

多类型能量路由器研究综述

孙秋野^{1,2}, 邢荣达¹, 沈千翔¹, 孙振奥¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 在能源互联网中, 能量路由器(ERs)是实现多端口能量转换和能量流主动调控的核心组件之一。本文将ERs分为3类: 电能路由器、信息能量路由器和多能能量路由器。根据类别间的差异, 将ER的研究划分为4个层面: 电力变换, 侧重多端口的电力变换拓扑与控制; 能量路由控制, 主要关注端口间功率流的调控; 信息处理与优化控制, 强调信息的获取、传输并据其优化能量的流动; 多能协调, 以多能综合利用为主要目标。以4个层面研究为基础, 探讨了ER的拓扑、控制、通信和多能优化等技术, 以及不同层面间的关联性。

关键词: 能量路由器(ER); 电力变换; 能量路由控制; 信息处理; 多能综合利用

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)07-0011-11

Review of Multi-type Energy Routers Research

SUN Qiu-ye^{1,2}, XING Rong-da¹, SHEN Qian-xiang¹, SUN Zhen-ao¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China. Corresponding author: SUN Qiu-ye, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn)

Abstract: Energy routers (ERs) are one of the core components of the energy Internet for achieving multi-port energy conversion and active energy flow control. This paper classified ERs into three categories: electrical ERs, information ERs, and multi-energy ERs. Based on the differences between these categories, the research on ERs is divided into four aspects: electrical conversion, focusing on topology and control of multi-port electrical conversion; energy routing control, primarily concerned with the regulation of power flow between ports of ERs; information processing and optimal control, emphasizing the acquisition and transmission of information and optimizing energy flow; and multi-energy coordination, with multi-energy comprehensive utilization as the main goal. Based on these four research aspects, this paper explored topology, control, communication, and multi-energy optimization of ERs, as well as the interrelationships between different aspects.

Key words: energy router (ER); power conversion; energy routing control; information processing; multi-energy comprehensive utilization

近年能源互联网发展迅猛, 2023年相关企业数量突破32万家, 年复合增长率达65.5%^[1]。能源互联网通过利用信息技术构建去中心化网络, 整合风电、光伏等分布式能源以及跨区域电网, 能够实现能源供需的动态匹配, 兼容不同电压等级及能源形式, 并满足精细化调度等功能需求。为了实现上述功能, 能量路由器(ERs)应运而生^[2]。类比于网络路由器将子网内信息传入互联网的机制, 能源互联网中的ER能够将不同电压等级

或能源网络中的能量按需分配到其他网络。

受益于分布式能源的普及和智能电网建设的需求, 全球智能能源路由器市场将呈现显著增长^[3]。当前ER在实际工程中的应用逐渐增多, 在促进新能源消纳、优化能源配置等方面发挥着重要作用。例如, 在沈阳华晨宝马铁西工厂部署的ERs实现了分布式光伏并网与电动汽车充电的智能协同^[4], 显著提升了光伏自发自用率, 并降低了充电成本, 展示了ER在实际场景中的应用潜力。

收稿日期: 2025-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62433013)。

作者简介: 孙秋野(1977—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师, 沈阳工业大学教授。

通过以上工程案例可以看出,ER在实际应用中展现出了巨大的潜力和价值.然而,当前关于ER的综述研究局限于特定应用场景中,如专注电能变换的电能路由器或专注能量耦合数学关系的能量枢纽(energy hub,EH)等,缺少对其整体的描述^[5-9].本文将ER根据其功能特点分为3个类别:电能路由器、信息能量路由器和多能能

量路由器,具体情况如表1所示.相较于现有根据容量和电压等级的分类,本文的优势在于突破了传统分类仅针对单一技术或场景的局限^[5-6],从功能特性与跨领域整合角度构建了更系统的研究框架,覆盖电力变换、信息能量耦合及多能综合利用等多维度功能,促进电力电子、信息技术与多能系统理论的交叉融合.

表1 ER的分类
Table 1 Classification of ER

类别	主要研究方向	特点或主要功能	发展方向
电能路由器	端口间的电力分配	多端口电力变换及电能路由功能	高效率电能转换、高质量供电
信息能量路由器	能量节点间的协调调度	信息采集、处理等功能	运行状态调控与优化、设备间协同
多能能量路由器	多能源系统建模	无实体装备,由能源网络抽象而成; 多能转换功能	多能源的梯级利用、多能流优化

本文将ER的研究方向划分为4个层面(见表2),梳理了各研究方向之间的关联,旨在从电力电子、电力系统、信息技术及多能协调4个领域提

供全面认知,为ER的研究提供更全面、多维的视角,为未来研究与应用奠定基础.

表2 ER的研究层面
Table 2 Research aspects of ER

层面	特点	研究内容	现有问题
第一层面电力变换	多端口电力变换	拓扑结构、内部单元能量平衡 ^[1] 、端口控制 ^[10]	本层面研究较成熟,但尚未有ER的容量定义
第二层面能量路由控制	端口间的能量路由	网络电压控制 ^[11]	缺少ER与网络中其他设备交互的研究
第三层面信息处理与优化控制	信息能量耦合	信息处理、通信、网络潮流优化 ^[12]	信息与能量流的结合仍不紧密
第四层面多能协调	多能综合利用	经济运行、碳排放、能源效率等优化	未有对实体设备的研究

ER的4个层面研究分别是:电力变换、能量路由控制、信息处理与优化控制、多能协调.

1) 电力变换的研究为ER提供双向功率调节的硬件平台,其他研究在此基础上进行功能扩展与智能化管理.目前研究主要集中在提高效率、减小波形畸变的多端口电力变换技术方面,但缺乏对ER整机的容量、效率等参数的标准定义.

2) 能量路由控制以端口功率流调控为研究目标,其成果支撑ER的能量分配功能.当前研究主要致力于减小电压和频率等参数的稳态误差、降低线路损耗、提高可再生能源利用率、增加系统运行稳定裕度.但现有成果多集中在ER之间的路由控制层面,ER与网间其他设备协同仍待进一步研究.

