

电-热综合能源系统优化调度综述

朱浩昊, 朱继忠*, 李盛林, 董瀚江, 何晨可, 蓝静

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510641)

Review of Optimal Scheduling of Integrated Electricity and Heat Systems

ZHU Haohao, ZHU Jizhong*, LI Shenglin, DONG Hanjiang, HE Chenke, LAN Jing

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China)

Abstract: With the popularization of energy conversion equipment such as combined heat and power units, heat pumps, electric boilers, and air conditioners, energy conversion and information interaction between electric power systems (EPS) and district heating systems (DHS) have become increasingly close, gradually forming integrated electricity and heat systems (IEHS). Combined heat and power dispatch (CHPD) can promote renewable energy accommodation and improve the flexibility of EPS. First, the composition of IEHS is introduced, including electric power networks, district heating networks and coupling equipment. On this basis, the development history of IEHS modeling is reviewed from the perspectives of energy hub, network topology and energy circuit theory. Subsequently, based on analytical methods and artificial intelligence algorithms, the similarities and differences of existing research on combined heat and power dispatch are reviewed. Among them, stochastic optimal operation of IEHS considering uncertainty and robust optimal scheduling of IEHS are included. Finally, the key scientific issues of CHPD are summarized and the future research prospect are proposed.

Keywords: renewable energy; integrated electricity and heat systems; modeling; combined heat and power dispatch

摘要: 随着热电联产机组、热泵、电锅炉、空调等能量转换设备的普及, 电力系统和热力系统之间的能量转换和信息交互日益密切, 逐步形成了电-热综合能源系统。热电联合调度可以促进可再生能源消纳, 提高电力系统灵活性。首先, 分析电-热综合能源系统组成, 包括电网、热网和耦合设备等。在此基础上, 从能量枢纽、网络拓扑和统一能路等角度回顾电-热综合能源系统建模的发展历程。然后, 基于解析法和人工智能法等评述现有电-热综合能源系统优化调度研究的异同, 包括考虑不确定性的电-热综合能源系统随机优化运行和热电联合鲁棒优化调度。最后, 总结热电联合

调度关键科学问题并对未来研究方向予以展望。

关键词: 可再生能源; 电-热综合能源系统; 建模; 热电联合调度

0 引言

人类对化石能源的过度开采, 造成了环境污染和能源危机等问题。充分利用光伏、水电和风电等可再生能源可以有效缓解上述问题。21世纪可再生能源政策网络 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21) 发布的《2021年全球可再生能源现状报告》指出, 尽管受到新冠疫情的影响, 2020年全球可再生能源新增装机容量仍创历史记录^[1]。2020年全球可再生能源新增装机容量超过256 GW, 全球可再生能源发电占比约29%。近年来, 中国新能源总装机容量占世界第一。截至2021年底, 中国可再生能源发电装机容量达10.63亿kW, 占总发电装机容量的44.8%^[2]。

高比例可再生能源的接入, 使各种不同能源之间的能量转换和信息交互更加密切, 传统的电力系统逐渐转变为综合能源系统 (integrated energy systems, IES)。综合能源系统目前尚没有统一的定义, 一般指在规划、建设和运行等过程中, 对电、气、冷、热、氢等各类能源的生产、传输与分配 (供能网络)、转换、存储、消费、交易等环节实施有机协调与优化, 进而形成的能源产供消一体化系统^[3]。

随着热电联产机组 (combined heat and power unit, CHP)、热泵 (heat pump, HP)、电锅炉 (electric boiler, EB)、空调 (air conditioner, AC) 等能量转换设备的普及, 电力系统和热力系统之间的耦合日益密切, 逐步形成电-热综合能源系统 (integrated electricity and heat systems, IEHS), 其通过电能和热能

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52177087)。
National Natural Science Foundation of China (52177087).

等不同能源之间互补优化,提升电力系统灵活性,降低系统运行费用。

可再生能源具有显著的随机性、波动性和间歇性等特点,电力系统的功率又需要时时处处平衡,导致电力系统灵活性不足。2020年,中国平均“弃风率”为3%^[4]。以中国北方地区为例,“以热定电”模式下的热电联产机组在大量供热的同时,相应产生了大量电能,限制了风电的消纳空间,从而造成了“弃风”现象。相对电力系统而言,供热管网惯性很大并且具有良好的储能效果。热力系统对可再生能源输入的波动有一定的平抑功能。若能有效发掘和利用供热管网的储能效应,则可以有效缓解“弃风”现象。大城市热负荷、热需求远离过剩风电地区,可通过跨地域网络消纳风电,进而促进可再生能源消纳并提高电-热综合能源系统总体经济性。

表1显示了在相同电负荷和热负荷情况下,热电联产和热电分离在能量总输入和损耗之间的差异。其中,热电联产能量总输入是100,能量总损耗是17;热电分离能量总输入是148,能量总损耗是65。由此可见,电力系统和热力系统协同运行,可以减少能量损耗,提高能量利用效率^[5]。

表1 热电联产和热电分离的比较

Table 1 Comparison of cogeneration and division of heat and power

	热电联产	热电分离	
		单独供电	单独供热
电负荷	38	38	0
热负荷	45	0	45
能量损耗	17	57	8
能量输入	100	95	53
能量总损耗	17	65	
能量总输入	100	148	

热电联合调度(combined heat and power dispatch, CHPD)可以扩展电力系统运行边界,促进可再生能源消纳,实现电-热综合能源系统经济安全运行目标。然而,电力系统和热力系统物理性质迥异。相对电力网络,供热管网在传输过程有明显时间延迟和温度变化等动态特性。此外,电热耦合机理较为复杂,电网和热网通过热电联产机组、热泵、电锅炉等耦合设备连接在一起。耦合设备增加了电力系统和热力系统灵活性,促进了可再生能源消纳。目前电-热综合能源系统大部分是基于传统前四代热网,通过少数大型热

电联产机组形成的弱耦合网络。第五代区域供热供冷系统驱动的能源元胞可通过热泵池实现高密度网状融合的电热网,改变电热网交互形态^[6]。目前,在多数研究中,热源是电网和热网唯一的耦合点,热泵和水泵很少被考虑。热泵通过电能和热能转换,可调节电网与热网的峰谷差;水泵通过变频调节压力实现热网的水力平衡。大量热泵与水泵是实现电热网高度耦合的有效途径^[7]。文献[8]研究了基于数据驱动的综合能源系统负荷预测,进一步说明了可再生能源具有显著的随机性和波动性。电力系统和热力系统潮流模型均是非线性、非凸的,这些都增加了电-热综合能源系统的建模难度。电-热综合能源系统本质上是一个非线性、非凸、高维度、随机的数学模型,热电联合调度本质上是优化求解电-热综合能源系统模型,从而使运行费用最小或能量利用效率最高。

本文从电-热综合能源系统建模和热电联合调度两方面对现有文献进行回顾,分析现存问题并提供相应的解决思路。最后,分析热电联合调度关键科学问题并对未来研究方向予以展望。

1 电-热综合能源系统组成

电-热综合能源系统耦合了电能和热能,是最常见的综合能源系统之一。电-热综合能源系统主要由电力网络、供热管网和热电联产机组、热泵、电锅炉等耦合设备组成,具有复杂的时空特性。图1是电-热综合能源系统结构图。常规火电机组和风电机组为用户提供电能;CHP机组可以同时产生电能和热能;热水管网分为一次管网和二次管网;热源利用一次管网

