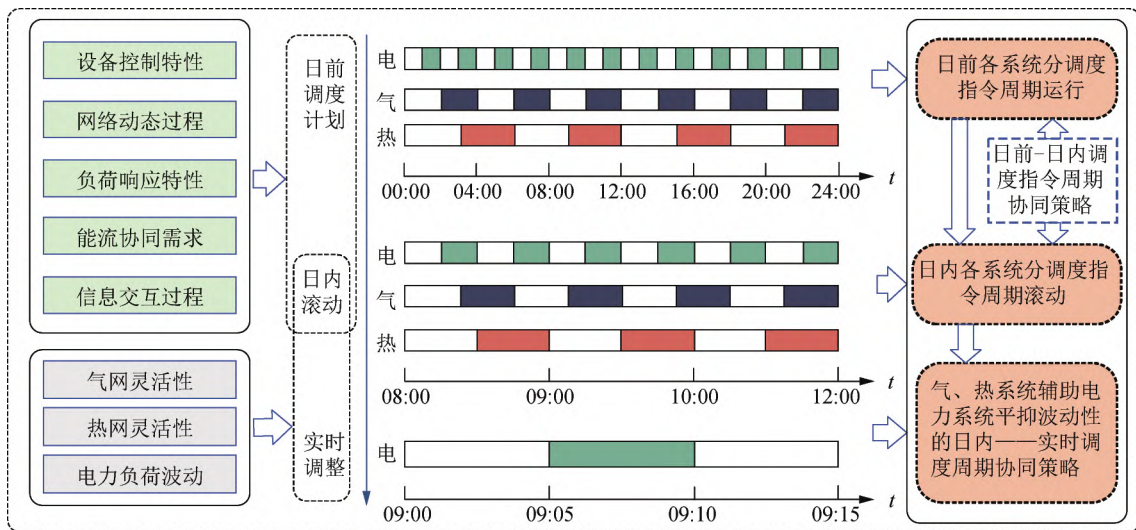


图 3 综合能源系统混合时间尺度动态协调优化调度框架

Fig. 3 Framework of hybrid time-scale dynamic coordinated optimal scheduling for IES

表 1 鲁棒优化模型对比
Table 1 Comparison of robust optimization model

文献	不确定性因素	鲁棒类型	优化目的
[40]	可再生能源出力、涌出水	两阶段随机鲁棒	利用采矿过程中产生的额外能源
[41]	风速、太阳辐射及电、热、冷负荷	两阶段随机鲁棒	容量配置
[42]	风能、电价	最大-最小-最大鲁棒	机组调度、能源采购
[43]	风电出力、燃气消费及生产	分布式鲁棒	降低运行成本、促进风电消纳
[44]	风电出力	分布式鲁棒	降低运行成本、促进风电消纳
[45]	太阳能发电、负荷需求预测	两阶段鲁棒	降低系统运营成本、对抗建模的不确定性
[46]	风电、负荷	两阶段鲁棒	提升系统鲁棒性、促进风电消纳、抵御实时补偿电价风险
[47]	市场、可再生能源出力	随机鲁棒	降低运行成本及潜在的成本增加风险
[48]	分布式能源、负荷	随机鲁棒	降低运行成本、促进能源供需平衡
[49]	电力、室外温度	自适应鲁棒	保障 IES 的安全运行和最终用户的热舒适性

2.3.2 多主体博弈

IES 中各主体往往均是理性地追求各自领域利益的最大化,但是每个主体之间往往信息不透明不对称,导致各主体竞争无序化现象特别严重,不利于市场效率的提高。尤其是在电力市场环境下,多利益主体有各自的运行决策空间,同时主体之间又存在着复杂的合作或竞争关系,因此存在着相互博弈的现象。本文整理的博弈论现有研究成果如表 2 所示,具体分析了所选文献博弈参与主体、博弈模型及求解算法三个方面的内容。IES 混合时间尺度动态协调优化调度体系采用的博弈类型可分为合作博弈^[52, 58]、非合作博弈^[52, 54-55]、主从博弈^[50, 57]、Stackelberg 博弈^[54]、联盟博弈^[51]及演化博弈^[56]等。其中联盟博弈属于合作博弈的分支。合作博弈和非合作博弈经常用来处理主体间的利益关系,前者顾及个体和整体利益,能实现全局最优;后者强调个体利益,可实现局部最优。若出现领导者和跟随者等分层决策问题,往往采用主从博弈及 Stackelberg 博弈。联盟博弈中,参与主体在合作的

