

区域综合能源系统规划关键问题研究综述

Review on key points in the planning for a district-level integrated energy system

刘自发, 谭雅之, 李炯, 樊静宜, 周翰泽*

LIU Zifa, TAN Yazhi, LI Jiong, FAN Jingyi, ZHOU Hanze*

(华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206)

(School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 能源转型战略目标的提出促进了社会供能系统向清洁化、高效化、经济化发展, 因此需要通过研究区域综合能源系统(DIES)实现系统优化调度的整体突破与提升。首先分析以打破地域约束、能源与行业壁垒为规划目标, 具有多能流耦合、多区域互联与多系统融合特征的DIES典型规划方案; 接着分源、网、储3类概括DIES包含的设备及管道的数学模型。结合以上分析, 考虑互联互动机制下的DIES多目标、多随机因素的特征, 围绕能源站、能源网络及站网协调, 对基本规划模型在优化建模与求解方法上的关键问题进行分析与总结, 并根据不同的评价指标分别论述DIES优化效益, 最后基于目前研究存在的不足对未来的研究方向进行展望。

关键词: 区域综合能源系统; 互联互动机制; 能源转型; 能源互联网; 站网协调; 能源网络建模

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)06-0012-13

Abstract: The proposed energy transition strategy has promoted the clean, efficient and economic development of public energy supply systems. District-level integrated energy system (DIES) is an important measure to achieve overall breakthroughs in system dispatch optimization. A typical planning scheme for a DIES with the characteristics of multi-energy flow coupling, multi-regional interconnection and multi-system integration is carried out and analyzed with the goal of breaking regional constraints, energy barriers and industry borders. Then, the mathematical models for the equipment and lines in DIES are divided into three categories, source, network and storage. Since DIES planning scheme under the interconnection and interaction mechanism is a multi-objective multi-factor optimization problem, the key problems in the optimization modeling and model solving of the basic planning model are analyzed and summarized, especially the ones focusing on power dispatch between energy stations and networks. The economic benefits of DIES optimization are assessed according to different evaluation indexes. Finally, based on the deficiency of the current research, the future research direction is prospected.

Keywords: district-level integrated energy system; interconnection and interaction mechanism; energy transition; energy internet; cooperation of station and network; modelling of Energy Internet

0 引言

能源是社会经济发展的重要物质基础, 随着世界传统化石能源供求关系日益紧张, 能源供应的多样性逐渐开始引起人们的关注, 依赖于单一能源的供给方式已经无法满足人们日益增长的生活需求^[1]。因此国内外学者相继提出了能源互联网(Energy Internet, EI)^[2]以及集多种能源生产、转换、存储和消费为一体的综合能源系统(Integrated Energy System, IES), 对能源流结构的不断优化正在循序渐进地推动新一轮能源革命, 有望达成能源行

业绿色集约以及能源利用提质增效这2个阶段性目标^[3]。

根据对能源互联覆盖的地理范围不同, IES可分为园区级、区域级和跨区级, 这三者的侧重点不同, 现有的研究进展也不同。其中园区级的范围最小, 其规划模型也最为简单, 一般可忽略管网损耗, 其研究重点为综合能源站的建模以及多能流的源荷储协同规划, 从而降低规划区的供能成本, 是综合能源系统的用户终端, 也是其研究成果的最直观体现。区域级相比园区级要考虑能源网络, 因此研究重点为多能流下的潮流算法。跨区域级相比区域级综合能源的管网运输更多考虑能源运输手段, 例如利用大容量电力高压线路输气网、利用交通网

络等运输能源^[4],从而实现跨区域级的能源互补。除此之外,在近年来能源技术、电能替代技术以及信息技术的发展下^[5],综合能源系统规划研究也包括了能源-交通系统融合^[6]以及能源-信息系统融合^[7]。

综上所述,区域综合能源系统规划涵盖了能源站、多能流网络、源荷储协同规划以及跨行业的各类新互联形式。本文以区域综合能源系统(District-level Integrated Energy System, DIES)为研究对象,分别从典型互联形式、规划模型建模研究、规划方法研究3个方面展开综述。最后,对DIES规划未来可能的发展方向进行展望。

1 综合能源系统典型互联形式

DIES基于区域能源站、配电网、配气网、供热网,由居民区与工商业园区至整个城镇或城市组成,进行能源侧与用户级的传输与调度。本章节考虑DIES互联互动机制,先介绍由电-热网、电-气网及能源转换设备构成的多能流耦合形式,接着分析不同主体下的DIES区域联合,最后研究了交通系统、信息系统与能源系统的深度融合。

1.1 多能流耦合

传统能源系统单一的能源结构特性造成了能源利用率低、供能可靠性差等问题,利用多种能源在时空特性上供能方式及经济效益的差异,通过耦合互补实现能源横向统一规划与协调优化,是解决上述问题的重要方法。园区级综合能源系统一般由多类异质能流系统通过燃气轮机热电联产(Combined Heat and Power, CHP)、冷热电联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)、储热罐(Heat Storage, HS)、吸收式制冷机(Absorption Chiller, AC)、电锅炉(Electric Boiler, EB)、工业螺杆式制冷机(Screw Chiller, SC)、冰蓄冷(Cold Storage, CS)等设备耦合,如图1所示,电网侧包括光伏(Photovoltaic Power, PV)、蓄电池(Battery, BAT),在能源的生产、传输、消费,存储过程中进行互补,同时解决高渗透率可再生能源接入导致功率波动性及风光利用率低的问题。

在电-气能源侧,燃气轮机具有快速爬坡的运行特性,同时电转气(Power to Gas, P2G)技术的应用也可有效实现弃风消纳,提高系统调峰能力;文献[8]利用动态场景模拟新能源出力,通过CCHP电气耦合特性实现主网功率波动的转移与平抑;文献[9]分析碳交易市场下的P2G协同原理,实现弃风消纳与电-气能源网络有效互联耦合;电-热能源耦合多采用CHP、电锅炉等设备实现能源的转换,但

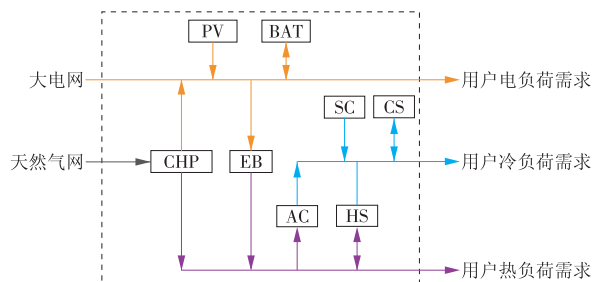


图1 DIES多能流耦合架构

Fig. 1 Multi-energy coupling in a DIES

在实际运行中由于耦合装置的约束条件,产生了“以热定电”的运行模式,可通过引入热泵、储热来替代用户部分热负荷需求;文献[10]通过比较4种不同供热方式,对传统CHP机组耦合方式提出灵活性改进;文献[11]基于电力、热力及电热耦合网络建立区间模型,其中电热耦合装置主要考虑CHP机组、水泵、热泵的运行特性。上述研究多基于耦合元件的特性进行定性分析,缺少对元件之间耦合程度的具体分析,文献[12]构建耦合电力、热力、天然气的IES,基于能源系统结构配比与耦合度定义定量分析系统运行可靠性与经济性。