3) 信息处理与优化控制层面的研究建立在前两层基础上,其主要方向包括通信技术、负荷建模与辨识、协同优化控制等,旨在为ER的智

能路由赋能.然而当前信息与功率的融合仍存在不足,主干网络的能量流控制仍依赖调度中心指令,终端配电网无法根据实际需求自主优化调整功率流.

4) 多能协调用于多能源系统以提升综合能效,目前主要目标是优化和多能互补.相比现有的多个独立能源设备间配合的方式,最终实现ER对综合能源系统的枢纽支撑功能,提高功率密度并提升计算效率,但仍未有多能ER的实体设备出现.未来需突破理论研究和虚拟模型,研发出实现多种能源形式转换和路由的实物装置.

上述4个层面分别对应ER的硬件载体、能量调控、智能决策和多能拓展功能维度,共同构成其技术实现体系.本文将全面介绍ER的4个层面研究,为ER的未来发展提供全面而深入的参考.

1 ER 的电力变换

电力变换是 ER 的基本功能,包括交/直流、单/三相、高/低压等变换,强调多端口的能量分配.本章从电力变换层面介绍 ER,包括能量分配方式及电力变换控制.

1.1 ER 的能量分配方式

通常,ER 的结构由端口、电力变换器以及母线组成.端口连接了 ER 与外部输电线路,根据国标 GB/T 40097—2021,ER 需要具备 2 个以上的端

口^[13].其中,不同端口的功率耦合在能量分配点上.对于大部分 ER 拓扑,能量分配点就是母线.端口都要通过电力变换器与母线连接(母线端口除外),把不同端口间的能量按需转移.

ER 的拓扑结构可以根据能量分配方式分类,即低压直流母线、高压直流母线、高频交流母线、磁耦合无母线以及多母线型结构,如图 1 所示.不同能量分配结构与电力变换器可组合成多种 ER 拓扑,多个基本拓扑亦可通过串联方式拓展容量或电压等级,如图 1c~1d 所示.

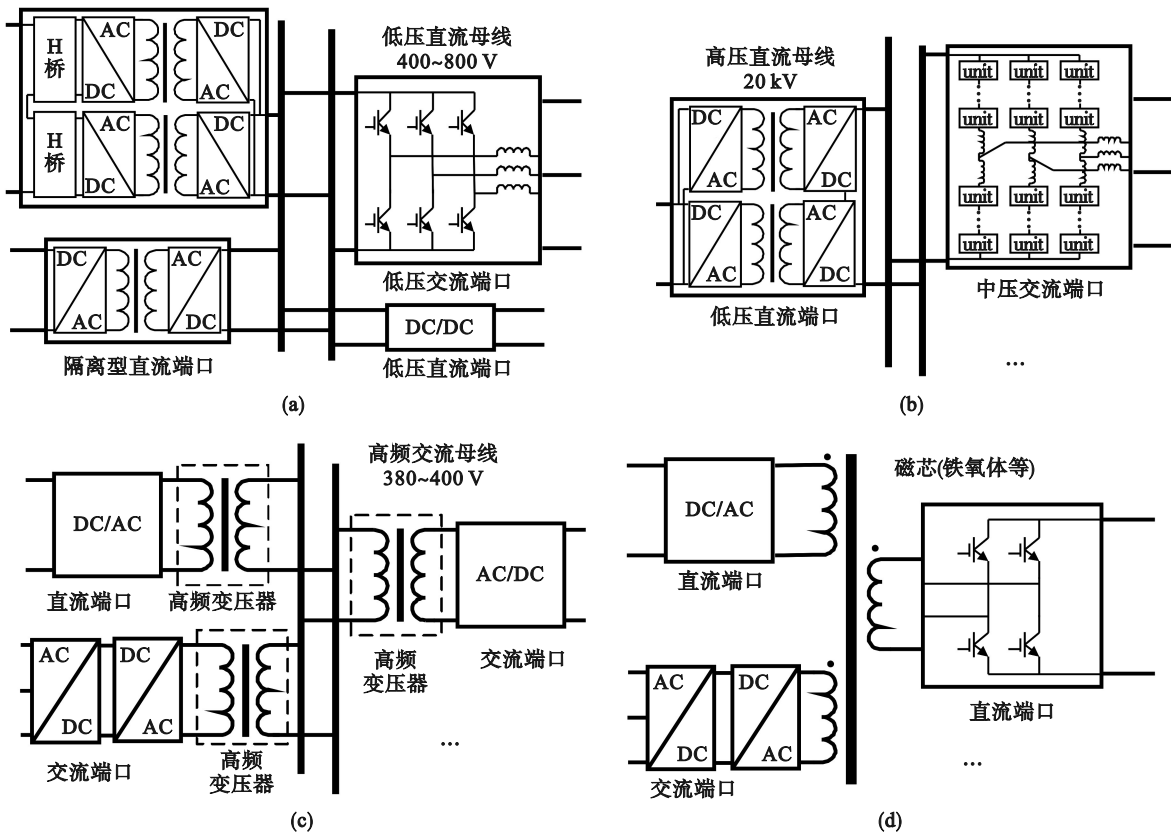


图 1 ER 的能量分配拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy distribution topology for ER

(a)—低压直流母线型; (b)—高压直流母线型; (c)—高频交流母线型; (d)—磁耦合无母线型.

1) 低压直流母线型的 ER 拓扑. 低压直流母线的母线电压通常为 400~800 V,其特点是通过三相桥式拓扑实现母线与三相 380 V 交流端口间的双向可控电力变换,常用于配电网的终端^[14-17].

2) 高压直流母线型的 ER 拓扑. 高压直流母线用于高电压等级配网线路的能量路由.其特点是母线与端口间采用多模块串/并联组合换流器连接以适应大容量的需求,主要用于主干电力线路能量的分配^[18].

3) 高频交流母线型的 ER 拓扑. 高频交流母线的特点是所有端口均可双向运行并相互隔离,

端口通过电力变换器和高频变压器连接母线,通过设计高频变压器匝数比,可以实现高中低压直流端口间的能量路由^[19-21].