基础上形成联盟。演化博弈模型中,根据生物进化论,人不再是完全理性的,而是通过试错的方法实现博弈均衡。

基于博弈论的 IES 运行优化求解方法主要包括数学规划方法^[50, 54-55]、不完全信息博弈的学习算法^[52]、智能优化方法^[51, 53, 56-57]等。基于博弈论的框架、理论和方法研究含多种可调资源的综合能源系统动态协调优化的研究相对较少,且均以关于日前交互博弈为主,对考虑多能源协调实时反馈校正策略的 IES 博弈模型求解方法尚未见报道。

3 IES 优化运行展望

作为新一代能源系统,IES 可满足荷侧多元化用能需求,有效提升源侧能源利用效率,促进了能源可持续发展,受到国内外广泛关注。然而,IES 因其本身的特点,使得 IES 内各能源系统的优化运行面临诸多挑战,难以发挥系统多能互补的优势。在总结上述综述内容的基础上,展望 IES 优化运行未来的研究方向。

表 2 博弈论研究现状
Table 2 Research status of game theory

文献	参与主体	博弈模型	求解方法
[50]	发电侧、需求侧	主从博弈	并行分布式计算方法
[51]	能源集线器	联盟博弈(合作博弈)	分布式联盟构造算法
[52]	供能商、配电网、用户	合作博弈、非合作博弈	边际一致性优化、Q-Learning 算法
[53]	分布式能源站、用户	Stackelberg 博弈	分布式算法
[54]	微能源网、用户	非合作博弈	BONMIN 求解器
[55]	多园区	非合作博弈	Nash 均衡解
[56]	农网、农业园区	演化博弈	多目标粒子群优化算法
[57]	能源管理商、供能运营商、储能运营商、用户	主从博弈	自适应差分进化算法
[58]	多园区	合作博弈	ADMM 算法

3.1 不同形式的能源集线器接口模型

IES 包括电、气、冷、热多种能源形式,从模型的角度来讲,IES 不同能源之间的转化、存储和分配通过能源集线器实现。然而 IES 中不同设备组成的能源接口形式多样,对应不同接口形式的能源集线器接口模型研究尚少,难以满足当前综合能源系统对能源集线器接口的要求。

因此,有必要针对接口设备组成差异,结合接口组成设备的数学模型,研究对应不同接口形式的能源集线器接口模型,并基于建立的能源集线器模型,对比各接口形式在不同负荷特性下的性能表现,研究不同条件下的最优接口选择策略,为能源集线器划分及 IES 能量管理提供支撑。通过分析不同接口模型的分配矩阵、转换矩阵等研究多能源之间的交互转换关系,针对不同需求选取相应的能源接口划分依据,对能源接口分类,建立多能源传输网络的支路特性、网络特性、传输延时以及网络损耗等数学模型;结合能源集线器基本模型与多能源传输网络模型,建立基于能源集线器的 IES 集成模型。

3.2 多能源网络间耦合程度强弱判据

IES 中多能源单元在供能、使用和储存过程中存在耦合,耦合程度影响着不同时间尺度下多能源之间的互济能力和协同消纳能力,如电锅炉可通过其效率衡量电热功率的转换程度,其值影响着电、热网之间的功率交互大小;而在源侧,能源网络间的耦合程度影响着风、光等可再生能源的互补潜力,进而影响 IES 对可再生能源的消纳能力。

