

“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势

李明佳^{1*}, 郭嘉琪², 马腾², 严俊杰², 陶文铨²

1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 西安交通大学, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: mjli@bit.edu.cn

2022-10-27 收稿, 2023-02-05 修回, 2023-02-06 接受, 2023-02-07 网络版发表

国家重点研发计划(2021YFB2400701)和国家自然科学基金(52293413)资助

摘要 发展新一代“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统是能源行业高质量发展和提高可再生能源消纳水平的必然需求, 加快其发展对构建多能互补、灵活、智慧的能源系统具有重要意义. 目前, 我国能源系统转型与升级进程加快, 能源系统多能流交织、多品位分布、多时空尺度等特征愈发突出, 给能源的高效利用带来新的理论和技术挑战. 为实现异质能流系统的协同发展, 还需要突破单一能流系统能量转换分析的局限, 从能质、能量品位的角度, 解释不同能源系统间的耦合逻辑并指导能源结构优化和能量管控, 解决异质能流多尺度协同响应难等问题. 因此, 本文以“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的构成和特征为切入, 明晰了异质能流系统基础架构及各层间的关系, 阐明了按质用能思想和能量品位相匹配对构建高效能量梯级利用系统、实现能量有序按需转化的重要性, 总结了异质能流系统动态响应特性与协同调控、结构优化和能量管控等研究现状和挑战, 并对未来能源系统的发展提出了一些建议.

关键词 异质能流, 源-网-荷-储, 动态响应, 能量管理, 数字孪生

随着经济快速发展和人类生产、生活需求的不断提高, 传统能源枯竭和生态环境日益恶化已成为全世界共同面临并难以有效解决的危机. 鉴于此, 提高传统能源利用效率、提升清洁能源利用占比成为各国能源发展共识. 我国是能源生产和消费大国, 解决能源问题的可行办法是加快推动能源结构调整, 以供给侧结构性改革为主线, 构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系. “30-60”碳达峰碳中和(“双碳”)目标和《“十四五”现代能源体系规划》的提出表明, 发展清洁、高效的新一代综合能源供能系统是经济与环境可持续发展的一个重要课题, 也是现阶段面临的一项重要而紧迫的任务^[1].

在“双碳”目标下, 我国的能源利用表现出清洁化、规模化、综合化、智能化的发展趋势, 着力加强化石能源清洁高效利用的同时, 大力发展新能源技术, 力争构建灵活、智慧、多能互补的新一代综合能源供能系统. 相较于相对独立的传统电力系统以及分散供能、运维成本高的分布式能源系统^[2], 新一代综合能源供能系统涵盖了冷、热、电、气等不同形式能源的获取、耦合、转化、输运等过程, 通过源侧、网侧和用户侧能的梯级利用, 突破了各能源子系统独立运行的局限, 为不同能源形式之间的协同优化与匹配提供了解决途径, 在满足多元化用能需求的同时, 有效提高了能源利用率.

引用格式: 李明佳, 郭嘉琪, 马腾, 等. “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势. 科学通报, 2023, 68: 1941–1958

Li M J, Guo J Q, Ma T, et al. Research status and development trend of generation-grid-load-storage type integrated systems with heterogeneous energy flows (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 1941–1958, doi: [10.1360/TB-2022-1088](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1088)

随着多种品位、多种形态的能量涌入供能网络,对新一代综合能源供能系统的运行稳定性提出了更高的挑战,具体表现为:一方面,在大规模新能源接入的综合能源供能系统中,非同步发电电源增加,需要依靠更可靠的控制器和控制算法提高电网的同步稳定性;另一方面,新能源发电具有间歇性且电压调节能力有限,影响电网的电压稳定性;再者,高比例电力电子设备惯性响应能力小,导致振荡频率提高,电网频率稳定性受到挑战。为确保可再生能源的顺利消纳和电网安全,需要增强不同能源间的互补性和“源-网-荷-储”各侧的互动性,从而提高系统动态运行的稳定性。因此,“源-网-荷-储”式复合供能系统的协同发展是建设新一代综合能源供能系统的客观需要与内在要求^[3]。

“源-网-荷-储”式复合供能系统的电源侧通常由清洁可再生能源发电系统、化石能源发电系统构成。从能量角度来看,其涉及风能、太阳能、热能、机械能、电能及化学能等多种能量形式;从热力学角度来看,这些能量具有不同的品位。电能、机械能等品位高,其次是化学能、光能,而热能的品位较低。热能根据不同的温度水平又分为高品位热能和低品位热能。这些具有不同势能、不同品位的能量流耦合,形成了“异质能流”,异质能流间的互补利用是提高能源利用率的关键。考虑“源-荷”侧风能、太阳能等清洁能源的间歇性和用户负荷变化的随机性,需要进一步配合以先进储能技术实现电能或热能的按需有序充放,提高系统消纳新能源的能力。同时,大比例新能源的接入使得系统处于较剧烈的动态运行中,电网侧电力响应迅速且高频,因此需要对各能源系统出力与实时用户负荷间的响应进行不同时间和空间尺度的匹配,提高“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统(以下简称异质能流系统)各单元间的互动能力,实现深度协同。

目前,围绕异质能流系统的研究多集中于系统能量转化特性的探索。从工程热物理角度,依据热力学定律探索能量转化机理,揭示关键参数变化对系统效率的影响规律,获得发电系统效率最优时的运行工况条件^[4]。为进一步描述系统实际运行过程中的变工况性能,以热力学和传热学理论为指导,发展涡轮机械、换热器等关键设备的变工况非稳态传热-传质模型,开展系统实时动态响应特性研究^[5,6]。相关研究多侧重于物理层的动力系统分析,与信息层的微网负荷响应及调度指令的研究相对独立。目前,基于按质用能的思想揭示能流耦合与协同交互的研究较缺乏。

当考虑异质能流系统在多场景需求的能源网络中应用时,通常对涡轮机械设备、换热设备等以简化的黑箱模型替代,而对其内部能量高效转换与传递机理的深入分析和探讨不够充分。从电气工程角度,研究更多关注电网、热网、水网和气网等的传输特性,通过关键节点的功率平衡实现参数传递和运行约束,对能源间转化与耦合逻辑关系的分析研究较少开展。近年,随着工程热物理与电气工程学的交叉深入,有研究尝试应用热力学第二定律解释能源网络中能流的品位差异性,研究多集中于热网,如何以此指导系统配置优化尚需探索。此外,提出的异质能流系统大多具有多网络、多节点的特征,随着系统复杂度的增加和非线性特征的突出,多时间尺度、多空间尺度的协同运行难度增大,动态耦合方法及协同响应策略也有待更进一步发展。

综上,异质能流系统具有多能流交织、多品位分布、多时空尺度等本质特征,实现异质能流系统的协同发展,还需突破单一能流系统能量转换分析的局限,从能质、能量品位的角度,解释不同能源系统间的耦合逻辑并指导能源结构优化和能量管控,解决异质能流多尺度协同响应难等问题。因此,为明确异质能流系统能量高效转换与利用的关键途径,本文首先梳理了“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的构成,凝练总结了其主要特征,明晰了异质能流系统基础架构及各层间的关系;其次,阐明了按质用能思想和能势理论对构建高效能量梯级利用系统、实现能量有序按需转化的重要性;再次,总结了异质能流系统动态响应特性与协同调控、结构优化和能量管控等研究现状和挑战;最后,从理论、方法和技术层面提出了高效、智慧能源系统的发展方向。

1 “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的内涵

明确“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的构成和特征,对揭示异质能流系统与微网的耦合机理及明晰系统目前还需要解决的关键科学问题具有重要意义。

1.1 系统的构成

“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的架构包括物理层、交互层和信息层(图1),各层之间需要很好的温度对口、能量品位相匹配、能流协同,才能实现

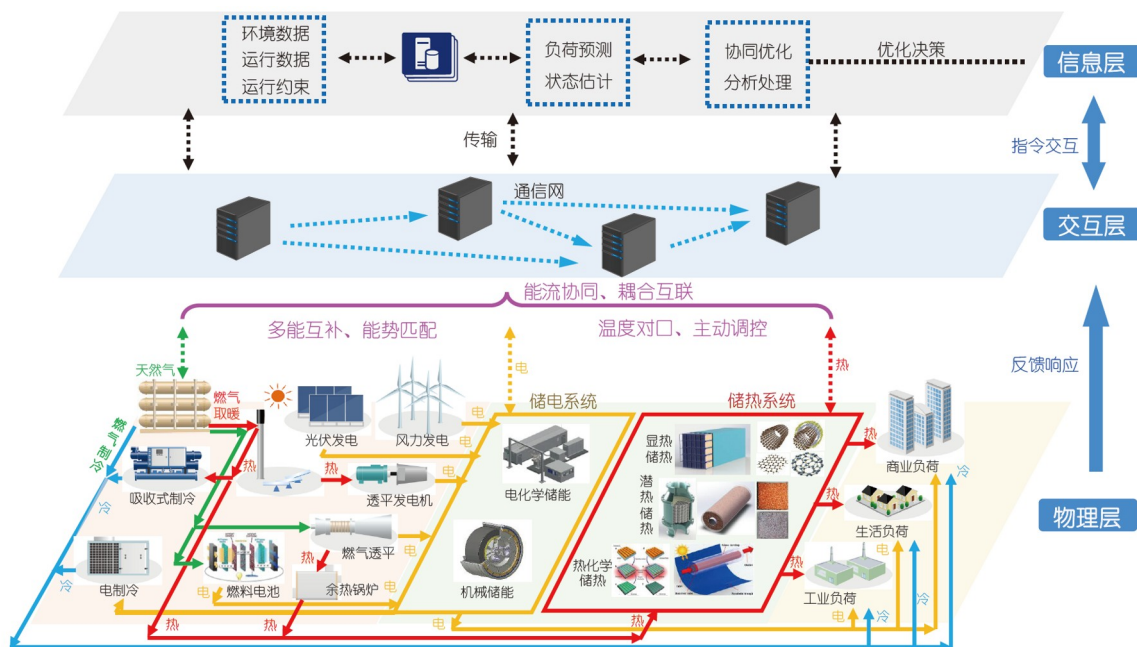


图1 (网络版彩色)“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统结构

Figure 1 (Color online) Structure of the generation-grid-load-storage type integrated system with heterogeneous energy flows