4) 磁耦合无母线型的 ER 拓扑. 磁耦合无母线结构的特点是全部端口均电气隔离,并支持母线与各端口双向传输功率.如由多个串联谐振型变换器子模块组成的可重构端口 ER,各子模块均耦合在 1 条磁芯上^[22-24],也可以通过模块化磁耦合转换器实现中压端口的能量路由^[25-26].

5) 多母线型的 ER 拓扑. 为集合各类型拓扑的优势,有学者提出了多母线型的拓扑结构.例

如双母线型 ER 结构可控制功率双向流动,实现了高低压负荷及分布式电源的互联^[27-28]。

1.2 ER 的电力变换控制

电力变换是 ER 的基础,完成电力变换的功

能不仅需要硬件拓扑,还需要对应的控制算法。目前,电力变换器的控制算法有恒定参数控制、下垂控制、虚拟同步机控制和智能控制等,如表 3 所示。

表 3 ER 的电力变换控制
Table 3 Power conversion control of ER

控制方法	基本特性	适用场景	主要优缺点	实现目标	与其他方法的比较
恒定参数控制	输出参数保持设定值	组网或并网	易实现,但缺乏适应性	电压、频率或功率支撑	与下垂控制相比,缺乏动态调节能力
下垂控制	有功功率按容量比例分担	分布式构网	易实现,但无功难以按比例分配	功率分配	相比恒定参数控制,增加了动态调节
虚拟同步机控制	模拟同步发电机特性	新能源并网	提供虚拟惯性,但控制复杂	模拟惯性	相比传统控制,更能适应可再生能源波动
智能控制	应用先进算法和计算技术	高级应用	灵活且性能高,但实现难度大	系统优化	相比传统控制,具有更高级的智能化水平

如表 3 所示,恒定参数控制用于保持输出稳定,下垂控制常用于分布式构网时多设备功率按比例分配,虚拟同步机控制用于为新能源并网提供虚拟惯性,智能控制用于优化能源配置等场景。4 种控制方法的特点具体如下:

1) 恒定参数控制用于组网或并网,如工厂供电系统,可保证输出稳定,其控制目标是使输出参数保持设定值,目前这种控制较为成熟与可靠。

2) 下垂控制常见于分布式构网,如分布式光伏微电网,可实现多设备功率按比例分配。但滤波器和线路阻抗的不同会导致多台逆变器之间无功功率分担不均衡^[29]。目前其主要研究方向包括改进控制算法以解决无功的比例分担^[30-31],以及为电网提供虚拟惯性。

3) 虚拟同步机控制应用于新能源并网,如大型风电场接入电网时,可为电网应对能量波动提供惯性。当前主要研究方向是解决大量新能源接入电网引发的惯性缺乏和阻尼不足问题,避免受到功率波动等扰动的影响^[32]。

4) 智能控制适用于城市智能电网,可优化能源配置。例如,基于模型预测的控制策略可以在空闲操作模式下保持网络内部的电压和频率,以提高系统的稳定性^[33];基于输出电压模型预测控制和梯度下降算法的混合控制策略,可降低 ER 中的回流功率,改善动态性能^[34];采用两自由度潮流柔性控制策略,可实现 200% 有功功率和 120% 无功功率的传输^[35];在含 ER 的 DC 微电网中,双有源桥变换器的功率前馈控制策略可有效减小母线的电压波动^[36]。

2 ER 的能量路由控制

在实现电力变换的前提下,能量路由控制是 ER 的核心功能之一。在该层面的研究中,主要考虑各端口间功率流的控制手段,包括 ER 的分层控制和端口所连网络的能量平衡控制。

2.1 ER 的分层控制

微电网三级分层控制的思想如下:一级控制包括电压、频率、功率、虚拟惯量以及输出阻抗的控制,例如电压频率(VF)控制、有功无功(PQ)功率控制、下垂控制和虚拟同步机控制;二级控制是补偿一级控制产生的电压、频率的稳态偏差;三级控制是优化各节点的功率流动,使电网运行更加经济^[37]。

在 ER 的端口功率流控制场景中,面临的目标需求更为多元且复杂。不仅需要保障总线与端口物理参数的稳定,还需实现端口运行参数及能量流的全面可控。面对如此复杂的控制目标,传统单一控制模式难以满足需求,因此借鉴分层控制策略成为合理选择。通过将受控目标分层拆解,以上层目标为下层参数依据,确保控制逻辑的系统性与精准性。

参考微电网的分层控制,ER 单机的分层控制通常可分为两层:一层控制是端口控制器完成本地物理参数稳定等控制目标;二层控制是 ER 本地控制器对各端口变换器下达工况指令,即修改其控制目标的参数。除独立组网运行的 ER 之外^[38],并网 ER 在上述两层架构基础上,还需要接受上层平台的调度指令,如图 2 所示。

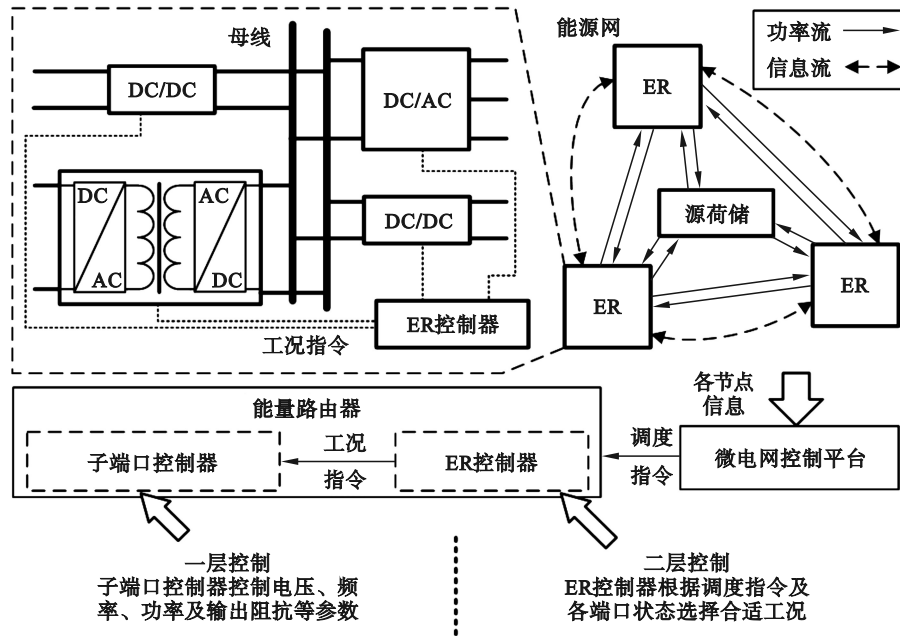


图2 ER的单机分层控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single-unit hierarchical control for ER

