

综合能源系统耦合性研究综述： 定性分析与量化应用

宋晨辉^{1,2}, 李顺宇¹, 肖峻², 贺波¹, 黄思卓¹, 贾宏杰²

(1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 长沙市 410114;

2. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

摘要:【目的】“耦合”广泛存在于自然界,是综合能源系统(integrated energy system, IES)的基本物理属性与首要特征。明确 IES 耦合机理,能充分发挥其多能互补优势,挖掘其作为“虚拟储能”的新能源消纳潜力。目前 IES 耦合研究主要针对能量耦合形式定性分析,存在“不全面”“未量化”“难分析”等问题。【方法】文章围绕 IES 耦合性,从“定性”和“定量”两个维度,对 IES 耦合性进行了综述。首先,由广泛存在的耦合现象出发,提出了 IES 耦合的基本概念。其次,针对 IES 耦合对规划与运行的影响,梳理了异质能源耦合定性研究的现状。接着,针对 IES 耦合定性分析的局限,从指标与方法两个维度,总结了当前 IES 耦合的量化研究进展,并从时间、空间与能量品位三个维度展开,探讨了耦合量化应用的潜力。【结果】最后,围绕建模、机理、应用,阐述了 IES 耦合量化的未来研究挑战。【结论】异质能源耦合涉及多时间尺度分析、源网荷储协同、能量梯次利用等 IES 研究中的多个关键本质问题,明确耦合特性将有助于明晰 IES 运行的本质规律,有助于形成全新的理论成果与应用方法。

关键词:综合能源系统(IES);异质能源耦合;定性分析;量化应用;规划运行;机理分析

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)12-0044-13

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.12.005

Review of Coupling Characteristics in Integrated Energy System: Qualitative Analysis and Quantitative Applications

SONG Chenhui^{1,2}, LI Shunyu¹, XIAO Jun², HE Bo¹, HUANG Sizhuo¹, JIA Hongjie²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: [Objective] "Coupling" exists widely in nature and is the fundamental physical attribute and primary characteristic of the integrated energy system (IES). Clarifying the coupling mechanism of IES can fully leverage its multi-energy complementary advantages and tap into its potential as a "virtual energy storage" for new energy consumption. Current coupling research mainly focuses on qualitative analysis of energy coupling forms, which suffers from issues such as "incompleteness," "unquantified," and "difficult to analyze." [Methods] This paper reviews the analysis and application of IES coupling from both "qualitative" and "quantitative" dimensions. Firstly, starting from the widely existing coupling phenomena, the basic concept of IES coupling is proposed. Secondly, the current status of qualitative research on heterogeneous energy coupling in terms of its impact on planning and operation is sorted out. Then, in view of the limitations of qualitative analysis of IES coupling, the progress of current quantitative research on IES coupling is summarized from the dimensions of indicators and methods, and the potential of quantitative application of coupling is explored from the three dimensions of time, space and energy grade. [Results] Finally, the future research challenges of IES coupling quantification are expounded around modeling, mechanism and application. [Conclusions] Heterogeneous energy coupling involves multiple key essential issues in IES research, such as multi-time scale analysis, source-grid-load-storage coordination, and energy cascade utilization. Clarifying the coupling characteristics will help clarify the essential laws of IES operation and

contribute to the formation of new theoretical achievements and application methods.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52307079) and the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2024JJ6050).

KEYWORDS: integrated energy system (IES); heterogeneous energy coupling; qualitative analysis; quantitative application; planning and operation; mechanism analysis

0 引言

近年来,我国开始着力构建多元化、可再生的新型能源供应体系,大力推动风能、太阳能等清洁能源利用,提出了“双碳”目标^[1]。然而,在“双碳”目标实施过程中,以风光为主的间歇性新能源大量接入,带来了严峻的并网与消纳问题:一方面,电力系统呈现高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”特征^[2],系统转动惯量持续下降,调频调压能力不足,新能源随机性会进一步加大系统运行时冬、夏“双峰”的峰谷差;另一方面,“双高”“双峰”形势下的新能源并网和消纳,大大增加了我国电力系统源网荷储各环节的建设运营成本,电能即发即用、难以大规模存储的特性也制约了新能源在电力系统中的消纳空间。

上述背景下,综合能源系统(integrated energy system, IES)应运而生。IES是电、气、热、冷等异质能源在生产、输送、转化与分配等过程中耦合而成的能源供应系统,是能源互联网的物理载体。IES打破了异质能源系统的物理界限,电、气、热、冷可以通过能源转化方式,将新能源在电力系统以外的能源系统进行消纳,为破解新能源消纳难题提供了新思路。IES具有该优势的本质原因在于异质能源耦合。此外,耦合性作为IES的核心特征与基本物理属性,也是其内部异质能源实现互补互济、协同开发与综合利用的必备要素。

现有IES耦合性研究,通常通过描述异质能源线性转换关系进行定性分析,少量文献通过引入功率耦合因子、能源耦合度和能源结构配比等指标对IES耦合性进行量化研究^[3],但量化指标各异、缺乏统一框架,存在主观性强和扩展性差等问题,难以客观描述IES耦合关系的本质特征和演化规律。此外,相关IES耦合性研究均只针对异质能源在能量形式上的耦合关系,事实上,IES耦合性广泛体现在时间、空间与能量品位等多个维度,而“时空-能量”全维度的耦合关系分析与量化应用仍鲜有报道。

综上,本文对IES的耦合性研究进行系统性梳理、分析和总结。首先,讨论了物理世界广泛存在的耦合现象,分析了耦合在IES中的具体表现形式。其次,对IES耦合的定性研究进行了总结,先梳理了异

质能源耦合对IES源网荷储各环节规划的影响,再围绕可靠性、灵活性、安全性和韧性,分析了多能耦合对IES运行的影响,并分析了IES耦合定性研究的局限。接着,从指标与应用两个维度,对IES耦合的量化研究进行了梳理。最后,从模型、机理、方法层面,递进探讨了IES耦合性量化应用的未来挑战。

1 耦合的存在性及在IES中的描述

1.1 耦合的广泛存在性

“耦合(Coupling)”最早被用在物理学中,指2个或2个以上的系统或运动方式通过物质、能量、信息交流形成的彼此约束、选择、协同和放大的现象^[4]。其中,约束与选择机制导致了各耦合方原有自由度或固有属性的缩减乃至消失,体现了相互间的一种限制与调整。相反,协同与放大效应则彰显了各系统在耦合交互过程中的积极互动,促使彼此原有的功能得到增强,属性得以放大,展现出一种相互促进、共同提升的态势。

耦合性在自然界广泛存在,可以表现为多种形式,如引力场耦合下的节气变迁、两级耦合的放大电路、变压器中的电磁耦合、交通领域的车轨耦合、化工等领域的耦合反应、航空等领域的流固耦合等。在物理世界中,力的耦合作用决定了宇宙基本运行规律:强相互作用力维持原子核的稳定性,电磁力控制原子和分子的结构,弱相互作用力参与放射性衰变,引力则支配星体运动和宇宙结构的形成。在社会系统中,个体协作、竞争和激励同样展现了耦合效应:社会分工使得个体在不同角色和功能中相互依赖,形成高效整体结构;竞争和激励则推动个体不断提升和创新,促进了社会的进步和发展^[5]。

可见,耦合性是物理世界和社会系统普遍存在的重要特征,耦合性研究对于理解物理现象本质、揭示社会行为规律,进而推动相关学科理论发展具有重要意义。

1.2 IES的耦合性描述

耦合性是IES的基本物理属性与首要特征,也是其内部异质能源实现互补互济与综合利用的基础。当前,相关研究主要围绕源网荷储等能源传输环节,对IES内的异质能源耦合关系进行描述。

