

综合能源系统运行优化研究综述

潘邦勇, 刘敏, 陈鑫瑞, 蒙昌州

贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年6月6日; 录用日期: 2023年7月11日; 发布日期: 2023年7月18日

摘要

综合能源系统(integrated energy system, IES)对电、冷、热、气等多种形式的能源实施多层次利用, 实现各类能源在提高可再生能源消纳率方面的差异互补。由于不同系统之间的紧密耦合和能量流动的复杂变化, IES在运行优化方面具有独特性。本文全面综述了IES优化运行的研究现状。首先, 介绍了IES设备的数学模型和IES运行优化模式。其次, 阐述了IES优化的求解方法及其特点。最后, 对IES综合效益评价体系进行了详细阐释并对该领域的未来发展进行了展望, 以期为今后的研究提供参考。

关键词

综合能源系统, 运行优化, 求解方法, 效益评价

Review of Research on Operation Optimization of Integrated Energy System

Bangyong Pan, Min Liu, Xinrui Chen, Changzhou Meng

School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 6th, 2023; accepted: Jul. 11th, 2023; published: Jul. 18th, 2023

Abstract

The integrated energy system (IES) implements multi-level utilization of various forms of energy such as electricity, cold, heat and gas, and realizes the complementarity of various energy sources in improving the consumption rate of renewable energy. Due to the tight coupling between different systems and the complex changes of energy flow, IES is unique in operation optimization. This paper comprehensively reviews the research status of IES optimal operation. Firstly, the mathematical model of IES equipment and the optimization mode of IES operation are introduced.

Secondly, the solution method and characteristics of IES optimization are expounded. Finally, the IES comprehensive benefit evaluation system is explained in detail and the future development of this field is prospected in order to provide reference for future research.

Keywords

Integrated Energy System, Operation Optimization, Solution Method, Benefit Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源领域的技术变革与创新贯穿人类社会发展史[1]。如何快速开发清洁能源, 高效协调多种能源的利用, 已成为世界能源领域的研究热点[2]。世界各国学者提出了多能源系统[3]、IES [4]、能源互联网[5]等相关概念, 并讨论了电、气、热、冷等多种能源的协调互补机制和开发应用模式的结构形式[6]。

随着化石能源过度消费和自然环境问题恶化, 推进国家能源转型[7], 实现能源生产从“一煤独大”向清洁主导的转变。这将改变传统能源系统的能源结构、用能方式和市场模型。从能源利用的角度来看, 多种类型的能源系统在不同的时间尺度上是相互联系和互补的, 能量的储存和转移可以在多个时间尺度上进行[8]。因此, 在 IES 的能量产生和利用过程中, IES 的运行优化是未来研究的主要方向。本文围绕 IES 运行优化这一主题, 梳理了 IES 设备单元的静态物理/经济模型, 总结了 IES 的基本运行优化模式、IES 的求解方法种类及其特点和 IES 效益评价方法。最后, 基于 IES 发展存在的不足, 提出了该领域的研究展望, 以期为今后的研究提供参考。

2. IES 设备模型

IES 涵盖供电、供热、制冷、供气等多种能源网络, 以及相关的信息设备和管理系统。IES 设备复杂多样, 不同设备构成的 IES 特性不同, 其通用网络架构图如图 1 所示。

目前对 IES 中的独立型和双重耦合型设备的数学静态建模已接近实际设备正常运行时的效果。然而随着越来越多不同种类的能源联合运行的快速发展, 需要四重以上耦合型设备机组也越来越多, 这将使得数学建模变得更加困难, 耦合关系也变得更加复杂[9], 然而目前对其相关的建模未有之。

IES 中独立型设备只生产、传输、存储电能、热能、冷能和天然气[10]。其中相关设备的物理/经济模型见表 1 对应的参考文献。

在研究和应用中, 系统的耦合模型可分双重耦合设备单元和三重及以上耦合型设备机组。IES 中双重耦合型设备只限于不同的两种能源进行转化, 主要有气转电、电转冷、热转冷、气转热、电转热和电转气等。三/四重耦合型设备机组也仅限气转电/热/冷, 其相关设备的物理/经济模型见表 2 对应的参考文献。然而, 目前对于气、电、冷、热、交通、水等网络彼此之间互联耦合的研究几乎没有触及。

3. IES 运行优化模式

IES 的研究涉及多个方面, 其中 IES 的建模和运行优化研究是比较重要的。IES 优化运行通常是在保证用户供能需求的前提下, 考虑 IES 运行成本最低为目标, 以便实现能源供能的总成本最低, 保证能源的高效利用, 从而实现系统的经济运行。目前, 对于电-气联供 IES、电-热联供 IES 以及电-气-热

联供 IES 等运行优化模式的研究已经很成熟。然而，对 IES 能源枢纽的研究甚少。本文主要对电 - 气联供 IES、电 - 热联供 IES 以及电 - 气 - 热联供 IES 进行简单介绍，重点在于介绍 IES 能源枢纽。

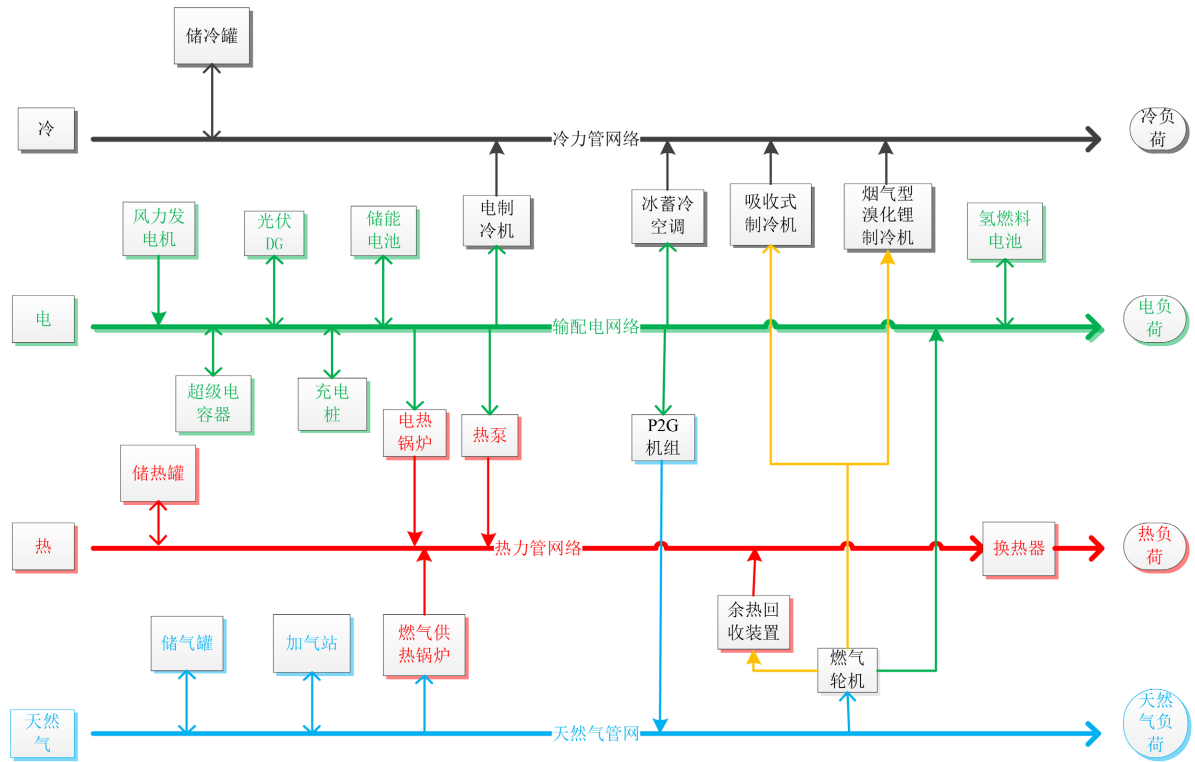


Figure 1. ES network architecture diagram

图 1. IES 网络架构图

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

类别	设备	物理/经济模型参考文献
电力设备	风力发电机	文献[11]
	光伏 DG	文献[6] [12] [13]
	输配电网	文献[14]
	储能电池	文献[15]
	充电桩	文献[16]
	超级电容器	文献[17]
热力设备	热力管网	文献[18] [19] [20] [21]
	储热罐	文献[15]
	换热器	文献[22]
	余热回收装置	文献[23]
冷力设备	冷力管网	文献[24]
	储冷罐	文献[25]