现有研究中,还有其他的ER二层控制分类方式,例如上层和下层控制,或参考信号层和变换器层的控制策略^[39].文献[40]的上层是变电站日运行费用最小的优化模型,下层是多个变换器的控制策略.文献[41]的上层采用智能决策,下层根据上层指令控制各变换器完成整个系统的能量管理.

此外,还有其他种类的ER三层分层控制.例如,在第三层能源中央调度层发送工况指令,在第二层微电网控制层向各本地控制层发送驱动信号,在第一层本地控制层根据不同工况采用不同的电压环控制和功率环控制^[42].现有文献中,不同分层方式具有相同特点.二层控制策略的上层和三层控制策略的第三层都是网络中能量流的路径优化控制.二层控制策略的下层和三层控制策略的一、二层均为ER各端口间功率流的组合优化控制,属于本文归类的ER单机分层控制.

2.2 基于能量平衡的电能质量控制

电能质量不仅要求电压及频率稳定,还涉及频率和电压等偏差情况,能量的不平衡是引发这些偏差的根本原因^[43].ER能够通过调控能量流,将所连网络的电压和频率维持在期望范围之内,从而改善电能质量.

目前已有的ER提高用户电能质量方法可分为基于新拓扑和基于控制策略等方法.在新拓扑中,1种基于四有源桥(QAB)的三相统一电能质量调节器实现更高的功率密度、更小的质量和体

积^[44].在控制策略上,ER在补偿电网电压不平衡的同时,可以实现有功和无功功率控制^[45].ER通过能量协调策略可将能量二次分配,改善电网电能质量^[46].通过协调ER和储能系统,可解决微电网频率波动问题,保证间歇性分布式能源的最大效率^[47],以及使孤岛式微电网得到其他微电网的频率支持^[48].文献[49]采用多端口无源性的协同控制,实现谐波的抑制,提高系统稳定性.

以上方法都是通过ER调节能量流的分配,以达到各网络能量供需的平衡.此外,现有电力系统中常用SVG (static var generator)进行无功功率调节以及电压治理,但它不适用于功率不平衡导致的频率偏差的调节.

3 ER的信息处理与优化控制

信息能量路由器强调信息流对能量流的控制,信息处理与优化控制是该类型ER研究的重要层面.本章涵盖从数据收集到决策执行的3个关键步骤:首先是信息的获取及负荷模型的建立,其次是设备间的通信技术,最后是协同控制技术.

3.1 信息获取和模型建立

信息的获取是ER协同控制的必要前提.ER可以直接测量本地节点的电压、电流等信息,也可向所连网络注入信号,辨识出端口所连对象或系统的模型或特征^[50].

在信息监测的基础上,ER 进行负荷建模与辨识,获取负荷的特性和用电规律.这有助于预测负荷变化,为协同调控与优化提供依据.根据用户设备负荷信息改变消费者的行为和改善运营策略,可以节省大量的能源消耗^[51].例如,文献^[52]提出的能量路由策略可预测光伏和负载以优化储能的充放电,进而减少电网功率的消耗.

在负荷预测和辨识问题中,常用智能算法,如在 ER 网络中提出的电力负荷微预测模块,实现正确预测策略的选择^[53].也可以构建负载模式先验知识的数据库,实现电力监控和能源管理的平台^[54].

3.2 ER 的通信技术

通信是 ER 发挥功能的重要条件之一.ER 通信技术的研究包括通信方式和通信机制.

ER 之间的通信方式包括工业以太网、光纤、功率线载波(PLC)技术等^[5].其中,PLC 技术实现了能量和信息的同线传输.由于 ER 在电网中已通过电力线路互相连接,PLC 技术可以省去单独搭建通信网络的成本.目前的 PLC 技术主要有 3 种:能量包技术、传统 PLC 技术和功率信息复合

调制技术.3 种 PLC 技术示意图如图 3 所示.

1997 年,Saitoh 等^[55]提出含有信息的能量包在指定 ER 节点间传输的观点.基于此,京都大学提出了基于能量包的直流能量路由方案.利用高低电平构建信息帧,在能量帧的传输前后加入信息帧构成能量包,以分时复用的方式将多个能量包调制到同 1 条传输线,实现了信息与能量的同传^[56],常用通信频率为 100 kHz,如图 3a 所示.

当前电力系统中的传统 PLC 技术是通过隔离的信号调制器将高频信息耦合到工频功率线路中,再通过同样的方式从功率网络中检波,实现信息与能量同线传输,常用通信频率范围为 0.7~12 MHz,如图 3b 所示.

2020 年,电力电子变换和通信的同源性被揭示,同时信息与能量复合调制技术被提出^[57].将信息耦合到电力变换器的载波中,通过电力电子器件开关的纹波实现了功率线中搭载信息,通信频率与开关频率(常用 5~300 kHz)有关,如图 3c 所示.基于此,可以将功率变换器复用为数据传输器,实现功率流和信息之间的同步传输^[58].