储能装置在能源传输、中转、存储方面起到备用、调节的作用,提高了其他装置的灵活性。文献[13]从能源利用方式将储能分为广义储能与狭义储能,同时基于时间尺度、空间范围分析高比例可再生能源接入下的Power-to-X(利用清洁电能制备各种无机、有机原材料和燃料的技术手段)能源存储方式;文献[14]通过二次利用电动汽车废弃电池,将其与园区级电热混合储能模型结合,提出储能状态双层优化运行模型,有效减少储能投资成本;储气装置利用P2G技术,储气罐等实现协调优化功能。文献[15]考虑不同季节下天然储存特性的差异,利用CCHP缓解其储气工作强度,提高系统效率;文献[16]结合天然气负荷和天然气价格的长期季节性波动与不确定性,确定3种多时间层次的优化调度模型。

相较于电能传输的瞬时性,热力系统与天然气系统在能量的传输上具有延迟性,因此其自身可以看作具有一定的储备功能。文献[17]利用供热系统热能变化缓慢的响应特性,提出虚拟热网储能配合需求侧响应实现电-热系统的能源协调优化;文献[18]考虑楼宇内温度特性变化的延缓性,联合用户侧挖掘其虚拟储热潜力,构建充放电模型,实现储能成本的降低。在天然气系统中,可利用气网中管道传输速度慢的特性,实现调峰与调度缓冲;文献[19]分析了燃气轮机快速动作的特点与天然气网络动态管存特性,能够有效辅助系统缓解风电引

起的功率波动;文献[20]利用天然气管道流入流出之间功率的差值,考虑其管网的储存特性,实现P2G与风电消纳的协同运行。

能源耦合装置打破异质能源壁垒实现电、气、热能源之间的转换与支撑,配合具有备用、中转功能的多能存储装置,在提高系统灵活性与风电消纳能力的同时,还可改变负荷的时空分布,使供能-耗能趋于平衡,实现源-荷-网侧的互联互动,多能流耦合设备类型见表1,各耦合元件在不同系统的时间尺度、运行策略下相互影响,呈现气、热力、水力特性在动态、稳态模型上的差异,对综合能源系统规划时需要充分考虑多能网络安全性、可靠性等方面的约束。

表1 多能流耦合设备

Table 1 Multi-energy flow coupling equipment

设备功能	类型	作用
耦合元件	CCHP	实现电-气-热能源的转换,提高对可再生能源的消纳能力,扩大系统的运行区间以及灵活性
	P2G	
	燃气轮机	
	CHP	
	电锅炉	
储能装置	热泵	能源储存、中转、备用装置,改变负荷的时空分布,实现削峰填谷,提高能源的利用率与系统的调度能力
	蓄热罐	
	储气罐	
	热网	
	电网	
	楼宇	
	电池	

1.2 多区域联合

多区域联合指各区域之间通过联络管线进行跨区能量传输,实现全局供耗平衡以及能源利用率的提高。如图2所示,随着我国经济体系的快速发展,逐步形成了以工业、商业、住宅和高新产业为主体的产业区域模块,因此可以利用其所需负荷的时空差异构成互联互动的集群能源站,实现全局优化。

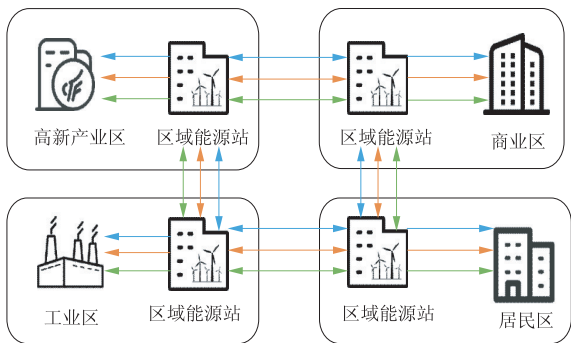


图2 DIES多区域互联结构

Fig. 2 Multi-district interconnection in a DIES

文献[21]基于冷热电联产机组与热网模型,分析了不同季节下居民区、商业区、办公区与工业区冷热负荷通过“错峰效应”实现能源交互;文献[22]提出共享储能模式下多DIES双层优化运行模型,可有效减少各个子系统储能装置建设成本,实现能源互补共济;文献[23]以能源枢纽为决策主体,建立了与EH分布度相适应的电-气能源系统协同优化调度模型,相比单独的调度中心更具互补调控运行和管理形态的灵活性;文献[24]以居民区、办公区、商业区作为研究对象,提出基于用户体感温度的楼宇能源枢纽配置模型。

综合以上分析,目前关于多区域联合的方式主要包括:(1)源侧共享模式的发展,例如共享储能、可再生能源的共同消纳,解决了风电场地理位置的限制以及子系统中设备整数性约束的问题;(2)用户侧不同产业区域的联合。利用子区域负荷的时空差异,实现错峰消耗、能源互补,优化机组容量的配置。

同时区域联合的发展将导致整体规模的扩大,造成系统优化目标、求解维度的增大,因此需要更新非线性、多目标优化问题求解算法以满足对计算精度与速度的要求。

1.3 多系统融合

1.3.1 能源-交通系统融合

随着能源转型、节能减碳理念的提出,近年来,电动汽车(Electric Vehicles, EV)得到了迅速发展,区域综合能源系统作为其能源供应侧,一方面由于EV自身不确定性因素,导致其在交通网中存在时空限制;另一方面,各DIES内部能源特点也影响着电价、充电桩的配置,导致EV接入电网具有随机性,使系统负荷压力增大,甚至加剧峰谷差^[24];因此如何改善EV与电网的互动,促进能源-交通系统的健康运行成为了目前的研究热点。

考虑大规模无序EV的接入将加重电网的负担,多数研究通过探讨EV充电方式以及用车行为,进而预测EV负荷曲线与出行场景。文献[25]对接入IES的EV实施分群充放电策略,建立二层嵌套调度模型;文献[26]基于经济性与可靠性对比EV的3种充电模式:分布式充电、快充、电池替换,以提高EV接入电网的灵活性。

相较于传统电负荷,EV具有移动储能特性,通过引入干预手段提高EV的可调度性,能够实现交通-能源系统有效互联。文献[27]构建EV负荷曲线,引入动态分时电价引导EV有序充电,缓解IES负荷压力;文献[28]利用电动汽车移动储能特性实现负荷转移,且合理配置充电站能够降低