Continued

天然气设备	天然气管网	文献[26] [27] [28]
	储气罐	文献[29]
	加气站	文献[30] [31]

Table 2. Physical/economic model of coupled IES equipment and references

表 2. IES 耦合型设备的物理/经济模型及参考文献

类型	设备	物理/经济模型参考文献
电转冷	电制冷机	文献[32] [33]
	冰蓄冷空调	文献[34] [35] [36]
气转热	烟气型溴化锂制冷机	文献[37]
	燃气供热锅炉	文献[17] [38]
电转热	热泵	文献[39] [40] [41]
	电热锅炉	文献[42] [43]
气转电	氢燃料电池	文献[44]
	燃气轮机	文献[45]
液转电	柴油发电机	文献[46]
热转冷	吸收式制冷机	文献[32] [47]
电转气	P2G 机组	文献[48] [49] [50] [51]
气转电/热	CHP 机组	文献[52] [53] [54]
气转冷/热/电	CCHP 机组	文献[55] [56] [57]

3.1. 电 - 气互联 IES 运行优化

电 - 气互联 IES 将电力系统和天然气系统通过耦合元件结合到一起, 充分将电能和天然气的不足彼此互补, 从而提高了电力、天然气系统的稳定性, 其通用模型架构如图 2 所示。

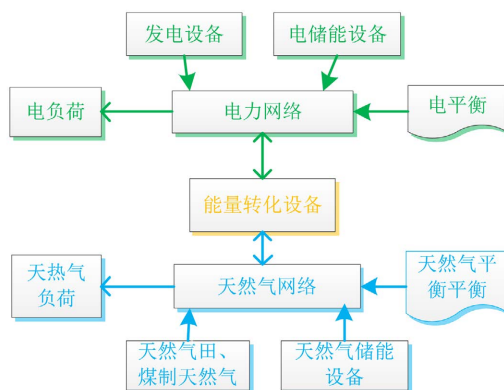


Figure 2. IES model architecture of electricity-gas interconnection

图 2. 电 - 气互联 IES 模型架构

电 - 气互联 IES 的运行机制，一般其目标函数是以系统运行成本和污染物排放最小，并考虑相关的技术约束，其公式表达式见表 3 对应的参考文献。

Table 3. IES constraint expression of electrical-gas interconnection and references

表 3. 电 - 气互联 IES 约束表达式及参考文献

类型 I	类型 II	参考文献
电力网络	节点功率平衡约束	文献[58] [59] [60]
	节点相角约束	文献[58] [59]
	CHP 机组出力约束	文献[58] [59]
	火电机组出力约束	文献[58] [59]
	P2G 机组出力约束	文献[58] [59] [60]
	风电机组出力约束	文献[60]
天然气网络	管存平衡约束	文献[58] [59] [60]
	加压站约束	文献[58] [59] [60]
	储气罐容量约束	文献[58]
	容量传输限制	文献[59]
	节点气压约束	文献[58] [59] [60]
	气源出力约束	文献[58] [59] [60]
	节点流量平衡约束	文献[58] [59] [60]

文献[61]以运行成本与碳排放最小为目标函数和以配电/气网与耦合装置作为约束条件来求解考虑综合需求响应的电 - 气综合能源系统低碳经济调度。文献[62]以机组成本与气井产气成本和以电力/天然气系统和耦合元件作为约束条件求解考虑精细模型的电 - 气综合能源系统优化运行

3.2. 电 - 热互联 IES 运行优化

电 - 热互联 IES 耦合了电能和热能，调动了电力、热力系统的互动，其通用模型架构如图 3 所示。

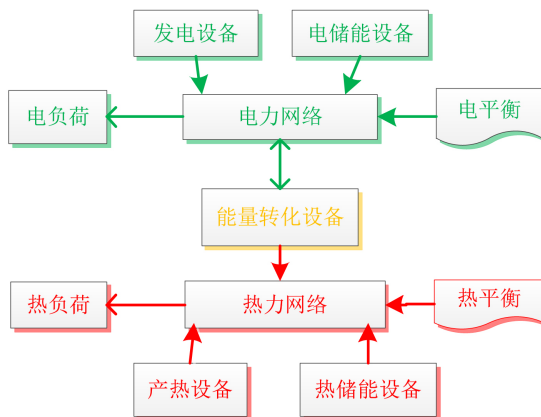


Figure 3. Electric-thermal interconnection IES model architecture

图 3. 电 - 热互联 IES 模型架构

电-热互联 IES 的运行机制,一般其目标函数是系统运行成本最小,并考虑相关的技术约束,其公式表达式参考文献[43]。文献[63]以发电、弃风/光与储能成本为最小和以电/热平衡、运行设备与储能设备作为约束条件来求解考虑风电消纳的电-热综合能源系统优化运行。文献[64]以煤耗量最小为目标函数,且以电力/热力需求、机组利用率、设备运行和装机作为约束条件来求解电热综合能源系统框架下蒙西电网电源容量最优配比研究。

3.3. 电-气-热互联 IES 运行优化

电-气-热互联 IES 耦合了电力、热力以及天然气而组成的一个大型系统,使得系统结构极其复杂,其通用模型架构如图 4 所示。

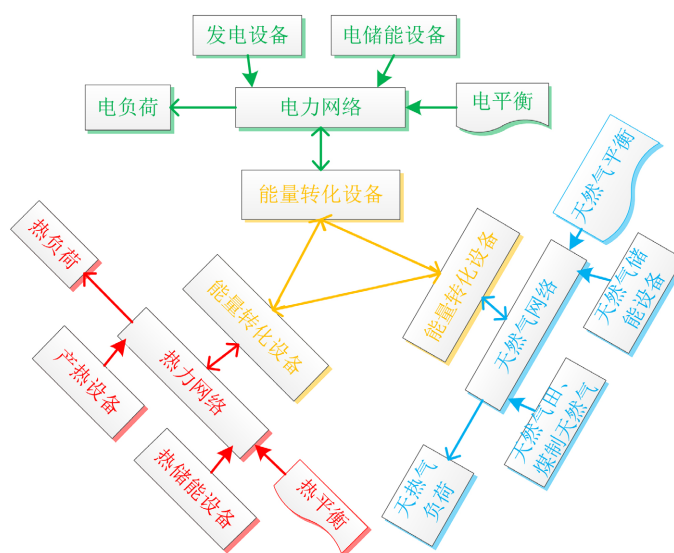


Figure 4. IES model architecture of electricity-gas-heat interconnection
图 4. 电-气-热互联 IES 模型架构