为充分利用多能源之间的多时间尺度互补特性,提高能源利用效率,应分析多能源网络以及包括风、光等可再生能源的多能源单元的供用方式、出力特性、转换效率等特性,对多能源网络间耦合强弱程度的判断依据展开深入研究,以能源网络输入及输出数据为基础,利用卷积神经网络、长短期记忆模型等深度学习方式,探究电、气、冷、热各能源之间的耦合方式、耦合机理和耦合强度等相关特性分析的理论依据,以实现大规模风电等新能源并网后能源系统可再生能源的最大消纳,解决弃风弃光问题。

3.3 混合时间尺度动态协调优化调度体系

包含日前调度计划、日内动态协调优化和实时反馈校正策略的 IES 混合时间尺度动态协调优化调度体系,能够降低因为电、气、冷、热各子系统物理差异较大和系统不确定性引起的调度误差。但在日内阶段,由于可再生能源和负荷预测受多重因素影响,预测准确度随着预测时间尺度变长而逐渐降低,日前计划往往无法满足功率平衡需求。此外,日内动

态协调优化虽然减少了可再生能源波动对有源配电系统运行的影响,但仍属于开环的优化方法。

围绕上述问题,在日前部分,依托各个设备单元的数学模型、电/热/气网络的简化数学模型以及冷、热、电负荷特性曲线,实现 IES 的多目标能量优化管理,并考虑每个目标的重要程度,选取合理转化方法,将多目标问题转换成单目标优化问题;在日内部分,以多能源互补及其对调度指令的响应特性作为主要输入信息,以提高 IES 运行灵活性为主要目标,深入研究 IES 各设备调节速率、调节深度、响应速度及指令下发后能源网络动态过程,并建立区域综合能源系统灵活性量化指标与评估方法;在实时阶段,剖析各能流系统内负荷波动特性之间的关联关系,并利用集成学习技术建立各能流系统内负荷功率预测模型并给予增量学习,在对下一个控制时域进行负荷功率预测前,先将前几个控制时域内量测到的功率波与其他相关信息更新至历史数据库,并通过在线增量学习机制对当前预测模型进行修正。

3.4 混合时间尺度协调优化模型求解方法

1) 优化模型的重构与简化。IES 混合时间尺度动态协调优化模型具有高维非线性、混合整数、负荷随机扰动及多管理主体等特点,造成 IES 运行工况复杂多变,需要对其数学模型进行重构与简化。笔者认为可利用线性化技术、二阶锥优化技术及网络约束逐次线性逼近技术对混合时间尺度动态协调优化模型进行重构与简化,从而降低模型的复杂度。三种重构与简化方法如图 4 所示。线性化技术将 IES 核心设备模型简化为线性模型;二阶锥优化技术利用区域综合能源系统特有网架结构,对能流网络约束进行松弛,从而将区域综合能源系统能流网络方程转化为二阶锥凸优化;网络约束逐次线性逼近技术将优化模型中的非线性项进行变量替代,减少模型中的非线性项,便于模型能够用常规的优化软件进行求解。

2) IES 最优分区。IES 虽然规模庞大,但其网络结构具有稀疏性。对综合能源系统进行分区后,各区域高内聚低耦合,其求解也相对容易,图 1 所示结构的 IES 最优分区如图 5 所示。在 IES 最优分区的基础上,IES 优化问题变为分布式优化问题。

3) IES 最优分区算法。对于分布式优化问题,可采用拉格朗日松弛^[59]、增强拉格朗日松弛^[60]、分布式模型预测控制算法^[61]和交替方向乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM)^[62]等算法求解,交替方向乘子法因其收敛性好等特点,广泛应用于电力系统的分布式优化问题。在 IES 最优分区的基础上,基于交替方向乘子法