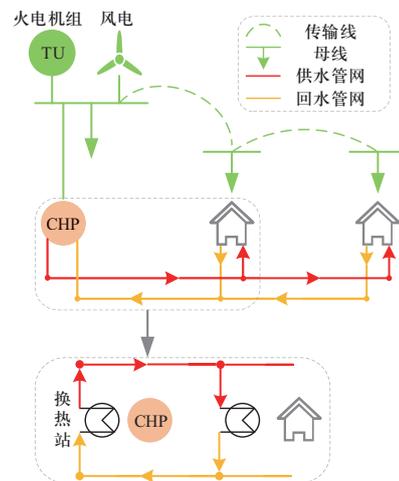


图1 电-热综合能源系统结构图

Fig. 1 The structure of integrated electricity and heat systems

将水和蒸气传送至换热站, 换热站通过二次管网将低温水传递至热用户。

1.1 电力网络

电力系统是完成电能生产、输送、分配、消费的统一整体。电力网络是电能输送和分配的重要环节。大部分电网都是交流模型, 其可分为稳态模型和动态模型两种。在分析电-热综合能源系统运行优化时暂不考虑电力系统的动态模型。基于支路特性和拓扑约束, 电力系统的稳态潮流方程如下^[9]:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + jB_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - jB_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电压相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导和电纳。

虽然电力系统稳态潮流计算相对成熟, 但是现代电网具有多区域电网广义互联和大量可再生能源并网2个显著特点^[10]。如图2所示, 多区域互联电力系统通过联络线交换功率, 不同区域能源协调优化, 实现电网安全经济运行的目标。

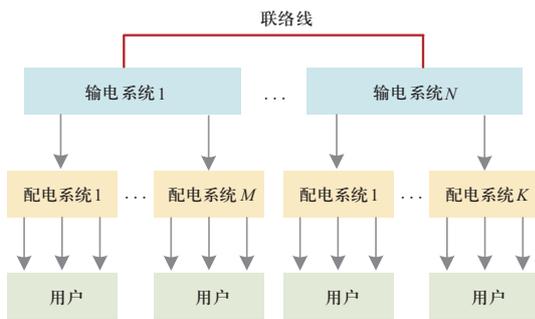


图2 多区域互联电力系统
Fig. 2 Multi-area interconnected power system

1.2 耦合元件

电-热综合能源系统的主要耦合元件包括热电联产机组、热泵、电锅炉等。CHP机组主要由锅炉和汽轮机构成, 可以产生电能和热能。朗肯循环是产生电能和热能的基础。水在高压锅炉中转化为蒸汽, 蒸汽在汽轮机中释放热能并发电。在中国北方地区, CHP机组的供电比例占总数的30%~50%^[11]。CHP机组可分为背压式和抽汽式2种, 其电出力 and 热出力的可行

域如图3所示。背压式CHP机组的可行域是一条线段, 产热和产电基本成正相关; 抽汽式CHP机组的可行域是四边形。

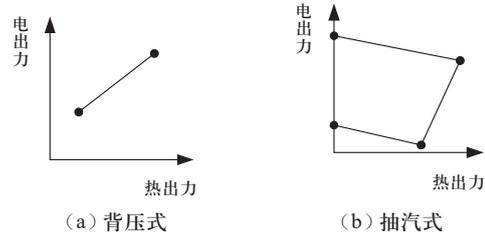


图3 热电联产机组运行可行域
Fig. 3 Operation feasible region of combined heat and power units

热泵是通过做功使热量从温度低的介质流向温度高的介质的装置。热泵利用电能从环境中吸收空气、水、土壤、太阳能和废热等低品位的热能, 适当升温后, 再向楼宇供热。电锅炉消耗电能, 提供热能。电锅炉的模型表达式如下:

$$\varphi_{EB} = \eta_{EB} P_{EB} \quad (2)$$

式中: η_{EB} 为能量转换效率; φ_{EB} 为提供的热功率; P_{EB} 为消耗的电功率。

1.3 供热管网

供热管网分为一次管网和二次管网。一次管网是从热源至换热站的供/回水管网, 类似于电力系统中的输电网; 二次管网是换热站至热用户的供/回水管网, 类似于电力系统的配电网。热量一般从热源通过水或蒸汽等媒介传输到换热站, 然后再从换热站通过二次管网流经热用户。按照热网调节方式划分, 热网有质调节 (constant flow-variable temperature, CF-VT) 和量调节 (variable flow-constant temperature, VF-CT) 2种^[12]。量调节是指保持供热网络的供热水温不变, 通过改变网络中的循环水流量来满足用热负荷需求; 质调节则保持供热网络的循环水流量不变, 通过改变供热网络的供热水温来满足用热负荷需求。

供热管网同电力网络一样, 也具有稳态模型和动态模型。在电-热综合能源系统中, 改变质量流量可以更好地利用热力系统的惯性来增加电力系统的灵活性。相对电力传输, 热网传输具有明显的时间延迟。热量从热源通过媒介传输到热用户需要一定时间, 热能的供需不用像电能一样时时处处平衡, 供热管网可以将热能间接存储起来。此外, 热能在传输过程中同样存在损耗。通常采用分块法 (element method) 和节点法 (node method) 来刻画热网温度动态特性。文

献[13]提出了分块法,其中管道出口温度通过管道进口温度和节点初始温度计算。文献[14]提出正交分解法来减少求解偏微分方程的时间,本质上是一种差分法。节点法^[15]的基本思想:①在忽略热损耗的条件下,用过去不同时段管道入口温度的线性组合表示当前时段管道出口温度;②在考虑热损耗的条件下,对当前时段管道出口温度进行修正^[10]。

分块法和节点法的求解精度较好,但是其模型非线性程度相对较高且内部参数关系相对复杂。上述方法在热电联合调度时需要热网将原始数据、拓扑结构和运行状态等信息全部传送给电网。不仅未能保护热网的数据隐私,而且增加了调度的复杂性。因此,上述模型不适用于实际场景中的热电联合调度。受到等值电路(如戴维宁等效、诺顿等效)的启发,文献[16]提出了一种计及温度动态特性的热网等值模型,在热电联合调度过程中,热网只需要提供端口信息,不必披露具体的拓扑结构,该模型具有较高的理论和工程应用价值。

2 电-热综合能源系统建模

电-热综合能源系统建模是热电联合调度的基础。目前,电-热综合能源系统模型主要可以分为3类:①基于能量枢纽(energy hub, EH)构建电-热综合能源系统模型;②类比电力系统潮流,基于热力模型和水力模型,建立热电联合潮流计算模型;③在多时间尺度下,考虑不同能源主体动态特性的统一能路模型。

2.1 能量枢纽

2007年,苏黎世联邦理工学院的Göran Andersson等人首次提出了能量枢纽的概念^[17]。能量枢纽模型将物理上的能量输入和输出关系通过数学上的耦合矩阵来表示,具体可以表示为

$$\begin{bmatrix} P_{out1} \\ P_{out2} \\ \vdots \\ P_{outn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{in1} \\ P_{in2} \\ \vdots \\ P_{inn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P_{in} 和 P_{out} 分别为第 n 个端口的输入能量和输出能量; C_{ij} 为耦合系数。目前,有大量基于能量枢纽建模的研究。文献[18]基于能量枢纽对综合能源系统建模,归纳总结了能量流的优化和管理。文献[19]基于冷/热/电需求对能量枢纽进行统一建模和最优管理。文献[20]综合分析了CO₂排放和储能装置的能量枢纽

优化运行。文献[21]基于扩展能量枢纽进行电-热综合能源系统潮流计算。文献[22]设计了一个闭环框架,将契约理论和共识算法集成到一个双层热电能量共享系统中。文献[23]介绍了综合能源系统与能量枢纽协同运行规划方法。

然而,基于能量枢纽的综合能源系统模型只适用于稳态分析,无法扩展到动态过程和长时间尺度;其仅在宏观上遵循能量守恒定律,却忽视了网络的拓扑结构,无法计算网络损耗,不适用于较高精度下的综合能源系统优化运行和能量管理。