电-气-热互联 IES 的运行机制,一般其目标函数是以系统运行成本最小,并考虑相关的技术约束,具体约束条件表达式见表 4 对应的参考文献。

Table 4. IES constraint expression of electricity-gas-heat interconnection and references
表 4. 电-气-热互联 IES 约束表达式及参考文献

类型 I	类型 II	类型 III	参考文献	
系统运行约束	功率平衡	电功率平衡约束	文献[65] [66] [67] [68]	
		热功率平衡约束	文献[65] [66] [67] [68]	
		天然气功率平衡	文献[65] [66] [67] [68]	
	系统备用	系统备用	电功率备用约束	文献[66] [67] [68]
			热功率备用约束	文献[68]
			气功率备用约束	文献[68]

Continued

供能单元运行约束	风机	功率出力约束	文献[66] [67] [68]
		弃风量约束	文献[66] [67] [68]
	火电机组	电功率出力约束	文献[66] [67] [68]
		爬坡功率约束	文献[66] [67] [68]
		开停时间约束	文献[68]
	燃煤锅炉	热功率出力约束	文献[68]
	气井压缩机	气功率出力约束	文献[68]
	CHP 机组	电功率出力约束	文献[66] [67] [68]
		爬坡功率约束	文献[66] [67] [68]
		转化效率约束	文献[66] [67] [68]
	蓄热电锅炉	电功率出力约束	文献[66] [67] [68]
		蓄热量上限约束	文献[66] [67] [68]
	P2G 机组	气功率出力约束	文献[66] [67] [68]
	燃气锅炉	热功率出力约束	文献[66] [67] [68]

文献[69]以外系统购买的电、气能的费用为目标函数和以能源平衡、储能设备与机组作为约束条件求解计及用户行为的电-气-热互联 IES 日前经济调度。文献[70]以系统总运行成本最小为目标函数和以电/气/热网、耦合设备与 CCUS 装置作为约束条件求解考虑 CCUS 的电-气-热综合能源系统鲁棒优化调度。

3.4. IES 能源枢纽运行优化

IES 能源枢纽是一个允许不同能量流输入和输出、相互转换和储存的单元。目前,应用于 IES 的能源枢纽模型一般只包含用于实现电、热、冷之间转换的部件,其通用模型架构如图 5 所示。

电-热互联 IES 的运行机制,一般其目标函数是系统运行成本最小,并考虑相关的技术约束,其公式表达式参考文献[43]。文献[63]以发电、弃风/光与储能成本为最小和以电/热平衡、运行设备与储能设备作为约束条件来求解考虑风电消纳的电-热综合能源系统优化运行。文献[64]以煤耗量最小为目标函数,且以电力/热力需求、机组利用率、设备运行和装机作为约束条件来求解电热综合能源系统框架下蒙西电网电源容量最优配比研究。

文献[71]以运行费用最低为目标函数和以能量枢纽分配系数、电/热平衡、运行设备作为约束条件,对能量枢纽进行优化运行求解。文献[72]以安装、运行及可靠性惩罚成本之和最小为目标函数和以电/热平衡、设备、储能、分配系数、负荷旋转备用和可靠性作为约束条件来求解计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化。

能源枢纽运行优化问题的目标函数和约束条件通常可概括为如下表达方式。

3.4.1. 目标函数

能源枢纽总体趋向是主要以考虑日优化调度问题,合理安排各单元在每个时间间隔的处理,以能源枢纽购买电力 C_p 和天然气的费用 C_G 与污染物排放交易成本 F 之和最小为目标,其目标函数为。

$$\min C = C_G + C_p + F \quad (1)$$

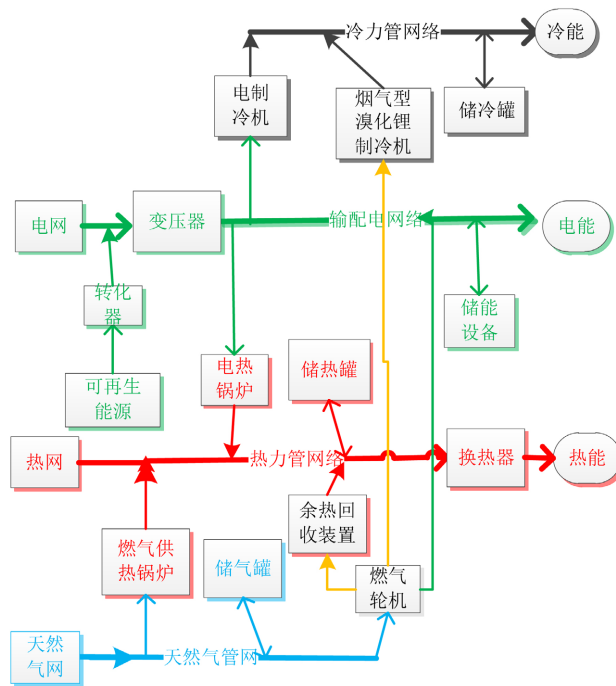


Figure 5. Energy hub model architecture
图 5. 能源枢纽模型架构

$$C_G = \sum_t \pi^G \left(\frac{P_t^{CCHP}}{\eta^{GT}} + \frac{H_t^{GB}}{\eta^{GB}} \right) \frac{\Delta T}{\lambda_{gas}} \quad (2)$$

$$C_P = \sum_t (\pi_t^{Tou} P_t^{PG} - \pi^s P_t^s) \Delta T \quad (3)$$

式中， π^G 、 π_t^{Tou} 和 π^s 分别为购气价格、购电的分时电价和售电价格； P_t^{PG} 为时刻 t 的购电功率； P_t^s 为时刻 t 的售电功率，其中售电只包括新能源生产的电力。

3.4.2. 约束条件

(1) 系统运行约束。

系统运行约束表达式如下所示：

$$0 \leq P_t^{PG} \leq P_{max}^{PG} \quad (4)$$

$$0 \leq f_t^{GT} + f_t^{GB} \leq f_{gas}^{max} \quad (5)$$

式中， P_{max}^{PG} 和 f_{gas}^{max} 分别为能源枢纽的购电、气容量上限。

(2) 电动汽车约束。

电动汽车(electric vehicle, EV)约束表达式如下所示[73]：

$$S_{k,min}^{EV} \leq S_{t,k}^{EV} \leq S_{t,k,max}^{EV} \quad (6)$$

$$P_{t,k}^{EV} = 0, t \notin [t_k^{ani}, t_k^{dep}] \quad (7)$$

$$S_{dep,k} \geq S_{k,min} + d_k^{dri} / d_{k,max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{t,k}^{EV, ch} \leq P_{t,k}^{EV, max} \quad (9)$$

式中, $S_{k,max}^{EV}$ 和 $S_{k,min}^{EV}$ 分别为第 k 辆电动汽车蓄电池荷电状态的最大最小值; t_k^{ani} 和 t_k^{dep} 分别为电动汽车接入和断开系统的时刻; $S_{dep,k}$ 为第 k 辆电动汽车离开电力系统时可以满足出行距离 d_k^{di} 的荷电状态 SOC 值, $S_{dep,k}$ 限定了电动汽车的可调度时段; $d_{k,max}$ 和 $P_{t,k}^{EV,max}$ 分别为第 k 辆电动汽车的最大续航里程和充电功率。