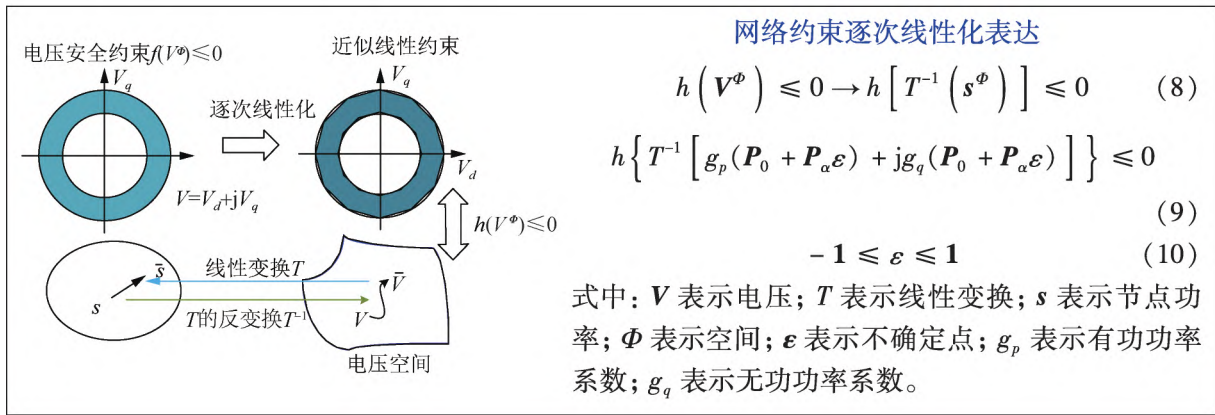
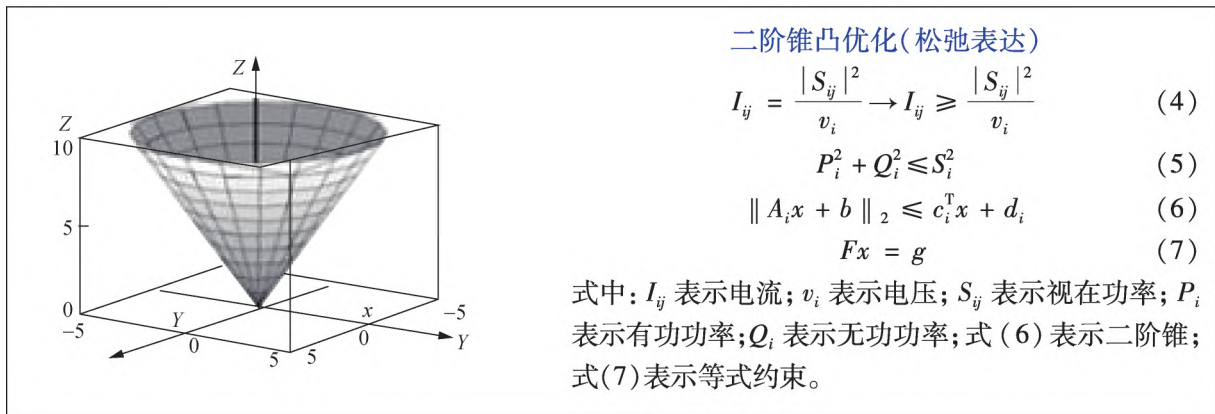
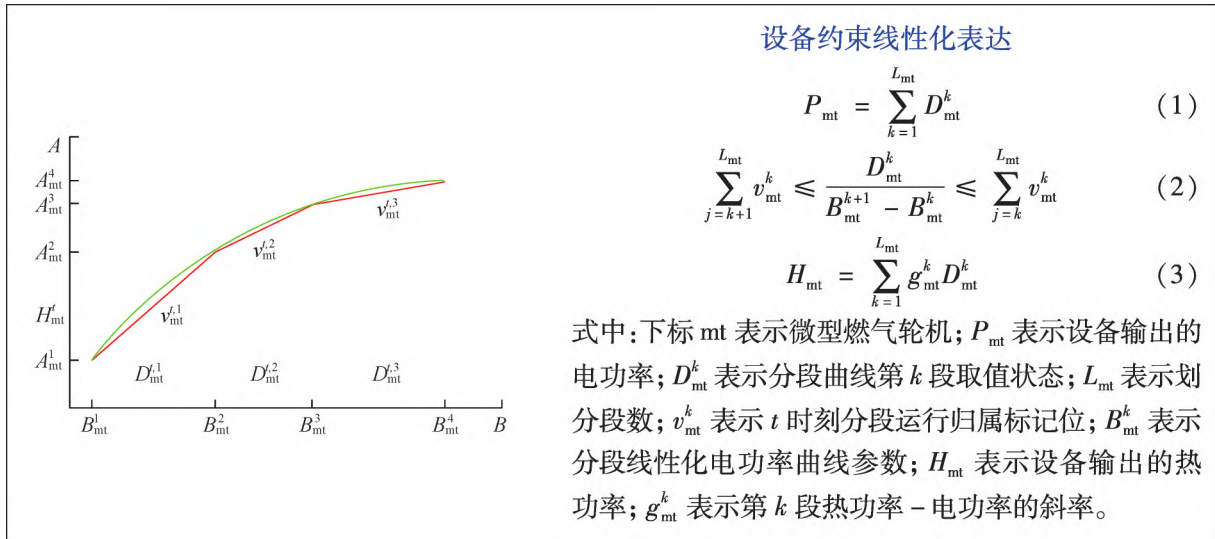