IES 规划成本。

结合以上分析,能源与交通系统通过 EV 形成耦合关系,如图 3 所示,在整体规划过程中,首先基于历史 EV 负荷数据与充电方式的分析,模拟 EV 出行场景,优化充电桩的配置,接着结合交通网络流量、IES 机组工作状态的实时信息,形成有效的信息管理平台,使用户自主调控出行方案减少拥堵及排队,达到源荷测互动,或引入市场机制,提高 EV 可控性与 IES 新能源消纳能力。在规划过程中,需要综合考虑交通网、IES 等多种因素,进一步要求精准化、全面化的求解模型。

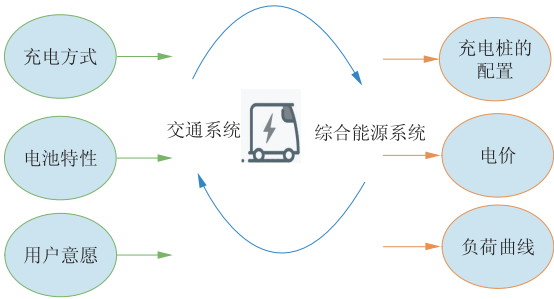


图 3 能源-交通耦合结构
Fig. 3 Integration of an energy system and a transportation system

1.3.2 能源-信息系统融合

信息时代的到来,促进了物联网、大数据、互联网的快速发展,进一步打破能源建设与信息之间的壁垒^[29],为 IES 数字化互联、信息化管理提供了新的契机。

为实现信息系统与 IES 的深度融合,对两者的融合方式,可靠性及互联效率进行了研究。文献[30]针对信息物理融合下的综合能源系统进行可靠性评估,提出 IES 可靠运行与信息系统紧密相关;文献[31]分析数据流-能量流数据中心耦合模型及机理,考虑 3 个层次探讨协同规划模型;文献[32]基于电-气耦合综合能源系统信息采集误差与冗余度高的特点,采用一种深度学习方法提高信息精度。

数据中心是 IES 数据处理、存储、规划的关键,而目前大规模数据中心的建立增大了系统整体能耗,针对此问题,可考虑数据流负荷的时空可调度性,或利用数据中心产生的余热形成区域循环热网模式。文献[33]提出一种基于数据中心风险衡量的碳排放优化决策方案,利用 2 种负荷的灵活性与系统整体废热的回收,实现节能减碳与能源经济消耗;文献[34]通过利用数据中心产生的余热以及分析不同回收方式的可行性,提高供热网络的能源利用效率;文献[35]提出带时移机制的负载调度方法和数据中心储能动态响应机制,平滑联络线功率波

动算法,提高供电可靠性。

如图 4 所示,利用信息系统发掘 IES 多时空能耗特征,使其向数字化、智能化管控转型,是实现能源生产改革、双碳目标的重要举措,而为了保证信息系统的高效工作,通过储能设施与数据负荷的空间转移,能够减少数据中心能耗,同时优化 IES 的供能与用能曲线,此外结合需求侧响应可进一步促进 IES 智慧管理,因此基于能源流-数据流的 IES 协同规划有望成为未来重要的发展方向。

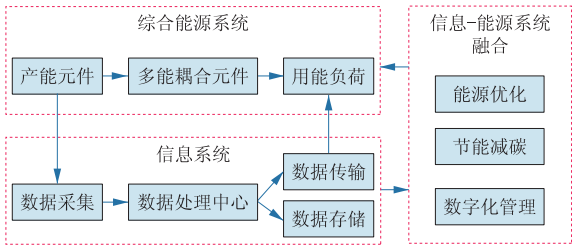


图 4 能源-信息融合结构
Fig. 4 Integration of an energy system and an information system

2 综合能源系统规划模型建模研究

2.1 园区级综合能源站建模

随着中外学者的研究,有了较为统一且通用的设备数学模型^[36]。本文将综合能源园区级综合能源站的设备(见表 2)分为 3 类,概述其通用建模及原理。

表 2 SAIES 通用架构中包含的设备
Table 2 Equipment included in an SAIES

类型	作用	设备
分布式能源设备	供电	光伏发电
	气-电-热	热电联产机组
	电-热	电锅炉
	电-冷	工业螺杆式制冷机
能源转换设备	热-冷	溴化锂制冷机
	储电	蓄电池
能源存储设备	储热	蓄热槽
	储冷	冰蓄冷

2.1.1 分布式能源设备建模

合理的新能源接入电网规划是新能源有效利用的前提,因此对新能源接入电网方式在规划层次上的建模研究很有必要。

(1)风电、光伏规划建模^[37]。由于风电、光伏功率的随机性和波动性,接入系统后对于主网潮流分布有着较大影响,需要对其不确定性进行建模。风电的输出功率取决于风速以及风功率曲线,而光伏的输出功率取决于光伏倾斜面上的辐照度以及运行温度,具体计算方法可参考文献[36]。

(2) 供电设备通用建模。在 IES 的规划方法研究中可以参考规划区附近的设备出力得到简化的供电设备通用模型

$$\vec{P}_{np,m} = \frac{C_{NP}}{C_{NP_0}} \times \vec{P}_{np_0,m}, \quad (1)$$

式中: $\vec{P}_{np,m}$ 为 m 季节的新能源发电功率序列, MW; C_{NP} 为规划区域内安装的新能源发电设备装机容量, MW; C_{NP_0} 为参考区域的新能源发电设备装机容量, MW; $\vec{P}_{np_0,m}$ 为 m 季节参考的新能源发电设备典型日发电功率序列, MW。

2.1.2 能源转换设备建模

CHP, AC, SC 与 EB 等能源耦合设备在 IES 中能够实现冷、热、电、气之间的相互转换。考虑这些能源耦合设备的工作原理与基础模型, 可以参考 CHP 系统建立定效率的通用数学模型

$$P_{k,out} = \eta_k P_{k,in}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{k,min} C_k \leq P_{k,in} \leq C_k, \quad (3)$$

式中: $P_{k,in}$ 和 $P_{k,out}$ 为以上 k 设备的输入和输出功率; C_k 为 k 设备配置容量; η_k 为 k 设备运行效率; $\varepsilon_{k,min}$ 为 k 设备最低功率系数。

2.1.3 储能设备建模

DIES 中的储能装置在中转、存储方面起到备用、调节的作用。本文基于 BAT, HS, CS 等工作原理得到较为简约且通用的储能设备数学模型:

$$\begin{cases} W_{ese,t} = W_{ese,t-1} (1 - \mu_{ese,loss}) + \\ \Delta t (\eta_{ese,ch} P_{ese,ch,t} - P_{ese,dis,t} / \eta_{ese,dis}) \\ W_{ese,t} \leq W_{ese,max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $W_{ese,t}$ 为 t 时刻储能设备中存储的能量, kW·h; $\mu_{ese,loss}$ 为储能设备自耗率; $\eta_{ese,ch}$, $\eta_{ese,dis}$ 分别为储能设备充能效率、放能效率; $P_{ese,ch,t}$, $P_{ese,dis,t}$ 分别为储能设备 t 时刻的充能功率、放能功率, kW; Δt 为时间间隔, h; $W_{ese,max}$ 为储能设备性能与容量决定的储能上限。此外, 不同的规划方法可以在该数学模型的基础上增加不同的约束来进一步细化建模。