(3) 储电(electric storage, ES)设备约束。

$$S_{min}^{ES} \leq S_t^{ES} \leq S_{max}^{ES} \quad (10)$$

$$0 \leq P_t^{ES,ch} \leq \mu_t^{ES,ch} P_{max}^{ES,ch} \quad (11)$$

$$0 \leq P_t^{ES,dis} \leq \mu_t^{ES,dis} P_{max}^{ES,dis} \quad (12)$$

式(10)为 ES 荷电状态约束, 式(11)和式(12)为充放电功率约束。其中, S_{max}^{ES} 和 S_{min}^{ES} 分别为 ES 荷电状态的上下限; $P_{max}^{ES,ch}$ 和 $P_{max}^{ES,dis}$ 分别为 ES 的最大充、放电功率; $\mu_t^{ES,ch}$ 和 $\mu_t^{ES,dis}$ 表示 ES 在时刻的充、放电状态的二进制变量。

为保证 ES 不能同时充放电, 需满足以下约束:

$$\mu_t^{ES,ch} + \mu_t^{ES,dis} \leq 1 \quad (13)$$

为了保证优化调度的连续性, 在 ES 每日调度的结束时刻 T 的荷电状态要与初始时刻的荷电状态相等, 即

$$S_1^{ES} = S_T^{ES} \quad (14)$$

(4) 储热(heat storage, HS)设备约束。

$$W_{min}^{HS} \leq W_t^{HS} \leq W_{max}^{HS} \quad (15)$$

$$0 \leq H_t^{HS,ch} \leq \mu_t^{HS,ch} H_{max}^{HS,ch} \quad (16)$$

$$0 \leq H_t^{HS,dis} \leq \mu_t^{HS,dis} H_{max}^{HS,dis} \quad (17)$$

式(15)为 HS 储热量状态约束, 式(16)和式(17)为储/放热功率约束。其中, W_{max}^{HS} 和 W_{min}^{HS} 分别为储热量的上下限; $H_{max}^{HS,ch}$ 和 $H_{max}^{HS,dis}$ 分别为 HS 的最大储、放热功率; $\mu_t^{HS,ch}$ 和 $\mu_t^{HS,dis}$ 表示 HS 在时刻 t 的储、放电状态的二进制变量。

为保证 HS 不能同时储热和放热, 且一个调度周期始末 HS 的储热量相同, 即

$$\mu_t^{HS,ch} + \mu_t^{HS,dis} \leq 1 \quad (18)$$

$$S_1^{HS} = S_T^{HS} \quad (19)$$

(5) 用户舒适度约束。

① 室内温度约束。

$$\theta_{min}^{in} \leq \theta_t^{in} \leq \theta_{max}^{in} \quad (20)$$

式中, θ_{max}^{in} 和 θ_{min}^{in} 分别表示室内温度的上下限, 这确保室内温度保持在用户期望的舒适温度区间内。

② 用户意愿的水温约束。

$$\theta_{min}^{ws} \leq \theta_t^{ws} \leq \theta_{max}^{ws} \quad (21)$$

式中, θ_{max}^{ws} 和 θ_{min}^{ws} 分别为用户意愿的水温上下限, 以保证用户一天都有热水可用。

(6) 燃气锅炉(gas boiler, GB)运行约束。

$$0 \leq H_t^{GB} \leq H_{max}^{GB} \quad (22)$$

式中, H_{\max}^{GB} 表示 GB 的热力出力上限。

(7) 燃气轮机(gas turbine, GT)运行约束。

$$0 \leq P_t^{\text{GT}} \leq P_{\max}^{\text{GT}} \quad (23)$$

$$0 \leq H_t^{\text{GT}} \leq H_{\max}^{\text{GT}} \quad (24)$$

$$\left| P_t^{\text{GT}} - P_{t-1}^{\text{GT}} \right| \leq \Delta P_{\max}^{\text{GT}} \quad (25)$$

式中, H_{\max}^{GB} 和 P_{\max}^{GT} 分别表示 GT 的热力和电力出力上限; $\Delta P_{\max}^{\text{GT}}$ 表示 GT 发电的爬坡上限。

(8) 功率平衡约束。

① 电功率平衡约束。

$$P_t^{\text{EV, ch}} + P_t^{\text{L}} + P_t^{\text{ES, ch}} - P_t^{\text{ES, dis}} + P_t^{\text{EC}} = P_t^{\text{GT}} - P_t^{\text{S}} + P_t^{\text{Pv}} + P_t^{\text{CCHP}} \quad (26)$$

$$P_t^{\text{ES, ch}} = \lambda_t P_t^{\text{L}} \quad (27)$$

式中, P_t^{L} 为基本电力负荷; λ_t 为在[0, 1]在区间内的系数, 其表示储电设备为基本负荷所提供的电功率占基本负荷需求的比例。由于建设储能设备到多种负荷的成本较高, 考虑只有基本负荷可通过储能设备放电供电, 制冷需求和电动汽车的电能需求只能通过电网供电。

② 热功率平衡约束。

$$H_t^{\text{GB}} + H_t^{\text{CCHP}} = H_t^{\text{L}} + H_t^{\text{HS, ch}} - H_t^{\text{HS, dis}} + H_t^{\text{WS}} + H_t^{\text{AC}} \quad (28)$$

式中, H_t^{L} 为基本热负荷; 由燃气锅炉和余热锅炉为系统供热, 产生的热能供给基本负荷、热水负荷和吸收式制冷机。

③ 冷功率平衡约束[74]。

$$\left(E_t^{\text{AC}} \cdot \text{COP}_{\text{AC}} \right) + \left(E_t^{\text{EC}} \cdot \text{COP}_{\text{EC}} \right) = H_t^{\text{air}} \quad (29)$$

式中, E_t^{AC} 和 E_t^{EC} 分别为吸收式制冷机和电制冷机的输出功率; COP_{AC} 和 COP_{EC} 分别为吸收式制冷机和电制冷机的制冷系数, 分别为 0.7 和 3。

4. IES 运行优化的求解

由于多种能源系统间的相互连接, 综合能源系统的耦合性不断增强, 这将使得 IES 优化求解的计算量变大, 所以需要能够找到一种高效的求解方法。目前, IES 优化运行模型尚无统一的求解方法, 只能根据需要寻找适合具体优化模型的求解方法。IES 常用的求解方法包括数学优化算法和智能优化算法。从算法上来讲, 目前针对 IES 的优化调度多是结合数学规划算法或启发式算法进行的[75]。

4.1. 数学规划算法

数学规划算法是经典的数学优化算法[76], 包括线性规划、非线性规划 Benders 分解法等。一般而言, 数学优化算法适用范围广、计算速度快、最优解准确等优点, 但受变量类型、约束条件的线性情况、目标函数的个数、问题的凸性等影响较大并且在处理非线性、非凸或非连续问题时会陷于局部最优中[77]。使用数学规划算法解决 IES 优化调度问题有几个前提: 研究对象的数学模型清晰、约束条件明确、物理过程简单。文献[66]针对系统运行中电、热、天然气耦合问题, 采用基于拉格朗日松弛协同优化方法进行解耦。该方法仅适用于确定性模型。文献[78]采用原对偶内点法来求解考虑到电热综合能源系统实时优化调度运行的不确定性。

IES 规划与运行调度涉及设备间的相互耦合, 属于非线性求解问题。数学模型相互之间的约束比较

复杂, 求解维度较高[79]。因为, IES 中设置有大量热设备和热力反应设备, 设备模型始终具有非线性, 使用数学规划算法时常常需要对这些设备进行线性化处理。文献[80]以总成本最低为目标函数, 通过分段线性化, 转化为混合整数线性规划问题进行求解。文献[81]建立了考虑储能设备的电-气区域 IES 日前调度模型, 利用二阶锥松弛将模型线性化。