相互间的深度融合、能源互联和信息共享。

物理层为“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的物理主体，具备不同场景下能源生产、传输、供应等功能^[7,8]。随着高比例可再生清洁能源和大规模电力电子设备的接入，与传统分布式能源系统相比，“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统有3点不同。第一，“源”侧更加强调多能互补。分布式能源是建立在用户侧的能源综合利用系统，通常以太阳能、风能、氢能等清洁能源为主体，依据热力学第一定律和热力学第二定律，注重能量的梯级、高效利用。在此基础上，异质能流系统更加突出多种能源在时空层面的互补特性。例如，太阳能昼强夜弱，而潮汐能昼弱夜强，这是时间层面的互补；太阳能在西北沙漠地区较为丰富，而风能可在山区或东南沿海较为丰富，这是空间层面的互补。第二，异质能流的差异性凸显。分布式能源系统一般以电能、热能的综合利用居多，涉及的能流形式通常为2~3种。而异质能流系统远多于此，其不仅包含太阳能、风能、化学能、机械能、电能、热能等主流能源形式，还涉及电流、热流、物质流、信息流等多种能流形式，虽然使得系统更加复杂，但同时赋予了系统更多的功能与灵活性，可根据需求匹配合适的运行模式。第三，储能的参与拓展了系统的时空自由度。储能的规模化应用突破了传统能源系统“实时供需平衡”的概念，储

能可以在时间尺度进行削峰填谷，在空间尺度传递运输，较大提高了系统的灵活性。同时，储能既可作为“源”进行供能，亦可作为“荷”消纳能源，进一步丰富了供给侧与需求侧的交互模式。通过“源-网-荷-储”的相互协作，可实现异质能流系统的稳定、高效运行。

交互层是连接物理层和信息层的桥梁，它可以实现客观物理规律的抽象化与数字化，并通过能量管理系统控制与调度，承担着物理层海量运行数据的上传与信息层指令下达的作用。交互性具体表现在两个方面：(1) 能源系统间的交互，通过能量管理实现产能、用能和储能间的协调与能源系统的效能最优；(2) 依托先进数字化信息与通信技术实现能源技术与通信技术的互动、互构和互嵌，二者相辅相成。能源技术支撑通信技术的探索应用，通信技术支撑能源技术的转型与升级，主要的技术途径包括5G技术^[9]、数字孪生技术(digital twin technology)^[10]等。在众多数字化技术中，数字孪生互操作性、可扩展性、实时性、保真性和闭环性等特点较突出^[11]，通过对历史数据、实时数据和算法模型的分析，可以实现能源系统全生命周期内模拟、验证、预测和控制，在“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的交互层中起到了重要作用。

信息层是“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的顶层架构，集合了海量数据、算法、指令等信息，并

对能源系统的运行状态进行监控、协调与控制,具备从态势觉察、态势理解到态势预测的全面态势感知能力^[12].信息层的构建依托传感技术、数据技术和控制技术的融合,依据设定的优化目标函数调节物理层内各节点的功率、流量关系,实现系统能量流的重新分布.信息层的高效性对提升复杂系统的驾驭能力,提高“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的灵活性、安全性和稳定性具有重要意义.

由此可见,物理层是“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的基础.一方面,客观物理特性约束了异质能流系统的瞬态运行工况、参数范围、动态响应等;另一方面,物理层对交互层的反馈时间和响应速度决定了交互层与信息层对指令、数据等的处理速度、精度上限.因此,物理层的本征特性揭示及协同优化匹配对异质能流复合供能系统的高效、稳定运行至关重要.

1.2 系统的主要特征

基于上述系统构成,“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的运行特征可归纳为“三多”,即多能、多尺度和多变三方面.

多能不仅表现为能量形式、能量类别的多样,也表现为能量品位的多样.从热力学第一定律能量角度来看,异质能流系统包含太阳能、风能、化学能、机械能、电能、热能等主流能源形式,多能之间的耦合与转化应遵循能量守恒定律.从热力学第二定律角度来看,这些能量具有不同品位,电能、机械能品位高,化学能次之,热能的品位较低.同时,热能根据不同的

温度水平又分为高品位热能和低品位热能,“温度对口、能势匹配”是异质能流高效协同的基本原则.

多尺度主要表现为多时间尺度与多空间尺度,如图2所示.在多时间尺度方面,由于可再生清洁能源如风能、太阳能的间接性和用户负荷变化的随机性,异质能流系统一直处于较剧烈的动态运行工况中,电力系统的响应速率通常为毫秒级^[13],而热力系统的响应速率通常为千秒级^[14].此外,还涉及能源利用在小时、日、月等长时间尺度的运行与规划^[15].不同的时间常数使得异质能流的跨时间尺度协同响应难,对异质能流系统的动态稳定运行造成挑战,因此需要基于物理层特征揭示各能源子系统对实时用户负荷的动态响应特性,以期实现多时间尺度下异质能流的协同控制与实时匹配.在多空间尺度方面,异质能流系统空间跨度大,包含源侧、网侧、荷侧等多区域.源侧主要由各类能源转换系统构成,包括元件、设备、热力系统等,通过“多能互补、梯级利用”实现能量的高效生产与转化;网侧包括电网、热网、水网、天然气网等,通过这些异质能流网络实现能量的大容量、远距离运输;荷侧主要为需求供应侧,通过需求响应、负荷预测等核心技术满足电、冷、热、水等多区域、多场景的供应^[16].由于能源网络间的耦合设备广泛存在,各区域能源系统间存在深度融合的关系,因此需要明晰系统的实时全工况动态响应特性,挖掘兼顾考虑时间尺度与空间尺度的协同调控机理.

多变主要表现为功率的强波动性、物理特性的差异性及相关运行参数的多元性.随着新能源的大规模

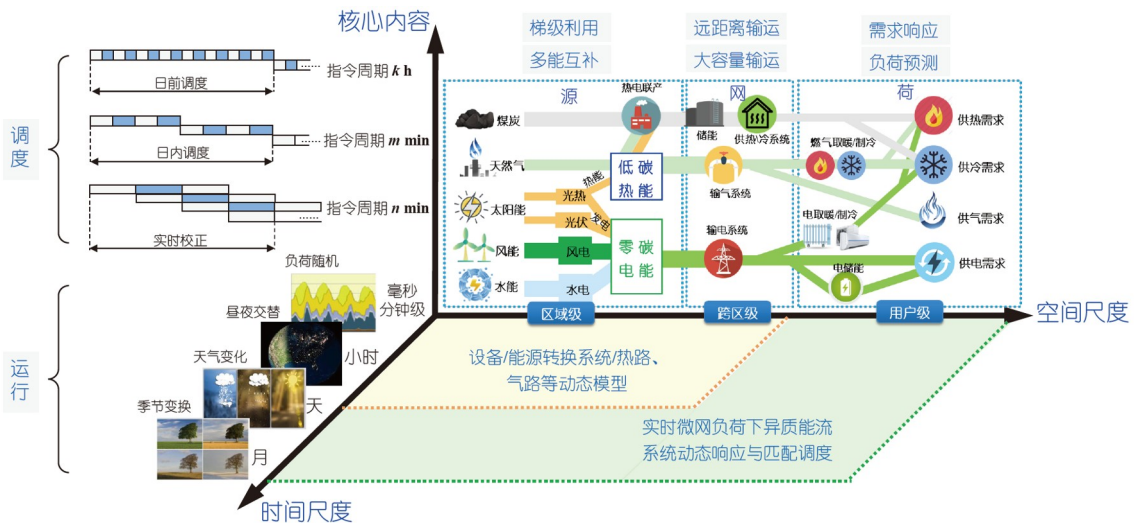


图2 (网络版彩色)异质能流系统的时间和空间尺度示意图
Figure 2 (Color online) Time scales and space scales of the heterogeneous energy flow system

并网, 异质能流系统呈现显著的“三双”特征: 双侧随机(供应侧和需求侧)、双峰(夏、冬季负荷高峰)、双高(高比例可再生能源和电力电子设备), 表现出较强烈的功率波动特性, 给系统平衡与稳定带来挑战. 为平抑波动和保障系统安全, 亟需大规模、多样化储能技术的参与^[17]. 目前, 在高比例可再生能源大量接入的条件下, 不同的储能类型具有不同的物理特性及时间尺度, 规模化储能配置和调度运行规范、储能系统精确入网技术及可靠性验证仍需持续突破.

2 “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的重要研究方向

根据多能、多尺度和多变的主要特点所决定的多能耦合、多维度协同调控、优化匹配与调度等技术挑战, 为构建高效、清洁、稳定的新一代能源系统, 目前主要围绕以下3个方面开展研究.

2.1 异质能流系统能量高效转换与耦合机理

如前所述, 异质能流系统涉及化学能、太阳能、热能、机械能、电能等多种能量形式的传递、转换及耦合, 同时这些能量流又具有不同的品位. 因此, 能量转化既包含能量数量的变化, 又包含能量品位的变化. 能量数量变化的描述以热力学定律为理论指导^[18]. 近些年, 能量品位表征的研究受到了关注^[19-24], 常用的表征方式包括物质品位(物质的焓与物质的焓的比值)及过程品位(过程初始状态与终了状态的焓变与焓变的比值). 文献^[19,23,24]提出并发展了燃料化学能、聚光太阳能的能质能势表征方法, 用于反映不同能量转化过程的方向与速率, 揭示能源转化的不可逆损失机理, 形成能质能势匹配机制, 指导能源的有序转化.