在源侧,文献[6]通过源侧整合生物质气化、垃

圾气化及干化污泥等可再生能源,与煤炭形成多燃料互补输入模式,实现了传统化石能源与可再生能源的耦合利用。文献[7]在源侧引入光热电站,考虑电热耦合,构建了源侧双重主从博弈模型。在网侧,文献[8]在建立 IES 综合收益模型时,考虑了电网、气网和热网的耦合性,反映了耦合性对综合收益的影响;文献[9]考虑电能和天然气在网络传输时的耦合性,建立了电-气 IES 状态估计模型,提升了状态估计的实时精度。在荷侧,文献[10]考虑冷热电负荷耦合特征,利用耦合特征挖掘算法,提高了 IES 短期负荷的预测精度。文献[11]提出基于 TimeGPT 的 IES 多元负荷预测方法,通过自注意力机制捕捉电、热、冷负荷间的动态耦合关系。在储侧,文献[12]考虑柔性电负荷、热惰性空调建筑、电储能和热储能等资源,提出了考虑广义储能的多园区 IES 低碳优化运行策略;文[13]考虑电热耦合特性,分析电储能、热储能等不同类型储能在新能源消纳和峰谷平衡下的互补协调关系。

上述研究从源网荷储等环节,对 IES 耦合性展开研究,但尚未形成共识概念,也并未对 IES 耦合性给出明确定义。文献[3]在 2018 年,对 IES 耦合性进行了定义:IES 耦合性指电、热、天然气等不同能源形式之间的相互关联程度,用于表征和量化异质能源间的相互作用强度,同时还基于能源结构配比和能源耦合度等指标,最早对 IES 的耦合性进行了量化描述,相关介绍详见 3.1 节。

2 IES 耦合性的定性分析

2.1 IES 异质能源间的耦合关系

IES 异质能源间的耦合关系由耦合单元建立,如电转气(power to gas, P2G)机组、热电联产(combined heat and power, CHP)机组、蓄热电锅炉和燃气锅炉等。图 1 给出了一种典型的 IES 耦合关系示例,其中,电力系统和天然气系统由电转气机组建立耦合;电力系统、天然气系统和热力系统由热电联产机组建立耦合;天然气系统和热力系统由燃气锅炉建立耦合;电力系统和热力系统由蓄热电锅炉建立耦合。

需要指出,图 1 仅给出了 IES 耦合关系的一种经典描述,表 1 对异质能源系统、耦合单元及耦合关系进行了更全面的总结。

随着能源结构转型推进,IES 的耦合机理与协同优化研究已突破传统能源形式边界,向氢能载体延伸并拓展至交通网络交互领域。文献[14]探讨了基于深度强化学习的氢能综合能源系统优化调度方法,构建了包含风、光、氢、冷、热、电等多种能源形式

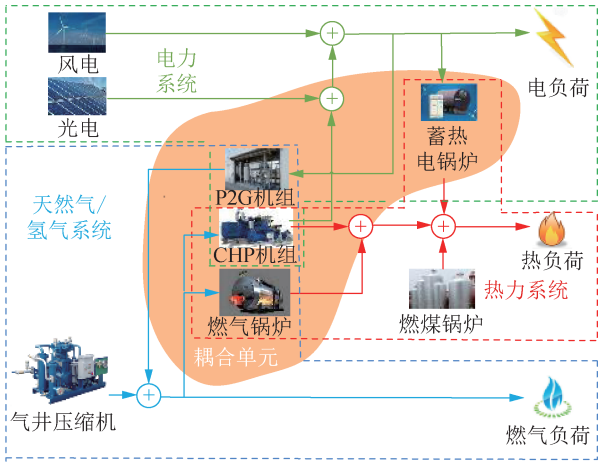


图 1 IES 耦合结构

Fig. 1 Coupling structure of IES

表 1 能源系统耦合单元引入的耦合关系
Table 1 Coupling relationship introduced by coupling units in energy system

耦合单元	能量耦合关系
CHP 机组	电能、热能和天然气
空调、蓄热电锅炉热泵	电能和热能
P2G 机组、燃气发电机	电能和天然气
燃气锅炉	天然气和热能

耦合的综合能源系统模型。文献[15]研究了考虑电-气-交通耦合的城市综合能源系统规划问题,分析了交通系统与电力系统、天然气系统之间的耦合关系增强现象。

2.2 异质能源耦合对 IES 规划的影响分析

异质能源耦合,即不同形式能源之间的转换与转移,对 IES 从能源生产到能源消费的全环节都产生了巨大影响。本文从源侧规划、网侧规划、源网协同规划、源荷协同规划以及储能规划等方面,总结了异质能源耦合对规划的影响。

在源侧规划方面,异质能源耦合主要影响站内资源配置^[16-18]。例如,文献[16]结合混合整数非线性规划算法优化站内设备容量,通过迭代调整站间能源价格与权重,在保障经济性的同时平衡各主体收益。文献[17]在 IES 能源站资源配置时,基于电热多能互济,降低了系统的碳排放总量;文献[18]基于多能耦合的能量枢纽理论和系统成本最小化的目标函数,确定了各能源站的设备配置与线路规划情况。

在网侧规划方面,异质能源耦合主要影响多能源下不同主体的利益协调^[19-21]。例如,文献[19]指出多能耦合带来了多主体间利益冲突难题,通过建立多能源耦合双层博弈规划模型,可以有效协调不同主体利益诉求;文献[20]提出了面向配电网的 IES 容量规划与能源交易优化策略,在保障配电网安全经

济运行的同时,提升了多主体利益协调性;文献[21]提出了一种电热综合能源系统协同规划方法,有效协调了热电联产机组“以热定电”运行约束与电网调峰需求之间的矛盾。

在源网协同规划方面,异质能源耦合主要面向考虑负荷分配的峰谷平衡需求^[22-23]。例如,文献[22]利用源侧多能流耦合和网侧多能流协同,有效缓解了传统单一能源网络解耦规划时的负荷分布不均衡问题。文献[23]考虑异质能源耦合下的多能负荷互补特征,提出了兼顾能源站选址、供能范围划分与管网布局的分层优化方法,缓解了供能网络峰谷不平衡问题。文献[24]通过分析异质能源耦合的时空分布特征,优化 IES 的站网布局,显著降低投资成本与能量传输损耗。

在源荷协同规划方面,异质能源耦合主要影响源-荷不确定性风险^[25-27]。例如,文献[25]提出了一种源荷协同规划策略,通过鲁棒优化与随机优化方法分别处理源侧与荷侧的不确定性,以降低源荷不确定性带来的风险。文献[26]考虑光伏出力和电负荷需求的不确定性,提出了 IES 鲁棒多阶段规划方法,通过分期投建设备、动态调整建设时序,提升了规划方案的适应性与可靠性。文献[27]考虑源-荷预测误差的不确定性,提出了 IES 多目标优化规划方法,优化了源荷规划中能源生产结构与备用容量配置,实现经济性、环境效益与供电可靠性的协同优化。

在储能规划方面,主要围绕推动多元储能形式的集成与优化^[28-30]。文献[28]提出了考虑电-氢混合储能的电-热 IES 规划方法,通过储能与热电联产机组等机组协同运行,有效降低了系统碳排放和系统运行波动。文献[29]提出了计及热网蓄热特性的多区域 IES 多元储能耦合规划模型,有效降低了系统年综合成本。文献[30]基于电、热耦合特性,构建了以光热复合先进绝热压缩空气储能为能源枢纽的分布式 IES,显著提升了系统的清洁能源消纳能力。