图 4 混合时间尺度动态协调优化模型的重构与简化方法

Fig. 4 Reconstruction and simplification of hybrid time-scale dynamic coordination optimization model

将综合能源系统优化模型分解成若干子问题求解,每一个分区对应一个子问题,通过不断求解各分区子问题实现原始问题的求解。各分区子问题的求解相互独立,即各子问题求解实现异步迭代,仅仅在每个子问题求解收敛后各分区与相邻分区交换分区边界节点迭代结果,大大降低通信要求和信息传输量。

4 结 论

IES 是未来实现高比例可再生能源接入电网的重要应用场景与载体,为能源行业的低碳化发展提供了一条有效途径,契合国家“双碳”目标的需求。IES 能够实现多类能源的互联集成和互补融合,实现了供

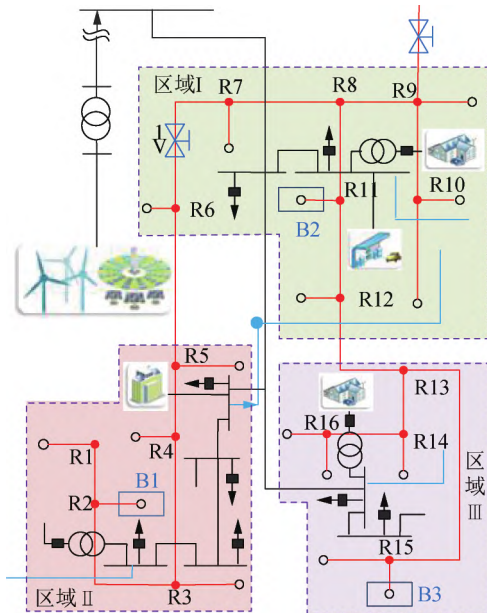


图 5 综合能源系统最优分区
Fig. 5 Optimal sub-area of IES

电、供气、供冷、供热系统的一体化,满足用户对多类能源的需求,在降低系统碳排放的同时兼顾了系统运行的经济性。因此,推广 IES 势在必行。实现 IES 的优化运行,有利于统筹系统内各个能源网络的动态协调优化,提升各个能源网络内的综合用能效率和新能源的消纳能力,并通过集成 IES,实现不同能源网络内的可再生能源与负荷特性互补,进一步提升能源利用效率和促进可再生能源的消纳。深入研究 IES 优化运行技术,有助于及时解决综合能源系统井喷式发展过程中可能出现的技术问题,发挥综合能源系统内各种可调资源的协同互补优势,推动综合能源系统能量管理技术的发展。

本文综述了 IES 优化运行技术的研究现状。围绕 IES 优化运行问题,首先介绍了 IES 的概念和特点;其次从 IES 基础信息感知、混合时间尺度动态协调优化调度体系及其求解算法三个方面梳理和归纳了当前 IES 优化运行技术国内外研究动态及不足之处;最后展望了 IES 优化运行未来可深入研究的方

5 参考文献

- [1] 齐宁,程林,田立亭,等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(10): 193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [2] 张希良,姜克隽,赵英汝,等. 促进能源气候协同治理机制与路径跨学科研究[J]. 全球能源互联网,2021,4(1): 1-4.