2.2 热电联合潮流模型

基于供热管网的热力模型和水力模型,类比电力系统潮流计算,进行热电联合潮流计算是一个研究方向。类比电力系统Kirchhoff电流定律、Kirchhoff电压定律、欧姆定律,热力系统存在节点流量平衡、回路压力平衡、水头损失方程。通过牛顿-拉夫逊法可以迭代求解热力系统潮流方程。电力系统和热力系统节点类型对比如表2所示^[24]。

表2 电力系统和热力系统节点类型对比

Table 2 Comparison of node types between electric power systems and district heating systems

节点类型	已知量	未知量
电力系统	PQ节点	有功功率 P 无功功率 Q
	PV节点	有功功率 P 电压幅值 V
	平衡节点	电压幅值 V 电压相角 θ
热力系统	T_r, ϕ 节点	回水温度 T_r 热功率 ϕ
	T_s, ϕ 节点	供水温度 T_s 热功率 ϕ
	T_s, H 节点	供水温度 T_s 水头 H

文献[24]结合热力模型和水力模型,计算了电-热综合能源系统潮流。文献[25]基于能量枢纽模型,构建电-热综合能源系统模型,提出了综合能源系统混合潮流计算方法。文献[26]考虑到可再生能源的波动性,计算了电-热综合能源系统区间潮流。文献[27]研究了含配电网重构的区域综合能源系统最优混合潮流计算方法。文献[28]分析了电-热综合能源系统概率潮流。文献[29]在间歇性可再生能源、蓄热和电网电价

可变的情况下, 计算热电最优潮流。文献[30]基于节点压力的供热流量模型, 分析了综合能源系统中的供热管网。文献[31]提出了大规模电-热综合能源系统潮流解耦计算方法。

然而, 热电联合潮流计算忽视了热网的传输时延和温度动态特性, 没有充分发掘供热管网的储能特性, 不能很好地提高电力系统灵活性, 促进可再生能源消纳。热电联合潮流计算很难拓展到动态过程和长时间尺度, 限制了综合能源系统协同优化效率。

2.3 统一能路理论

综合能源系统网络由电、气、热等多种能源子网络耦合而成, 各子网络的建模与分析是综合能源系统优化运行的重要基础。电力网络涉及的主要物理指标有电压、电流、相角差、功率、传输损耗等。实际上, 电力网络分析是电气工程领域的经典问题, 可借鉴电力网络由“场”到“路”的建模思路, 展开热力网络分析。文献[32]探讨了能量本质并分析了能量网络的基本理论, 将物理量归纳为强度量和广延量, 为统一能路理论的建模奠定了基础。

热力网络通过管道和热媒将热能输送到热负荷, 可解耦为热力模型和水动力模型。热力网络传输线路模型包含节点与管段2个部分, 管段部分描述管网中的能量损失, 节点部分描述管网中的流量平衡与能量守恒。热力网络涉及的主要物理指标有温度、流量、压力、传输效率等。根据能量守恒定律, 热力方程可表示为

$$c\rho A \frac{\partial T}{\partial t} + cm \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon T = 0 \quad (4)$$

式中: c 、 T 、 ρ 、 A 、 m 、 ε 、 t 和 x 分别为比热、温度、密度、横截面积、流量、散热系数、时间和位移。忽略二阶导, 即令 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$ 。

引入热流定义为

$$\varphi = cmT \quad (5)$$

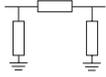
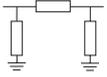
整理可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -c\rho A \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon T \\ \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\rho A}{cm^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\varepsilon}{c^2 m^2} \varphi \end{cases} \quad (6)$$

电力系统和热力系统类比如表3所示。可以看出, 虽然电力系统和热力系统物理性质迥异, 但是数学形式上具有高度相似性。

表3 电力系统和热力系统的类比

Table 3 Analogy of electric power systems and district heating systems

	电	热
物理定律	电磁学定律	热力学定律
数学方程	$\frac{\partial I}{\partial x} = -GU - C \frac{\partial U}{\partial t}$ $\frac{\partial U}{\partial x} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -c\rho A \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon T$ $\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\rho A}{cm^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\varepsilon}{c^2 m^2} \varphi$
强度量	U	T
广延量	I	φ
阻	R	$\varepsilon/c^2 m^2$
容	C	$c\rho A$
导	G	ε
感	L	$\rho A/cm^2$
二端口示意图		

文献[16]从电模拟角度对热损失和传递延迟进行建模, 在拉普拉斯域中提出了一个统一模型框架; 在此框架的基础上, 提出了热网的等效模型, 分析了热供给和热需求之间明确的端口关系。文献[33]基于质量守恒定律和动量守恒定律推导了水路模型, 基于能量守恒定律建立了热路模型; 其次, 通过Fourier变换和网络的二端口等值实现了微分方程到代数方程的转换; 最后, 通过水路与热路模型描述了供热网络的支路特性与拓扑约束, 并由此导出了水力网络方程和热力网络方程。文献[34]基于统一能路理论实现电-热-气综合能源系统优化调度, 结果表明, 该方法不仅可提高电力系统运行灵活性, 还可以降低系统运行成本, 具有较快的求解速度和较好的模型精度。

统一能路模型借鉴电力系统建模“由场到路”的思路, 将复杂的偏微分方程转换为易于求解的代数方程。统一能路模型通过“二端口”等效, 可以在复杂时空条件下, 得到准确的调度结果, 实现电-热综合能源系统安全经济运行。统一能路模型可以拓展到动态过程和长时间尺度下的优化调度, 适用范围广泛。然而, 统一能路理论不适用于计算时变系统。

3 热电联合调度模型

热电联合调度模型大致可以分为基本调度模型、考虑系统灵活性的调度模型、考虑不确定性因素的随机调度模型。

3.1 基本调度模型

热电联合基本调度模型以最小运行成本或最大可再生能源利用率等为目标函数，以热力系统、电力系统、耦合元件等为约束条件，如表4所示。

表4 电-热综合能源系统一般调度模型
Table 4 General dispatch model of integrated electricity and heat systems

系统类型	约束条件	稳态	暂态
目标函数	最小运行成本或最大可再生能源利用率		
热力系统	节点流量平衡	质量守恒定律	✓ ✓
	回路压力平衡	回路压降为零	✓ ✓
	水头损失约束	水流与管道摩擦引起的沿管压强损失	✓ ✓
	传输时延约束	水温变化延时效应	× ✓
	热量损耗约束	循环水流动过程发生热量损耗	× ✓
	温度混合约束	能量守恒定律	✓ ✓
	流量限制约束	流量需要满足上下限约束	✓ ✓
	温度限制约束	温度需要满足上下限约束	✓ ✓
电力系统	功率平衡约束	若忽略网损，则发电功率与负荷功率相等	✓ ✓
	旋转备用约束	发电机组预留备用容量以应对可能的故障	✓ ✓
	爬坡速率约束	相邻调度时段，机组发电出力增量将受限	✓ ✓
	网络潮流约束	电力网络线路潮流应在线路传输容量以内	✓ ✓
机组出力约束	机组出力需要满足技术出力上下限约束	✓ ✓	
耦合设备	热泵	消耗电能，产生热能	
	电锅炉	消耗电能，产生热能	
	热电联产机组	消耗燃气，产生电热	

3.2 考虑系统灵活性的调度模型

热电联合调度可以提高系统灵活性，促进可再生能源消纳。提高系统灵活性主要依靠供热管网、蓄热罐、建筑物等的储能效应。

与电能传输相比，热能传输具有显著延时效应，供热管网可以储能且不需要其他基础设施投入。文献[35-37]基于节点法刻画了供热管网的温度半动态特性，降低了运行成本，促进了风电消纳。文献[38]提出了考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优