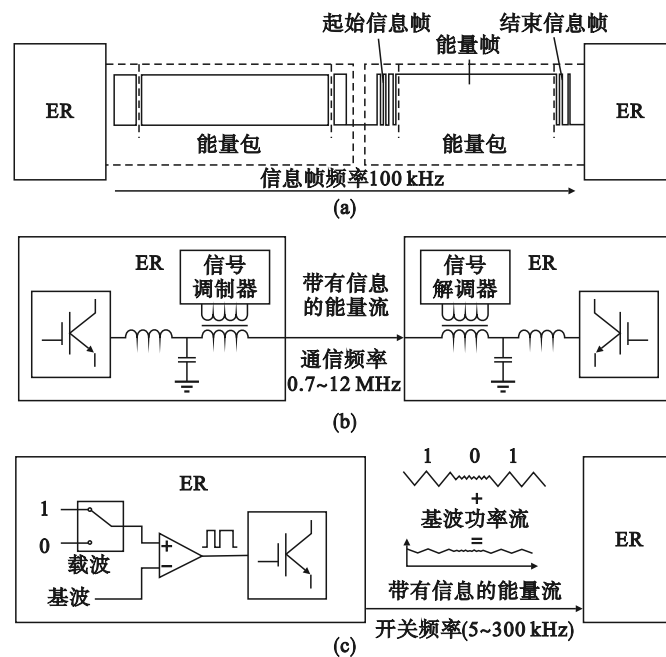


图 3 3 种功率线载波通信技术示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three kinds of power line carrier communication technologies

(a)—能量包技术; (b)—传统 PLC 技术; (c)—功率信息复合调制技术.

总体而言,能量包技术侧重于特定节点间能量与信息的同步传输,适用于直流电网;传统 PLC 技术较为成熟,在交流网络中大量应用;功率信息复合调制技术则无须额外信号调制电路,促进设备小型化,在一些对体积和集成度要求较高的应用场景中具有较大优势.但目前 PLC 技术

无法使信息通过变压器或换流站,只适用于同电压等级的网络间通信,对于跨电压等级的信息与能量同传仍有待研究.

ER 的通信触发机制主要有 3 种:周期触发、事件触发和周期事件触发.目前微电网中常用的通信和控制机制是周期触发,即以固定周期进行

通信及控制器的更新.事件触发机制是指控制单元之间仅在触发函数满足的前提下进行通信,可以降低通信频率,减少计算压力或信道压力.在前两种机制的基础上,周期事件触发周期性地检验事件触发条件,并且在周期内决定是否进行通信或控制器更新.例如,周期事件触发策略以及分布式事件触发条件,可降低事件触发机制的实现难度和减少通信需求^[59].

3.3 ER的优化与协同控制

在获取本地及相关节点的信息和负荷模型后,ER可对电网的运行状态进行调控与优化.含ER的能源网常有多个优化目标,比如线路损耗^[60-61]、输电成本^[62-64]、可再生能源消纳率^[65-66]、分布式电源出力等.

线路损耗优化问题可简化为最短路径问题,文献[67]构建OFV(objective function value)目标函数,获取最小OFV的源节点和路径.文献[61]提出基于有偏最小一致性算法,用于寻找最优供电节点以最小化网络功率损耗.在最低成本的能量路径优化问题中,常见策略有基于图论的能量路由算法^[62],基于日前对等交易与日内功率平衡的拥塞管理和重负载供电路由机制^[63],均实现了

最低成本的路由选择.在优化可再生能源消纳方面,常见策略有考虑可再生能源消纳能量路由策略,解决用户匹配、节能路径和传输调度的路由问题^[65].基于此,文献[66]提出1种充分利用可再生能源的ER智能家居能源管理系统.

4 ER的多能协调

除电网以外,热能、冷能、天然气等能源网同样存在通过信息控制能量流的需求.因此,虽然尚未有可以完成多能间相互转换和路由的独立实体装备,但可以将可控的区域能源网整体看作虚拟的多能ER,其内部包含多种能源的互相转化设备、能量流控制设备、储能设备、负荷以及能源,对外可以表现出多种能源相互转化以及能量流可控的特性.多能ER继承电力变换中的多端口能量路由控制逻辑,将电力变换的功率调节拓展至电-热-气多能转换场景,其优化算法需依托能量路由控制的分层策略来实现多能源供需平衡;负荷预测模型与协同控制算法可嵌入多能ER的能量管理系统,如图4所示.

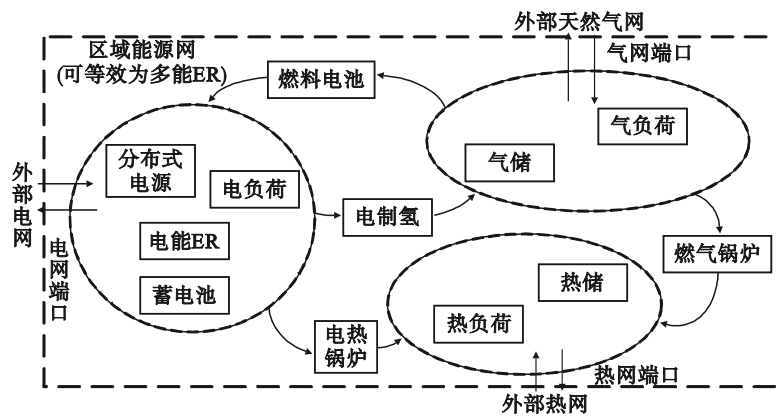


图4 区域能源网示意图

Fig. 4 Schematic diagram of regional energy network

当前以ER集成多种能源并统一管理的尝试,主要是关于多能协调的设计.通过ER集成电力子系统和氢气子系统,这可减少整体能耗和碳排放^[68];集成可变热能储存的太阳能热辅助系统,可提高系统的电能转换效率^[69].与之相似的概念还有能量枢纽(energy hub, EH),其主要研究内容是各能源耦合关系的数学模型,对ER的多能优化具有参考意义,但ER的研究更强调对外属性,以及优化能源管理的算法.

4.1 多能的梯级利用

多能的梯级利用是根据不同种类能源相互

转化的难度不同,优化能源利用效率的方法.现有的研究主要关注电能、天然气、冷能、热能4种能源形式.常用折煤率或者基于焓分析的能量品质系数来对能源品质进行量化.