- ZHANG Xiliang, JIANG Kejun, ZHAO Yingru, et al. Boost interdisciplinary research on development pathway and synergy governance of energy and climate [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 1-4.
- [3] 陈胜,卫志农,顾伟,等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革:多能流协同技术[J]. 电力自动化设备,2021,41(9): 3-12.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12.
- [4] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [5] 高军伟,陈泽雄,郑欣,等. 含光伏的冷热电联供园区微网多类型储能协调鲁棒优化配置[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(6): 56-66.
GAO Junwei, CHEN Zexiong, ZHENG Xin, et al. Coordinated robust optimal allocation of multiple types energy storage devices in the CCHP campus microgrid with photovoltaic [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 56-66.
- [6] 孙浩,傅金洲,鄢小虎,等. 区域综合能源仿真优化系统的研制[J]. 华电技术,2021,43(4): 8-13.
SUN Hao, FU Jinzhou, YAN Xiaohu, et al. Research and development of integrated community energy simulation-optimization system [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 8-13.
- [7] 孙宏斌,潘韶光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(15): 1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [8] 张仙智. 习近平新时代能源国家战略研究[J]. 上海经济研究,2019,31(1): 15-19.
ZHANG Xianzhi. Xi Jinping's national energy strategy in the new era [J]. Shanghai Journal of Economics, 2019, 31(1): 15-19.
- [9] 赵曰浩,鞠平. 考虑供气约束与净负荷预测误差的电-气综合能源系统调度策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(7): 221-228.
ZHAO Yuehao, JU Ping. Scheduling strategy of integrated electricity and gas system considering constraint of gas supplying and prediction error of net power load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 221-228.
- [10] 王丹,黄德裕,胡庆娥,等. 基于电-热联合市场出清的综合需求响应建模及策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(12): 13-21.
WANG Dan, HUANG Deyu, HU Qinge, et al. Modeling and strategy of integrated demand response based on joint electricity-heat clearing market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 13-21.
- [11] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [12] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6): 41-47.

- WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 41-47.
- [13] HUANG X Z, XU Z F, SUN Y, et al. Heat and power load dispatching considering energy storage of district heating system and electric boilers [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(5): 992-1003.
- [14] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1305-1316.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1305-1316.
- [15] 管霖, 江泽涛, 唐宗顺. 基于集中质量调节的综合能源系统供能管径优化设计方法及系统经济性分析 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 75-83.
GUAN Lin, JIANG Zetao, TANG Zongshun. Optimal diameter sizing based on centralized quality-quantity regulation and economic analysis of IES piping network [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 75-83.
- [16] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [17] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7174-7184.
WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling heating and power microgrid based on model predictive control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7174-7184.
- [18] LUO Z, WANG Z H, WEI G, et al. A two-stage energy management strategy for CCHP microgrid considering house characteristics [C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015: 1-5.
- [19] TANG Y Y, GU W, WANG Z H, et al. Optimal configuration of distributed generators in an integrated energy system [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016, 8(4): 045301.
- [20] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2): 573-589.
ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 573-589.
- [21] MEHLER E D, SARIMVEIS H, MARKATOS N C, et al. A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level [J]. *Energy*, 2012, 44(1): 96-104.
- [22] 袁琦. 可再生能源发电中的储能技术 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2009, 30(5): 30-32, 42.
YUAN Qi. Energy storage technology in renewable energy generation [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2009, 30(5): 30-32, 42.
- [23] DUFO-LÓPEZ R, BERNAL-AGUSTÍN J L. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(1): 33-46.
- [24] LI Z G, WU W C, WANG J H, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 480-492.
- [25] 徐业琰, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 152-163.
XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 152-163.
- [26] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings [J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 234-246.
- [27] 艾小猛, 方家琨, 徐沈智, 等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型 [J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 409-416.
AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenzhi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 409-416.
- [28] 裴玮, 邓卫, 沈子奇, 等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 9-15.
PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 9-15.
- [29] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Generation risk assessment in volatile conditions with wind, hydro, and natural gas units [J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 4-11.
- [30] CHEN Z X, ZHANG Y J, JI T Y, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(3): 495-508.
- [31] 黄伟, 刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 20-28.
HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station-network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 20-28.
- [32] KAMALINIA S, WU L, SHAHIDEHPOUR M. Stochastic midterm coordination of hydro and natural gas flexibilities for wind energy integration [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(4): 1070-1079.
- [33] 邓逸天, 王宇辉, 黄景光, 等. 考虑需求响应的含 P2G 电-气综合能源系统优化调度 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(12): 8-13.