综上所述,异质能源耦合对源网荷储各环节规划都产生了深刻影响,但又存在一定区别:在源侧规划方面,更注重站内资源优化配置,以促进低碳转型;在网侧规划方面,更关注电、气、水(热)管网的耦合互联关系,在能流动态平衡基础上,协调多主体利益;在源-网规划方面,主要针对负荷分配中的峰谷平衡需求,利用多能流耦合特性缓解负荷分布不均衡;在站/源-荷规划方面,重点应对源-荷不确定性挑战,采用随机规划和鲁棒规划方法提升规划方案适应性;在储侧规划方面,推动多元储能形式的集成优

化,来辅助新能源消纳并实现电网的削峰填谷。

2.3 异质能源耦合对 IES 运行的影响分析

IES 运行优化是指考虑安全性、可靠性和灵活性等目标,以各能源网络方程、多能流耦合约束、元件安全约束等为边界条件,进行运行方式优化,其通用模型^[31]如下:

$$\begin{cases} \min f(x_i) \\ \text{s.t.: } y_i(x_i, k_i) = 0 \\ g_i(x_i) \leq 0 \\ h(x_\alpha, x_\beta, \dots, x_\omega) = 0 \\ i = \alpha, \beta, \dots, \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i, k_i 为能源系统 i 的运行变量、网络参数; $\alpha, \beta, \dots, \omega$ 分别表示电、热、气等不同能源类型。式(1)中从上到下依次为目标函数、异质能流平衡条件、元件安全运行条件、异质能源耦合约束,具体表达如式(2)所示。

异质能流平衡条件:

$$\begin{aligned} P_{j,t} &= U_{j,t} \sum_{\lambda \in j} U_{\lambda,t} (G_{j\lambda} \cos \theta_{j\lambda,t} + B_{j\lambda} \sin \theta_{j\lambda,t}) \\ Q_{j,t} &= U_{j,t} \sum_{\lambda \in j} U_{\lambda,t} (G_{j\lambda} \sin \theta_{j\lambda,t} - B_{j\lambda} \cos \theta_{j\lambda,t}) \\ \Delta \phi_{k,t} &= \phi_{k,t}^L - (m_{k,t} + m_{k,t}^s) \cdot C_p (T_{k,t}^s - T_{k,t}^r) \\ f_{mn,t} &= C_{mn} \text{sign}(\pi_{m,t}, \pi_{n,t}) |\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2|^{0.5} \\ &\vdots \end{aligned}$$

元件安全运行条件:

$$\begin{aligned} U_j^{\min} &\leq U_{j,t} \leq U_j^{\max} \\ m_b^{s,\min} &\leq m_{b,t}^s \leq m_b^{s,\max} \\ f_{h,\min} &\leq f_{h,t} \leq f_{h,\max} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

异质能源耦合约束:

$$\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{\alpha\alpha} v_{\alpha\alpha} & \cdots & \eta_{\omega\alpha} v_{\omega\alpha} \\ \eta_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta} & \cdots & \eta_{\omega\beta} v_{\omega\beta} \\ \vdots & & \vdots \\ \eta_{\alpha\omega} v_{\alpha\omega} & \cdots & \eta_{\omega\omega} v_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}$$

式中: $\lambda \in j$ 表示与节点 j 相邻的节点; $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别代表在 t 时刻注入节点 j 的有功和无功功率; $U_{j,t}$ 和 $U_{\lambda,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 和 λ 的电压; $G_{j\lambda}$ 和 $B_{j\lambda}$ 分别为节点 j 和 λ 的电导和电纳; $\theta_{j\lambda,t}$ 为 t 时刻节点 j 和 λ 之间的相角差; $\Delta \phi_{k,t}$ 为节点 k 在 t 时刻的热能变化; $\phi_{k,t}^L$ 为 t 时刻节点 k 的热负荷; $m_{k,t}$ 和 $m_{k,t}^s$ 分别为 t 时刻节点 k 处管道流量和热源供给流量; C_p 为水的比热容; $T_{k,t}^s$ 和 $T_{k,t}^r$ 分别为 t 时刻节点 k 处的供水温度和回水温度; $f_{mn,t}$ 为 t 时刻节点 m 和节点 n 之间的燃气管道流量; $\pi_{m,t}$ 和

$\pi_{n,t}$ 为 t 时刻节点 m 和节点 n 的压力; C_{mn} 为管道常数; $\text{sign}(\pi_{m,t}, \pi_{n,t})$ 代表气体流动方向, 当 $\pi_{m,t} < \pi_{n,t}$ 时取 -1 , 反之取 1 ; $U_j^{\max}$ 和 $U_j^{\min}$ 为节点 j 电压的上限和下限; $m_b^{s, \min}$ 和 $m_b^{s, \max}$ 分别为第 b 条管道水流量的下限和上限; $m_{b,t}^s$ 为第 b 条管道在 t 时刻的循环水流量; $f_{h, \min}$ 和 $f_{h, \max}$ 分别为第 h 条管道气体流量的下限和上限; $f_{h,t}$ 为第 h 条管道在 t 时刻的气体流量; L 和 P 分别代表能源枢纽的输出和输入; η 代表能源变换系数; v 代表能源分配系数。

异质能源耦合对 IES 运行影响巨大, 但其作为能源系统的本质特征与运行要求与电力系统是一致的, 因此本文选取可靠性、灵活性、安全性和韧性 4 个电力系统运行基本目标, 对相关研究进行了总结和分析。具体如图 2 所示。

2.3.1 可靠性

异质能源耦合对 IES 运行可靠性的影响, 主要体现在供能网络故障传播过程^[32-34]与多能负荷恢复^[35-37]两方面。

在供能网络连锁故障传播过程方面, 文献[32]在电力系统连锁故障建模时, 考虑了天然气动态过程影响; 文献[33]通过分析电-气耦合特征, 量化了天然气系统故障的极限风险, 建立了电-气 IES 的连锁故障模型。文献[34]指出单一能源子系统故障可通过能源转换设备引发跨系统连锁反应, 且影响程度随负荷需求水平升高而加剧。

在多能负荷恢复方面, 文献[35]提出了基于双层优化的电-气耦合故障恢复模型, 在多种故障场景下能有效减少切负荷量。文献[36]考虑了电-气异质能源耦合运行情况, 提出了优先恢复关键耦合元件的两阶段负荷恢复策略; 文献[37]提出了计及电-气-热异质能源耦合的配电网故障恢复策略, 有效降低了 IES 故障时的失负荷率和失负荷时间。

总体上, 异质能源耦合对 IES 运行影响具有双重效应。一方面, 系统故障不仅会导致系统本身供能中断, 还会加剧其他互联能源系统的连锁故障风险; 另一方面, 通过利用异质能源的耦合特性, 也可以加速负荷恢复过程、减少负荷损失, 提升系统运行的可靠性。上述风险广域传导与故障协同恢复的矛盾统一, 充分反映了异质能源耦合对 IES 运行可靠性影响的复杂机理。

2.3.2 灵活性

异质能源耦合对 IES 运行灵活性的影响主要集中于源侧调节能力^[38-40]、网侧功率平衡^[41-42]、负荷需求响应^[43-45]以及广义储能调控^[46-48]等方面。

在源侧调节能力方面, 相关研究主要针对多能协同的灵活调度策略^[38-39]和多能耦合下的低碳运行方法^[40]。文献[38]针对风、光、多能负荷预测误差, 对异质能源的非线性耦合相关性进行了建模分析, 设计了双向灵活爬坡产品以应对净负荷波动; 文献[39]提出了一种结合机会约束的多目标分布鲁棒优