多能的梯级利用常被看作优化问题,优化的目标函数多为经济价值,约束条件包括电功率平衡、热功率平衡、冷功率平衡、储能容量和能量转换设备容量等.关于多能优化策略,有基于ER的电-气-热一体化系统及其相应能量路由算法^[70].或者在调节ER系统内母线电压偏差的同时,平衡各子单元的电力供需^[71].此外,能量路由算法

可解决多能 ER 之间的能源供应分配问题^[72]。以日运行费用最低为目标,在功率平衡以及设备物理约束下,采用混合整数线性规划法对工业生产流程与设备运行参数进行综合优化^[73]。

4.2 多能流模型

能流分析是综合能源系统分析与优化工作的重要基础。与电力系统中潮流分析类似,多能 ER 如同电力系统中的关键节点,在多能流系统中是能量汇聚、转换和分配的核心设备。多能 ER 网络的能流分析同样涉及保障运行安全、提升经济性、辅助规划建设以及助力故障恢复等重要内容。

多能 ER 网络的最优潮流算法也是从电力系统潮流优化中发展而来的,二者的研究对象均为复杂多约束非线性优化问题,因而可以采用相似的优化算法求解^[74],如线性规划、牛顿法、内点法等经典算法,以及粒子群、Q 学习、蛙跳算法、多目标分解进化算法等启发式算法^[74]。

ER 在多能流分析过程中,可能通过这些算法来处理能量流相关问题,如分析和优化电能、热能、气能等多种能量形式的流动和转换过程,确保在不同工况下合理分配输入能量、实现能量最优转换等。此外,多能 ER 的实体化还将带来新的研究课题,包括综合能源的规划及其市场运营机制,以及与现有电网基础设施的兼容性和互动。

5 总结与展望

根据电能路由器、信息能量路由器和多能能量路由器 3 种 ER 的差异,本文将 ER 的研究分为 4 个研究层面:电力变换、能量路由控制、信息处理与优化控制、多能协调。

目前,ER 的研究仍有很多问题需解决,虽然在电力变换层面的研究相较于其他层面更成熟,但尚未明确关于 ER 容量与效率的定义。在能量路由控制层面,ER 与网中其他装备协同机制尚待研究,例如负荷的需求响应及源荷储与 ER 的协同优化等问题。在信息处理与优化控制层面,目前信息与能量的结合还不紧密,能量的变换、流动仍依靠调度中心的指令,网间实时模型和信息的交互仍相对独立。在多能层面,实物装置仍待开发。

此外,4 个研究方向间存在交叉研究潜力,例如电力变换中的控制算法可与信息处理中的负荷预测模型耦合,实现功率流的动态优化;信息

处理中的功率信息复合调制技术能嵌入电力变换的开关器件,同步实现能量传输与状态监测,而多能综合利用中的能流分析方法可指导电力变换效率提升与能量路由策略优化,形成“硬件-控制-信息-多能”的协同研究链条。

综上,未来 ER 的发展方向可概括为:设计与传统电网设备的协同控制策略以优化电网潮流和电压控制,提升电网性能的稳定性;引入边缘智能技术实现信息实时采集、处理及交互,促进信息与能量流紧密融合以应对可再生能源波动;健全电力市场分布式电能交易机制及计量计费功能,依托 ER 搭建稳定智能的能源交易平台;综合考量多种能源特性与转换原理,研发高效能源转换接口和控制技术,推动多能 ER 从理论研究和虚拟模型走向实体化,实现多能转换、路由及管理功能。

参考文献:

- [1] 清华大学能源互联网创新研究院. 2024 国家能源互联网发展年度报告 [R/OL]. (2024-06-20) [2025-05-10]. <https://zkzx.tsinghua.edu.cn/info/1107/1314.htm>. (Energy Internet Research Institute, Tsinghua University. 2024 annual report on the development of China's national energy Internet [R/OL]. (2024-06-20) [2025-05-10]. <https://zkzx.tsinghua.edu.cn/info/1107/1314.htm>.)
- [2] Heydt G T. Future renewable electrical energy delivery and management systems: energy reliability assessment of FREEDM systems [C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, 2010: 1-4.
- [3] Data Library Research. Global intelligent energy router market opportunities and forecast 2023-2029 [R/OL]. (2023-03-22) [2025-05-10]. <https://www.datalibraryresearch.com/reports/intelligent>.
- [4] 腾讯网. 鼎信通讯能量路由器成功安装于华晨宝马铁西工厂,超级充电系统进入新阶段 [EB/OL]. (2024-04-24) [2025-06-10]. <https://news.qq.com/rain/a/20240424A04MB000>. (Tencent.com. Dingxin communication's energy router has been successfully installed at Brilliance BMW's Tiexi Factory, marking a new phase for the supercharging system [EB/OL]. (2024-04-24) [2025-06-10]. <https://news.qq.com/rain/a/20240424A04MB000>.)
- [5] 宗升,何湘宁,吴建德,等. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570. (Zong Sheng, He Xiang-ning, Wu Jian-de, et al. Overview of power electronics based electrical energy router [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(18): 4559-4570.)
- [6] 葛乾诚,姚钢,周荔丹. 电能路由器相关技术研究现状与展望[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 105-113. (Ge Qian-cheng, Yao Gang, Zhou Li-dan. Research status and prospects of electric energy router technology [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(6): 105-113.)
- [7] 赵争鸣,冯高辉,袁立强,等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834. (Zhao Zheng-ming, Feng Gao-hui, Yuan Li-qiang, et al.