总体来看, 现有研究多集中于各单元系统的简单组合, 如何合理分配不同数量、不同品位能量在异质能流系统的分布, 进而提高系统能源梯级利用水平和指导能量高效转化与耦合方式, 仍是“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统面临的主要挑战. “源”侧物理层能源系统中清洁能源与化石能源的协同转化及源头互补、“储”侧不同储能类型系统的协同及增质提效是目前重点攻克的问题之一.

2.2 实时微网负荷下异质能流系统多尺度动态响应与协同特性

清洁能源的间歇性和波动性、微网负荷的随机性

使异质能流系统一直处于动态变工况运行, 如何使电力瞬时波动与热力延迟响应能够最低迟滞地影响系统的动态响应与协同特性, 保证系统相对稳定、高效的出力, 是异质能流系统的另一个重要的研究方向.

根据异质能流系统的构成和特征可知, 动态特性主要体现为物理层系统的变工况运行特性和不同能源的时空尺度特性. 变工况运行特性的分析主要从能源设备的变工况线性动态特性着手, 进一步发展为不同能源系统的动态运行特性以及负荷反馈下的响应特性分析, 异质能流系统与实时微网负荷的参数耦合、协同匹配机理仍不清晰, 全工况动态条件下的能量高效转换与协同方法有待完善. 针对不同能流的时空尺度特性, 多以单一能源网络进行简单组合后的动态分析为主, 需要深入考虑不同能流互补特性和协同耦合作用下的动态特性分析. 此外, 冷、热、电用能负荷的波动特性及其对系统运行特性的影响仍需深入揭示.

2.3 异质能流系统优化设计与能量管控

不同负荷特性和不同应用场景下, 异质能流系统的设备选型和容量配置结果有较大差异, 相应的系统优化设计和能量管控方法也大相径庭. 因此, 需要构建以高效性、经济性、灵活性、安全性和稳定性为目标的系统综合性能评价准则, 进而提出典型应用场景下系统优化匹配与能量调度和管控方法. 异质能流系统优化设计的主要研究内容包括系统设备选型、容量匹配、负荷优化等, 通过发展以环境影响、成本、供电可靠性等指标为优化向量的优化方法, 结合工业园区、岛屿等应用场景用能需求, 提出能源系统的控制策略, 保障系统运行的高效性.

“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的能量流和信息流交织, 系统的优化运行仅依靠物理层的能量管理远远不能满足新型能源系统的建设需求, 亟须发展协同考虑冷、热、电、气等多能流综合能量管控体系. 一方面, 设备、热力系统等物理层的本征特性是异质能流系统的运行基础, 在动态运行条件下, 异质能流系统的响应反馈及调控方法需要遵循热力学第一定律和热力学第二定律; 另一方面, 系统复杂度、信息扰动等因素不断增多. 因此, 亟须揭示多工况、多场景下异质能流高效协同机理, 掌握物理-信息深度融合特性, 提出物理-信息耦合系统的动力学模型与评估方法, 形成“白箱”化能量管控系统, 以期通过信息流引导能量流实现调控, 充分发挥不同能流间的互补作用.

3 异质能流系统的主要研究进展

本节围绕上述异质能流系统的3个重要研究方向, 阐述目前国内外的研究进展.

3.1 异质能流系统的能量高效转换与耦合机理

考虑到“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统相比于传统能源系统的互联互通性更强、能量流种类多样, 因此, 首先以异质能流系统建模方法为突破, 明晰系统能量耦合与转换的理论基础; 进一步, 针对“双碳”目标下对可再生清洁能源需求日益增加的现状, 重点关注新能源光-热、热-电转换环节的提效方法; 最后, 阐述异质能流系统能量高效转换与耦合研究的重点.

3.1.1 “源-网-荷-储”式异质能流系统的建模方法

传统能源系统运行相对独立, 模型描述通常集中于单一能源系统. 随着多能互补、集成优化思想的发展, 呈现出由单一能流向多种能流交织运行的趋势, 对物理层的模型表达提出新要求.

从工程热物理角度来看, 建模对象由单一能源设备转换模型发展为多能流、多设备一体化集成模型. 单一能源模型的对象以能源转化设备及其构成的供能子系统为主, 通过分析部件物质流传递和能量流转化机理, 依托热力学、流体力学、传热学等学科, 实现能量转化过程的数学表征^[25]. 通过部件模型之间的参数传递及耦合关系, 进一步发展子系统模型; 完整的部件及子系统模型是异质能流系统建模的基础. 相比于单一能源系统, 异质能流系统涉及多过程、多能耦合, 但不同能流间仅依靠简单的组合关系难以实现能源高效转化与利用, 需要以优化理论为指导实现能量的有序转化. 例如, 文献^[26,27]以经典热力学理论为基础, 发展了熵产最小原理. 随着能源科学的不断发展, 对能量在“量”、“质”和“势”等多个层面的理解逐渐深

入, 对能量本质的认知也更加深刻. 文献^[28,29]所提出的焓理论为理解热量的势提供了新视角, 文献^[30~32]进一步基于换热设备焓耗散热阻计算式, 发展了反映传热过程驱动势、换热量和热阻三者之间关系的热量流模型和热力潮流模型. 考虑热力系统中热量的输运包括管道载热工质流动的热量迁移和换热设备中热量的传递, 文献^[33,34]基于焓理论并结合电路原理, 提出了综合考虑热力系统拓扑特性和元件特性的能量流法, 揭示了热量在系统中的输运规律. 文献^[35,36]发展了能质能势理论, 用于指导能的综合梯级利用. 文献^[37]提出了“多源输入, 综合互补; 品位对口, 梯级利用; 多元输出, 分配得当”的多能互补分布式能源系统的集成思路和设计原则.

从电气工程角度出发, 建模方法主要包括能源集线器^[16,38]等通用模型以及基于类比思想的热路、气路、水路等不同能流的表征模型^[39~41]. 能源集线器模型的核心是建立输入(电力、热力、天然气等)和输出(电、热、冷)端口的能源矩阵, 通过能源系统的转换模型, 建立输入和输出端口的耦合, 实现对电-热-气能源网络的系统优化分析与规划设计. 随着储能技术在异质能流系统中平抑波动、稳定供能的作用凸显, 能源集线器模型也呈现出以电、热、气为主要研究对象, 发展为考虑储能装置的能源集线器扩展模型, 以期实现储能装置对异质能流系统运行灵活性的分析^[42]. 此外, 以气路、水路、热路向电路类比为核心思想, 可以将一系列能源设备、网络等效表达为包含电阻、电容和电感的能源拓扑结构图, 一定程度上降低了计算的复杂度^[43~45], 核心内容如图3所示. 伴随对热传输过程非线性特征认知的深入, 热力系统的热量流模型也得到了发展^[46].

由上述分析可知, 现有能源系统建模方法的描述

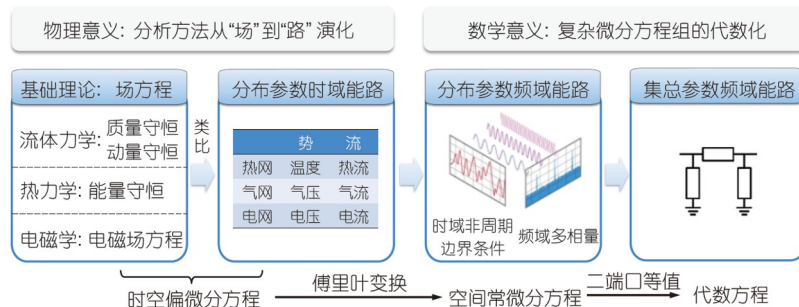


图3 (网络版彩色)基于类比思想的能量流模型^[43~45]
Figure 3 (Color online) Energy flow model based on analogy methods^[43~45]

对象仍具有一定的局限性,对异质能流系统中不同种类能流集成、耦合关系的刻画尚不完善,尤其是对不同能流品位的差异性考虑不足,缺少应用能质能势理论指导高效异质能流系统的构建,对不同时间尺度和空间尺度下的能量耦合关系考虑不充分.因此,发展更具有通用性和普适性的异质能流系统的建模方法仍是努力的方向.

3.1.2 太阳能发电系统能量的高效转换

在“双碳”目标下,我国能源消费结构将迎来重大调整.一方面,燃煤发电系统作为压舱石,发挥托底保供的重要作用;另一方面,非化石能源消费比重不断上升.由于太阳能来源广泛、清洁,太阳能发电技术产业化应用较成熟,正成为实现碳中和目标的主力军.太阳能利用技术主要包括太阳能光伏发电技术和光热发电技术,明确光-电、光-热-电高效转换机理,提高太阳能转换效率是确保综合能源系统高效运行的关键.

提高光伏发电技术能量转换效率的主要途径是电池材料改性和结构优化.在该技术路线的指导下,目前已开发了多代太阳能电池,如图4所示.第一代光伏电池晶体硅电池是我国光伏装机容量最多的电池类型,其光电转换效率为15%~25%.薄膜太阳能电池为第二代光伏电池,与晶体硅电池相比,具有可柔性好、重量轻等特点.可商业化应用的薄膜电池平均光电转换效率为10%~12%,实验室环境下,铜铟镓硒薄膜电池和碲化镉薄膜电池光电转换效率可达20%以上(数据来源:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>).第三代光伏电池技术,如硅基光伏与钙钛矿相结合的叠层电

池,效率可达30%以上^[47,48],其采用层叠结构突破了单结电池的光电转换效率极限,具有良好的发展前景,但进一步的商业化应用还需要大面积叠层电池制备工艺的持续突破.综上,大规模光伏电池技术的商业化应用仍需变革性技术的支撑,提高光伏组件性价比,突破大尺寸光伏电池效率的极限,增强大尺寸商业应用光伏电池的稳定性和拓展性是当前及未来一段时间内重点突破的方向.