化调度方法。

热网在质调节模式下，热电联合调度模型的约束是线性的，是一个凸二次规划（convex quadratic programming, CQP）问题；在量调节模式下，热电联合调度本质上是大规模非线性混合整数规划（mixed-integer nonlinear programming, MINLP）问题。在2种调节模式下，热电联合调度本质上都是非线性规划（nonlinear programming, NLP）问题，目前主要有传统数学规划方法和启发式算法2种。传统数学规划方法有拟牛顿法（quasi-Newton method, QN）、信赖域法（trust region, TR）、逐步二次规划法（sequential quadratic programming, SQP）、滤子法（filter）等^[39-40]。

文献[41]研究了基于混合整数锥规划（mixed-integer conic programming, MICP）的热电联合经济调度。文献[42]提出了基于半正定规划（semidefinite programming, SDP）的热电联合经济调度。文献[43]讨论了基于半正定规划松弛（semidefinite programming relaxation, SDPR）方法的主动配电网与区域供热系统协同优化运行模式。文献[44]研究了基于混合整数非线性规划的热电联合经济调度。

在量调节模式下，热电联合调度可以描述为MINLP问题^[35]。然而，MINLP模型由于在双线性约束中包含整数变量而极难求解。为了降低求解复杂度，许多文献提出了不同的简化方式。文献[45]使用0-1变量代替整数变量。文献[24]和[41]通过忽略热动态过程消除了优化模型中的整数变量。文献[24]中的方法可能会过度简化热力系统模型，虽然可以使问题更易于求解，但这会导致电-热综合能源系统经济性较差并使得问题不可行（infeasible）。解决双线性约束的方法可以分为两大类，一种是使用历史数据生成调度策略的数据驱动方法^[46-47]，尽管这些数据驱动方法的在线优化可能是有效的，但其结果可能会受到可解释性和可靠性问题的影响，尤其是在不同的调度条件下，文献[48]综述了基于数据驱动的综合能源系统可靠性评估方法；另一种是基于模型的方法，一些文献基于能源枢纽模型^[49]对热功率流约束进行线性化，然而线性化模型无法准确反映传输容量限制并考虑热力系统的惯性。

传统数学规划方法在求解非线性规划问题时采用的是局部搜索方法，无法保证非凸问题的全局最优解（global optimum, GO）。因此，一些学者提出了凸松弛（convex relaxation, CR）方法来松弛双线性约束，但这不可避免地对其他约束也线性化了，导致温度和质

量流量计算不准确。此外, 凸松弛方法得到的解往往是近似最优解, 如何保证这个近似最优解的可行性是值得探讨的。例如, 文献[50]和[51]松弛了温度混合约束, 将双线性方程线性化以计算传热延迟和热动态过程。文献[41]线性化了温度混合约束。文献[45]提出了一种改进的广义Bender分解方法来处理可变质量流量调度模型中的双线性约束, 然而其对供热管道模型和最优切割的近似进行了简化, 不能保证调度的安全性和最优性。文献[52]提出了改进的热管道模型来消除整数变量而不影响准确性, 并提出一种新的分解方法来求解具有双线性约束的优化模型, 将原优化模型分解为质量流量固定的下层凸子问题和简单的上层问题, 寻找最优质量流量。

除了供热管道自身的管存特性, 蓄热罐^[53]也具有储能效应。文献[54]研究了考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略。文献[55]表明含有蓄热装置的综合能源系统能够实现能源的合理配置、有效降低系统运行成本。建筑热特性也有良好储能效应, 很多研究将其考虑到调度模型中。文献[56]针对乡村高渗透率新能源消纳和清洁供暖问题, 提出了一种考虑建筑热平衡与用户柔性舒适度约束的微能源网电热联合调度方法。文献[57]提出了一种综合能源系统的优化运行模型, 该模型将区域供热网络和建筑物的热惯性相结合, 以提高风电消纳能力。

3.3 考虑不确定性因素的随机调度模型

具有显著不确定性的可再生能源大规模接入电网, 给电力系统的调峰、调频和调压等带来严峻挑战。因此, 计及不确定性的电-热综合能源系统优化运行引起了许多学者的广泛关注。不确定性优化 (optimization under uncertainty, OUU) 数学模型一般可以表示为

$$\begin{cases} \min & f(x, \xi) \\ \text{s.t.} & h(x, \xi) \leq 0, \forall \xi \in U \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f(x, \xi)$ 是目标函数; $h(x, \xi)$ 是约束条件; x 是决策变量; ξ 是不确定参数; U 是不确定集 (uncertainty set, US)。

不确定性优化可以大致分为事前分析法和事后分析法。事前分析法主要包含模糊规划 (fuzzy programming, FP) 和随机规划 (stochastic optimization, SO); 事后分析法主要包含灵敏度分析 (sensitivity analysis, SA) 和鲁棒优化 (robust optimization, RO)。值得一提的是, 建模生成替代方案 (modelling to generate alternatives, MGA) 也是一种不确定性处理方法^[58-60]。

计及不确定性的电-热综合能源系统优化运行一般可以分为热电联合鲁棒调度和热电联合随机调度。鲁棒优化在建模中充分考虑了不确定性, 通过不确定集对参数变化范围进行描述。热电联合鲁棒调度可以降低电-热综合能源系统运行风险, 但是调度策略相对保守, 遇到极端场景时, 系统总运行成本会大幅度提升。文献[61]研究了数据驱动电-热综合能源系统可调鲁棒机组组合问题。文献[62]提出电-热综合能源系统鲁棒优化调度方法, 有效处理了热网负荷的不确定性, 提高了电-热综合能源系统的鲁棒性。文献[63]提出一种基于简化热网络的非迭代解耦热电联合鲁棒调度方法。

与鲁棒优化不同的是, 随机优化通过概率密度函数 (probability density function, PDF) 表示参数不确定性。随机优化一般可以分为期望模型 (expectation model, EM) 和机会约束模型 (chance constraints model, CCM) 2种。为了实现电-热综合能源系统安全经济运行, 机会约束的热电联合随机调度和机组组合是一种较好的方案。按照预先设定的可接受的风险置信区间, 不考虑极端场景, 使得系统的保守性有所降低^[64]。

文献[65]介绍了考虑柔性设备储备和风电时空相关性的两阶段电-热综合能源系统随机优化运行。文献[66]讨论了针对热电联供微电网能量管理的多跟随双层随机规划。文献[67]讨论了微网的热电联合随机调度。文献[68]考虑到可再生能源发电和能源需求的不确定性, 提出了电-气-热能源系统最优随机运行方法。文献[69]提出了一种考虑并网功率波动平滑的可再生能源微电网滚动优化策略。此外, 还有鲁棒优化与随机优化的联合建模。文献[70]提出计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度。文献[71]提出基于鲁棒随机模型预测控制的园区综合能源系统两阶段优化。然而, 部分不确定性参数难以获得准确的概率分布。总之, 对随机变量的处理是热电联合随机调度的关键。

4 热电联合调度优化方法

以电-热综合能源系统模型为基础, 本章进一步阐述热电联合优化调度常用模型和优化方法, 按照优化方法可以分为解析法和人工智能法。

4.1 解析法

热电联合调度按调度方式可以分为集中式调度和

分布式调度。集中式是将电网和热网的模型合并成一个整体模型，在整体模型基础上求解热电联合调度问题，电网和热网共享整体模型的全部信息。分布式是将电网和热网当做不同主体，在求解热电联合调度问题时，电网和热网交互边界信息。