- The development and key technologies of electric energy router[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3823-3834.)
- [8] 盛万兴, 段青, 梁英, 等. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3760-3769.
(Sheng Wan-xing, Duan Qing, Liang Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy Internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3760-3769.)
- [9] Ding T, Jia W H, Shahidepour M, et al. Review of optimization methods for energy hub planning, operation, trading, and control[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1802-1818.
- [10] Wang C, Zheng X M, Liu Z, et al. Based on virtual generator energy router AC-DC coordination control[C]// IECON 2018: 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington D C, 2018: 122-125.
- [11] Feng Y S, Li Y, Cao Y J, et al. Automatic voltage control based on adaptive zone-division for active distribution system[C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Xi'an, 2016: 278-282.
- [12] Guo X, Zheng J H. Optimization configuration method for microgrid based on electric energy router[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, 2017: 1-6.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 能源路由器功能规范和技术要求: GB/T 40097—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
(National Market Supervision Administration, Standardization Administration of the People's Republic of China. Functional specifications and technical requirements of energy router: GB/T 40097—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [14] 李振, 盛万兴, 段青, 等. 基于储能稳压的交直流混合电能路由器协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(2): 121-129.
(Li Zhen, Sheng Wan-xing, Duan Qing, et al. Coordinated control strategy of AC/DC hybrid power router based on voltage stabilization by energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(2): 121-129.)
- [15] 刘迎澍, 马川. 基于交直流混合微网构架的电能路由器[J]. *现代电力*, 2015, 32(1): 13-18.
(Liu Ying-shu, Ma Chuan. The power router based on hybrid AC/DC microgrid framework[J]. *Modern Electric Power*, 2015, 32(1): 13-18.)
- [16] 段青, 盛万兴, 李振, 等. 电能路由器接入电力电子化配电网稳定性初步分析[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 227-235.
(Duan Qing, Sheng Wan-xing, Li Zhen, et al. Stability analysis of power routers connected to power electronic distribution grid[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 227-235.)
- [17] 王弦, 刘建华, 向加佳, 等. 基于电力电子变压器的电能路由器研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2016(11): 4-8.
(Wang Xian, Liu Jian-hua, Xiang Jia-jia, et al. Study on the power router based on power electric transformer[J]. *Automation & Instrumentation*, 2016(11): 4-8.)
- [18] 陶海波, 杨晓峰, 李泽杰, 等. 电能路由器中基于 MMC 的超级电容储能系统及其改进 SOC 均衡控制策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3970-3978.
(Tao Hai-bo, Yang Xiao-feng, Li Ze-jie, et al. A modified SOC equalization control strategy of MMC based super capacitor energy storage system in electrical energy router application[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3970-3978.)
- [19] 肖迁, 何晋伟, 王浩, 等. 电网故障下的电能路由器直流电容电压平衡控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(2): 20-25, 142.
(Xiao Qian, He Jin-wei, Wang Hao, et al. Voltage balancing control strategy for DC capacitor of electrical energy router under power grid failure[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(2): 20-25, 142.)
- [20] 魏树生, 赵争鸣, 文武松, 等. 共交流母线多端口变换器高频振荡特性分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(9): 751-762.
(Wei Shu-sheng, Zhao Zheng-ming, Wen Wu-song, et al. Analysis of the high-frequency oscillation characteristics of a multi-port converter with an AC link[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(9): 751-762.)
- [21] 蒋超. 单相电能路由器设计及其能量管理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
(Jiang Chao. Research on design and energy management of single-phase power router [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2020.)
- [22] Chen Y N, Wang P, Elasser Y, et al. Multicell reconfigurable multi-input multi-output energy router architecture[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 13210-13224.
- [23] Qin H J, Liu C, Shi Y, et al. Prediction-based MIMO control of a multiport magnetic-coupled energy router[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(5): 6409-6420.
- [24] Lyu Y Q, Deng F J, Shen Z, et al. Quad-port magnetic integrated coupled inductor based magnetic network energy routers with high power density[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(8): 11655-11672.
- [25] Liu X Z, Zheng Z D, Wang K, et al. An energy router based on multi-winding high-frequency transformer[C]// 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, 2016: 3317-3321.
- [26] Du S X, Wang Z, Liu J J. A medium-voltage four-port energy router based on modular magnetic-coupled converters (MMCC) with reduced switching losses [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(12): 15895-15903.
- [27] 韩学楠, 苏小林, 阎晓霞, 等. 基于双直流母线架构的电能路由器[J]. *电力建设*, 2018, 39(3): 83-91.
(Han Xue-nan, Su Xiao-lin, Yan Xiao-xia, et al. Electric power router based on double DC bus structure[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(3): 83-91.)
- [28] 冯高辉, 赵争鸣, 袁立强. 面向能源互联网的电能路由器应用研究[J]. *广东电力*, 2020, 33(12): 22-30.
(Feng Gao-hui, Zhao Zheng-ming, Yuan Li-qiang. Research on application of electric energy router for energy Internet[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(12): 22-30.)
- [29] 孙凌玉. 基于下垂控制的交流微电网组网技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
(Sun Ling-yu. Research on networking technology of AC microgrid based on droop control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.)
- [30] Zhong Q C. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1281-1290.