光热发电技术涉及的能量转化过程包括:通过聚光集热器吸收能量密度低的太阳能,经过传热工质(熔融盐、水、空气等)进一步将太阳能转化为高能量密度的热能,随后通过动力转换环节(蒸汽朗肯循环、布雷顿循环等)实现热能到机械能的转化,最后通过发电机实现供电^[49].聚光集热发电技术是目前大规模商业化应用的主要技术,发电系统通常由太阳能聚光集热子系统、储能子系统和动力循环子系统构成.面向高温(>700°C)运行条件的高性能集热器、储热器的开发和新型动力循环的发展是目前提高光热系统光-热-功转化效率的研究热点.以塔式太阳能热发电系统为例,分别阐释聚光、吸热、储热和动力转换环节的能量高效转换方法.

聚光环节的定日镜场成本占系统总成本接近一半^[49,50],但其年光学效率仅为50%~60%,难以满足更高吸热温度下对高聚光比和高聚光效率的发展需求.因此,需要以定日镜设计及镜场布局优化为切入,对低成本、高光学性能定日镜场的设计难点进行攻克.定日镜设计重点关注尺寸优化和反射镜选型.具体地,尺寸优化需要权衡考虑与成本的关系,避免过大尺寸引起的支撑结构成本骤增或过小尺寸导致的布线、控制系统复杂度的增加^[51].反射镜的选型主要考虑镜面反射率,以获得较优的光学性能.镜场布局通过优化每一面定日镜位置,以实现较高的年光学效率,常见的布局方式包括叉排布置、仿生布置等^[52,53],未来需要进一步探讨镜场占地成本与效率间的关系.

集热环节的吸热器要求具备耐高温、耐高压特性,依据换热工质种类,熔盐吸热器^[49,54]、颗粒吸热器^[55]、气体吸热器^[56]被认为是第IV代光热电站中最具应用前景的3种吸热器.熔盐吸热器应用的难点在于开发耐高温、耐腐蚀的熔融盐,目前广泛推荐的吸热工质包括碳酸盐、氟化盐和氯化盐,但高温环境下熔融盐的分解特性及与金属材料的兼容性仍需充分的实验来验证.颗粒吸热器以陶瓷颗粒、石英砂等为吸热工

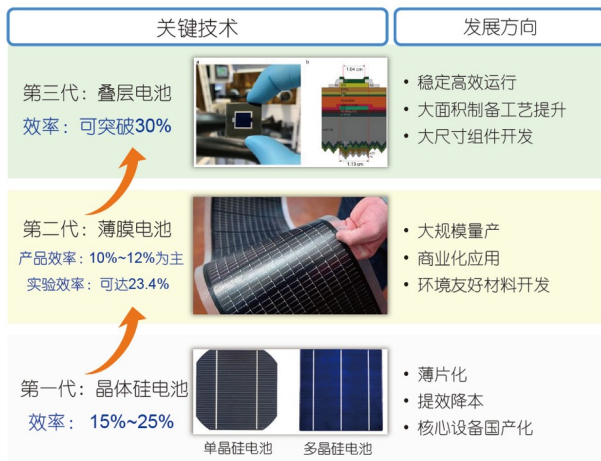


图4 (网络版彩色)光伏电池技术及发展方向

Figure 4 (Color online) Development trends of photovoltaic cell technology

质, 其具有热稳定性高的优势, 但颗粒间的磨损对吸热器的耐久度和运行成本造成一定的挑战. 气体吸热器以二氧化碳、空气等为工质, 考虑气体热物性较差, 为提高吸热效率, 从吸热器优化设计角度, 提出了叶片状吸热器、微通道式吸热器等结构^[56,57], 对新型吸热器性能的实验测试有待进一步开展.

熔融盐和固体颗粒不仅可作为吸热器的吸热工质, 同时也是储热系统的蓄热工质. 因此, 熔盐储热系统和粒子储热系统在下一代高温光热发电系统中占据重要地位, 但面临着运行温度高导致的热损失大和热应力变形严重等问题^[58]. 建议未来围绕储热系统可靠性分析开展工作.

动力循环是热-电转化的关键环节, 其热-电转化效率对系统整体效率有重要影响. 通常采用的热力循环形式为蒸汽朗肯循环, 随着第IV代高温光热技术的发展, 蒸汽朗肯循环效率受材料使用温度和压力的限制, 难以进一步提高, 高效、经济的超临界二氧化碳(super-critical carbon dioxide, S-CO₂)动力循环引起了广泛关注, 太阳能光热S-CO₂循环发电系统透平入口工况550°C/25 MPa条件下, 循环热效率>42%, 总发电系统热效率可达29%以上, 具有良好的应用前景^[59,60]. 目前, 该先进动力循环尚处于理论分析与实验论证的阶段, 工程应用经验不足. 未来还需从大容量、高参数S-CO₂动力机械设备的设计方法、规模化应用可行性分析等方面开展深入研究, 推动光热技术平价上网.

此外, 太阳能光伏光热综合利用(photovoltaics/thermal, PV/T)是近年来备受关注的研究方向. 该技术能够显著提高太阳能综合利用效率, 实现太阳能的全

光谱利用和热、电的灵活配置. 常见的利用途径包括太阳能光伏热水系统、太阳能光伏光热采暖系统、太阳能光伏热泵系统、海水淡化等^[61-64]. 为了获得PV/T系统的性能, 主要从理论和实验两方面开展了研究, 揭示了不同传热工质流速、放置倾角等关键参数对PV/T系统效率、输出功率等指标的影响规律, 并通过优化表面纳米结构等方式实现了系统光学效率的进一步提升^[65-68]. 近年来, 为了形成具有竞争力的太阳能上网电价, 光伏光热混合发电系统示范项目的建设进程加速并取得了一定进展(表1). 例如, “一带一路”倡议的亮点工程, 同时也是目前世界上装机容量最大、熔盐储备热量最大的迪拜700 MW光热和250 MW光伏项目, 于2021年成功并网, 项目建成后, 预计每年将减少160万吨碳排放量.

3.1.3 异质能流系统的能量高效转换与耦合研究

热力学定律表明, 能量不仅有量的多少, 还有品质的高低. 能量可分为有序能和无序能, 其中有序能品位较高且可以实现向其他能量形式的转化, 如电能、机械能等; 无序能品位较低, 增加有序性是有条件的, 热力学第二定律解决了能量转换过程的方向、条件及限度问题. 不同能源的能质、能势存在区别, 为促进能量利用效率最大化, 能势匹配和梯级利用是协调供能系统间、供能系统与用能系统间优化匹配的关键要素. 区别在于不同能源间的简单组合, 能势匹配和梯级利用思想实现了能量按能势和品位的高低, 有序、逐级释放与转化, 能够实现可再生能源的增质提效和化石能源能质损失的减少^[35,37]. 随着研究的深入, 能质和能量品位表征方法得到一定发展, 并在异质能流系统的

表1 部分已建、在建及规划中的太阳能光热光伏混合发电项目

Table 1 Part of the constructed, under-construction and planned solar thermal photovoltaic hybrid power generation projects

国家	名称	光热容量(MW)	光伏容量(MW)	其他主要特点
阿联酋	迪拜700 MW光热+250 MW光伏太阳能电站项目	700	250	熔融盐储热
	阿克塞汇东新能源光热+光伏试点项目	110	640	双罐熔融盐储热 8 h热储能
中国	玉门新奥70万千瓦光热储能+光伏+风电示范项目	100	400	线性菲涅尔式太阳能聚光集热系统 储热时长8 h 风电200 MW
	敦煌70万千瓦光热储能+光伏试点项目	100	600	熔盐线性菲涅尔式 项目总占地21547亩(1 亩=666.67 m ²)
沙特	Hinakiyah太阳能光热项目	~350	待定	沙特首个太阳能混合动力项目
摩洛哥	摩洛哥Noor Midelt I光热光伏混合项目	190	610	光伏系统生产的部分电能将通过电加热装置储存在光热系统的储热系统中

性能评价中得到应用,实现了能量质量和数量的耦合分析,合理表征了能的利用程度.例如,热能的品位通常用释放或接受热源温度所对应的卡诺循环效率表征.不同品位热能的利用方式有所不同,高品位热能主要用于驱动高温动力循环,中/低品位热能则主要与制冷系统耦合进行供冷,更低品位的热能则可直接进行供热,体现了“温度对口,梯级利用”关系的量化表征.随着构建异质能流系统能流种类的增加,不同能源的品位表征方法需要进一步完善,未来还需从全局角度分析能量能势和品位匹配特性,指导系统的协同优化设计.

3.2 异质能流系统多尺度动态响应与协同特性

异质能流系统实际运行过程中表现出复杂的多时间和多空间尺度特性:一方面,电、气、热等多种能流表现出显著的传输特性差异.其中,电能传输所造成的时间延迟较小,可以忽略,并通常以代数方程进行描述;热力系统的惯性次之,同时伴随有能量损失和传输延迟,传输特性通常以水力模型和热力模型进行刻画;天然气系统的传输延迟不可忽略,传输动态特性需要质量守恒、能量守恒和动量守恒等多个数学方程共同描述.再者,电力电子器件的增多使系统非线性特征增强,结构更加复杂,给电力系统的暂态稳定性带来挑战,包括与系统振荡、异步运行等有关的发电机、电动机等转动元件的机电暂态过程,以及与短路(断线)等故障有关的电压器、输电线等各个元件电场、磁场及相应电压、电流变化的电磁暂态过程^[69].在新型能源系统中,微秒级电磁暂态过程与毫秒级机电暂态过程相互交错,时间多尺度特征明显,需要从仿真效率、仿真精度等方面提高系统暂态仿真能力^[70].另一方面,异质能流系统中多参与主体的空间分布差异明显,主要表现在设备、系统等动态特性不同,用户级、区域级及跨区级等不同空间尺度下系统的集成调度与控制方法各异.传统单一能流系统的建模和分析方法无法考虑异质能流的多时空尺度特征,需要进一步开展异质能流系统动态特性在时间尺度和空间尺度的协同优化研究.