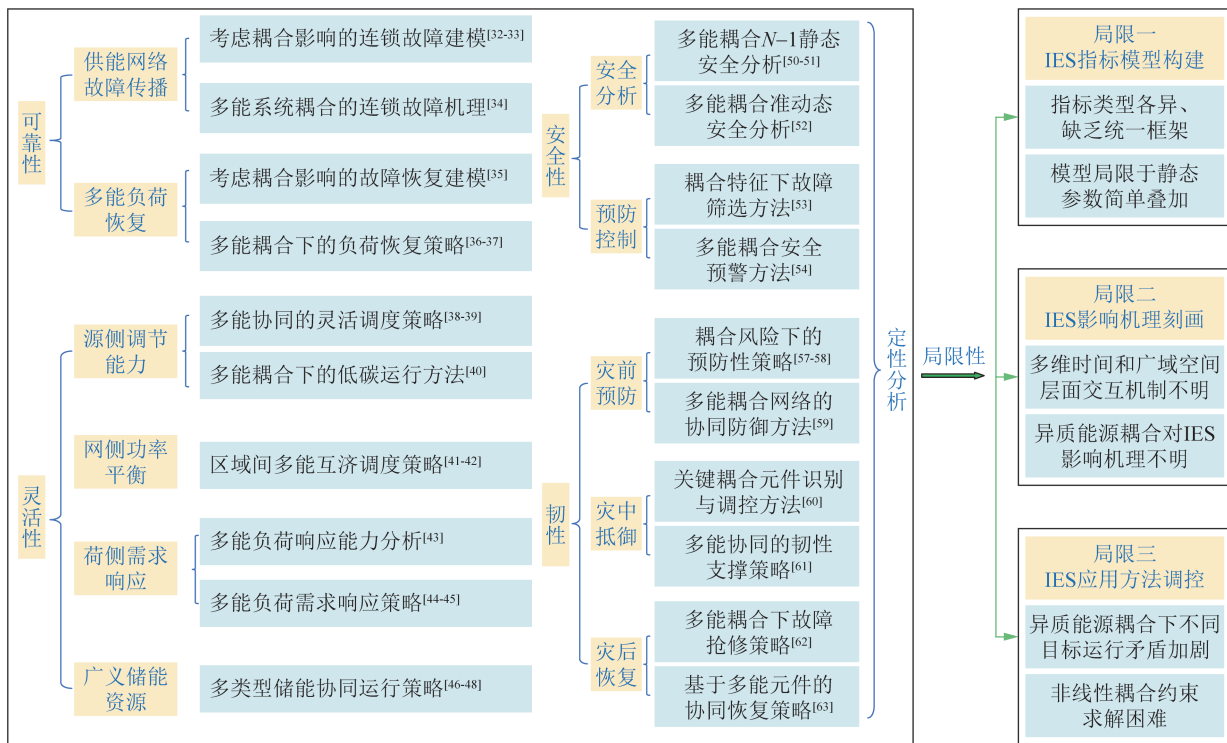


图 2 异质能源耦合对 IES 运行的影响

Fig. 2 Influence of heterogeneous energy coupling on the operation of IES

化调度策略,通过多能协同灵活调度实现 IES 的低碳经济性与鲁棒性平衡。文献[40]通过构建电、冷、热、气一体化系统模型,采用鲁棒优化应对风光出力不确定性,并结合碳排放惩罚因子,实现了系统灵活低碳运行。

在网侧功率平衡方面,相关研究主要针对区域间能源协调与互济互补^[41-42]展开。文献[41]通过设置含电热转换设备的能源集线器并构建跨区域电能-热能交换网络,实现了区域内电热平衡与跨区域电热互补;文献[42]提出了一种面向区域能量互济的多目标双层优化策略,在网侧功率动态平衡的基础上,利用能量互济机制进行跨区域电能交互,减少整体购能成本并提升系统灵活性。

在负荷需求响应方面,主要针对多能负荷响应能力^[43]和负荷需求响应策略^[44-45]。文献[43]通过分析异质能源耦合下的负荷响应能力,提出了电、气峰谷分时定价方法,从需求侧角度有效平抑了用能峰谷差。文献[44]通过考虑异质能源负荷的需求响应潜力与用户行为习惯,提出了基于差异化需求响应的负荷分类方法与精细化多能负荷需求响应策略;文献[45]考虑异质能源价格波动对用户行为影响,提出了冷热电多能耦合下的需求响应策略。

在广义储能资源方面,主要通过多储能系统协同优化^[46-48],保障能源系统广域动态平衡。文献[46]提出了计及广义储能的 IES 低碳运行策略,通过蓄电池、楼宇热储能等异质能源的时间转移特性,实现了跨时段能源互济;文献[47]提出了一种多储能系统协同运行优化方法,利用异质能源耦合提升了储能系统之间的互补协同效益。文献[48]提出基于电-热-气耦合的 IES 优化策略,通过电池储能、热储能及混合储能系统的互补协同优化,结合双群体多目标优化算法和相对熵理论,实现储能资源的高效利用。

综上所述,通过合理利用异质能源耦合特性,有助于在源侧提升系统应对源荷不确定性的调节能力,在网侧提升跨多能源的广域协调互补能力,在负荷侧优化对多能用户的管理水平,并以广义储能方式,实现多能源的跨时空动态能量平衡,有效增强 IES 的应变能力与运行灵活性。

2.3.3 安全性

相较于用于描述系统中长期运行时负荷保障能力的可靠性,安全性指系统在发生故障情况下,系统能保持稳定运行和正常供电的风险程度^[49]。异质能源耦合对于 IES 安全性的影响主要围绕安全分析^[50-52]、预防控制^[53-54]等方面展开。

在安全分析方面,主要包括静态安全评估^[50-51]与

准动态安全分析^[52]。文献[50]提出了一种基于多能流解耦算法的 $N-1$ 静态安全分析方法,分析了耦合元件控制模式对系统安全性的影响。文献[51]提出了基于电-气-热耦合的 IES 静态安全分析方法,通过扩展传统 $N-1$ 准则,分析了耦合设备退出运行对多能源网络潮流的影响。文献[52]考虑了电、气动态耦合过程中的时间尺度差异,分析了 IES 在事故发生时的准动态安全性。

在预防控制方面,主要针对耦合特征下故障筛选方法^[53]与多能耦合安全预警方法^[54]。文献[53]提出了一种预防-校正协同的混合控制方法,基于异质能源耦合元件筛选关键故障,缩减故障集搜索空间,减少了系统切负荷范围;文献[54]提出了一种基于安全边界和模糊理论的 IES 预警方法,使得 IES 能够根据异质能源实时耦合特征,快速调整运行状态,有效预防供能中断或过载等不安全状况。

综上,较单一能源系统,异质能源耦合的实时影响将大大改变 IES 的安全评估、故障调控方法与安全性机理。基于综合指标集、关键节点分析、协同控制方法可以提升元件突发故障下系统的应对能力。但多能耦合对系统安全性的影响机理,尤其是极端场景下基于耦合机理的系统安全运行提升方法仍有待深入研究,以应对复杂工况下多源能量失衡与拓扑重构问题^[55]。

2.3.4 韧性

韧性是指在系统面对极端天气、自然灾害或人为破坏等小概率、大风险情况时,能否迅速恢复可靠供应并保持安全稳定运行的能力^[56]。异质能源耦合对 IES 韧性中的灾前预防^[57-59]、灾中抵御^[60-61]和灾后恢复^[62-63]均有重要影响。

在灾前预防方面,文献[57]考虑极端天气引发的电-气系统耦合风险,通过预测灾害信息筛选高风险线路进行加固,并协同部署了多种能源设备,提升了系统应对灾害的预防能力;文献[58]通过融合趋势分析法和时序概率加权法,结合历史运行数据和未来变化趋势,提前识别 IES 中的潜在风险点,在灾害发生前采取针对性预防措施。文献[59]通过优化储电与储气资源的空间布局与容量配置,形成覆盖关键负荷节点的应急防御网络,显著增强系统灾害预防能力。