4.2. 启发式算法

相较于数学规划算法, 启发式算法可以更好地处理 IES 调度问题。启发式算法主要以智能优化算法为代表, 它能够很好地处理有关非凸优化问题。目前, 比较成熟的智能式算法包括灰狼算法、禁忌搜索算法和模拟退火算法等[82], 这些算法被广泛应用于 IES 优化调度的研究中。智能优化算法为许多复杂困难问题的求解提供了可行有效的策略, 具有简单、通用、便于并行处理等特点, 针对不同情况下的 IES 需要合理选择算法进行求解。具体如下表 5 所示。

Table 5. Heuristic algorithm corresponding to IES optimization problem
表 5. IES 优化问题对应的启发式算法

IES 运行优化问题	启发式算法
考虑风电不确定性的电-气综合能源系统协调优化	改进型蝙蝠算法[83]
基于低碳目标的电-气综合能源系统经济调度	ADMM 算法[84]
基于碳交易机制的电气耦合综合能源系统规划	改进粒子群算法[85]
电-气区域综合能源系统多目标混合潮流优化	NSGA-II 算法[86]
含电转气技术的电气综合能源系统风电消纳研究	改进的飞蛾扑火算法[87]
基于合作博弈的多区域电-气综合能源系统低碳经济调度	小生境粒子群算法[88]
促进风电消纳的电-热-气综合能源系统优化运行研究	改进磷虾群算法[89]
基于风电功率预测的综合能源系统经济调度研究	改进的教与学优化算法[90]
提升风电消纳的电-气综合能源系统多目标协调优化运行研究	改进的多目标粒子群算法[91]
天然气地下储气库的电-气-热综合能源系统联合规划研究	布谷鸟搜索算法[92]
基于价格杠杆作用的冷热电联供综合能源系统协同优化	灰狼算法[93]

目前, IES 规划与运行优化中的求解方法过于繁多。许多研究都采用启发式算法来解决综合能源系统的优化问题。那么对于统一建立模型与求解法索引体系, 是值得研究和创建的。

4.3. 求解流程及步骤

IES 运行优化建模是基于具体场景中不同元素的角色和作用, 建立各能源供给设备之间协调互补的能量流关系。根据 IES 的典型特征和运行机制, 对 IES 运行优化模型的求解步骤和流程如下:

IES 运行优化模型一般求解流程如下图 6 所示:

IES 运行优化模型求解步骤如下:

步骤 1: 根据所建立的运行场景输入优化模型所需的数据

步骤 2: 设置各出力设备的出力约束、传输约束、爬坡率及电网交互约束等运行参数。

步骤 3: 根据优化模型选择合适的智能算法。

步骤 4: 根据输入的基础数据和参数设置, 在系统约束条件下利用智能算法计算目标函数值。

步骤 5：输出优化决策的运行策略结果。

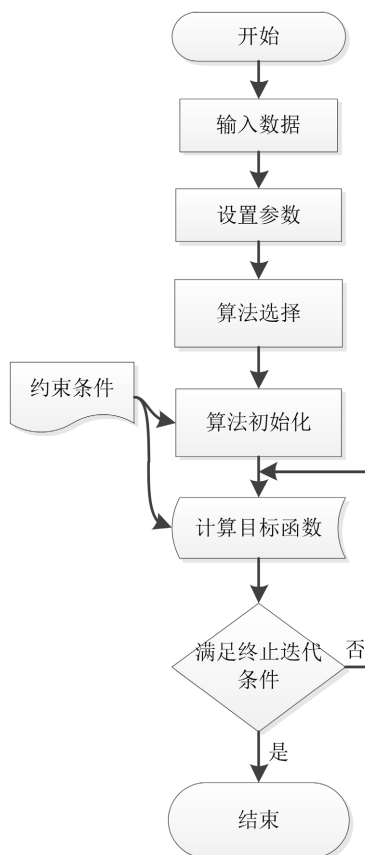


Figure 6. IES operation optimization model solving process

图 6. IES 运行优化模型求解流程

5. IES 综合评价体系

5.1. IES 综合效益评价指标

近年来对 IES 的研究主要集中在规划、调度、负荷预测等方面。其中，IES 预测、决策和控制都是以相关评价指标为指导。IES 与评价指标之间的强耦合关系要求我们在进行综合评价时，全面、深入地考虑 IES 对安全、经济、环境和社会的影响，且在进行综合评价时，必须考虑各评价对象的独特性指标，IES 效益评价指标具体如表 6 所示。

本节构建的 IES 效益评价指标体系涵盖了经济、社会、环境、安全 4 个方面的效益情况，但二级指标设置较少，尚不能全面、深入地反映 IES 能够带来的效益情况。例如，设备利用率、投资回收期、可再生能源渗透率、用户端能源质量等效益指标未进行考虑，有待于补充更新。

此外，有学者对 IES 评价指标进行了深入研究。文献[94]提出了区间多属性决策方法和模糊语言多属性决策模型。最后，构建了综合能源系统效率评价的数学模型。文献[95]实施了一种新的评估方法，将热经济学分析与可靠性和可用性评估相结合，以优化能源枢纽系统的设计。文献[96]建立了综合评价指标，有效地评价了连锁故障的严重程度。文献[97]建立了以不同主体的评价体系，对区域 IES 的综合效益进行定量评价。文献[98]对农村 IES 在经济、环境、技术和社会进行了指标评价。

Table 6. IES benefit evaluation index system
表 6. IES 效益评价指标体系

一级指标	二级指标	指标单位
经济	系统设备投资费用	万元
	设备利用率	%
	弃风/光率	%
	系统运行费	万元
	管网热损失率	%
	网损率	%
安全	线路越限概率	%
	设备无故障率	%
	IES 平均故障停电时间	h
	管道越限概率	%
	切负荷概率	%
环境	装置故障率	%
	能源转换效率系数	---
	NO _x 排放量	t
	一次能源消耗量	t
	SO ₂ 排放量	t
	清洁能源供能占比	%
社会	CO ₂ 排放量	t
	烟效率	%
	配电网缓建效益能力	---
	用户舒适度	---

目前,国内外已有大量的研究工作涉及到的 IES 效益评价,但是应用于实际工程的 IES 效益评价标准并不完善。

5.2. IES 综合评价方法

IES 效益评价是保障系统规划和运行优化决策的重要依据。不同的评价方法对系统整体性能的评价会产生不同的结果,对优化的目标导向也会产生不同的影响。评价方法一般包括 3 种[99][100][101][102][103]: Pareto 非支配解多目标优化方法、多指标加权综合评价和统一的单目标综合优化方法。

多目标优化后得到 Pareto 非支配解,包括一系列可行解。例如,文献[104]以性能因子指标为目标函数,采用改进的遗传算法对区域 IES 进行优化。性能因子指标由年总成本、年能源交易成本、二氧化碳排放量和负荷峰谷比组成;文献[105]综合考虑经济效益、能源效益和环境效益,建立了 IES 评价指标体系,并利用 NSGA-II 对不同建筑和模式进行了优化。文献[106]采用粒子群优化算法,以投资成本、一次能源消耗、CO₂ 排放和供能可靠性 5 个评价指标,对含 CCHP 的微能源网络容量和运行策略进行优化。