4.1.1 集中式

热电联合调度的一种直接方法是将电网和热网合并成一个整体模型，无需迭代，“集中式”求解，如文献[41]、[44]和[46]。然而，集中式调度存在以下不足：①在大量可再生能源并网情景中，系统规模很大，集中式调度可能会使求解不稳定，可靠性低；②不同能源主体运行方式存在差异，将物理性质迥异的电力系统和热力系统模型合并求解面临挑战；③由于电力系统和热力系统属于不同主体，电-热综合能源系统集中调度和管理存在一定的技术障碍和制度壁垒，集中式优化求解不利于保护不同主体间的信息隐私，如拓扑结构、运行状态、网络参数等。综上所述，“集中式”求解热电联合调度面临诸多挑战，并非是一种实用可行的方法。因此，分布式热电联合调度是目前研究的热点。

4.1.2 分布式

分布式优化算法大致可以分为原始问题分解算法（primal decomposition, PD）和对偶问题分解算法（dual decomposition, LD）2种。原始问题分解算法主要针对子问题包含耦合变量（complicating variable, CV）的情况；对偶问题分解算法主要针对子问题包含耦合约束（complicating constraint, CC）的情况。

分布式优化算法可以保证多主体信息隐私，不同主体间只是交互少量边界信息，实现电-热综合能源系统的分布式优化调度。分布式求解的框架如图4所示，一般将热电联合调度分为电网调度和热网调度。电网向热网传递耦合变量，热网调度问题更新最优解，将相应的信息传给电网。电网调度和热网调度反复迭代求解，直至原来热电联合调度问题收敛，达到最优解。

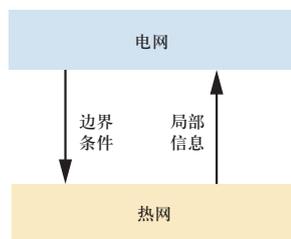


图4 分布式优化框架

Fig. 4 Distributed optimization framework

现有许多关于热电联合分布式调度的文献，其中Benders分解（Benders decomposition, BD）和交替方向乘法（alternating direction method of multipliers, ADMM）是较为常见的2种分布式优化算法。文献[72-73]提出基于Benders分解的热电联合调度方法，热电联合调度模型被分解为电网主问题和热网子问题，在每次迭代过程中，热调度中心向电调度中心传送一个可行割平面（feasibility cut, FC）或最优割平面（optimality cut, OC），直至找到最优解。为了保证热网子问题的可行性，文献[73]基于改进的Benders分解方法，实现热电联合优化调度。最优性条件分解法（optimality condition decomposition, OCD）基于最优化问题的Karush-Kuhn-Tucker条件实现对策问题的分解，在保证算法收敛性的前提下，电网和热网只交互少量边界信息，实现热电联合调度的分布式求解^[74]。文献[75]提出基于异质分解法（heterogeneous decomposition, HD）的热电联合调度，电网和热网分别交互边界母线的节点边际电价和边界注入热功率，该算法有效缓解了电网和热网的通信负担，具有较高的效率和鲁棒性。与此同时，基于异质分解法的热电联合调度可以有效减少弃风，提高电-热综合能源系统运行的经济性。文献[76-78]基于乘法实现电-热综合能源系统分布式优化调度。

然而，分布式优化调度相比集中式调度而言，需要进行反复迭代求解，计算量较大，电网和热网之间的通信负担较重。如果迭代次数很多甚至不收敛，还会对算法的稳定性造成影响，不利于实现热电联合分布式调度。因此，电-热综合能源系统分布式优化调度算法的收敛性值得研究。

4.2 人工智能方法

除了解析法外，也有许多学者通过人工智能方法求解热电联合调度问题。人工智能方法包括启发式算法和机器学习算法等。启发式算法（heuristic algorithm, HA）是一种基于直观或经验构造的算法，可分为3类：简单启发式算法（simple heuristic algorithm, SHA）、元启发式算法（meta-heuristic algorithm, MHA）和超启发式算法（hyper-heuristic algorithm, HHA）。

启发式算法优点是结构简单直观，易于实现和修改，可以在允许时间内得到一个较好的解，实用性较强。然而，启发式算法也有不可忽视的缺点：基于经验，算法不稳定，只能给出近似最优解，不能保证全

局最优解, 也难以量化描述结果的最优性。表5总结了热电联合调度常用的启发式算法及对应的参考文献。

表5 热电联合调度常用启发式算法

Table 5 Common heuristic algorithms for combined heat and power dispatch

算法名称	对应文献
遗传算法 (genetic algorithm)	[79]
粒子群算法 (particle swarm optimization)	[80]
差分进化算法 (differential evolution algorithm)	[81]
群搜索算法 (group search optimizer)	[82]
布谷鸟搜索算法 (cuckoo search algorithm)	[83]
灰狼优化算法 (grey wolf optimizer)	[84]
和声搜索算法 (harmony search algorithm)	[85]
人工蜂群算法 (bee colony optimization)	[86]
野草算法 (invasive weed optimization)	[87]
教学优化算法 (teaching learning-based optimization)	[88]
人工免疫算法 (artificial immune system algorithm)	[89]
萤火虫算法 (firefly algorithm)	[90]
磷虾群算法 (krill herd algorithm)	[91]
纵横交叉算法 (crisscross optimization algorithm)	[92]
队列竞争算法 (line-up competition algorithm)	[93]
交换市场算法 (exchange market algorithm)	[94]
引力搜索算法 (gravitational search algorithm)	[95]

遗传算法、进化差分算法等属于进化算法, 有较强的收敛性和可扩展性。进化算法本质是随机搜索, 并不能保证全局最优解。粒子群算法、群搜索算法、布谷鸟搜索算法、灰狼优化算法、和声搜索算法、人工蜂群算法、人工免疫算法、萤火虫算法、磷虾群算法等属于群体智能优化算法。群体智能优化算法突出特点就是利用了种群的群体智慧, 在多维度空间内进行协同全局搜索, 从而找到最优解。然而, 每一次寻优需要遍历所有群体后才能完成一次迭代, 使收敛速度相对较慢, 鲁棒性差。野草算法的鲁棒性较强, 队列竞争算法搜索效率较高。教学优化算法是全局优化算法, 简化了每一轮内的信息共享机制, 所有进化的个体可以更快收敛到全局最优解, 但不能很好地保持种群多样性。纵横交叉算法搜索能力较强。引力搜索算法收敛速度较快, 但会陷入局部最优。总之, 启发式算法是一种基于直观或经验构造的算法, 可以在有限时间内得到相对较好的解, 但是数学解释性较差。

除了启发式算法外, 机器学习算法也常被用于求

解非线性优化问题。机器学习主要分为传统机器学习、深度学习、强化学习和迁移学习。文献[96-97]提出基于深度强化学习的热电联合调度, 该方法获得了对不同运行场景的适应性, 并不影响准确性的情况下显著降低了计算复杂度。文献[98]对于不连续可微、非凸的非线性优化调度问题, 以知识迁移Q学习算法和内点法构成级联式算法进行求解, 并通过知识迁移提高求解效率。文献[99]提出了关于代理模型 (surrogate model) 的多能源区域运行方法。

表6对上述调度优化算法的优缺点及适用场景进行了分析。

5 综合能源系统仿真软件

综合能源系统的发展与仿真软件的支持密不可分, 表7对目前常用的综合能源系统仿真软件进行了总结。COMPOSE (compare options for sustainable energy) 是丹麦奥尔堡大学于2008年开发的技术经济能源项目评估模型^[100]。EnergyPLAN是由丹麦奥尔堡大学开发的综合能源建模最通用的工具之一。HOMER (hybrid optimization model for electric renewables) 是由美国国家可再生能源实验室开发的一款软件, 被广泛应用于离网能源系统的分析。RETScreen是一款由加拿大政府开发的免费的清洁能源管理软件。TRNSYS是一种准稳态仿真模型^[101], 该平台被广泛应用于太阳能系统、低能耗建筑、暖通空调系统、可再生能源系统、热电联产、燃料电池等领域。IES-Plan是2019年由东南大学开发的多能互补综合能源系统规划软件。Simulink是Matlab中的一种可视化仿真工具, 是综合能源系统动态仿真实验的常用平台。DER-CAM (distributed energy resources customer adoption model) 是一款混合整数线性规划软件, 主要为建筑或建筑群提供能源系统的运行规划策略, 提高设备间的运行耦合度, 降低成本及碳排放量。GTMax是一款寻找使电力系统价值最大化的运行方案的工具。Neplan是一款区域能源规划优化软件。上述软件具体细节可以参考文献[102-104]。