在灾中抵御方面,文献[60]考虑异质能源耦合,通过识别极端灾害关键耦合元件进行调控策略优化,提升了系统灾中抵御能力。文献[61]考虑电-气互补,通过虚拟电厂聚合储能与电动汽车资源,实现双向能量流动下的分散式韧性支撑。

在灾后恢复方面,文献[62]通过闭合联络开关,动态调整电力与热能供应策略,优化故障抢修顺序,可显著缩短故障恢复时间。文献[63]在灾后阶段依托电热储能单元的动态调度与双燃料设备的燃料切换,实现关键负荷的快速恢复。

IES韧性作为近年来的研究热点之一,通过分析异质能源耦合,不仅可以在灾前提升系统对极端事件的感知与预防能力,在灾中通过识别关键失效元件和整合分布式资源提升系统灾害抵御能力,而且在灾后依托多能互补和储能灵活调度加快系统修复与重构,从而实现系统在“预防-抵御-恢复”全过程的动态适应与自主调节,全面提升系统抗极端风险能力。

2.4 IES耦合性定性分析的局限性

尽管已有研究从多方面分析了异质能源耦合对IES规划运行的影响,但多基于定性讨论,存在以下局限性:

1) 模型指标方面。现有定性研究尚未形成统一的异质能源耦合量化指标体系,模型多局限于单一能源或静态参数的简单叠加,且物理意义模糊,无法对多异质能源全时空动态耦合过程进行全面刻画。

2) 影响机理方面。定性分析仅能模糊描述多能流耦合的宏观关联,无法在多维时间和广域空间层面解析耦合单元与异质能源网络的交互机制,异质能源耦合对IES的影响机理不明,缺乏科学规律总结。

3) 应用方法方面。现有方法难以充分发挥IES由耦合性带来的优势与潜力,表现为安全可靠、经济高效等运行矛盾由于异质能源耦合进一步加剧。此外,现有定性方法难以处理多维度非线性耦合约束,面向异质能源耦合的多维度协同优化仍为一大难点。

因此,针对异质能源耦合定性分析的局限性,需要构建多维度量化模型、深化耦合机理分析、创新协同优化方法,进而形成“量化评估—机理认知—协同应用”的全链条方法体系,驱动异质能源耦合特性由“发现”转化为“认知”和“应用”。

3 IES耦合性的量化研究

3.1 耦合性的量化指标

IES耦合研究中多集于定性分析,考虑到定性分析的局限性,部分学者从功率耦合因子和耦合度指标^[64]、能源结构配比^[3]与系统耦合度^[65]出发,初步量化分析了IES内部各异质能源系统之间的耦合关系。其中,文献[3]首次提出了能源结构配比及能源耦合

度的概念和模型,量化了IES异质能源的耦合关系;文献[64]将异质能源输出功率统一表征为多个分量之和,并引入功率耦合因子和耦合度指标来分析不同能源的耦合特性;文献[65]通过耦合度来表征IES能量流的耦合关系,分析了耦合对IES运行域的影响规律。

在IES耦合性量化研究中,通过能源结构配比、系统耦合度、功率耦合因子等指标,可以在一定程度上,实现IES耦合性的量化表征,进而从内部机理层面分析IES内部异质能源间的相互作用强度与协同效应。

3.2 耦合性的量化应用

IES通过耦合建立了电、热、天然气等异质能源互联关系。耦合量化应用的时间、空间与能量品位等维度展现出巨大应用前景,相关研究从多时间尺度^[66-67]、源网荷储^[68-69]、多能转化与梯级利用^[70-72]等角度出发,对上述耦合量化应用进行了初步讨论。

3.2.1 考虑多时间尺度的时间耦合

在IES时间耦合方面,相关研究主要围绕异质能源的多时间尺度动态特性差异^[64]与供需跨时间尺度耦合响应特性^[65]展开。

文献[66]针对IES在多时间尺度调度场景下难以准确把握碳交易成本问题,通过日前-日内-实时三级调度策略量化了碳交易成本,缓解了单一时间尺度下碳价误判导致的运行成本波动。文献[67]提出了一种IES多时间尺度低碳优化调度策略,该策略通过引入氢能耦合系统(包括电解槽、氢燃料电池等)和阶梯型碳交易机制,有效实现了供需两侧在跨时间尺度上的耦合响应。

综上,通过异质能源时间耦合特性量化应用,可以准确评估并提升IES在多时间尺度下多能协同效果,以适应IES面向高比例新能源电力系统降碳增效、源荷平衡的新形势发展需求。

3.2.2 面向源网荷储的空间耦合

在IES空间耦合量化方面,相关研究主要面向“源网荷储”各环节资源聚合^[68]和交互特性^[69]展开。

文献[68]针对IES中清洁能源消纳不足问题,通过虚拟电厂构建源网荷储量化交易模型,并采用两阶段优化实现了空间层面多能互补,显著提升系统清洁能源消纳能力;文献[69]针对海陆IES的能源供应波动问题,构建了涵盖源网荷储全环节的协同调控模型,并采用改进的状态空间动态规划算法,实现了多能耦合的供需平衡与波动抑制。

总体上,IES在空间分布上,呈现出源荷两侧“跨度小、耦合紧”与网侧“跨度宽、耦合松”的基本特征,

通过异质能源空间耦合特性量化应用,能充分挖掘 IES 源网荷储广域全环节互补互动潜力,从而实现新能源消纳空间延展、多能源灵活聚合等优势。

3.2.3 考虑多能转化及梯级利用的能量耦合

在 IES 能量耦合量化方面,文献[3]最早基于能源结构配比和能源耦合度对 IES 能量耦合进行量化描述,随后相关研究也从量化角度出发,逐渐聚集于多能转化^[70]和考虑品位差异的能量梯级利用^[71-72]。

文献[70]针对 IES 能量转换效率低及碳排放高等问题,提出了计及多能转换及光热电站的 IES 低碳优化方法,光热电站发挥热电联产功能并结合储热,提升了系统多能转化效率与低碳经济性;文献[71]针对天然气调压站压力能回收率低及低品位工业余热利用不足问题,提出了一种天然气压力能与低品位热能的耦合利用方法,实现了天然气压力能与工业余热资源的量化梯级利用;文献[72]针对沿海工业园区风电消纳困难问题,提出含高温蒸汽热泵的能量梯级利用方法,通过高温蒸汽热泵将富余风电转化为蒸汽供应,有效解耦了冷热电联产(combined cooling, heating and power, CCHP)机组“以热定电”的运行约束,显著提升了系统的风电消纳能力。

综上,通过异质能源能量耦合特性量化应用,有助于充分挖掘 IES 异质能源不同品位的能效价值,实现多能源灵活转化与梯级综合利用。

3.3 耦合性量化研究未来挑战

IES 耦合性量化研究已逐渐在其运行规划等方面受到关注,但相关研究仍处于起步阶段,如图 3 所

示,还存在以下挑战。

1)考虑时空-能量多能耦合特性的 IES 量化表征与建模。其核心难点在于多时间尺度动态异步性、空间异构性和能量品位差异性的联合表征。现有模型未能有效协调电能秒级波动与气/热系统小时级惯性的时间尺度匹配问题,导致状态预测存在偏差;同时,不同能源网络在源网荷储各环节的空间分布与拓扑结构上的显著差异性,进一步加剧了跨系统耦合关系的精准映射难度;此外,耦合过程中涉及的电能、化学能(燃气)、热能等不同能量形式及其品位(如热能的温度等级)的差异,可能会导致多能流的供需错配问题。