2.2 能源网络建模

DIES 相比 IES 不能因为能量传输距离而忽视管网损耗以及管网约束, 所以要对不同区域的园区级综合能源站之间的管网进行建模, 现在主要的研究方向是基于各种能源网络传统建模的基础上进行线性化研究。

2.2.1 电网潮流研究

DIES 中电力系统建模主要基于传统潮流计算中的直流潮流模型、Distflow 方程和近似潮流方程进行细化研究。文献[38]提出一种计及电压和无功

功率的改进型直流潮流模型, 实现支路潮流方程中电压幅值与相角的解耦。文献[39]采用近似的方法将输电网潮流线性化。其次提出了一种考虑输电网线性潮流约束的时序生产模拟模型建立了一种基于迭代法的关键时间断面选取策略。文献[40]在统一潮流控制器的基础上建立线性化最优潮流模型。

由于分布式电源、储能与无功调节装置的快速发展, 文献[41]基于 Distflow 方程, 把分布式电源也纳入运行模型, 提出了一种多时段优化模型。文献[42]提出了最优潮流凸型模型, 有效减小了松弛间隙。当前电力系统的拓扑日渐复杂, 选取适合的电网模型是十分重要的。

2.2.2 热网潮流研究

热网与电网不同, 主要建设在城镇附近, 只有较少有跨区域的网络。热网由于具有时延特性, 因此混合潮流问题仍旧难以完全解决, 但能得到满足规划模型的近似解。文献[43]详细建立了热力系统水力-热力耦合模型。在规划方法研究中, 在建模时进行了适当简化, 得到了线性化的热管网模型。文献[44]基于热网工作原理并对热损方程进行简化。

在热网的建模过程中, 因为热传输延迟效应以及在传输过程中因为热交换造成的能量损失问题经常被纳入考虑范围之内, 通过建立考虑能量衰减的特性方程来表示这一现象。文献[45]在热网的建模中考虑了用户侧对热量需求的柔性效应及热网管道的储存热能的作用, 对电-热综合能源系统进行优化调度。热电联供可以有效提高燃料的利用效率, 节省运营成本, 不断优化现有模型改进联供效率也是未来学者们的研究思路。

2.2.3 气网潮流研究

能源互联网中的天然气网络与电网的协同运行与调度可以产生相当的经济效益与环境效益。气网潮流的研究也支撑着能源互联网的发展。天然气在管道中传输较慢, 具有惯性大、时延长的特性。气网建模中稳态建模忽略一些外部因素, 针对特定的研究问题。文献[46]基于对气网流量的预测, 建立了气网的动态模型。文献[47]利用有限差分单元, 在时间上体现了气网潮流缓慢运动的特性, 而在空间上, 每条管道也被分为几段, 整体模型属于动态气流差分模型。

由于气网模型非线性, 一般加入压缩机来简化模型。文献[48]提出的管存模型加入了压缩机简化了气网模型。文献[49]在合理范围内进行简化与省略, 针对自身研究内容推导了相应的动态气流

方程,采用有限差分法求解精准暂态模型。天然气管网的完整规划模型能推进综合能源的进一步优化建设。

综上,综合能源的系统建模合理性对区域综合能源规划的多能源耦合灵活性、系统经济型以及通用性有着重要意义。在全面梳理现有设备类型以及电-热-气三网模型的基础上对综合能源进行系统的合理规划安排。

3 综合能源系统规划方法研究

3.1 混合整数线性规划模型

区域综合能源系统规划的主要目标对象是能源枢纽以及能源配网,从而完成二者的合理配置。在传统的能源供给系统规划中,多以独立规划为主,而在综合能源系统在引入了互联形式之后,则需要考虑互联形式所引入的新变量、物理模型以及工作机理,从而调整原有的规划模型。主要以混合整数线性规划模型为基础模型进行扩展

$$\begin{cases} \min f(x, y, z) \\ \text{s.t. } h(x, y, z) \leq 0, \\ g(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f(x, y, z)$ 为区域综合能源系统规划目标函数,一般包括或基于建设成本、运行成本、环保、可靠性等构建; $h(x, y, z) \leq 0$ 为不等式约束函数,包括了设备能量输入输出上下限约束、配电(气、热)网潮流约束、管线的容量约束、负荷中断约束等; $g(x, y, z) = 0$ 为等式约束函数,包括能源站能量供需平衡约束、能源站功率守恒约束以及系统节点能量守恒约束等。其中变量可分为以下3种类型。

(1)区域综合能源系统内各站的设备与站间的管网容量。

(2)区域综合能源系统内所有设备的输入输出与站间的能量运输。

(3)表达储能设备运行以及管网规划的0~1变量。

所总结的综合能源系统规划问题,本质上是混合整数线性规划问题,目前主流的求解思路是:使用凸优化算法如序列二次规划法、内点法、分支界定法、Benders分解法、割平面法等寻优,然后借助各类如GUROBI求解器以及MATLAB等编程平台编程优化模型进行求解。

3.2 区域综合能源系统规划

区域综合能源系统的规划,是一个多层次的过程,需要根据不同的能源站、能源网络需求构建,配合2.1章节中构建的各类能源设备模型,基于3.1

章节中的混合整数线性模型基础上,根据工程实际提出相应的目标函数以及必要的约束条件构建规划模型,将涉及能源站、能源网络以及二者的协同规划3个层面的问题,其规划框架如图5所示。