6 关键科学问题和展望

电-热综合能源系统优化调度可以促进可再生能源消纳, 提高电力系统灵活性, 降低系统的运行费用, 具有良好的发展前景。本文总结了几个关于电-

热综合能源系统优化调度的关键科学问题。

1) 电力和热力系统潮流非线性、非凸。未来可再生能源的发展及电力电子设备的增多, 会使电力系统更加非线性化。此外, 现有的电-热综合能源系统模型无法准确刻画动态过程中不同能源主体间的耦合。因此, 如何构建计及动态、简单、精确且实用的电-热综合能源系统仿真运行平台是研究重点之一。

2) 现有的分布式优化调度可以保护不同主体间的隐私, 实现分布式迭代求解, 随着电-热综合能源系统规模越来越大, 不同主体之间的通信负担也越来越重, 对算法的可行性和收敛性要求越来越高, 如何设

计高效、稳定的分布式优化算法来求解MINLP问题值得考虑。

3) 现有研究往往重点关注电-热综合能源系统运行总体经济效益最优, 很少涉及不同主体之间的利益分配, 如何寻找公平且高效的分配机制值得研究。

4) 大规模可再生能源并网给电-热综合能源系统优化调度带来很大不确定性。已有的随机调度和鲁棒调度能提供一定的策略参考, 但是不确定性量化精度和求解效率存在较大提升空间。随着人工智能的发展, 基于数据驱动的电-热综合能源系统不确定性优化调度方法值得探讨。

表6 热电联合调度优化算法对比

Table 6 Comparison of optimization algorithms for combined heat and power dispatch

方法	基本原理	优点	缺点	适用场景	文献	
解析法	集中式求解	通过泰勒展开将原问题的非线性约束转为线性约束, 通过凸松弛将非凸集合转为凸集合, 本质上是求解线性混合整数规划问题	无需迭代	不能保护各主体隐私	适用于对精度要求不高的场景	[41, 44]
	分布式求解	单独求解电力系统和热力系统, 交互边界耦合信息, 反复迭代, 直至全局最优	能保护不同主体的信息隐私	参数设置不当可能会不收敛, 通信负担重	各个主体隶属于不同运营商, 需要进行分布式优化调度	[72-74]
人工智能方法	启发式算法	模拟自然界现象或生物群体智能行为, 寻找最优方案	与求解问题的数学类型无关, 可处理非线性优化	基于经验, 算法不稳定, 只能给出近似最优解, 难以量化描述结果的最优性	适用于解析法难以处理的非线性优化问题	[80-96]
	机器学习算法	模拟或实现人类学习行为, 补充完善已有的知识结构, 以获得最优的结果		离线训练时间较长		[96-97]

表7 综合能源系统的常用仿真软件

Table 7 Commonly-used simulation software for IES

平台名称	时间尺度	能源类型	支持能源	支持储能	仿真目标
COMPOSE	h级	电/热/冷	化石能源、生物质能、光伏、风电、地热能、氢能	电池、蓄热储能、冷储能	最小运行成本
EnergyPLAN	h级	电/热/冷	化石能源、生物质能、水电、光伏、风电、太阳能、地热能、潮汐能、氢能	抽水蓄能、电池、压缩空气、蓄热储能、氢储能	最小运行成本
HOMER	min级	电/热/冷	化石能源、生物质能、光伏、风电、太阳能	电池、氢储能、燃料电池	最小净现成本
RETScreen	d级	电/热/冷	化石能源、生物质能、光伏、风电、太阳能、地热能、潮汐能、氢能	电池、燃料电池	最小运行成本
TRNSYS	s级	电/热/冷	化石能源、生物质能、光伏、风电、地热能	电池、热储能、冷储能、氢储能、燃料电池、吸收式制冷机	最小运行成本
IES-Plan	h级	电/热/冷/气	化石能源、生物质能、光伏、风电	抽水蓄能、电池、压缩空气、蓄热储能、燃料电池	经济/环保/能效
Simulink	s级	电/热/气	化石能源、生物质能、光伏、风电、太阳能、氢能	电池、热储能、冷储能、氢储能、燃料电池	模拟系统暂态

续表

平台名称	时间尺度	能源类型	支持能源	支持储能	仿真目标
DER-CAM	min级	电/热/冷	化石能源、核能、生物质能、光伏、太阳能、地热能	抽水蓄能、电池、热储能、燃料电池、吸收式制冷机	CO ₂ 排放最低
GTMax	h级	电/热	化石能源、风电、光伏	电池、热储能	净收益最大化
Neplan	s级	电/热/气	化石能源、生物质能、光伏、风电、潮汐能	电池、燃料电池、热储能	最优化网络布局

7 结论

电-热综合能源系统是一种典型的综合能源系统。电力系统和热力系统耦合可以促进可再生能源消纳,提高电力系统灵活性,降低系统运行成本。本文从电-热综合能源系统建模和热电联合调度展开分析。热电耦合机理复杂,电力潮流和热力潮流非凸、非线性,增加了电-热综合能源系统建模难度。现有建模理论主要包含能量枢纽模型、热电联合潮流计算模型、统一能路模型。电-热综合能源系统建模是热电联合调度的基础。热电联合调度本质上是非线性规划。若热网在量调节模式下,热电联合调度就是非线性、非凸模型,求解难度大。此外,可再生能源显著的随机性和波动性给电-热综合能源系统优化运行带来了挑战。鲁棒优化和随机优化是求解不确定性优化问题的2种主要方法。未来可再生能源并网比例增大及电力电子设备增多,会使电力系统更加非线性化。如何构建计及动态、简单、精确且实用的电-热综合能源系统模型,并设计高效且稳定的分布式优化算法,实现电-热综合能源系统安全经济运行值得研究。

参考文献

- [1] Renewables 2021. Renewable energy policy network for the 21st century [R/OL]. (2021) [2022-05-05]. <http://www.chinacaj.net/ueditor/php/upload/file/20210903/1630633637477894.pdf>.
- [2] 国家能源局. 国家能源局举行新闻发布会发布2021年可再生能源并网运行情况等并问答[EB/OL]. (2022-01-29) [2022-05-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/29/content_5671076.htm.
- [3] LI J X, WANG D, JIA H J, et al. Prospects of key technologies of integrated energy systems for rural electrification in China[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 3-17.
- [4] 国家能源局. 国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2022-01-30) [2022-05-05]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm.
- [5] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(5): 1-7.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(5): 1-7(in Chinese).
- [6] WIRTZ M, KIVILIP L, REMMEN P, et al. 5th generation district heating: a novel design approach based on mathematical optimization[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114158.
- [7] 刘学智, 严正, 解大, 等. 电热综合能源网的强耦合路径研究与展望[J/OL]. *电力系统自动化*, 2022: 1-16.
LIU Xuezhi, YAN Zheng, XIE Da, et al. Research and prospects of a pathway to tight coupling between electricity and heat networks[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022:1-16(in Chinese).
- [8] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(23): 7905-7924.
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23): 7905-7924(in Chinese).
- [9] 朱继忠. 电网安全经济运行理论与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [10] 李志刚. 消纳大规模风电的互联网多维协同优化调度方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [11] KANG C Q, CHEN X Y, XU Q Y, et al. Balance of power: toward a more environmentally friendly, efficient, and effective integration of energy systems in China[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2013, 11(5): 56-64.
- [12] 贺平. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] MANSON J R, WALLIS S G. An accurate numerical algorithm for advective transport[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1995, 11(12): 1039-1045.
- [14] GUELPA E, TORO C, SCIACOVELLI A, et al. Optimal operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation[J]. *Energy*, 2016, 102: 586-595.
- [15] BENONYSSON A, BØHM B, RAVN H F. Operational optimization in a district heating system[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(5): 297-314.
- [16] YANG J W, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 560-570.
- [17] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(1): 24-30.
- [18] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区