2)IES 多能耦合的复杂机理与运行规律分析。现有研究初步揭示了多能耦合对系统运行的影响,但对多维度耦合特性的运行机理和规律研究并不深入。例如,可靠性方面,多能耦合的级联效应使得系统间故障传播和协同恢复机理变得难以精准刻画;灵活性方面,源网荷储协同运行尚未形成理论框架,导致多能转换的响应迟滞特性与储能系统充放能速率不匹配以及跨时空尺度的调节裕度受限;安全性方面,多能流时空耦合对系统安全边界的影响机理尚未明晰,使得安全边界的构建仍停留在被动响应层面;韧性方面,灾前预防对多能流耦合的协同防御机理不明确,致使关键设备布局与跨能级资源分配存在优化盲区,灾时响应对极端工况下多能耦合设备运行边界和支撑能力缺乏定量表征,导致应急调度策略难以兼顾多能互补优势与连锁故障抑制需求等。

3)面向 IES 时空多能耦合特性的应用方法。虽

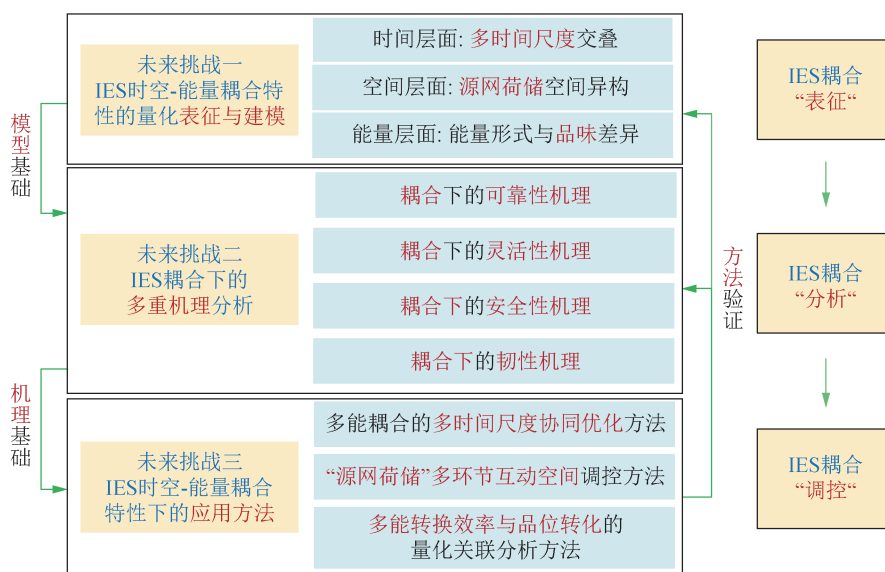


图3 耦合性量化研究的未来挑战

Fig. 3 Future challenges in quantitative research on coupling

然当前量化应用在多时间尺度、源网荷储广域互补及能量品位梯级利用等维度展开初步应用,但在多时间尺度方面,未能形成多时间尺度动态响应的协同优化方法,导致短时波动与长周期调度的匹配精度不足;在空间尺度方面,缺少源网荷储多环节互动的空间调控策略,制约了广域资源互补的灵活性与经济性提升;在能量梯级利用方面,缺乏对多能转换效率与品位转化的量化关联分析方法,使得梯级利用实际效益难以精准评估。如何将综合能源耦合性由理论分析,延拓至应用,从而从IES内在属性层面提高系统的运行效率与效果,仍然是当前IES研究的巨大挑战。

4 结束语

IES是促进可再生能源消纳、提升异质能源综合利用效率的重要物理系统。耦合作为IES基本物理属性,是IES实现多能灵活互补的基础与关键。针对IES耦合的研究普遍存在以定性分析为主,分析不全面、未量化、难以揭示机理等问题。

文章从定性分析和量化应用两方面,系统地阐释了IES耦合性的研究进展与技术挑战。首先,从源侧规划、网侧规划、源网协同规划、源荷协同规划等方面梳理了异质能源耦合对系统规划的影响;围绕可靠性、灵活性、安全性与韧性分析了异质能源耦合对系统运行的影响。其次,从能源结构配比、耦合度等量化指标方面,梳理了耦合量化研究进展,阐述了异质能源耦合在多时间尺度响应、空间资源互补及能量梯级利用中的应用潜力。最后,从IES时空建模、多能耦合机理与运行规律、耦合特性的应用方法三个维度出发,提出了未来耦合性量化研究所面临的挑战。

IES耦合性量化可以从耦合视角揭示IES多能互补与灵活高效的本质原因,并为新能源安全消纳提供全新技术方法,甚至为其他学科耦合性分析与应用研究提供参考,将是未来能源领域研究的热点之一。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions):

宋晨辉提出综合能源系统耦合性研究方向,提供研究内容、论文修改和项目资助;李顺宇、贺波、黄思卓参与文献调研与整理,设计论文框架并起草论文;肖峻、贾宏杰指导研究思路,参与论文审核。所

有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司发布“碳达峰碳中和”行动方案[N]. 国家电网报, 2021-03-02(1).
- [2] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [3] 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. Collaborative optimization of integrated energy considering system coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 38-45, 86.
- [4] 物理学名词审定委员会. 物理学名词[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [5] 吴飞. 什么是耦合[N]. 浙江日报, 2021-11-01(00006).
- [6] 员盼锋, 徐舒涵, 丹慧杰, 等. 基于火电厂源侧的综合能源系统集成及优化配置研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(4): 650-657.
YUN Panfeng, XU Shuhan, DAN Huijie, et al. Integration and optimal allocation of integrated energy system based on source side of thermal power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(4): 650-657.
- [7] 徐敏, 刘早富, 康哲. 计及光热电站和“源荷”双侧博弈的综合能源系统优化运行[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(9): 27-39.
XU Min, LIU Zaofu, KANG Zhe. Optimal operation of integrated energy system considering bilateral game between solar thermal power station and “source load”[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(9): 27-39.
- [8] 曹俊波, 晁岱旭, 刘爽, 等. 考虑电、气、热耦合性及随机性的IES-CCHP综合收益模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 16-22.
CAO Junbo, CHAO Daixu, LIU Shuang, et al. Comprehensive profit model of IES-CCHP considering the coupling and randomness of power, gas and heat[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(6): 16-22.
- [9] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 400-408.
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408.
- [10] 吕忠麟, 顾洁, 孟璐. 基于耦合特征与多任务学习的综合能源系统短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 58-66.
LYU Zhonglin, GU Jie, MENG Lu. Short-term load forecasting for integrated energy system based on coupling features and multi-task learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 58-66.