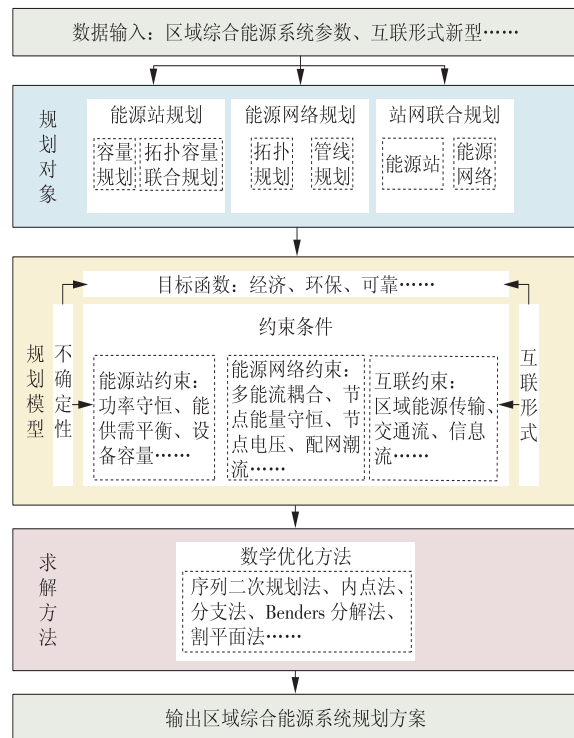


图5 DIES规划框架

Fig. 5 Process of the planning for a DIES

3.2.1 能源站规划

在能源站规划方向上,目前主要由设备容量规划以及站内拓扑与设备容量协同规划2大分支,并在引入互联形式后,基于多能流耦合的影响,相应地在模型构建时作出改变。

在设备容量规划方面,文献[50]考虑了电、气、热、冷等多种能量形式耦合,提出效率计算方法建立多层级能源集线器模型处理规划中的多能耦合问题。文献[51]在考虑互联影响下,分别以能量单元安装容量和能量单元调度值,构建针对多区域类型的能源互联网二层规划模型。文献[52]基于多能源的协同的基础,提出了一种具有分布式鲁棒保证的,关于能源站容量规划的数据驱动2阶段鲁棒随机规划模型。文献[53]在结合能源站建设者以及运营者之间关系讨论的基础上,针对低碳校园问题构建了4种不同的能源站规划框架。

在能源站内拓扑结构以及设备容量配置规划方面,相较于传统的拓扑结构配置,基于传统功率平衡的建模方式不再适宜,需要新的研究进行补充。文献[54]建立了以总成本最小为目标的具有较大通用性整数线性规划模型,其模型具有在其他

类型设备建模时的使用通用性。文献[55]提出一种基于分支能量流的建模方式,从而使模型可以同时完成优化能量转化、存储以及连接3个方面。

设备容量配置以及能源站内拓扑与设备容量联合配置作为目前主流的综合能源系统规划方向,仍旧有着很大的发展前景。并且在考虑了互联形式之后,综合能源系统的规划方案也会发生变化,能源站的成本、设备配置等方面需要发生相应的改变以适应新的需求,从而寻求提高综合能源系统整体效益的最优方案。

3.2.2 能源网络规划

在考虑了互联形式之后,区域综合能源系统的能源网络管线能量方程以及节点的功率平衡会发生相应改变,且在进行能源网络规划时,保证多能流耦合的存在,从而建立更加符合预期的综合能源系统规划方案。

文献[56]在考虑气网管存效应、热网延时效应以及热量损失的情况下,构建了考虑经济最优的综合能源规划模型。文献[57]则是建立了基于奖惩阶梯型碳交易费用的模型,在处理系统运营、投资成本的同时分析碳交易对综合能源系统规划的影响。文献[58]提出了基于EV充电负荷以及分布式储能系统接入下,与能源网络进行拓展联合多阶段规划的模型。

在考虑了互联形式后,能源设备类型增加,能源网络结构需要考虑到电-气-热网结合配置;负荷侧的需求存在更大的不确定性,需要配合储能系统进行统一规划,这些都直接影响能源网络的拓扑结构规划结果。

3.2.3 站网协同规划

考虑到能源站以及能源网络进行单独规划后无法达到方案最优的情况,进一步又提出了站网系统规划的方案。并在引入互联形式之后,站网协同规划的模型也将更为复杂,不同的学者也对其提出了不同的规划方法。文献[59]将综合能源系统分为两层,上层为能源传输网络,下层为能源站模型,基于图论理论建立能源站分层线性化模型。文献[60]基于能源网络之间的互动协调规律和能量调控机理,形成多时序互补特性规划方案以及最优运行策略,以CCHP系统为核心完成网络优化以及管网布局建模。文献[61]建立一种考虑负荷特性互补的能源站网协同规划模型,并提出了基于Kruskal算法的优化模型以及基于能效矩原理的负荷计算和站址优化方法。文献[62]基于系统的效率和经济性结构提出了多目标规划模型,将规划问题转化为最优路径问题。

3.3 不确定性处理方法

在考虑了互联形式的区域综合能源系统中会存在着能源站输出、能源网络故障、多能负荷变化、交通流量、信息负载率、能源价格等各类不确定因素的影响,因此需要相应的不确定性处理方法。

文献[63]利用概率分布模型,完成了对不确定性的处理。文献[64]利用鲁棒优化模型,针对光伏出力的不确定性进行处理,完成最优情况调度规划。文献[65]利用机会约束刻画风电出力不确定下的系统安全运行要求。文献[66]利用条件风险价值算法描述电价以及多能源负荷的不确定性,以保守形式完成优化。文献[67]采用了K-means聚类算法对多时序数据聚类缩减,形成典型规划场景。综合以上多篇文献可以得到区域综合能源系统不确定性处理方法见表3。

表3 区域综合能源系统不确定性处理方法
Table 3 Countermeasure for the uncertainty of DIES

建模方式	优点	缺点
概率	准确描述不确定性	难以获得准确分布
模糊	方法简单,计算量小	结果精度较差
区间	方法简单,计算量小	结果精度较差
机会约束	分析结果更接近实际	置信度设置主观性高
条件风险价值	可衡量尾部风险,完成保守计算	置信度设置主观性高
多场景	方法简单,将不确定性问题转化为典型场景确定性问题的	需要进行场景缩减和最终场景需要高典型性
鲁棒	考虑到最恶劣场景	结果相对保守

3.4 效益评价指标建模方法

3.4.1 评价指标

目前已有的主流综合能源系统效益评价模型主要从经济效益、环境效益、能耗效益、社会效益等几个方面入手,进行评价指标建模。

综合能源系统具有通过多能源系统优化技术的关键作用,可节省各项能源消耗的费用,因此经济效益的指标是综合能源系统一个重要的评判方面,主要由以净现值以及内部收益率作为静态、动态的财务指标

环境效益是综合能源系统在工程评价中的一个重要组成部分,目前主要通过排放量作为评价指标对系统进行环境评价。同时文献[68]还引入了清洁能源比例作为一项指标,用于体现功能环节清洁程度。

能耗效益是综合能源系统最为重要的一个指标,主要用于评价系统运行状态以及设备运行的可靠性,目前主要分为几个方向构建对综合能源系统能耗效益的评估^[68-69]。

社会效益不仅体现在综合能源系统对于用户端的注重程度,也体现在综合能源系统对于社会稳定发展可以带来的正向效益。

总结上述 4 个方向提及的各个指标,可得综合能源系统评价指标体系,见表 4。从现有的研究成果来看,目前国内外对于综合能源系统效益评价指标体系已有一定研究。

表 4 综合能源系统评价指标体系
Table 4 Evaluation indexes of an IES

一级指标	二级指标	指标单位
经济效益	净现值	万元
	内部收益率	%
	设备运行节约费用	万元
环境效益	CO ₂ 年排放量	t
	NO _x 年排放量	t
	清洁能源比例	%
能耗效益	能量梯级利用率	%
	节能率	%
	系统效率	%
	配电网线损率	%
	配电网负载率	%
	系统热损失率	%
	天然气管道容载率	%
	削峰填谷率	%
	能源质量	
社会效益	主动削峰负荷用户比例	%
	用户满意度	
	区域经济发展贡献率	%
	提供就业岗位率	%