在多时间尺度方面,多能耦合动态建模理论的发展为揭示异质能流系统多时间尺度动态特性奠定了基础.常见的研究方法为混合多时间尺度建模^[71].混合多时间尺度建模过程如图5所示:首先,建立计及能量传输特性和设备动态响应差异性的(偏)微分-代数方程组,难点在于选取适宜的时间分辨率实现求解精度和模型

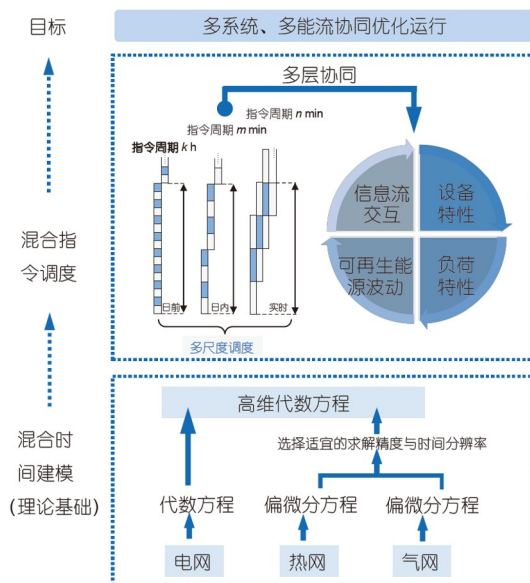


图5 (网络版彩色)混合时间尺度建模方法
Figure 5 (Color online) Modeling method of hybrid time scales

步长之间的平衡.在此基础上,进一步获得异质能流和不同设备的动态特性及控制特性,以此指导日前-日内及实时优化调度策略的制定.该方法改善了传统调度方法对电、热、冷等异质能流采用相同时间分辨率而导致的设备频繁调节等问题,实现了调度策略的逐级修正,确保了不同能流、不同设备间的协调运行,增强了能源系统的灵活性.

在多空间尺度方面,针对异质能流协同运行与控制研究,主要从设备-热力系统耦合拓展至多能耦合的横向研究和“源-网-荷-储”协同控制的纵向研究两方面开展工作.在设备-热力系统-多能耦合的横向研究方面^[72],以设备动态响应特性为基础,结合异质能流间的转化与耦合关系,发展为系统层的动态模型,并通过考虑设备选型、容量等约束条件,指导完成系统的运行规划.进一步,根据运行特性和资源的空间分布差异,进行选址、不同区域能源系统的出力协调和容量匹配等,由此实现多种系统间的互补互济.本团队建立了从关键部件到整体系统的S-CO₂动力循环变工况动态计算模型,并结合典型的微网实时波动负荷,提出了S-CO₂循环变负荷全工况多参数协同控制方法,使动态调控达到兼顾发电效率和发电稳定性的目标^[25,73].进一步,以经济性和高效性为目标,基于分频滤波思想,发展了一种兼顾系统日均成本最低及关键子系统动态效率最高的能量分频优化管理方法^[74].在“源-网-荷-储”

协同控制的纵向研究方面,通常采用理论方法对用户负荷进行预测,随后耦合不同能源系统、应用场景下的需求响应,进行电侧调控.例如,针对分布式能源系统与用户负荷的耦合电侧调控,文献[75]提出了一种基于逆变器的分布式发电单元最优实时控制器并应用于岛屿微电网.文献[76]提出了将分布式能源系统集成到输配电运营市场中的微电网控制器,并分析了分布式能源管理系统的通用功能与相应控制方法.文献[77]发展了一种基于双拍卖市场的分布式P2P能源交易新方法,实现了分布式能源系统与城市社区微电网系统的大规模整合.文献[78]建立了一种适用于不同类型分布式能源微电网的混合整数线性模型,分析了可再生能源资源、用户负荷及其不确定性对配电系统弹性的影响.

随着智慧能源系统建设进程的加快,异质能流系统能量流、信息流深度融合和交互耦合趋势加深,但电气、热动、信息等多学科的交叉研究尚存在一些难题.数字孪生技术的应用为解决这一问题提供了一种思路,该技术基于物理模型和运行数据,实现了能源系统多时空尺度下的性能预测与分析,其基本研究框架如图6所示.例如,文献[79]建立了320 MW燃煤电站的数字孪生模型,并将其作为一种有效的工具来模拟电厂机组在各种运行条件下的热力性能,评估其对工厂运行经济的成本效益影响.文献[80]提出了一种基于数据驱动的能源系统数字孪生方法,可以提供电力需求和冷却能力预测.文献[81]提出了一种基于运行数据和第一原理机制的控制系统性能监测的混合建模方法,并开发了控制系统的数字孪生技术,以330 MW亚临界汽轮机和1000 MW超超临界汽轮机为例,对所提出的混合建模方法进行了验证.结果表明,控制系统出口压力和出口温度的模拟值与实测值之间的平均相对误差在1%范围内.文献[82]根据某地区供冷机组的实际数据构建了数字孪生的详细模型,并设计了用于控制生产装置的预测模型.

综上,针对异质能流系统多时间或空间尺度的动态特性研究,已经从建模方法、运行调控等方面开展了相关工作,但同时考虑时间尺度和空间尺度对系统动态运行特性或调控策略影响的研究尚且缺乏,区域级、跨区级能源系统动态特性有待揭示.数字孪生技术应用于能源系统的分析尚处于初期阶段,对建立完善的包含不同设备、能源系统及多元负荷等在内的数字孪生模型库有迫切需求.

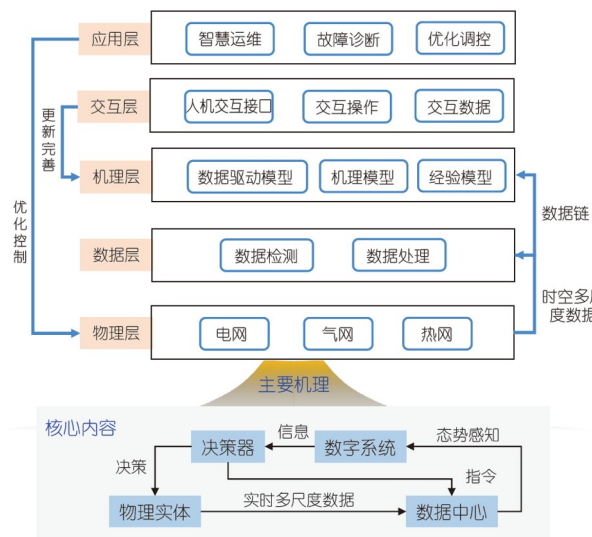


图6 (网络版彩色)数字孪生技术应用于能源系统的框架
Figure 6 (Color online) Framework of the digital twin technology applied in energy systems

3.3 异质能流系统结构优化与能量管控

异质能流系统与典型应用场景间的优化匹配与集成调度是另一个重要的问题.各国学者开展了较多工作,提出了多种优化设计思路与运行调度策略.概括起来,研究主要分为系统优化设计与容量匹配、综合评价方法和不同应用场景下系统集成调度.

在系统优化设计与容量匹配方面,已有研究主要针对离/并网运行工况下能源系统关键设备选型方法和系统各设备容量优化匹配开展.在离/并网运行工况下系统关键设备选型方面,现有研究主要从优化能源系统中设备功能和运行能力角度出发,建立考虑系统经济稳健性、运行可靠性等指标的多目标优化模型、混合整数线性规划模型,并用于指导工业园区、孤立岛屿等场景中能源系统的结构优化设计^[83~85].选型方法通常围绕特定设备在一定运行场景和工况下开展优化,应用于多能、多尺度、多变的异质能流系统还需进一步考虑其普适性.设备容量优化匹配研究主要以经济、环境、节能效益为评价指标,指导发电设备的容量优化配置,尽可能降低能源系统的经济成本和环境影响,并在商业楼宇、住宅建筑等应用场景开展了实例验证^[86~89].然而,已有研究未综合考虑应用场景下用户负荷实时变化、各子系统间的动态响应特性以及供电质量指标对系统优化设计与容量匹配结果的影响.

在综合评价方法方面,大多数研究围绕稳态设计

工况系统能源利用的高效性(包括热效率和烟效率)、投资成本的经济性以及低碳减排的环境友好性开展评估。例如,文献[90]提出了一种综合评价模型,对多能互补分布式系统的节能、经济和环境影响进行了综合评价,同时还探究了非额定工况下系统性能的变化规律。文献[91]将层次分析法和信息熵法相结合,建立了一种综合考虑经济-能源-环境的多准则评价方法。文献[92]考虑到分布式冷-热-电联供系统出口能源形式和能量品质的差异,建立了一种综合考虑一次能源比、节能率、热电比、烟效率等指标的能效评价指标体系,提出了适用于分布式冷-热-电联供系统的综合能效评价方法。这些评价方法通常也是对比和筛选控制策略使系统达到最佳运行状态的依据。然而,动态工况多了时间维度,参数复杂度、数据采集量、突发事件随机性均有较大变化,稳态评价方法是否仍适用还有待论证。

在系统运行调度策略方面,现有研究大多通过对比不同控制策略下能源系统的性能,从而筛选出一种最优运行控制策略以达到最佳的节能效果^[93]。同时,通过控制策略与混合整数线性算法等多种优化模型结合,可达到降低系统一次能源消耗和二氧化碳排放并提高系统经济性的效益^[94,95],实现系统最优运行调控。

总体来看,如何发展具有一定普适性的综合性能评价导则并用于指导高效、经济、灵活能源系统的优化匹配及集成调度,尚无相对统一的定论,且研究主要集中于分布式能源系统,建议未来进一步发展考虑“源-网-荷-储”各环节相互影响的综合评价、结构优化与能量管控方法。