对于多指标加权综合评价,文献[107]基于 9 个二级指标,操纵 FCA 对园区 IES 进行性能分析和评价;文献[108]等提取了区域 IES 评价在能源环节、装置环节、配电网环节和用户环节的指标,采用网络分析和反熵权法相结合的方法计算了各指标的权重和评分函数;文献[109]等建立了能源、环境、经济综合评价模型,对分布式 IES 的综合效益进行评价;文献[110]采用技术、经济、环境、社会等多指标综合评价

方法对 IES 进行评价, 并采用秩相关分析法和熵信息法分别获得主观权重和客观权重; 文献[111]提出了一个涵盖源、网、荷、储技术特性以及经济、环境、可靠、智慧等多维度的评价体系, 用于工业园区 IES 的性能评价; 文献[112]从能源效率、经济性、环保性、社会效益等二级指标出发, 建立了基于主客观信息融合的港口 IES 综合评价体系。

统一的方法是通过转换系数将每种物质转换为统一维度的数据。常用的方法有焓环境法和生态能值法。文献[113]采用能量效率、焓效率、CO₂ 排放量等指标对 IES 的能量、焓经济和环境性能进行了分析。结果表明, 单纯的能量和焓效率评价并不能描述太阳能在混合系统中的作用。文献[114]基于能值系数建立了可再生能源与冷热电联供系统的综合评价体系, 并采用模糊综合评价方法分析了系统的综合性能。文献[115]计及焓效率的区域综合能源系统综合评估模型, 从多个维度科学有效地评估了区域综合能源系统。

由于我国的 IES 尚处于发展的初级阶段, 其效益评价方法也应该是一个不断发展的过程。

5.3. IES 综合评价流程

随着 IES 的发展, 综合评价的基本步骤和系统架构方法需要进一步规范。综合相关文献资料[94]-[118], IES 综合评价的基本流程图和步骤具体如下。

IES 的效益评价流程图如下图 7 所示:

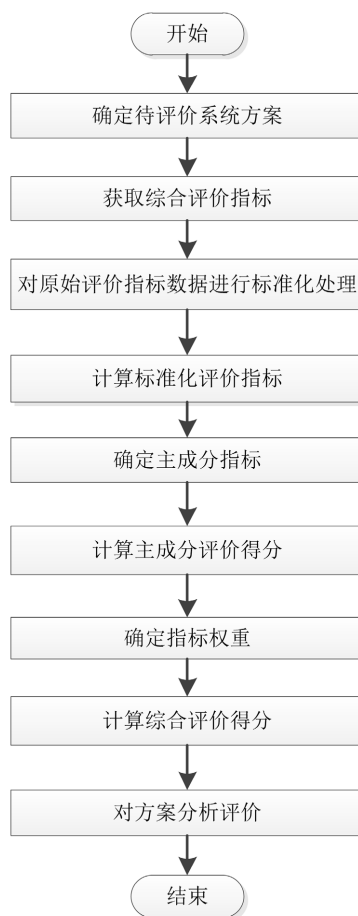


Figure 7. IES comprehensive evaluation flow chart
图 7. IES 综合评价流程图

IES 的效益评价步骤如下所示:

- 步骤 1: 确定待评价系统方案。
- 步骤 2: 获取综合评价指标, 对原始评价指标数据进行标准化处理。
- 步骤 3: 计算标准化评价指标。
- 步骤 4: 确定主成分指标, 并计算其得分。
- 步骤 5: 确定指标权重, 计算得分。
- 步骤 6: 对结果进行评价分析。

6. 结论

目前, 我国 IES 不断蓬勃发展, 在社会上各个层面发挥出巨大的作用和影响。但是, 同时也正面临越来越多的问题急需学术界和产业界不断地进一步地深入研究和在实践中加以论证解决。具体问题表述如下所示:

- 1) IES 的优化一般都是按照理想化来处理, 那么如何处理数据采集系统在采集的过程中存在的不确定因素, 而造成理论与实际的误差。
- 2) 目前的设备元件模型主要为静态模型, 那么如何建立设备元件的动态模型并能够更好地进行分析不确定性。
- 3) 对于多种能源的高度融合与互联, 如何提高气网、热网、电网、冷网和交通网等网络之间的匹配性和高效性。
- 4) 目前, 对于 IES 运行模式研究的种类很少, 有待结合实际工程扩展运行模式种类。
- 5) 在 IES 规划与运行优化中, 采用什么样的方式, 才能更好实现系统的合理配置和高效高质运行。
- 6) 对于 IES 的效益评价指标太多, 无法直接应用于实际工程, 那么可以采取什么样的方式来更好地准确细化和有效量化。

本文在 IES 现有研究文献的基础上, 介绍了 IES 设备单元的静态物理/经济模型和 IES 运行优化模式, 重点介绍了 IES 能源枢纽运行优化模型。其次, 总结了 IES 的求解方法种类及其特点。最后, 总结了综合评价方法和构建了综合评价体系。结尾对 IES 未来的下一步深入研究发展要面对的问题进行了概述, 以便能够为今后的研究提供参考。

参考文献

- [1] Rifkin, J. (2013) *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Palgrave Macmillan, New York.
- [2] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9-14.
- [3] Geidl, M. and Andersson, G. (2007) Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22, 145-155. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888988>
- [4] Lund, H. and Munster, E. (2006) Integrated Energy Systems and Local Energy Markets. *Energy Policy*, 34, 1152-1160. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.10.004>
- [5] 于凯, 余志文, 肖斐, 陈静鹏, 艾芊. 能源互联网概述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 1-9. <https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2015.24.006>
- [6] 黄海清, 周健, 董亚文, 朱国义. 综合能源微电网管理系统优化调度及能耗模式研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(5): 13-18.
- [7] 周鹏程, 吴南南, 曾鸣. 综合能源系统建模仿真规划调度及效益评价综述与展望[J]. 山东电力技术, 2018, 45(11): 1-5.
- [8] 于波, 吴亮, 卢欣, 等. 区域综合能源系统优化调度方法[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 70-76.
- [9] 马晓燕, 穆云飞, 李树荣, 等. 数据中心综合能源系统优化运行研究综述[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 1-13.