3.4.2 效益评价方法

在综合能源系统效益评价方法设计方面,国内外常用的综合评价方法还有概率分析法、灰色关联优劣解距离法(TOPSIS)、层次分析法(AHP)、熵权法、神经网络算法、支持向量机法以及其他智能优化算法。

文献[69]在使用 AHP-熵权法处理指标权重后,对多方案项目基于区间理论和 TOPSIS 法建立数学模型确立评价指标值,对单方案项目通过实际值与目标值对比进行评价。在将概率分析法应用于效益评价方法上,文献[70]在统筹考虑用户需求以及市场价格的不确定性,采用了蒙特卡洛模拟方法测算综合能源系统的净现值期望,以评价不同方案下的收益,文献[71]采用均值-方差组合的投资理论完成对于综合能源系统不同规划方案的成本以及风险评估,体现了投资组合理论在效益评价方向具有一定适应性,文献[72]则提出采用基于正态分布区间数的多属性决策方法构建评价模型,并采用

期望-方差准则对规划方案进行分析,但存在评估精确性过于相应评价指标取值准确性的问题。

4 展望

本文基于国内外的研究成果并结合自身的研究概述了 DIES 的典型互联形式、建模方法以及规划方法等研究内容,初步建立了具有互联互动基础特征的 DIES 规划框架^[73-74]。但距离其在社会上的广泛实际应用仍有一定的差距,因此本文就其市场互动特性、动态特性及可靠性进行展望。

4.1 计及多主体博弈 DIES 的规划方法

随着传统能源行业的壁垒逐步消除,综合能源市场进一步发展,逐步产生了“产消者”以及能源共享等新概念,并考虑到市场参与者的多样性,为了促进综合能源系统进一步落地,有必要对市场机制与能源交易影响下的 DIES 规划进行研究。现有的研究成果中对主体的定义也不同,在进行能源价格博弈时极少考虑其对区域综合能源规划的影响,都将规划结果作为已知条件,仅对能源价格博弈部分进行算法的研究。不同主体利益目标不同,所考虑的运行约束也不相同,如何确定博弈主体、建立公平有效地能源交易机制并且能保证不同利益主体的安全运行是现在研究的难点,因此计及多主体博弈 DIES 的规划方法值得进一步探讨。

4.2 考虑动态特性的 DIES 的规划方法

DIES 规划现有的相关研究大多仍停留在稳态分析层面。天然气系统以及热力系统两者与电力系统不同,存在管存特性,现有的时间尺度统一模型无法体现综合能源系统本质上具有的暂态与时延特性,从而综合能源系统的可靠性研究也无法深入探讨。因此,需要对不同时间常数系统合理数学建模,建立不同能流的差异化优化周期确定方法,以准确地描述能量转换与传输过程。

4.3 DIES 的可靠性评估

由于 DIES 具有多能源的强耦合特性,不能针对单一系统进行可靠性评估,而是需要针对整个系统统一分析。这需要研究多能流联合计算方法,实现多能流统一求解,除此之外还要考虑 DIES 的不确定性。目前各独立网络系统的可靠评估研究非常成熟,因此可以考虑将已有的可靠性评估模型与方法发展并应用于 DIES^[75]。

5 结论

资源整合、协调优化是能源革新的必然趋势,综合能源系统即通过能源、信息、区域上的集成物联,促进可再生能源的消纳与节能减排。本文首先

介绍 DIES 能源横纵互补形式,分析多能流、多区域、多目标下的基本理论与典型方法框架;在此基础上,得到 DIES 包含的各设备以及内部能源网络的数学模型;接着对互联互动机制下 DIES 规划模型与求解过程中的关键难点及解决措施进行分析与总结,并归纳适合 DIES 不同度量主体的评估指标体系;最后分析 DIES 在多方面面临的挑战,为促进 DIES 的进一步发展提供参考。

参考文献:

- [1] 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 several problems of regional integrated energy system [J]. Automation of Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [2] GEIDL M, KOEPEL G, FAVREPERRO D, et al. Energy hubs for the future [J]. Power & Energy Magazine IEEE, 2007, 5(1): 24-30.
- [3] 程浩忠,胡泉,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(7):2-13.
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. A review of regional integrated energy system planning [J]. Power System Automation, 2019, 43(7): 2-13.
- [4] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021.
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. A review on the planning of regional integrated energy systems considering interconnection and interaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [5] 徐笋,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7194-7205,7446.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. A review and prospect of comprehensive demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205, 7446.
- [6] XIANG Y, LIU J, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates [J]. Applied Energy, 2016, 178: 647-659.
- [7] DAYARATHNA M, WEN Y, FAN R. Data center energy consumption modeling: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(1): 732-794.
- [8] 王静,徐箭,廖思阳,等.计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J].电力系统自动化,2019,43(15):2-9.
WANG Jing, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Collaborative optimization of electrical integrated energy system considering the uncertainty of new energy output [J]. Power System Automation, 2019, 43(15): 2-9.
- [9] 林楷东,陈泽兴,张勇军,等.含 P2G 的电-气互联网络风电消纳与逐次线性低碳经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(21):23-33.
LIN Kaidong, CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, et al. Wind power consumption and successive linear low-carbon economic dispatch of electricity-gas interconnection network with P2G [J]. Power System Automation, 2019, 43(21): 23-33.
- [10] 于炎娟,陈红坤,姜欣,等.促进风电消纳的蓄热罐运行策略[J].电力系统自动化,2017,41(7):37-43.
YU Yanjuan, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. Operation strategy of heat storage tank to promote wind power consumption [J]. Power System Automation, 2017, 41(7): 37-43.
- [11] 伍惠斌,王淳,刘宽,等.电-热综合能源系统能流的区间计算算法[J].电网技术,2019,43(1):91-99.
WU Huicheng, WANG Chun, LIU Kuan, et al. Interval calculation algorithm for energy flow of electric-thermal integrated energy system [J]. Power Grid Technology, 2019, 43(1): 91-99.
- [12] 宋晨辉,冯健,杨东升,等.考虑系统耦合性的综合能源协同优化[J].电力系统自动化,2018,42(10):38-45,86.
SONG Chenhui, FENG Jian, YANG Dongsheng, et al. Integrated energy collaborative optimization considering system coupling [J]. Power System Automation, 2018, 42(10): 38-45, 86.
- [13] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(19):194-207.
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. A review and prospect of seasonal energy storage for high-proportion renewable energy power system [J]. Power System Automation, 2020, 44(19): 194-207.
- [14] GUO Mingxuan, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Electric/thermal hybrid energy storage planning for park-level integrated energy systems with second-life battery utilization [J]. Advances in Applied Energy, 2021, 4: 100064.
- [15] 刘赫川,周孝信,杨小煜,等.考虑天然气季节性存储的综合能源系统年度运行方式研究[J].中国电力,2022,55(4):145-155.
LIU Hechuan, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Study on the annual operation mode of integrated energy system considering seasonal storage of natural gas [J]. China Electric Power, 2022, 55(4): 145-155.
- [16] QIAO Z, GUO Q, SUN H, et al. Multi-time period optimized configuration and scheduling of gas storage in gas-fired power plants [J]. Applied Energy, 2018, 226: 924-934.
- [17] 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 dispatching method of electricity-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of thermal energy transmission [J]. Power Grid Technology, 2020,44(1):132-142.
- [18]靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-591.
- JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method of cold, heating and power combined power and cold power building microgrid for converged demand-side virtual energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(2):581-591.
- [19]陈泽兴,赵振东,张勇军,等.计及动态管存的电-气互联系统优化调度与高比例风电消纳[J].电力系统自动化,2019,43(9):31-40,49.
- CHEN Zexing, ZHAO Zhendong, ZHANG Yongjun, et al. Optimal dispatching of electricity-gas interconnection system considering dynamic storage and high proportion of wind power consumption [J]. Power System Automation, 2019,43(9):31-40,49.
- [20]周晟锐,刘继春,张浩禹,等.考虑管存动态特性的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电气传动,2021,51(13):69-74.
- ZHOU Shengrui, LIU Jichun, ZHANG Haoyu, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-thermal integrated energy system considering dynamic characteristics of reservoirs [J]. Electric Drive, 2021, 51(13):69-74.
- [21]王珺,顾伟,陆帅,等.结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J].电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
- WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Collaborative planning of multi-regional integrated energy system combined with heat grid model [J]. Power System Automation, 2016,40(15):17-24.
- [22]吴盛军,李群,刘建坤,等.基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置[J].电网技术,2021,45(10):3822-3832.
- WU Shengjun, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Optimal configuration of double-layer multi-microgrid system based on energy storage power station service [J]. Power Grid Technology, 2021,45(10):3822-3832.
- [23]文云峰,瞿小斌,肖友强,等.耦合能量枢纽多区域电-气互联能源系统分布式协同优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(9):22-30.
- WEN Yunfeng, QU Xiaobin, XIAO Youqiang, et al. Distributed collaborative optimal dispatch of multi-regional electric-gas interconnected energy system in coupling energy hub [J]. Power System Automation, 2019, 43(9):22-30.
- [24]范成围,陈刚,熊哲浩,等.考虑室内体感舒适度的城市楼宇型能量枢纽优化配置与定容应用分析[J].全球能源互联网,2020,3(3):291-300.
- FAN Chengwei, CHEN Gang, XIONG Zhehao, et al. Optimal configuration and capacity application analysis of urban building-type energy hub considering indoor somatosensory comfort [J]. Global Energy Internet, 2020, 3(3):291-300.
- [25]黄伟,叶波.综合能源系统环境下电动汽车分群优化调度[J].电力建设,2021,42(4):27-39.
- HUANG Wei, YE Bo. Optimal scheduling of electric vehicles in groups under the environment of integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4):27-39.
- [26]SACHAN S, DEB S, SINGH S. Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 60:102238.
- [27]宋晓通,吕倩楠,孙艺,等.基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J].高电压技术,2021,47(10):3744-3756.
- SONG Xiaotong, LYU Qiannan, SUN Yi, et al. Interaction strategy between electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance [J]. High Voltage Technology, 2021,47(10):3744-3756.
- [28]李兴源,蒋林洳,陈中,等.考虑电动汽车互动的综合能源系统扩展规划[J].电网与清洁能源,2020,36(4):110-118.
- LI Xingyuan, JIANG Linbai, CHEN Zhong, et al. Expansion planning of integrated energy system with the interaction between electric vehicles and power grid [J]. Power Grid and Clean Energy, 2020,36(4):110-118.
- [29]王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1597-1608.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in smart city integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5):1597-1608.
- [30]加鹤萍,丁一,宋永华,等.信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述[J].电网技术,2019,43(1):1-11.
- JIA Heping, DING Yi, SONG Yonghua, et al. Reliability analysis and review of integrated energy system under the background of deep integration of information physics [J]. Power grid Technology, 2019,43(1):1-11.
- [31]吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.集成数据中心的综合能源

- 系统能量流-数据流协同规划综述及展望[J].中国电机工程学报,2021,41(16):5500-5521.
- LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Energy flow-data flow collaborative planning for integrated energy systems in integrated data centers [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5500-5521.
- [32] 兰浦哲, 韩冬, 徐潇源, 等. 基于长短期记忆的电-气耦合综合能源系统贝叶斯状态估计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 18-28.
- LAN Puzhe, HAN Dong, XU Xiaoyuan, et al. Bayesian state estimation for electric-gas coupling integrated energy system based on long and short term memory [J]. Automation of Power Systems, 2021, 45(20): 18-28.
- [33] DING Z, XIE L, LU Y. Emission-aware stochastic resource planning scheme for data center microgrid considering batch workload scheduling and risk management [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5599-5608.
- [34] EDUARD, ORÓ, PAOLO, et al. Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks-science direct [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 522-542.
- [35] YANG T, ZHAO Y, PEN H, et al. Data center holistic demand response algorithm to smooth microgrid tieline power fluctuation [J]. Applied Energy, 2018, 231: 277-287.
- [36] 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. Multi-energy network and energy hub joint planning method [J]. Proceedings of the Csee, 2018, 38(18): 5425-5437.
- [37] 何意, 郭苏, 彭怀午, 等. 风电-光伏-抽水蓄能-蓄电池联合发电系统容量及运行协同优化[J]. 西北水电, 2021(3): 6-10, 17.
- HE Yi, GUO Su, PENG Huaiwu, et al. Collaborative optimization of capacity and operation of wind-photovoltaic-pumped-storage battery combined power generation system [J]. Northwest Hydropower, 2021(3): 6-10, 17.
- [38] 范志成, 朱俊澎, 袁越, 等. 基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 504-513.
- FAN Zhicheng, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Distributed power planning model for active distribution network based on improved dc power flow algorithm and its linearization method [J]. Power Grid Technology, 2019, 43(2): 504-513.
- [39] 朱俊澎, 施凯杰, 李强, 等. 考虑输电网潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1947-1955.
- ZHU Junpeng, SHI Kaijie, LI Qiang, et al. Time-series production simulation and new energy consumption capacity evaluation considering power flow constraint of transmission network [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(5): 1947-1955.
- [40] 臧海洋, 何天雨, 刘建坤, 等. 热启动环境下含统一潮流控制器的线性化最优潮流模型[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3517-3524.
- ZANG Haixiang, HE Tianyu, LIU Jiankun, et al. Linearized optimal power flow model with unified power flow controller in hot start environment [J]. Power Grid Technology, 2016, 40(11): 3517-3524.
- [41] 杨德龙. 主动配电网的多时段网损优化模型[J]. 电气技术与经济, 2021(5): 14-16.
- YANG Delong. Multi-time network loss optimization model of active distribution network [J]. Electric Technology and Economy, 2021(5): 14-16.
- [42] 陈雨薇. 能源互联背景下电力系统最优潮流的凸松弛方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [43] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [44] JIANG X, JING Z, LI Y, et al. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system [J]. Energy, 2014, 64(1): 375-388.
- [45] 王婉璐, 杨莉, 王蕾, 等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 45-52.
- WAN Wanlu, YANG Li, Wang Lei, et al. Optimization scheduling of electric-thermal integrated energy system considering heat storage characteristics of heating network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 45-52.
- [46] YING C, THORSTEN K, NAZGUL Z, et al. Modeling and forecasting the dynamics of the natural gas transmission network in Germany with the demand and supply balance constraint [J]. Applied Energy, 2020, 278, 115597.
- [47] FANG J. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017(99): 1.
- [48] 林舜江, 唐智强, 谢煜铨, 等. 电-气混合系统安全约束最优能量流的分布式计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 36-46.
- LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, XIE Yuquan, et al. Distributed computation of optimal energy flow with safety constraints for electric-gas hybrid systems [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7): 36-46.
- [49] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures

- with a transient model for natural gas flow[J].Chaos,2011,21(2):531.
- [50]胡泉,尚策,陈东文,等.考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):22-31,139.
- HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 22-31, 139.
- [51]吴聪,唐巍,白牧可,等.基于二层规划的用户侧能源互联网规划[J].电工技术学报,2017,32(21):122-131.
- WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Optimal planning of energy internet near user side based on bilevel programming [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 122-131.
- [52]CAO Y, WEI W, WANG J, et al. Capacity planning of energy hub in multi-carrier energy networks: A data-driven robust stochastic programming approach [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018: 1.
- [53]OLSEN D, ZHANG N, KANG C, et al. Planning low-carbon campus energy hubs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018(6): 1.
- [54]MA T, WU J, HAO L, et al. The optimal structure planning and energy management strategies of smart multi energy systems[J].Energy, 2018, 160: 122-141.
- [55]WANG Y, ZHANG N, ZHUO Z, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: Starting from scratch [J]. Applied Energy, 2018, 210(1): 1141-1150.
- [56]张利军,王一铮,陈飞,等.计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):3-13.
- ZANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [57]ZHANG X, LIU X, ZHONG J, et al. Electricity - gas-integrated energy planning based on reward and penalty ladder-type carbon trading cost [J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2019, 13(23): 5263-5270.
- [58]贾龙,胡泽春,宋永华,等.储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):73-84.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [59]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.
- [60]郑徐跃.区域综合能源网络规划方法与运行优化策略研究[D].厦门:厦门大学,2018.
- [61]刘洪,郑楠,葛少云,等.考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J].中国电机工程学报,2021,41(1):52-64,397.
- LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 52-64, 397.
- [62]HU X, ZHANG H, CHEN D, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both exergy efficiency and economy[J].Energy, 2020, 197: 117155.
- [63]刘晋源,吕林,高红均,等.计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J].电力系统自动化,2020,44(12):41-48.
- LIU Jinyuan, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41-48.
- [64]翟晶晶,吴晓蓓,傅质馨,等.考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J].中国电力,2020,53(8):9-18.
- ZHAI Jingjing, WU Xiaobei, FU Zhixin, et al. Robust optimization of integrated energy systems considering demand response and photovoltaic uncertainty [J]. Electric Power, 2020, 53(8): 9-18.
- [65]高晗,李正烁.考虑电转气响应特性与风电出力不确定性的电-气综合能源系统协调调度[J].电力自动化设备,2021,41(9):24-30.
- GAO Han, LI Zhengshuo. Coordinated scheduling of integrated electricity-gas energy system considering response characteristic of power-to-gas and wind power uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 24-30.
- [66]MIRZAEI M, OSKOEI M, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. An integrated energy hub system based on power to gas and compressed air energy storage technologies in presence of multiple shiftable loads [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(13): 2510-2519.
- [67]曾明全.区域综合能源系统通用建模及规划方法研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [68]李梦露.P2G参与气电综合能源系统优化及效益评价研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [69]赵静.园区综合能源项目综合评价体系研究[D].北京:

- 华北电力大学, 2020.
- [70] KIENZLE, AHCIN, et al. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty [J]. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2011.
- [71] FAVRE-PERRODPATRICK, KIENZLEFLORIAN, ANDERSSONGÖRAN. Modeling and design of future multi-energy generation and transmission systems [J]. European Transactions on Electrical Power, 2010, 20(8): 994-1008.
- [72] 张璐, 张斌. 基于正态分布区间数的综合能源系统效益评价研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 41-45
ZHANG Lu, ZHANG Bin. Evaluation of the integrated energy system effectiveness based on the normal distribution interval number method [J]. Energy Construction, 2015, 2(2): 41-45.
- [73] 尹硕, 郭兴五, 燕景, 等. 考虑高渗透率和碳排放约束的园区综合能源系统优化运行研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 1-7.
YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 1-7.
- [74] 朱海东, 郝浩, 郑剑, 等. 基于冷热电多能互补的园区综合能源系统设计[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 34-38.
ZHU Haidong, HAO Hao, ZHENG Jian, et al. Design of integrated energy system for parks based on complementation of cold, heat and electricity [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 34-38.
- [75] 徐恒志, 周博文, 李广地, 等. 含水源热泵的区域综合能源系统低碳运行优化研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(1): 39-48.
XU Hengzhi, ZHOU Bowen, LI Guangdi, et al. Research on optimal operation of the regional integrated energy system with water-source heat pumps [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 39-48.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

刘自发(1973), 男, 教授, 博士, 从事电网规划和优化运行、分布式电源接入电网分析等方面的研究, tjubluesky@163.com;

谭雅之(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事分布式电源接入电网分析, 电网规划等方面的研究, 1598817561@qq.com;

李炯(2000), 男, 在读硕士研究生, 从事电力系统规划和优化运行方面的研究, 1920481366@qq.com;

樊静宜(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事新型电力系统规划应用方面的研究, 18991095050@163.com;

周翰泽*(1997), 男, 硕士, 从事电力系统规划和优化运行等方面的研究, m15658537671@163.com。

*为通信作者。

广 告 索 引

郑州科润机电工程有限公司 (后插 1)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插 2, 3)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插 4, 5)

中国华电科工集团有限公司新能源
技术开发公司 (后插 6)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
研发(实验)中心 (后插 7)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插 8)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插 9)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 10, 11)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插 12, 13)

中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版) (后插 14, 15)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插 16)

山东华电节能技术有限公司 (后插 17)

2022综合智慧能源大会暨优秀项目
案例发布会 (后插 18)

公益广告(降碳节能) (后插 19)

《华电技术》更名启事 (后插 20)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)