- DENG Yitian, WANG Yuhui, HUANG Jingguang, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-gas system with power to gas considering demand response [J]. *Smart Power*, 2020, 48(12): 8-13.
- [34] CONFICONI C, BARTOLINI A, TILLI A, et al. Integrated energy-aware management of supercomputer hybrid cooling systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1299-1311.
- [35] 栗然, 孙帆, 刘会兰, 等. 考虑能量特性差异的用户级综合能源系统混合时间尺度经济调度 [J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3615-3624.
- LI Ran, SUN Fan, LIU Huilan, et al. Economic dispatch with hybrid time-scale of user-level integrated energy system considering differences in energy characteristics [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3615-3624.
- [36] 顾伟, 陆帅, 姚帅, 等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化 [J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 203-213.
- GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 203-213.
- [37] LI X Z, WANG W Q, WANG H Y. Hybrid time-scale energy optimal scheduling strategy for integrated energy system with bilateral interaction with supply and demand [J]. *Applied Energy*, 2021, 285: 116458.
- [38] WANG S K, JIA R, SHI X Y, et al. Hybrid time-scale optimal scheduling considering multi-energy complementary characteristic [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 94087-94098.
- [39] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度 [J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 2964-2975.
- CUI Yang, GUO Fuyin, ZHONG Wuzhi, et al. Interval multi-objective optimal dispatch of Integrated energy system under multiple uncertainty environment [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 2964-2974.
- [40] HUANG H X, LIANG R, LV C X, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system [J]. *Applied Energy*, 2021, 290: 116759.
- [41] YAN R J, WANG J J, WANG J H, et al. A two-stage stochastic-robust optimization for a hybrid renewable energy CCHP system considering multiple scenario-interval uncertainties [J]. *Energy*, 2022, 247: 123498.
- [42] NAJAFI A, POURAKBARI-KASMAEI M, JASINSKI M, et al. A max-min-max robust optimization model for multi-carrier energy systems integrated with power to gas storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 48: 103933.
- [43] ZHANG Y C, ZHENG F, SHU S W, et al. Distributionally robust optimization scheduling of electricity and natural gas integrated energy system considering confidence bands for probability density functions [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106321.
- [44] 易文飞, 卜强生, 路珊, 等. 计及气网管存效应的综合能源系统分布鲁棒优化调度 [J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(6): 53-60.
- YI Wenfei, BU Qiangsheng, LU Shan, et al. Distributionally robust optimal dispatching of integrated energy system considering line pack effect of gas network [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(6): 53-60.
- [45] WANG C S, JIAO B Q, GUO L, et al. Robust scheduling of building energy system under uncertainty [J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 366-376.
- [46] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度 [J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3090-3100.
- GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3090-3100.
- [47] WANG Y W, TANG L, YANG Y J, et al. A stochastic-robust coordinated optimization model for CCHP micro-grid considering multi-energy operation and power trading with electricity markets under uncertainties [J]. *Energy*, 2020, 198: 117273.
- [48] LI P, WANG Z X, WANG N, et al. Stochastic robust optimal operation of community integrated energy system based on integrated demand response [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 128: 106735.
- [49] LU S, GU W, ZHOU S Y, et al. Adaptive robust dispatch of integrated energy system considering uncertainties of electricity and outdoor temperature [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4691-4702.
- [50] 张彦, 张涛, 孟繁霖, 等. 基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23): 6829-6845.
- ZHANG Yan, ZHANG Tao, MENG Fanlin, et al. Model predictive control based distributed optimization and scheduling approach for the energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 6829-6845.
- [51] 丛昊, 王旭, 蒋传文, 等. 基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 14-22.
- CONG Hao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Coalition game based optimized operation method for integrated energy systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 14-22.
- [52] 郝然, 艾芊, 姜子卿. 区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 194-201.
- HAO Ran, AI Qian, JIANG Ziqing. Bi-level game strategy for multi-agent with incomplete information in regional integrated energy system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 194-201.
- [53] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 142-150.
- WU Lilan, JING Zhaoxia, WU Qinghua, et al. Equilibrium strategies for integrated energy systems based on Stackelberg game model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 142-150.
- [54] 林凯骏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 25-32.
- LIN Kaijun, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Optimization