- [10] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.
- [11] 郭祚刚, 徐敏, 于浩, 等. 考虑多重不确定性的园区综合能源系统区间优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 121-128+141.
- [12] Farret, F.A. (2006) *Integration of Alternative Sources of Energy*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [13] 戚艳, 尚学军, 聂靖宇, 等. 基于改进多目标灰狼算法的冷热电联供型微电网运行优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 12-19+52. <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2022.06.002>
- [14] 郑宗强, 韩冰, 闪鑫, 等. 输配电网高级应用协同运行关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 122-128.
- [15] 潘学萍, 张源, 鞠平, 等. 太阳能光伏电站等效建模[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1173-1178.
- [16] 张立静, 娄素华, 陈艳霞, 等. 基于电池租赁模式的电动汽车换电站电池容量优化[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1730-1774.
- [17] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/光伏/制氢/超级电容器并网系统建模与控制[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2982-2990.
- [18] Jie, P., Tian, Z., Yuan, S., *et al.* (2012) Modeling the Dynamic Characteristics of a District Heating Network. *Energy*, **39**, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.055>
- [19] Kuosa, M., Kontu, K., Mäkilä, T., *et al.* (2013) Static Study of Traditional and Ring Networks and the Use of Mass Flow Control in District Heating Applications. *Applied Thermal Engineering*, **54**, 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.018>
- [20] 殷戈, 葛斌, 王培红. 蒸汽管网热力系统的建模与软件开发[J]. 热力发电, 2008, 37(5): 24-28.
- [21] Wei, G., Wang, J., Shuai, L., *et al.* (2017) Optimal Operation for Integrated Energy System Considering Thermal Inertia of District Heating Network and Buildings. *Applied Energy*, **199**, 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.004>
- [22] 薛凯, 王帅, 马金鹏, 等. 工业园区分布式综合能源系统的规划与调度[J/OL]. 化工进展: 1-14. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1598>, 2023-02-28.
- [23] 王志贺. 冷热电联供型微电网优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [24] 翟旭. 区域供冷系统物理模型参数辨识方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022. <https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.000182>
- [25] 陈德秋, 刘凯. 光热电站热能储存最优分配研究[J]. 电子世界, 2020(19): 70-71. <https://doi.org/10.19353/j.cnki.dzsj.2020.19.031>
- [26] 陈长明. 城市供热系统二级网建模与动态特性分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [27] 王磊. 供热系统稳态热力工况建模与热力失调研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [28] Abeysekera, M., Wu, J., Jenkins, N., *et al.* (2016) Steady State Analysis of Gas Networks with Distributed Injection of Alternative Gas. *Applied Energy*, **164**, 991-1002. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.099>
- [29] 文闯, 曹学文, 马玉鹏. 天然气气态储存工艺[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(1): 5-9.
- [30] Harrison, G. and Wei, S. (2017) Active Operation of Hydrogen Fuelling Stations to Support Renewable Integration. 2017 *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Torino, 26-29 September 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2017.8260194>
- [31] Zhao, L. and Brouwer, J. (2015) Dynamic Operation and Feasibility Study of a Self-Sustainable Hydrogen Fueling Station Using Renewable Energy Sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 3822-3837. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.044>
- [32] 唐沂媛. 冷热电联供/综合能源系统的规划研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [33] 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. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.151888>
- [34] 李超. 地源热泵与冰蓄冷联合运行的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2015.
- [35] 黄迪. 冰蓄冷空调控制系统的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [36] 孙可, 何德, 李春筱, 等. 考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型[J]. 电力建设, 2017, 38(12): 12-19.
- [37] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮. 含冷热电三联供的微能源网能量流计算及综合仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 22-27+124.

- [38] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 计及变负荷特性的小型冷热电联供系统经济优化运行研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3240-3246.
- [39] 邹晓锐, 周晋, 邓星勇, 等. 太阳能-地源热泵耦合式热水系统优化匹配研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1281-1290.
- [40] 徐辉, 林丽琼, 谭忠富. 地源热泵全寿命周期节能减排技术经济模型及应用[J]. 运筹与管理, 2018, 27(2): 159-167.
- [41] 邹晓锐. 太阳能-地源热泵耦合式热水系统优化及控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [42] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0150>
- [43] 徐媛. 考虑风电消纳的电-热综合能源系统优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [44] 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [45] 彭树勇. 冷热电联供型微电网优化配置与运行研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [46] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2013.03.002>
- [47] 朱璇. 溴化锂吸收式制冷机的数学模型与优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2013.
- [48] 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.
- [49] Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L.M., *et al.* (2017) Power to Gas Projects Review: Lab, Pilot and Demo Plants for Storing Renewable Energy and CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **69**, 292-312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>
- [50] Schiebahn, S., Grube, T., Robinius, M., *et al.* (2015) Power to Gas: Technological Overview, Systems Analysis and Economic Assessment for a Case Study in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 4285-4294. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.123>
- [51] Clegg, S. and Mancarella, P. (2015) Integrated Modeling and Assessment of the Operational Impact of Power-to-Gas (P2G) on Electrical and Gas Transmission Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **6**, 1234-1244. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2015.2424885>
- [52] Luo, X., Hu, J., Zhao, J., *et al.* (2014) Improved Exergoeconomic Analysis of a Retrofitted Natural Gas-Based Cogeneration System. *Energy*, **72**, 459-475. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.068>
- [53] 姜廖春晖. 燃煤热电联产区域供热系统热源优化配置研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [54] Kecebas, A. (2013) Energetic, Exergetic, Economic and Environmental Evaluations of Geothermal District Heating Systems: An Application. *Energy Conversion and Management*, **65**, 546-556. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.021>
- [55] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- [56] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.0952>
- [57] 姜子卿, 郝然, 艾芊. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 260-267.
- [58] 李昊飞, 瞿凯平, 余涛. 低碳动态电-气最优能流的加速凸分散优化求解[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 85-93+103.
- [59] 郑宝敏, 余涛, 瞿凯平, 等. 电-气互联系统的气电解耦分布式多目标优化调度[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 492-503.
- [60] 吴新, 史军, 马伟哲, 等. 基于并行 ADMM 的分布式电-气能量流多目标协同优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 60-68. <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2020.12.010>
- [61] 赵硕, 胡健, 王云鹏, 等. 考虑综合需求响应的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(9): 243-252.
- [62] 董文杰, 李俊格, 田志强, 等. 考虑精细模型的电-气综合能源系统优化运行方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 26-33. <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2022.11.004>
- [63] 李永光, 杨建兵, 杜欣慧, 等. 考虑风电消纳的电-热综合能源系统优化运行[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 228-235. <https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.05.035>

- [64] 路晓敏, 陈磊, 徐飞, 等. 电热综合能源系统框架下蒙西电网电源容量最优配比研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 132-138. <https://doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.018>
- [65] 吉兴全, 朱应业, 张玉敏, 等. 基于 DDQN-KRR 动态重构策略的综合能源系统运行优化[J/OL]. 高电压技术: 1-14. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221960>, 2023-03-24.
- [66] 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.
- [67] 赵帅, 撒奥洋, 周生奇, 等. 基于改进 BAS 算法的综合能源系统优化调度研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(4): 147-151. <https://doi.org/10.14022/j.issn1674-6236.2022.04.031>
- [68] 宋晨辉. 电-热-气综合能源系统优化运行与潮流分析研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2018. <https://doi.org/10.27007/d.cnki.gdbeu.2018.002539>
- [69] 张涛, 章佳莹, 王凌云, 等. 计及用户行为的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 86-94.
- [70] 罗平, 闫文乐, 王严, 等. 考虑 CCUS 的电-气-热综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2077-2087. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210257>
- [71] 凌梓, 李莉华, 杨秀, 等. 考虑需求响应的各季节能量枢纽优化运行[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 210-214.
- [72] 罗艳红, 梁佳丽, 杨东升, 等. 计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 47-54.
- [73] 卢锦玲, 闻若彤, 郭鲁豫, 等. 园区多能源系统优化运行策略[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(9): 59-65.
- [74] 徐建军, 赵书琪, 马睿, 等. 基于改进粒子群优化算法的综合能源系统多目标优化[J]. 广东电力, 2021, 34(5): 73-81.
- [75] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 176-194. <https://doi.org/10.16383/j.aas.2017.c160390>
- [76] 陈剑龙. 基于深度强化学习的微能源网能量管理策略研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020. <https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.003401>
- [77] 刘俊峰, 陈剑龙, 王晓生, 等. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3794-3803. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0144>
- [78] 任超宇. 促进风电消纳的电热协同优化调度运行[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [79] 刘圣春, 宋丽莹, 代宝民, 等. 附加碳税的综合能源系统优化调度分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(7): 1790-1800.
- [80] 周鑫, 韩肖清, 李伊竹林, 等. 基于可调热电比和两阶段阶梯式碳交易的多主体综合能源系统低碳经济调度策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-11. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001224>, 2023-03-13.
- [81] 汪春, 孙靖鸿, 徐青山, 等. 基于 CVaR 的高比例光伏区域综合能源系统优化调度[J/OL]. 工程科学与技术: 1-10. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202200787>, 2023-03-13.
- [82] 焦育威, 王鹏. 基于种群个体数自适应的多尺度量子谐振子优化算法[J/OL]. 自动化学报: 1-13. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200247>, 2023-03-10.
- [83] 马迪, 高红均, 张江林, 等. 考虑风电不确定性的电-气综合能源系统协调优化[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 33-40.
- [84] 赵硕. 基于低碳目标的电-气综合能源系统经济调度研究[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27276/d.cnki.gsdgc.2022.000719>
- [85] 燕飞. 基于碳交易机制的电气耦合综合能源系统规划[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022. <https://doi.org/10.27724/d.cnki.gnmkg.2022.000661>
- [86] 刘国庆. 电-气区域综合能源系统多目标混合潮流优化研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022. <https://doi.org/10.27144/d.cnki.ghbbsc.2022.000666>
- [87] 马书文. 含电转气技术的电气综合能源系统风电消纳研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022. <https://doi.org/10.27140/d.cnki.gbbbu.2022.001217>
- [88] 管科宇. 基于合作博弈的多区域电-气综合能源系统低碳经济调度[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27753/d.cnki.gcqgx.2022.000274>
- [89] 李永光. 促进风电消纳的电-热-气综合能源系统优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2021. <https://doi.org/10.27352/d.cnki.gylgu.2021.000464>
- [90] 于增志. 基于风电功率预测的综合能源系统经济调度研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021.