- 域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306(in Chinese).
- [19] SALEHIMALEH M, AKBARIMAJD A, VALIPOUR K, et al. Generalized modeling and optimal management of energy hub based electricity, heat and cooling demands[J]. Energy, 2018, 159: 669-685.
- [20] ELADL A A, EL-AFIFI M I, SAEED M A, et al. Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO₂ emissions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105719.
- [21] AYELE G T, HAURANT P, LAUMERT B, et al. An extended energy hub approach for load flow analysis of highly coupled district energy networks: illustration with electricity and heating[J]. Applied Energy, 2018, 212: 850-867.
- [22] LIU N, TAN L, SUN H N, et al. Bilevel heat-electricity energy sharing for integrated energy systems with energy hubs and prosumers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3754-3765.
- [23] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5425-5437.
- HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437(in Chinese).
- [24] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [25] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
- XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642(in Chinese).
- [26] 王文学, 胡伟, 孙国强, 等. 电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 83-95.
- WANG Wenxue, HU Wei, SUN Guoqiang, et al. Interval energy flow calculation method of integrated electro-thermal system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 83-95(in Chinese).
- [27] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑配电网重构的区域综合能源系统最优混合潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 18-24.
- JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Calculation of optimal hybrid power flow for integrated community energy system considering electric distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 18-24(in Chinese).
- [28] FU X Q, SUN H B, GUO Q L, et al. Probabilistic power flow analysis considering the dependence between power and heat[J]. Applied Energy, 2017, 191: 582-592.
- [29] AYELE G T, MABROUK M T, HAURANT P, et al. Optimal heat and electric power flows in the presence of intermittent renewable source, heat storage and variable grid electricity tariff[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114430.
- [30] CHEN D W, HU X, LI Y, et al. Nodal-pressure-based heating flow model for analyzing heating networks in integrated energy systems[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112491.
- [31] ZHANG S H, GU W, YAO S, et al. Partitional decoupling method for fast calculation of energy flow in a large-scale heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 501-513.
- [32] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.
- CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76(in Chinese).
- [33] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142(in Chinese).
- [34] 陈瑜玮, 孙宏斌, 郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论(五): 电-热-气耦合系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7928-7937.
- CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (V): integrated electricity-heat-gas dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937(in Chinese).
- [35] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [36] 徐飞, 郝玲, 陈磊, 等. 电热综合能源系统中热力管网动态建模及协调运行研究综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 55-63.
- XU Fei, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Review of district energy network dynamic modeling and coordinate optimal operation in integrated electricity and heat energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 55-63(in Chinese).
- [37] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation

- optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3596-3604(in Chinese).
- [38] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 132-142.
WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 132-142(in Chinese).
- [39] ZHU J Z. OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [40] 袁亚湘. 非线性优化计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [41] HUANG S J, TANG W C, WU Q W, et al. Network constrained economic dispatch of integrated heat and electricity systems through mixed integer conic programming[J]. *Energy*, 2019, 179: 464-474.
- [42] JUBRIL A M, ADEDIJI A O, OLANIYAN O A. Solving the combined heat and power dispatch problem: a semi-definite programming approach[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2012, 40(12): 1362-1376.
- [43] CHEN H H, LIN C Q, FU L B, et al. Collaborative optimal operation of transmission system with integrated active distribution system and district heating system based on semi-definite programming relaxation method[J]. *Energy*, 2021, 227: 120465.
- [44] KIM J S, EDGAR T F. Optimal scheduling of combined heat and power plants using mixed-integer nonlinear programming[J]. *Energy*, 2014, 77: 675-690.
- [45] CHEN Y W, GUO Q L, SUN H B, et al. A water mass method and its application to integrated heat and electricity dispatch considering thermal inertias[J]. *Energy*, 2019, 181: 840-852.
- [46] SASHIREKHA A, PASUPULETI J, MOIN N H, et al. Combined heat and power (CHP) economic dispatch solved using Lagrangian relaxation with surrogate subgradient multiplier updates[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 44(1): 421-430.
- [47] WANG L X, ZHENG J H, LI M S, et al. Multi-time scale dynamic analysis of integrated energy systems: an individual-based model[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 848-861.
- [48] 朱继忠, 骆腾燕, 吴皖莉, 等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 II: 数据驱动法与模型-数据混合驱动法[J/OL]. *电工技术学报*, 2022: 1-13.
ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems II: data-driven method and model-data hybrid driven method [J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022: 1-13(in Chinese).
- [49] MORVAJ B, EVINS R, CARMELIET J. Optimising urban energy systems: simultaneous system sizing, operation and district heating network layout[J]. *Energy*, 2016, 116: 619-636.
- [50] LU S, GU W, ZHANG C, et al. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: a convex optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4818-4832.
- [51] JIANG Y B, WAN C, BOTTERUD A, et al. Convex relaxation of combined heat and power dispatch[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(2): 1442-1458.
- [52] QIN X, GUO Y, SHEN X W, et al. Increasing flexibility of combined heat and power systems through optimal dispatch with variable mass flow[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(2): 986-997.
- [53] GU W, TANG Y Y, PENG S Y, et al. Optimal configuration and analysis of combined cooling, heating, and power microgrid with thermal storage tank under uncertainty[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015, 7(1): 013104.
- [54] 吕泉, 王海霞, 陈天佑, 等. 考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(14): 23-29.
LYU Quan, WANG Haixia, CHEN Tianyou, et al. Operation strategies of heat accumulator in combined heat and power plant with uncertain wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(14): 23-29(in Chinese).
- [55] CHEN X, KANG C Q, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: Modeling and implications[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(4): 1848-1857.
- [56] 刘洪, 王亦然, 李积逊, 等. 考虑建筑热平衡与柔性舒适度的乡村微能源网电热联合调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(9): 50-58.
LIU Hong, WANG Yiran, LI Jixun, et al. Coordinated heat and power dispatch of micro-energy network of countryside considering heat balance model of building and flexible indoor comfort constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(9): 50-58(in Chinese).
- [57] 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.
- [58] DECAROLIS J F. Using modeling to generate alternatives (MGA) to expand our thinking on energy futures[J]. *Energy Economics*, 2011, 33(2): 145-152.
- [59] DECAROLIS J F, BABAE S, LI B, et al. Modelling to generate alternatives with an energy system optimization model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 79: 300-310.
- [60] PRICE J, KEPPO I. Modelling to generate alternatives: a technique to explore uncertainty in energy-environment-economy models[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 356-369.
- [61] SHUI Y, GAO H J, WANG L F, et al. A data-driven distributionally robust coordinated dispatch model for