- [11] 史文瑜,郝晨晨,杨德昌,等. 基于时间序列大模型综合能源系统多元负荷预测[J/OL]. 电网技术, (2025-07-17) [2025-07-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673>.
SHI Wenyu, HAO Chenchen, YANG Dechang, et al. Integrated energy system load forecasting based on the time series large model [J/OL]. Power System Technology, (2025-07-17) [2025-07-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673>.
- [12] 沈运帷,徐凯,林顺富,等. 考虑广义储能参与的多园区综合能源系统低碳优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 41-51.
SHEN Yunwei, XU Kai, LIN Shunfu, et al. Low-carbon optimal operation strategy of multi-park integrated energy system considering generalized energy storage participation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 41-51.
- [13] 刁涵彬,李培强,王继飞,等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4532-4543.
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532-4543.
- [14] 张磊,吴红斌,何叶,等. 基于深度强化学习的氢能综合能源系统优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 132-141.
ZHANG Lei, WU Hongbin, HE Ye, et al. Optimal scheduling method for integrated energy systems with hydrogen based on deep reinforcement learning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 132-141.
- [15] 李珂,邵成成,王雅楠,等. 考虑电-气-交通耦合的城市综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2263-2273.
LI Ke, SHAO Chengcheng, WANG Yanan, et al. Optimal planning of urban integrated energy systems considering electricity-gas-transportation interactions [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2263-2273.
- [16] 刘自发,周翰泽. 计及多主体能源交易的综合能源系统规划方法研究[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3524-3536.
LIU Zifa, ZHOU Hanzhe. Research on comprehensive energy system planning method considering multi agent energy transaction [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3524-3536.
- [17] 白宏坤,尹硕,李虎军,等. 计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 11-19.
BAI Hongkun, YIN Shuo, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 11-19.
- [18] 杨志豪,苗世洪,涂青宇,等. 考虑多品位能源互补的综合能源系统分级规划策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1457-1467.
YANG Zhihao, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. Hierarchical planning strategy for integrated energy system considering the complementation of multi-grade energy [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1457-1467.
- [19] 陆海,张浩,陈晓云,等. 基于双层博弈的多能源网络协同规划方法[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 93-99.
LU Hai, ZHANG Hao, CHEN Xiaoyun, et al. Collaborative planning method for multi-energy networks based on double-layer game theory [J]. Electric Power, 2025, 58(1): 93-99.
- [20] 米阳,孔令飞,王育飞,等. 面向配电网的多综合能源系统容量规划和能源交易优化[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(9): 38-45, 87.
MI Yang, KONG Lingfei, WANG Yufei, et al. Capacity planning and energy trading optimization of multiple integrated energy systems oriented to distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(9): 38-45, 87.
- [21] 申鸿帅,吕家君,李更丰,等. 考虑热储灵活配置与热网水力热力特性的电热综合能源系统优化规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 214-222, 254.
SHEN Hongshuai, LÜ Jiajun, LI Gengfeng, et al. Optimal planning of integrated electricity and heating system considering flexible configuration of thermal storage and hydraulic-thermal characteristics of thermal network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 214-222, 254.
- [22] 黄伟,刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 20-28.
HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station-network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 20-28.
- [23] 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.
- [24] YAN R J, WANG J J, ZHU S T, et al. Novel planning methodology for energy stations and networks in regional integrated energy systems [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112441.
- [25] 陈湘元,吴公平,龙卓,等. 考虑源荷不确定性及用户侧需求响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 217-227.
CHEN Xiangyuan, WU Gongping, LONG Zhuo, et al. Multi-time scale optimal dispatch of integrated energy systems considering source-load uncertainty and user-side demand response [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 217-227.
- [26] 江训谱,包哲静,于淼,等. 考虑源荷不确定性的园区综合能源系统鲁棒多阶段规划[J]. 电力建设, 2025, 46(4): 99-112.
JIANG Xunpu, BAO Zhejing, YU Miao, et al. Robust multi-stage planning of park-level integrated energy system considering source-load uncertainties [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(4): 99-112.
- [27] SU Z E, ZHENG G Q, WANG G D, et al. Multi-objective optimal planning study of integrated regional energy system considering source-load forecasting uncertainty [J]. Energy, 2025, 319: 134861.
- [28] 黄元平,苏睿,何国彬,等. 考虑电-氢混合储能的热-电综合能源系统最优规划[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 152-162.
HUANG Yuanping, SU Rui, HE Guobin, et al. Optimal planning

- of electric-heat integrated energy systems considering electric-hydrogen hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 152-162.
- [29] 陈乾, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及热网蓄热特性的多区域综合能源系统多元储能规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5890-5903.
- CHEN Qian, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Multiple energy storage planning of multi-district integrated energy system considering heat storage characteristics of heat network [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5890-5903.
- [30] 方乐, 刘成奎, 陈晓骏, 等. 含光热复合压缩空气储能的分布式综合能源系统容量规划方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5933-5943.
- FANG Le, LIU Chengkui, CHEN Xiaotao, et al. Capacity planning method of distributed integrated energy system with solar thermal composite compressed air energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5933-5943.
- [31] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3829.
- SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3829.
- [32] 包铭磊, 杨阳, 丁一, 等. 考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 32-40.
- BAO Minglei, YANG Yang, DING Yi, et al. Assessment of cascading failures in power system considering effects of natural gas system [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 32-40.
- [33] 张安安, 李静, 林冬, 等. 考虑天然气管网极限风险影响的电-气耦合系统连锁故障模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7275-7285.
- ZHANG An'an, LI Jing, LIN Dong, et al. A cascading failure model of electricity-gas coupling system considering the influence of limit risk of natural gas pipeline network [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7275-7285.
- [34] 邹嘉嘉, 隋宇, 张小辉. 综合能源系统级联失效及故障连锁反应分析方法[J]. 电力建设, 2019, 40(8): 84-92.
- HUAN Jiajia, SUI Yu, ZHANG Xiaohui. Analysis method for cascade failure and fault chain reaction of integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 84-92.
- [35] 杨丽君, 王晨, 赵优, 等. 基于双层优化模型的电-气耦合综合能源故障恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4264-4273.
- YANG Lijun, WANG Chen, ZHAO You, et al. Electric-gas coupled integrated energy fault recovery strategy based on bi-level optimization model [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4264-4273.
- [36] 贾伯岩, 李丹, 李雄宇, 等. 电-气综合能源系统多故障两阶段恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 113-123.
- JIA Boyan, LI Dan, LI Xiongyu, et al. Two-stage restoration strategy for multi fault of an electric gas integrated energy system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 113-123.
- [37] 李尚宇, 秦昱, 田巍巍, 等. 计及电-气-热综合能源的有源配电网故障恢复[J]. 供用电, 2024, 41(3): 51-60.
- LI Shangyu, QIN Yu, TIAN Weiwei, et al. Active distribution network service restoration with integrated electricity-gas-heat energy [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 51-60.
- [38] 黄悦华, 刘兴韬, 张磊, 等. 基于C藤Copula及条件风险价值的综合能源系统灵活爬坡优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9411-9423.
- HUANG Yuehua, LIU Xingtiao, ZHANG Lei, et al. Flexible ramping optimal scheduling of integrated energy system based on C-vine copula and conditional value at risk [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9411-9423.
- [39] 郑丁园, 崔双喜, 樊小朝, 等. 计及风电不确定性的综合能源系统多目标分布鲁棒优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 1-8, 18.
- ZHENG Dingyuan, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Multi-objective distributionally robust optimization scheduling for integrated energy system considering wind power uncertainty [J]. Smart Power, 2024, 52(8): 1-8, 18.
- [40] 易纯, 肖辉, 吴公平, 等. 含电、冷、热、气的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 215-221.
- YI Chun, XIAO Hui, WU Gongping, et al. Optimal operation of regional integrated energy system including electricity, cooling, heating and gas [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 215-221.
- [41] 吴嘉豪, 曾成碧, 苗虹. 计及子区域间能量交换的多区域综合能源系统协调经济调度[J]. 电力建设, 2019, 40(11): 39-47.
- WU Jiahao, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Coordinated economic scheduling for multi-regional integrated energy system considering energy exchange between sub-regions [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11): 39-47.
- [42] 宋晓通, 孙艺, 刘欣博, 等. 计及能量互济的多区域综合能源系统多目标双层优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1426-1435.
- SONG Xiaotong, SUN Yi, LIU Xinbo, et al. Multi-objective bi-level programming strategy of integrated energy system considering regional interconnection [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1426-1435.
- [43] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.
- YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [44] 刘钊, 郭子豪, 申安, 等. 考虑冷热电灵活性负荷需求响应的区域综合能源系统运行优化[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 153-163.
- LIU Zhao, GUO Zihao, SHEN An, et al. Optimization of regional integrated energy system operation considering flexible load demand response for cooling, heating and power [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(6): 153-163.
- [45] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573-589.
- ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response

- characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (2): 573-589.
- [46] 张晓, 陈胜, 卫志农, 等. 计及广义储能的园区综合能源系统低碳规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 40-48.
ZHANG Xiao, CHEN Sheng, WEI Zhinong, et al. Low-carbon planning of park-level integrated energy system considering generalized energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 40-48.
- [47] 高明非, 韩中合, 赵斌, 等. 区域综合能源系统多类型储能协同优化与运行策略[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 205-216.
GAO Mingfei, HAN Zhonghe, ZHAO Bin, et al. Coordinated optimization and operational strategy for multi-type energy storage in regional integrated energy systems[J]. Electric Power, 2024, 57 (9): 205-216.
- [48] CHEN H Y, YANG B, WANG Z G, et al. Collaborative optimization of regional integrated energy system with multiple energy storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 276: 126969.
- [49] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [50] 陈厚合, 邵俊岩, 姜涛, 等. 基于多能流解耦算法的综合能源系统 $N-1$ 静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 20-27, 131.
CHEN Houhe, SHAO Junyan, JIANG Tao, et al. Static $N-1$ security analysis for integrated energy system based on decoupled multi-energy flow calculation method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 20-27, 131.
- [51] PIAO Z G, LI B, HU C B, et al. Research on the safe operation method of integrated energy system based on static safety analysis [C]//2024 IEEE 2nd International Conference on Power Science and Technology (ICPST). IEEE, 2024: 1752-1757.
- [52] 于丰硕, 孙宏斌, 乔铮, 等. 电-气耦合综合能源系统准动态安全评估[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3681-3692.
YU Fengshuo, SUN Hongbin, QIAO Zheng, et al. Quasi-dynamic security assessment of integrated electricity and gas system [J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3681-3692.
- [53] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 23-33.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening [J]. Power System Technology, 2019, 43 (1): 23-33.
- [54] XIAO J, SUN G, SONG C H, et al. Security monitoring, early warning and alarm Method based on security boundary for regional integrated energy system [J]. Applied Energy, 2025, 379: 124709.
- [55] 张冠宇, 付炜, 陈晨, 等. 面向电-气-热综合能源系统的恢复力研究现状与展望[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 69-77.
ZHANG Guanyu, FU Wei, CHEN Chen, et al. Status and prospects of resilience research for electric-gas-thermal integrated energy system[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 69-77.
- [56] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [57] 何雨霁, 王伟, 熊小伏, 等. 提升电-气互联能源系统弹性的应急资源灾前协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (14): 21-32.
HE Yufei, WANG Wei, XIONG Xiaofu, et al. Pre-disaster collaborative dispatch strategy of emergency resources for resilience enhancement of electricity-gas interconnected energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 21-32.
- [58] 许校晨, 崔双喜, 邓顺黎. 基于时间序列分析与预测的电-气互联综合能源系统运行风险评估[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 40-47.
XU Anchen, CUI Shuangxi, DENG Shunli. Operational risk assessment of electricity-gas interconnected integrated energy system based on time series analysis and prediction [J]. Smart Power, 2024, 52(11): 40-47.
- [59] 李欣, 王若宇, 赵乔, 等. 极端高温天气下电-气综合能源系统两阶段预防-恢复策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2025 (2025-08-01) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001688>.
LI Xin, WANG Ruoyu, ZHAO Qiao, et al. Two stage prevention recovery strategy for electricity gas integrated energy system under extreme high temperature weather [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025 (2025-08-01) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001688>.
- [60] WU J Q, GU J, LIU S Q, et al. Strategies for improving resilience of regional integrated energy systems in the prevention - resistance phase of integration [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8: 29.
- [61] LIU H C, WANG C, JU P, et al. A bi-level coordinated dispatch strategy for enhancing resilience of electricity-gas system considering virtual power plants [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147: 108787.
- [62] 唐坤霆, 周永智, 李宝聚, 等. 考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 129-137.
TANG Kuntong, ZHOU Yongzhi, LI Baoju, et al. Resilience enhancement of integrated energy systems under extreme ice and snow disasters considering thermal inertia [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 129-137.
- [63] AMIRIOUN M H, AMINIFAR F, SHAHIDEHPOUR M. Resilience-promoting proactive scheduling against hurricanes in multiple energy carrier microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2160-2168.
- [64] 叶林, 屈晓旭, 马明顺, 等. 含风-光-水的多能源系统的同质化耦合模型[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3201-3210.
YE Lin, QU Xiaoxu, MA Mingshun, et al. Multi-energy system homogeneous coupling model considering wind-photovoltaic-hydro power generations [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3201-3210.
- [65] 肖峻, 李宗哲, 宋晨辉, 等. 综合能源系统能源耦合度及其对运行域的影响[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 74-83.

- XIAO Jun, LI Zongzhe, SONG Chenhui, et al. Energy coupling degree of integrated energy system and its influence on operation region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 74-83.
- [66] 邹宇航, 曾艾东, 郝思鹏, 等. 阶梯式碳交易机制下综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2185-2198.
- ZOU Yuhang, ZENG Aidong, HAO Sipeng, et al. Multi-time-scale optimal dispatch of integrated energy systems under stepped carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2185-2198.
- [67] 赵北涛, 刘光宇, 韩东升. 考虑氢能耦合及阶梯碳交易的综合能源系统多时间尺度低碳优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 35-46.
- ZHAO Beitao, LIU Guangyu, HAN Dongsheng. Multi-time-scale low-carbon optimal scheduling of integrated energy systems considering hydrogen energy coupling and ladder carbon trading[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 35-46.
- [68] 杨冬梅, 王俊, 杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 28-39.
- YANG Dongmei, WANG Jun, DU Wei. Optimal dispatching for regional integrated electric and heating systems considering aggregation and transaction of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 28-39.
- [69] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18-26.
- SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18-26.
- [70] 董海鹰, 负韞韵, 马志程, 等. 计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3689-3700.
- DONG Haiying, YUN Yunyun, MA Zhicheng, et al. Low-carbon optimal operation of integrated energy system considering multi-energy conversion and concentrating solar power plant participation[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3689-3700.
- [71] WEI Y, DU L, LI J, et al. Thermodynamic analysis of a new natural gas pressure energy grade heat sources [C]//2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE). Chengdu, China, 2023: 957-962.
- [72] 唐成虹, 王靖韬, 曾博, 等. 计及含蒸汽热泵工业园区能量品位转换的综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2): 191-199.
- TANG Chenghong, WANG Jingtao, ZENG Bo, et al. Optimal dispatch for integrated energy considering energy grade conversion in industrial park with steam heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 191-199.
-
- 收稿日期: 2025-08-06 修回日期: 2025-09-05
- 作者简介:
- 宋晨辉(1993),男,博士,讲师,主要研究方向为综合能源系统安全分析与规划运行等,E-mail:songchenhui66399@163.com;
- 李顺宇(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行,E-mail:19513316940@163.com;
- 肖峻(1971),男,博士,教授,通信作者,主要研究方向为配电系统/综合能源系统的安全分析与规划,E-mail:xiaojun@tju.edu.cn;
- 贺波(2001),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行,E-mail:hebo152822@163.com;
- 黄思卓(2000),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行,E-mail:16673212095@163.com;
- 贾宏杰(1973),男,博士,教授,研究方向为大电网稳定性分析、电网规划、新能源集成、综合能源系统分析等,E-mail:hjjia@tju.edu.cn。
- (编辑 张小飞)