- <https://doi.org/10.27232/d.cnki.gnchu.2021.002995>
- [91] 刘子阳. 提升风电消纳的电-气综合能源系统多目标协调优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021. <https://doi.org/10.27845/d.cnki.gsygc.2021.000002>
- [92] 曹杰. 天然气地下储气库的电-气-热综合能源系统联合规划研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2021. <https://doi.org/10.27753/d.cnki.gcqgx.2021.000854>
- [93] 张杭. 基于价格杠杆作用的冷热电联供综合能源系统协同优化[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2022. <https://doi.org/10.27047/d.cnki.ggudu.2022.000534>
- [94] Li, Y. (2019) Research on Efficiency Evaluation Model of Integrated Energy System Based on Hybrid Multi-Attribute Decision-Making. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 17866-17874. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9100-8>
- [95] Talebjedi, B. and Behbahaninia, A. (2021) Availability Analysis of an Energy Hub with CCHP System for Economical Design in Terms of Energy Hub Operator. *Journal of Building Engineering*, **33**, Article ID: 101564. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101564>
- [96] Pan, Y., Mei, F., Zhou, C., et al. (2019) Analysis on Integrated Energy System Cascading Failures Considering Interaction of Coupled Heating and Power Networks. *IEEE Access*, **7**, 89752-89765. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926629>
- [97] 黄伟, 郭兆蕊, 华亮亮. 多主体利益协调的区域综合能源系统综合评价[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 81-89.
- [98] 宋晓华, 苏雨菁, 张露, 等. 基于改进物元可拓模型的农村综合能源系统效益评价[J]. 价格理论与实践, 2022(2): 170-174. <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2022.02.082>
- [99] Ma, W., Fang, S. and Liu, G. (2017) Hybrid Optimization Method and Seasonal Operation Strategy for Distributed Energy System Integrating CCHP, Photovoltaic and Ground Source Heat Pump. *Energy*, **141**, 1439-1455. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.081>
- [100] Strantzali, E. and Aravossis, K. (2016) Decision Making in Renewable Energy Investments: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **55**, 885-898. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021>
- [101] Kourkoumpas, D.S., Benekos, G., Nikolopoulos, N., et al. (2018) A Review of Key Environmental and Energy Performance Indicators for the Case of Renewable Energy Systems When Integrated with Storage Solutions. *Applied Energy*, **231**, 380-398. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.043>
- [102] Tahir, M.F., Chen, H. and Han, G. (2021) A Comprehensive Review of 4E Analysis of Thermal Power Plants, Intermittent Renewable Energy and Integrated Energy Systems. *Energy Reports*, **7**, 3517-3534. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.006>
- [103] Kang, L., Yang, J., An, Q., et al. (2017) Complementary Configuration and Performance Comparison of CCHP-ORC System with a Ground Source Heat Pump under Three Energy Management Modes. *Energy Conversion and Management*, **135**, 244-255. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.055>
- [104] Guo, Z., Zhang, R., Li, W., et al. (2021) Optimal Operation of Regional Integrated Energy System Considering Demand Response. *Applied Thermal Engineering*, **191**, Article ID: 116860. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116860>
- [105] Ren, F., Wei, Z., Zhai, X., et al. (2021) Multi-Objective Optimization and Evaluation of Hybrid CCHP Systems for Different Building Types. *Energy*, **215**, Article ID: 119096. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119096>
- [106] 陈灵敏, 吴杰康, 唐惠玲, 等. 考虑可再生能源消纳的 CCHP 微能源网优化配置模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 121-129.
- [107] Zhou, J., Wu, Y., Wu, C., et al. (2019) A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Performance Analysis and Evaluation of Park-Level Integrated Energy System. *Energy Conversion and Management*, **201**, Article ID: 112134. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112134>
- [108] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
- [109] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36. <https://doi.org/10.19666/j.rfd.201705040>
- [110] Yang, K., Yan, D., Zhu, N., et al. (2018) Multi-Criteria Integrated Evaluation of Distributed Energy System for Community Energy Planning Based on Improved Grey Incidence Approach: A Case Study in Tianjin. *Applied Energy*, **229**, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.016>
- [111] 钟依庐, 王路, 郑赞, 等. 适于工业园区综合能源类项目的综合评价指标体系[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(3): 51-56.

-
- [112] 何大春, 谈健, 苏宜强, 等. 主客观信息融合的港口综合能源系统评价指标体系[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(3): 110-116. <https://doi.org/10.13340/j.jsmu.2020.03.018>
- [113] Wang, J., Lu, Z., Li, M., *et al.* (2019) Energy, Exergy, Exergoeconomic and Environmental (4E) Analysis of a Distributed Generation Solar-Assisted CCHP (Combined Cooling, Heating and Power) Gas Turbine System. *Energy*, **175**, 1246-1258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.147>
- [114] Qian, J., Wu, J., Yao, L., *et al.* (2021) Comprehensive Performance Evaluation of Wind-Solar-CCHP System Based on Energy Analysis and Multi-Objective Decision Method. *Energy*, **230**, Article ID: 120779. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120779>
- [115] 陈威成. 计及(火用)效率的区域综合能源系统综合评估方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. <https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000955>
- [116] Kang, L., Yang, J., Deng, S., *et al.* (2016) Energy, Economical, Environmental Evaluation of a CCHP-Gshp System Based on Carbon Tax and Electric Feed in Tariff. *Energy Procedia*, **88**, 510-517. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.071>
- [117] Wang, X., Li, H., Wang, Y., *et al.* (2021) Energy, Exergy, and Economic Analysis of a Data Center Energy System Driven by the CO₂ Ground Source Heat Pump: Prosumer Perspective. *Energy Conversion and Management*, **232**, Article ID: 113877. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113877>
- [118] 檀晓林, 胡诗尧, 张菁, 等. 基于主成分分析与加权 TOPSIS 的县域配电网投资效益评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 133-139. <https://doi.org/10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.016>