- integrated power and heating systems considering wind power uncertainties[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 104: 255-258.
- [62] ZHOU H S, LI Z G, ZHENG J H, et al. Robust scheduling of integrated electricity and heating system hedging heating network uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1543-1555.
- [63] ZHENG W Y, WU W C, LI Z G, et al. A non-iterative decoupled solution for robust integrated electricity-heat scheduling based on network reduction[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(2): 1473-1488.
- [64] 吴文传, 李志刚, 王中冠. 可再生能源发电集群控制与优化调度[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [65] ZHANG M L, WU Q W, WEN J Y, et al. Two-stage stochastic optimal operation of integrated electricity and heat system considering reserve of flexible devices and spatial-temporal correlation of wind power[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115357.
- [66] ALIPOUR M, ZARE K, SEYEDI H. A multi-follower bilevel stochastic programming approach for energy management of combined heat and power micro-grids[J]. *Energy*, 2018, 149: 135-146.
- [67] KARAMI H, SANJARI M J, GOOI H B, et al. Stochastic analysis of residential micro combined heat and power system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 190-198.
- [68] LI Y, ZOU Y, TAN Y, et al. Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas, and heat delivery system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 273-283.
- [69] LI S L, ZHU J Z, DONG H J, et al. A novel rolling optimization strategy considering grid-connected power fluctuations smoothing for renewable energy microgrids[J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118441.
- [70] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 116-126.
- ZHU Lan, WANG Ji, TANG Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 116-126(in Chinese).
- [71] 刘春明, 李瑞月, 尹钰君, 等. 基于鲁棒随机模型预测控制的园区综合能源系统两阶段优化[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5): 1-7.
- LIU Chunming, LI Ruiyue, YIN Yujun, et al. Two-stage optimization for community integrated energy system based on robust stochastic model predictive control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5): 1-7(in Chinese).
- [72] LIN C H, WU W C, ZHANG B M, et al. Decentralized solution for combined heat and power dispatch through benders decomposition[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1361-1372.
- [73] ZHENG W Y, DAVID J H. Distributed real-time dispatch of integrated electricity and heat systems with guaranteed feasibility[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 18(2): 1175-1185.
- [74] HUANG J B, LI Z G, WU Q H. Coordinated dispatch of electric power and district heating networks: a decentralized solution using optimality condition decomposition[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1508-1522.
- [75] XUE Y X, LI Z S, LIN C H, et al. Coordinated dispatch of integrated electric and district heating systems using heterogeneous decomposition[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1495-1507.
- [76] TRAN H N, NARIKIYO T, KAWANISHI M, et al. Whole-day optimal operation of multiple combined heat and power systems by alternating direction method of multipliers and consensus theory[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 475-488.
- [77] LIANG X Y, LI Z G, HUANG W J, et al. Relaxed alternating direction method of multipliers for hedging communication packet loss in integrated electrical and heating system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(5): 874-883.
- [78] ZHANG T, LI Z G, WU Q H, et al. Decentralized state estimation of combined heat and power systems using the asynchronous alternating direction method of multipliers[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 600-613.
- [79] SUBBARAJ P, RENGARAJ R, SALIVAHANAN S. Enhancement of combined heat and power economic dispatch using self adaptive real-coded genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(6): 915-921.
- [80] LIU M, WANG S, YAN J J. Operation scheduling of a coal-fired CHP station integrated with power-to-heat devices with detail CHP unit models by particle swarm optimization algorithm[J]. *Energy*, 2021, 214: 119022.
- [81] BASU M. Combined heat and power economic dispatch by using differential evolution[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2010, 38(8): 996-1004.
- [82] BASU M. Combined heat and power economic dispatch using opposition-based group search optimization[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 73: 819-829.
- [83] MELLAL M A, WILLIAMS E J. Cuckoo optimization algorithm with penalty function for combined heat and power economic dispatch problem[J]. *Energy*, 2015, 93: 1711-1718.
- [84] JAYAKUMAR N, SUBRAMANIAN S, GANESAN S, et al. Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 74: 252-264.
- [85] KHORRAM E, JABERIPOUR M. Harmony search algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2): 1550-1554.

- [86] RABIEE A, JAMADI M, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Optimal non-convex combined heat and power economic dispatch via improved artificial bee colony algorithm[J]. Processes, 2020, 8(9): 1036.
- [87] JAYABARATHI T, YAZDANI A, RAMESH V, et al. Combined heat and power economic dispatch problem using the invasive weed optimization algorithm[J]. Frontiers in Energy, 2014, 8(1): 25-30.
- [88] ROY P K, PAUL C, SULTANA S. Oppositional teaching learning based optimization approach for combined heat and power dispatch[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57: 392-403.
- [89] BASU M. Artificial immune system for combined heat and power economic dispatch[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 1-5.
- [90] YAZDANI A, JAYABARATHI T, RAMESH V, et al. Combined heat and power economic dispatch problem using firefly algorithm[J]. Frontiers in Energy, 2013, 7(2): 133-139.
- [91] ADHVARYYU P K, CHATTOPADHYAY P K, BHATTACHARYA A. Dynamic optimal power flow of combined heat and power system with valve-point effect using Krill Herd algorithm[J]. Energy, 2017, 127: 756-767.
- [92] MENG A B, MEI P, YIN H, et al. Crisscross optimization algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problem[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105: 1303-1317.
- [93] SHI B, YAN L X, WU W. Multi-objective optimization for combined heat and power economic dispatch with power transmission loss and emission reduction[J]. Energy, 2013, 56: 135-143.
- [94] GHORBANI N. Combined heat and power economic dispatch using exchange market algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82: 58-66.
- [95] BEIGVAND S D, ABDI H, LA SCALA M. Hybrid gravitational search algorithm-particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients for large scale CHPED problem[J]. Energy, 2017, 126: 841-853.
- [96] ZHOU S Y, HU Z J, GU W, et al. Combined heat and power system intelligent economic dispatch: a deep reinforcement learning approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 106016.
- [97] ZHANG B, HU W H, CAO D, et al. Deep reinforcement learning-based approach for optimizing energy conversion in integrated electrical and heating system with renewable energy[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 202: 112199.
- [98] 瞿凯平, 张孝顺, 余涛, 等. 基于知识迁移Q学习算法的多能源系统联合优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 18-25.
QU Kaiping, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Knowledge transfer based Q-learning algorithm for optimal dispatch of multi-energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 18-25(in Chinese).
- [99] WANG X D, LIU Y B, ZHAO J B, et al. Surrogate model enabled deep reinforcement learning for hybrid energy community operation[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116722.
- [100] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1059-1082.
- [101] KALOGIROU S A. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus[J]. Renewable Energy, 2001, 23(2): 247-260.
- [102] 王梦雪, 赵浩然, 田航, 等. 典型综合能源系统仿真与规划平台综述[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4702-4712.
WANG Mengxue, ZHAO Haoran, TIAN Hang, et al. Review of typical simulation and planning platforms for integrated energy system[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4702-4712(in Chinese).
- [103] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. A review on the optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272(in Chinese).
- [104] 谢珊, 贾跃龙, 白雪涛, 等. 城市能源系统规划设计及能耗分析工具综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 163-177.
XIE Shan, JIA Yuelong, BAI Xuetao, et al. A review of tools for urban energy systems planning and energy consumption analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 163-177(in Chinese).

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-05-26。



朱浩昊

作者简介:

朱浩昊(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为热电联合调度, E-mail: epzh@scut.edu.cn。

朱继忠(1966), 男, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 研究方向为综合能源系统优化运行与控制。通信作者, E-mail: zhujz@scut.edu.cn。

李盛林(1992), 男, 博士研究生, 研究方向为微网能量管理, E-mail: iamslh@126.com。

董瀚江(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行优化与控制, E-mail: epdonghj@mail.scut.edu.cn。

何晨可(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为考虑电动汽车的综合能源优化规划, E-mail: 1197958177@qq.com。

蓝静(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为碳交易与储能对电力系统的影响分析, E-mail: 949263491@qq.com。

(责任编辑 张宇)