3.4 本团队的探索性工作

围绕“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统,本团队也开展了一些探索性研究工作。

在异质能流能量高效转换与耦合机理研究方面,以超临界二氧化碳(S-CO₂)燃煤发电子系统、光伏发电子系统和全钒液流储能子系统为例,建立了异质能流系统关键部件到核心子系统、再到集成系统的热力学及能量分析稳态模型,揭示了不同能流传递、转化机制,掌握了实时用户负荷及不同运行工况对系统能量转化效率的影响规律,并基于能量品位相匹配的思想,发展了一种异质能流系统综合能效优化方法。

在实时微网负荷条件下系统全工况动态响应特性研究方面,针对S-CO₂燃煤发电子系统,发展了从关键部件到热力循环的一体化动态计算模型,以变负荷速

率、负荷率变化范围、动态发电效率为指标,对系统的动态调控性能展开综合评价^[96],并进一步提出了兼顾系统发电效率与频率稳定性的变负荷全工况多参数协同控制方法^[25],在满足交互层S-CO₂燃煤发电子系统与微网负荷耦合匹配与实时响应的同时,实现了物理层热功转换系统的热力学性能优化。针对全钒液流储能子系统,基于简化等效电路模型,发展了耦合三传一反的全钒液流电池动态性能计算方法,实现了全钒液流电池实时效率的快速计算^[74],初步实现了综合考虑储能动态特性的“源-网-荷-储”深度耦合与实时反馈。在各子系统研究的基础上,针对异质能流复合供能系统,构建了从关键部件到微网系统以及电侧毫秒级与热侧分钟级相耦合的多系统、多时间尺度全工况动态响应模型,提出了基于分级控制的子系统协同运行方法,实现了异质能流复合供能系统的“源荷互动”与实时供需平衡。

在优化匹配及集成调度研究方面,首先以全钒液流电池储能子系统为切入点,以供能经济性、高效性和稳定性为目标,发展了一种基于移动平均滤波算法的能量优化管控方法,通过对全钒液流电池出力状态的优化调控,可以有效降低可再生能源弃置率以及提高子系统的动态效率。进一步,针对异质能流复合供能系统,提出了“源储荷解耦-正交试验-神经网络训练”的系统优化配置方法,获得了系统最优容量配置,有效提高了系统动态运行性能,为综合考虑多类型混合式储能的物理层性能优化与交互层协同运行的“源-网-荷-储”优化匹配与集成调度奠定了基础。

在上述研究的基础上,为了进一步构建并验证高效、强灵活性、低碳的新型异质能流系统,本团队搭建了“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统动态调控实验平台,原理图与实物图如图7所示。该平台集成了新型动力循环发电子系统、清洁能源光伏子系统与高效钒液流储能子系统。利用该平台,我们开展了以下研究:(1)关键设备或子系统与异质能流系统的耦合研究,分析并/离网工况下的设备及系统的运行稳定性;(2)不同典型负荷/实时负荷时间序列下的系统动态响应测试实验,以验证不同负荷与设备最优容量间的匹配机制;(3)不同情景下的系统协同调度方法研究,进行负荷响应与调度仿真测试实验,获得系统最优集成调度方法。

4 发展与挑战

面向高效性、清洁性和经济性的“源-网-荷-储”式

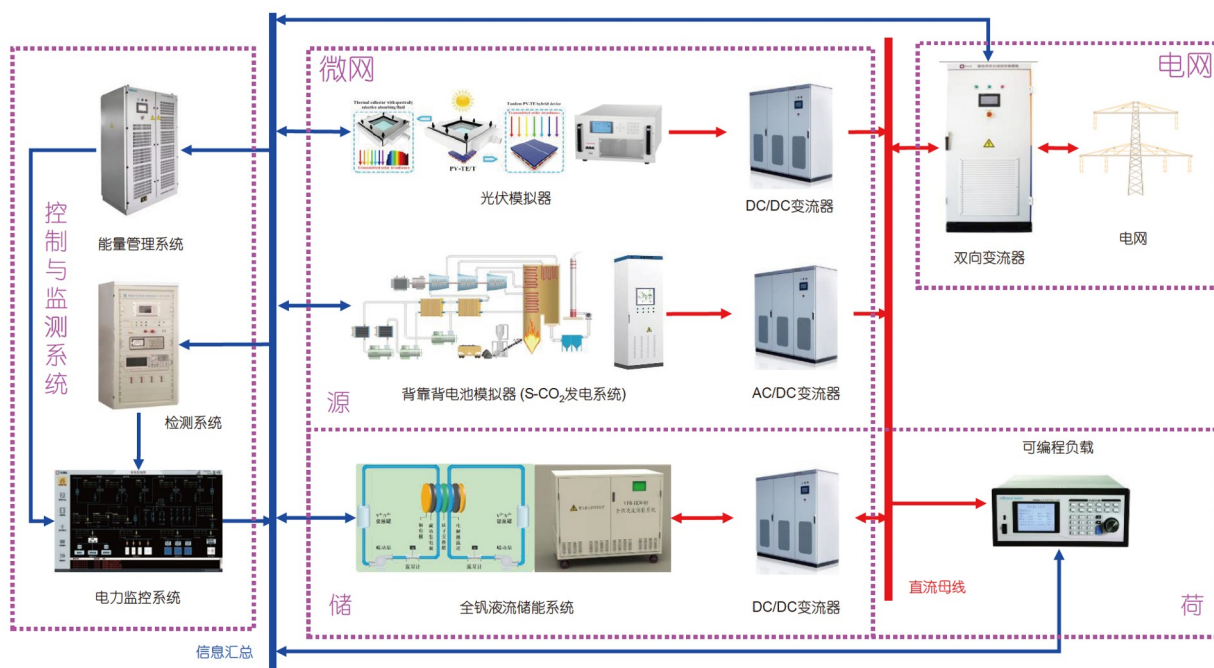


图7 (网络版彩色)“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统动态调控实验平台原理图及实物图
 Figure 7 (Color online) Schematic diagram and physical diagram of the dynamic experimental platform of the generation-grid-load-storage type integrated system with heterogeneous energy flows

异质能流复合供能系统的建设需求, 为促进多能互补能源系统的发展和應用, 推动“双碳”目标的实现和推进能源结构优化, 需要从理论上明确异质能流系统能量高效转化与耦合机理; 从方法上, 基于实时负荷下新

型能源系统的动态响应与协同特性, 提出主动调控方法; 从技术上, 发展机理和数据双驱动的能源系统数字孪生技术, 最终形成高效、灵活的异质能流系统. 具体建议如下.

(1) 突破各能源系统简单组合、能源数量不合理、能源品位不匹配的现状, 发展多能互补、能势匹配、梯级利用的异质能流耦合理论, 深入探究不同数量、不同品位能流间的转化、耦合、存储与运输机理, 指导异质能流系统的能量有序、高效转化。

(2) 发展适用于“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的综合性能评价方法, 兼顾高效性、经济性、灵活性、安全性和稳定性, 指导能源系统的设备选型和容量匹配。重点考察多类型、规模化储能的优化配置及协同调度技术, 发展包含储能装置的能源系统可靠性评估方法, 实现“源-网-荷-储”各部分高效协同运行。

(3) “源”侧新能源的波动性和“荷”侧用户负荷的不确定性对系统变工况运行稳定性造成一定挑战, 亟须突破热动、电气、信息等学科交叉的难点, 建立“源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的主动调控机制, 揭示不同时空尺度下能源系统的全工况运行特性, 实现系统的实时监测与优化。

(4) 随着能源互联网技术的发展, 能源数字化趋势显著, 但转型过程中仍面临普遍存在的技术、市场难题, 物理层、交互层及信息层互联互通性差。需要持续突破数字孪生等先进技术应用与能源系统的难点, 不断完善包括能源设备、能源系统、多元负荷等在内的数字孪生模型库, 推动能源系统智慧化发展。

参考文献

- 1 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th Five-year Plan for Modern Energy System (in Chinese). 2022, http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf [国家发展与改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划. 2022, http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf]
- 2 Jin H G, He Y L, Yang Y P, et al. Basic scientific issues in distributed energy system (in Chinese). *Sci Found China*, 2020, 34: 266–271 [金红光, 何雅玲, 杨勇平, 等. 分布式能源中的基础科学问题. *中国科学基金*, 2020, 34: 266–271]
- 3 National Development and Reform Commission. Guidelines on Promoting the Integration of Generation, Grid, Load and Storage System and the Complementary Development of Multiple Energy Sources (in Chinese). 2021, http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5602023.htm [国家发展与改革委员会. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见. 2021, http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5602023.htm]
- 4 He Y L, Mei D H, Tao W Q, et al. Simulation of the parabolic trough solar energy generation system with organic Rankine cycle. *Appl Energy*, 2012, 97: 630–641
- 5 Xin T, Xu C, Liu Y, et al. Thermodynamic analysis and economic evaluation of a novel coal-based zero emission polygeneration system using solar gasification. *Appl Therm Eng*, 2022, 201: 117814
- 6 Yan H, Chong D, Wang Z, et al. Dynamic performance enhancement of solar-aided coal-fired power plant by control strategy optimization with solar/coal-to-power conversion characteristics. *Energy*, 2022, 244: 122564
- 7 Xu N, Kong Y, Yan J, et al. Global optimization energy management for multi-energy source vehicles based on “Information layer-Physical layer-Energy layer-Dynamic programming” (IPE-DP). *Appl Energy*, 2022, 312: 118668
- 8 Ahmad T, Zhang D. Using the internet of things in smart energy systems and networks. *Sustain Cities Soc*, 2021, 68: 102783
- 9 Huseien G F, Shah K W. A review on 5G technology for smart energy management and smart buildings in Singapore. *Energy AI*, 2022, 7: 100116
- 10 Granacher J, Nguyen T V, Castro-Amoedo R, et al. Overcoming decision paralysis—A digital twin for decision making in energy system design. *Appl Energy*, 2022, 306: 117954
- 11 China Institute of Electronic Technology Standardization, Ministry of Industry and Information Technology. The Application White Paper of Digital Twin (in Chinese). 2020 [工业和信息化部中国电子技术标准化研究院. 数字孪生应用白皮书. 2020]
- 12 Liu S Y, Lin Z Z, Li J C, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2020, 44: 229–239 [刘晟源, 林振智, 李金城, 等. 电力系统态势感知技术研究综述与展望. *电力系统自动化*, 2020, 44: 229–239]
- 13 Veerashakar K, Flick M, Luther M. The micro-hybrid method to assess transient stability quantitatively in pooled off-grid microgrids. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2020, 117: 105727
- 14 Chen X, Liu C, Li Q, et al. Dynamic analysis and control strategies of organic Rankine cycle system for waste heat recovery using zeotropic mixture as working fluid. *Energy Convers Manage*, 2019, 192: 321–334
- 15 Liu C, Wang C, Yin Y, et al. Bi-level dispatch and control strategy based on model predictive control for community integrated energy system considering dynamic response performance. *Appl Energy*, 2022, 310: 118641
- 16 Wang W L, Wang D, Jia H J, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy interne (in Chinese). *Proc CSEE*, 2016, 36: 3292–3306 [王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究