- of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32.
- [55] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊焄, 等. 基于冷热电联供的多园区博弈优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68-75.
WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, et al. Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75.
- [56] 边辉, 陈丽娜, 马凡琳, 等. 基于中枢解耦与演化博弈的多农业园区综合能源系统优化运行 [J]. 电力建设, 2022, 43(2): 26-36.
BIAN Hui, CHEN Lina, MA Fanlin, et al. Optimal operation strategy based on central decoupling and evolutionary game for multiple agricultural integrated energy systems [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 26-36.
- [57] 王瑞, 程杉, 汪业乔, 等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 12-21.
WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12-21.
- [58] 姚文亮, 王成福, 赵雨菲, 等. 不确定性环境下基于合作博弈的综合能源系统分布式优化 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 43-53.
YAO Wenliang, WANG Chengfu, ZHAO Yufei, et al. Distributed optimization of integrated energy system based on cooperative game in uncertain environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 43-53.
- [59] CHEN J H, ZHANG Y. A Lagrange relaxation-based alternating iterative algorithm for non-convex combined heat and power dispatch problem [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 177: 105982.
- [60] WU C Y, GU W, BO R, et al. Energy trading and generalized Nash equilibrium in combined heat and power market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3378-3387.
- [61] 张勇, 李晨, 贾楠, 等. 基于改进二阶锥松弛的多区域电-气综合能源系统优化调度快速求解方法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 39-45.
ZHANG Yong, LI Chen, JIA Nan, et al. Fast solution method for optimal dispatching of multi-area integrated electricity-gas systems based on improved second-order cone relaxation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 39-45.
- [62] 王磊, 周建平, 朱刘柱, 等. 基于分布式模型预测控制的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 57-65.
WANG Lei, ZHOU Jianping, ZHU Liuzhu, et al. Multi-time-scale optimization scheduling of integrated energy system based on distributed model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 57-65.

收稿日期: 2022-06-01

作者简介:

骆钊(1986) 男, 博士, 副教授, 通信作者, 主要研究方向为综合能源系统运行、电力系统运行与控制、信息技术在电力系统中的应用, E-mail: waiting_1986@live.com;

刘德文(1999) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统运行, E-mail: Daiv@stu.kust.edu.cn;

沈鑫(1981) 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为区块链、智能配用电技术、非侵入式居民负荷量测技术, E-mail: 23755803@qq.com;

王钢(1999) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为信息技术在电力系统中的应用, E-mail: kust_401@163.com;

喻品钦(1999) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统运行, E-mail: yupinqin618@163.com;

李钊(1997) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统运行, E-mail: lizhao0211@qq.com。

(编辑 魏希辉)

广告目录

封二 《电力建设》征订通知
封三 江东金具设备有限公司
封底 抗疫公益广告
前插 1 中天科技海缆有限公司

前插 2 四川中电启明星信息技术有限公司
前插 3 浙江华云电力工程设计咨询有限公司
前插 4 安全用电公益广告
前插 5 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司