- 综述. 中国电机工程学报, 2016, 36: 3292–3306]
- 17 He Y L, Yan J J, Yang W W, et al. High efficient energy storage in distributed energy system (in Chinese). *Sci Found China*, 2020, 34: 272–280 [何雅玲, 严俊杰, 杨卫卫, 等. 分布式能源系统中能量的高效存储. 中国科学基金, 2020, 34: 272–280]
 - 18 Oyekale J, Petrollese M, Heberle F, et al. Exergetic and integrated exergoeconomic assessments of a hybrid solar-biomass organic Rankine cycle cogeneration plant. *Energy Convers Manage*, 2020, 215: 112905
 - 19 Jin H. A novel gas turbine cycle with hydrogen-fueled chemical-looping combustion. *Int J Hydrog Energy*, 2000, 25: 1209–1215
 - 20 Jiang X Z, Wang X, Feng L, et al. Adapted computational method of energy level and energy quality evolution for combined cooling, heating and power systems with energy storage units. *Energy*, 2017, 120: 209–216
 - 21 Wang Z, Han W, Zhang N, et al. Energy level difference graphic analysis method of combined cooling, heating and power systems. *Energy*, 2018, 160: 1069–1077
 - 22 Huang W, Zheng D, Chen X, et al. Standard thermodynamic properties for the energy grade evaluation of fossil fuels and renewable fuels. *Renew Energy*, 2020, 147: 2160–2170
 - 23 Zhao Y, Zhang Y, Li W, et al. Experimental investigation and thermodynamic analysis of effective hydrogen production driven by mid- and low-temperature solar heat. *J Clean Prod*, 2018, 176: 758–769
 - 24 Jin H G, Liu Q B, Sui J. Theory and technology of multi-energy complementary distributed energy system: Summary of the research progress and development trend (in Chinese). *Sci Found China*, 2020, 34: 289–296 [金红光, 刘启斌, 隋军. 多能互补的分布式能源系统理论和技术的研究进展总结及发展趋势探讨. 中国科学基金, 2020, 34: 289–296]
 - 25 Ma T, Li M J, Xu J L, et al. Study of dynamic response characteristics of S-CO₂ cycle in coal-fired power plants based on real-time micro-grid load and a novel synergistic control method with variable working conditions. *Energy Convers Manage*, 2022, 254: 115264
 - 26 Bejan A. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *J Appl Phys*, 1996, 79: 1191–1218
 - 27 Bejan A. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. *Int J Energy Res*, 2002, 26(S1): 545–565
 - 28 Guo Z Y. New Physical Quantities in Heat (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 112–114 [过增元. 热学中的新物理量. 工程热物理学报, 2008, 29: 112–114]
 - 29 Guo Z Y, Zhao T, Xue T W. Entransy analysis of reversible thermodynamic cycles based on the conservation of entransy equation and its application (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1200–1210 [过增元, 赵甜, 薛提微. 基于焓守恒方程的可逆热力循环焓分析及其应用. 科学通报, 2019, 64: 1200–1210]
 - 30 Hao J, Chen Q, He K, et al. A heat current model for heat transfer/storage systems and its application in integrated analysis and optimization with power systems. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2020, 11: 175–184
 - 31 He K L, Chen Q, Ma H, et al. An isomorphic multi-energy flow modeling for integrated power and thermal system considering nonlinear heat transfer constraint. *Energy*, 2020, 211: 119003
 - 32 Zhao T, Chen X, He K L, et al. A standardized modeling strategy for heat current method-based analysis and simulation of thermal systems. *Energy*, 2021, 217: 119403
 - 33 Chen Q, Hao J H, Fu R H, et al. Entransy-based power flow method for analysis and optimization of thermal systems (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2017, 38: 1376–1383 [陈群, 郝俊红, 付荣桓, 等. 基于(焓)理论的热系统分析和优化的能量流法. 工程热物理学报, 2017, 38: 1376–1383]
 - 34 Chen Q, Fu R H, Xu Y C, et al. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks. *Appl Energy*, 2015, 139: 81–92
 - 35 Jin H G, Zhang G Q, Gao L, et al. The development and prospect of total energy system (in Chinese). *J Mech Eng*, 2009, 45: 39–48 [金红光, 张国林, 高林, 等. 总能系统理论研究进展与展望. 机械工程学报, 2009, 45: 39–48]
 - 36 Jin H G. Cascade utilization of energy and total energy system (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2589–2593 [金红光. 能的梯级利用与总能系统. 科学通报, 2017, 62: 2589–2593]
 - 37 Yang Y P, Duan L Q, Du X Z, et al. Theory and technology of multi-energy complementary distributed energy system: Summary of the research progress and development trend (in Chinese). *Sci Found China*, 2020, 34: 281–288 [杨勇平, 段立强, 杜小泽, 等. 多能源互补分布式能源的研究基础与展望. 中国科学基金, 2020, 34: 281–288]
 - 38 Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future. *IEEE Power Energy Mag*, 2006, 5: 24–30
 - 39 Robertson A F, Gross D. An electrical-analog method for transient heat-flow. *J Res Natl Bur Stand*, 1958, 61: 2892
 - 40 Li J, Wang D, Jia H, et al. Mechanism analysis and unified calculation model of exergy flow distribution in regional integrated energy system. *Appl Energy*, 2022, 324: 119725
 - 41 Yang J, Zhang N, Botterud A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat

- operation. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 35: 560–570
- 42 Mansouri S A, Nematbakhsh E, Ahmarinejad A, et al. A multi-objective dynamic framework for design of energy hub by considering energy storage system, power-to-gas technology and integrated demand response program. *J Energy Storage*, 2022, 50: 104206
- 43 Chen B B, Sun H B, Chen Y W, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): Gaseous circuit (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 436–444 [陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 436–444]
- 44 Chen B B, Sun H B, Yin G X, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): Hydraulic circuit and thermal circuit (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 2133–2142 [陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 2133–2142]
- 45 Chen B B, Sun H B, Wu W C, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): Steady and dynamic energy flow calculation (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 4820–4831 [陈彬彬, 孙宏斌, 吴文传, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 4820–4831]
- 46 Chen Q, Hao J H, Zhao T. An alternative energy flow model for analysis and optimization of heat transfer systems. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 108: 712–720
- 47 Al-Ashouri A, Köhnen E, Li B, et al. Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with >29% efficiency by enhanced hole extraction. *Science*, 2020, 370: 1300–1309
- 48 Liao J H H. Behind the breakthrough of the ~30% perovskite solar cell. *Joule*, 2021, 5: 295–297
- 49 He Y L, Qiu Y, Wang K, et al. Perspective of concentrating solar power. *Energy*, 2020, 198: 117373
- 50 Pfahl A, Coventry J, Röger M, et al. Progress in heliostat development. *Sol Energy*, 2017, 152: 3–37
- 51 Coventry J, Campbell J, Xue Y P, et al. Heliostat Cost Down Scoping Study—Final Report. 2016, <http://ecite.utas.edu.au/113928/>
- 52 Belaid A, Filali A, Hassani S, et al. Heliostat field optimization and comparisons between biomimetic spiral and radial-staggered layouts for different heliostat shapes. *Sol Energy*, 2022, 238: 162–177
- 53 Wang W Q, Jiang R, He Y L, et al. Optical-thermal-mechanical analysis of high-temperature receiver integrated with gradually sparse biomimetic heliostat field layouts for the next-generation solar power tower. *Sol Energy*, 2022, 232: 35–51
- 54 Wang W Q, Qiu Y, Li M J, et al. Coupled optical and thermal performance of a fin-like molten salt receiver for the next-generation solar power tower. *Appl Energy*, 2020, 272: 115079
- 55 Mills B H, Ho C K, Schroeder N R, et al. Design evaluation of a next-generation high-temperature particle receiver for concentrating solar thermal applications. *Energies*, 2022, 15: 1657
- 56 Sedighi M, Padilla R V, Taylor R A, et al. High-temperature, point-focus, pressurised gas-phase solar receivers: A comprehensive review. *Energy Convers Manage*, 2019, 185: 678–717
- 57 Wang W Q, Qiu Y, Li M J, et al. Optical efficiency improvement of solar power tower by employing and optimizing novel fin-like receivers. *Energy Convers Manage*, 2019, 184: 219–234
- 58 Liu M, Steven Tay N H, Bell S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 53: 1411–1432
- 59 Guo J Q, Li M J, He Y L, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Convers Manage*, 2022, 258: 115437
- 60 Wang K, Li M J, Guo J Q, et al. A systematic comparison of different S-CO₂ Brayton cycle layouts based on multi-objective optimization for applications in solar power tower plants. *Appl Energy*, 2018, 212: 109–121
- 61 Fang X, Li D. Solar photovoltaic and thermal technology and applications in China. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013, 23: 330–340
- 62 Bai B L, Du S, Li M J, et al. A novel solar-driven water and electricity cogeneration integrated system by multistage vaporization enthalpy recycling. *Desalination*, 2022, 542: 116040
- 63 Bai B, Yang X, Tian R, et al. A high efficiency solar steam generation system with using residual heat to enhance steam escape. *Desalination*, 2020, 491: 114382
- 64 Elavarasan R M, Mudgal V, Selvamanohar L, et al. Pathways toward high-efficiency solar photovoltaic thermal management for electrical, thermal and combined generation applications: A critical review. *Energy Convers Manage*, 2022, 255: 115278
- 65 Hu Y H, Li M J, Zhou Y P, et al. Multi-physics investigation of a GaAs solar cell based PV-TE hybrid system with a nanostructured front surface. *Sol Energy*, 2021, 224: 102–111
- 66 He Y L, Zhou Y P, Hu Y, et al. A multiscale-multiphysics integrated model to investigate the coupling effects of non-uniform illumination on concentrated photovoltaic system with nanostructured front surface. *Appl Energy*, 2020, 257: 113971
- 67 Zhou Y P, He Y L, Hu Y H, et al. The coupling effects of the different carrier generation rate distributions and recombination caused by nanostructures on the all-back-contact ultra-thin silicon solar cell performances. *Energy Convers Manage*, 2019, 187: 537–545
- 68 Kazemian A, Khatibi M, Reza Maadi S, et al. Performance optimization of a nanofluid-based photovoltaic thermal system integrated with nano-

- enhanced phase change material. *Appl Energy*, 2021, 295: 116859
- 69 Zhu S, Liu K P, Qin L, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: An overview (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 3948–3962 [朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 3948–3962]
- 70 Chen Y, Gao S L, Song Y K, et al. High-performance electromagnetic transient simulation for new-type power system based on cloud computing (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 2854–2864 [陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 2854–2864]
- 71 Gu W, Lu S, Yao S, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system (in Chinese). *Electr Power Autom Equip*, 2019, 39: 203–213 [顾伟, 陆帅, 姚帅, 等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化. *电力自动化设备*, 2019, 39: 203–213]
- 72 Li Q Y, Wang L L, Zhang Y H, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow (in Chinese). *Power Syst Protect Control*, 2020, 48: 179–186 [李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述. *电力系统保护与控制*, 2020, 48: 179–186]
- 73 Ma T, Li M J, Xu J L, et al. Thermodynamic analysis and performance prediction on dynamic response characteristic of PCHE in 1000 MW S-CO₂ coal fired power plant. *Energy*, 2019, 175: 123–138
- 74 Ni J W, Li M J, Ma T, et al. The configuration optimized design method based on real-time efficiency for the application of vanadium redox flow battery in microgrid. *Energy Convers Manage*, 2022, 267: 115899
- 75 Jiang X, He C, Jermittiparsert K. Online optimal stationary reference frame controller for inverter interfaced distributed generation in a microgrid system. *Energy Rep*, 2020, 6: 134–145
- 76 Reilly J T. From microgrids to aggregators of distributed energy resources. The microgrid controller and distributed energy management systems. *Electr J*, 2019, 32: 30–34
- 77 Wang Z, Yu X, Mu Y, et al. A distributed peer-to-peer energy transaction method for diversified prosumers in Urban Community Microgrid System. *Appl Energy*, 2020, 260: 114327
- 78 Gilani M A, Kazemi A, Ghasemi M. Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources. *Energy*, 2019, 191: 116442
- 79 Xu B, Wang J, Wang X, et al. A case study of digital-twin-modelling analysis on power-plant-performance optimizations. *Clean Energy*, 2019, 3: 227–234
- 80 Blume C, Blume S, Thiede S, et al. Data-driven digital twins for technical building services operation in factories: A cooling tower case study. *J Manuf Mater Process*, 2020, 4: 97
- 81 Yu J, Liu P, Li Z. Hybrid modelling and digital twin development of a steam turbine control stage for online performance monitoring. *Renew Sustain Energy Rev*, 2020, 133: 110077
- 82 Zabala L, Febres J, Sterling R, et al. Virtual testbed for model predictive control development in district cooling systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 2020, 129: 109920
- 83 Yu N, Kang J S, Chang C C, et al. Robust economic optimization and environmental policy analysis for microgrid planning: An application to Taichung Industrial Park, Taiwan. *Energy*, 2016, 113: 671–682
- 84 Luo X, Liu Y, Liu J, et al. Optimal design and cost allocation of a distributed energy resource (DER) system with district energy networks: A case study of an isolated island in the South China Sea. *Sustain Cities Soc*, 2019, 51: 101726
- 85 Andiappan V, Benjamin M F D, Tan R R, et al. Design, optimization and reliability allocation for energy systems based on equipment function and operating capacity. *Heliyon*, 2019, 5: 102594
- 86 Waibel C, Evins R, Carmeliet J. Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials. *Appl Energy*, 2019, 242: 1661–1682
- 87 Uemichi A, Yagi M, Oikawa R, et al. Multi-objective optimization to determine installation capacity of distributed power generation equipment considering energy-resilience against disasters. *Energy Procedia*, 2019, 158: 6538–6543
- 88 Luo Z, Yang S, Xie N, et al. Multi-objective capacity optimization of a distributed energy system considering economy, environment and energy. *Energy Convers Manage*, 2019, 200: 112081
- 89 Ghorab M. Energy hubs optimization for smart energy network system to minimize economic and environmental impact at Canadian community. *Appl Therm Eng*, 2019, 151: 214–230
- 90 Guan T, Lin H, Sun Q, et al. Optimal configuration and operation of multi-energy complementary distributed energy systems. *Energy Procedia*, 2018, 152: 77–82
- 91 Dai H, Wang J, Li G, et al. A multi-criteria comprehensive evaluation method for distributed energy system. *Energy Procedia*, 2019, 158: 3748–3753
- 92 Wang J, Ye X, Li Y, et al. An energy efficiency evaluation method of distributed CCHP system based on attribute theory for optimal investment strategy. *Energy Procedia*, 2018, 152: 95–100

- 93 Gao J, Kang J, Zhang C, et al. Energy performance and operation characteristics of distributed energy systems with district cooling systems in subtropical areas under different control strategies. *Energy*, 2018, 153: 849–860
- 94 Li Y, Liang W, Tan R. Optimal design of installation capacity and operation strategy for distributed energy system. *Appl Therm Eng*, 2017, 125: 756–766
- 95 Tian Z, Fu F, Niu J, et al. Optimization and extraction of an operation strategy for the distributed energy system of a research station in Antarctica. *J Clean Prod*, 2019, 246: 119073
- 96 Ma T, Li M J, Xue X D, et al. Study of peak-load regulation characteristics of a 1000MWe S-CO₂ coal-fired power plant and a comprehensive evaluation method for dynamic performance. *Appl Therm Eng*, 2023, 221: 119892

Summary for “‘源-网-荷-储’式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势”

Research status and development trend of generation-grid-load-storage type integrated systems with heterogeneous energy flows

Mingjia Li^{1*}, Jiaqi Guo², Teng Ma², Junjie Yan² & Wenquan Tao²

¹ School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: mjli@bit.edu.cn

The development of a “generation-grid-load-storage” type integrated system with heterogeneous energy flows is necessary to construct a high-quality energy industry and improve the consumption level of renewable energy. Accelerating its development is significant to construct a multi-energy complementary, flexible and intelligent energy system and to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals. At present, the transformation and upgrading process of the energy system is speeding up in China. Compared to the conventional energy system, the new “generation-grid-load-storage” type of integrated systems with heterogeneous energy flows is more complex. It involves the processes of acquisition, integration, conversion, and transportation of various energy forms including cooling energy, heating energy, electricity, and gas. The demand of diversified energy utilization and the objective of higher energy conversion efficiency are both achieved. In view of these issues, this paper believes that the characteristics of multi-energy flows, multi-grade energy distribution, multiple time scales and space scales of the energy systems are becoming remarkable with the increase of complexity of the generation-grid-load-storage energy system. It also leads the new challenges of theoretical and technical problems to the efficient utilization of energy. Besides, to realize the collaborative development of the generation-grid-load-storage energy system with heterogeneous energy flows, it is necessary to break through the limitations of the energy conversion analysis of single energy flow system primarily. The coupling logic between different energy systems needs to be elaborated from the perspective of energy quality and energy grade to guide the optimization of energy structures and conduct energy control. Moreover, the difficulties in multi-scale collaborative responses of heterogeneous energy flow systems are required to be solved because of the more obvious nonlinear characteristics and the instability of the system. Thus, this paper states the composition and characteristics of the generation-grid-load-storage type of heterogeneous energy flow systems at first. The functions and features of the physical layer, interaction layer, and information layer are described respectively. The relationships between layers are clarified. Second, the modeling method of energy coupling and conversion is introduced to clarify the theoretical basis of heterogeneous energy flow systems. The importance of energy utilization and the realized method of energy grade matching are further expounded for building an efficient energy cascade utilization system. They are also significant to realize orderly and on-demand energy conversion. The essential role of renewable energy taking in the high-efficient energy utilization system is introduced with an emphasis. Furthermore, the dynamic response characteristics of heterogeneous energy flow systems are summarized from the perspective of time scales and space scales. The role of digital twin technology taking in heterogeneous energy flow systems is described to present its importance to construct intelligent energy systems. The research status and challenges of collaborative regulation, structural optimization, and energy control are illustrated. Meanwhile, the introduction of the authors' team work is displayed including high-efficient energy conversion analysis of the heterogeneous energy flow system, dynamic response characteristics of systems under real-time microgrid load and the optimized energy management method. Finally, some recommendations of the future development of energy systems are presented from aspects of theoretical, methodological and technical perspectives.

heterogeneous energy flow, generation-grid-load-storage, dynamic response, energy management, digital twin

doi: [10.1360/TB-2022-1088](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1088)