- [31] 金胜赫,张化光,孙秋野,等.基于一致性的微电网分布式不对称功率分配控制[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(10):1374-1378.
(Kim Sung-hyok, Zhang Hua-guang, Sun Qiu-ye, et al. Consensus-based distributed asymmetric power sharing control in microgrids [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(10): 1374-1378.)
- [32] van Wesenbeeck M P N, de Haan S W H, Varela P, et al. Grid tied converter with virtual kinetic storage [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest, 2009: 1-7.
- [33] Roasto I, Husev O, Najafzadeh M, et al. Voltage source operation of the energy-router based on model predictive control[J]. *Energies*, 2019, 12(10): 1892.
- [34] Zhou B K, Yang X F, Nong R B, et al. Multi-objective optimization control for input-series output-parallel dual-active-bridge DC-DC converter in EER application [C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing, 2020: 2408-2413.
- [35] Zhao X J, Liu Y R, Chai X H, et al. Multimode operation mechanism analysis and power flow flexible control of a new type of electric energy router for low-voltage distribution network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(5): 3594-3606.
- [36] Li Y Y, Sun Q Y, Wang D L, et al. A virtual inertia-based power feedforward control strategy for an energy router in a direct current microgrid application[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 517.
- [37] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158-172.
- [38] Yin X, Wu J, Li F, et al. Topology and coordinated operation control strategy of vehicle-mounted multienergy energy router [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(2): 6788-6798.
- [39] Lian J R, Dai C H, Zhou F L, et al. A hierarchical control strategy based on dual-vector model predictive current control for railway energy router[J]. *Electronics*, 2023, 12(18): 3919.
- [40] Lai J H, Chen M W, Dai X F, et al. Power flow optimization and control strategy for energy router in dual mode traction power supply system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(11): 12284-12293.
- [41] Zhao G P, Li Z, Zha P F, et al. Energy management scheme of single-phase electric energy router with two-layer intelligent control combined with optimal scheduling of battery [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(11): 2357-2371.
- [42] Chen R C, Yang Y X, Jin T. A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(15): 1-12.
- [43] 黄博南,周建国,孙秋野,等.能源互联网不平衡及谐波补偿控制策略[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(6):761-765,788.
(Huang Bo-nan, Zhou Jian-guo, Sun Qiu-ye, et al. Control strategy for the compensation of imbalance and harmonic in energy Internet [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(6): 761-765, 788.)
- [44] Han J, Li X, Jiang Y, et al. Three-phase UPQC topology based on quadruple-active-bridge[J]. *IEEE Access*, 2020, 9: 4049-4058.
- [45] Roncero-Clemente C, Vilhena N, Delgado-Gomes V, et al. Control and operation of a three-phase local energy router for prosumers in a smart community [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(4): 560-570.
- [46] Cui X Y, Liu Y L, Yuan D, et al. A hierarchical coordinated control strategy for power quality improvement in energy router integrated active distribution networks[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2655.
- [47] Lan Z, Wang J Z, Zeng J H, et al. Constant frequency control strategy of microgrids by coordinating energy router and energy storage system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 4976529.
- [48] Pham M C, Razi R, Hably A, et al. Power management in multi-microgrid system based on energy routers [C]//2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Buenos Aires, 2020: 1178-1183.
- [49] Ren Q C, Chen A L, Shen Y Q, et al. Harmonics suppression and stability improvement for power router in nonideal grid conditions: a multiport passivity-based collaborative control scheme [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(10): 12652-12666.
- [50] Weng X, Zhao Z M, Chen K N, et al. Chirp signal injection method and real-time impedance characteristic measurement of electric energy router [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(5): 5564-5577.
- [51] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3): 394-398.
- [52] Hambridge S, Huang A Q, Yu R Y. Solid state transformer (SST) as an energy router: economic dispatch based energy routing strategy [C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, 2015: 2355-2360.
- [53] Bruno S, Dellino G, La Scala M, et al. A microforecasting module for energy management in residential and tertiary buildings [J]. *Energies*, 2019, 12(6): 1006.
- [54] Mostafavi S, Cox R W. An unsupervised approach in learning load patterns for non-intrusive load monitoring [C]//2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Calabria, 2017: 631-636.
- [55] Saitoh H, Miyamori S, Shimada T, et al. An autonomous decentralized control mechanism for power flow in an open electric energy network [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1997, 121(4): 28-37.
- [56] Takuno T, Koyama M, Hikihara T. In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching [C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, 2010: 427-430.
- [57] He X N, Wang R C, Wu J D, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2479.
- [58] Wang R C, Chen G P, Chen J H, et al. An embedded communication method for in-home energy routers with power/signal dual modulation [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(5): 5553-5563.
- [59] Heemels W P M H, Donkers M C F, Teel A R. Periodic event-triggered control for linear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(4): 847-861.

- [60] Suhail Hussain S M, Aftab M A, Nadeem F, et al. Optimal energy routing in microgrids with IEC 61850 based energy routers [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(6): 5161–5169.
- [61] Shi X Y, Xu Y L, Sun H B. A biased min-consensus-based approach for optimal power transaction in multi-energy-router systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 217–228.
- [62] Wang R C, Wu J D, Qian Z N, et al. A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3275–3285.
- [63] Ji X T, Liu D, Xiao F, et al. A novel graph theory based two-stage minimum cost routing mechanism in energy Internet [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142: 108346.
- [64] 缪尚孝, 任一峰, 康睿, 等. 基于能量路由器的微网群优化调度研究[J]. *现代电子技术*, 2025, 48(10): 97–102. (Miao Shang-xiao, Ren Yi-feng, Kang Rui, et al. Microgrid cluster optimal scheduling based on ER [J]. *Modern Electronics Technique*, 2025, 48(10): 97–102.)
- [65] Hebal S, Mechta D, Harous S, et al. Hybrid energy routing approach for energy Internet [J]. *Energies*, 2021, 14(9): 2579.
- [66] Liu Y S, Li J, Wu Y, et al. Coordinated control of the energy router-based smart home energy management system [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(9): 943.
- [67] 叶泓炜. 基于能源互联网的分布式电能路由控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. (Ye Hong-wei. Research on distributed power routing control strategy based on energy Internet [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.)
- [68] Yu H Y, Wang Y B, Zhang H W, et al. Impedance modeling and stability analysis of triple-active-bridge-converter-based renewable-electricity-hydrogen-integrated metro DC traction power system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12340–12353.
- [69] Ni C, Chen L J, Chen X T, et al. Energy analysis and particle swarm optimization of clean energy router based on a solar-thermal-assisted advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2023, 17(9): 2302–2314.
- [70] Qiu S S, Chen J F, Mao C X, et al. Day-ahead optimal scheduling of power-gas-heating integrated energy system considering energy routing [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1113–1122.
- [71] Hua H C, Qin Y C, Geng J Y, et al. Robust mixed H_2/H_∞ controller design for energy routers in energy Internet [J]. *Energies*, 2019, 12(3): 340.
- [72] Zhou N, Xie D, Gu C H, et al. Coordinated planning of multi-area multi-energy systems by a novel routing algorithm based on random scenarios [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131: 107028.
- [73] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 123–130. (Xu Hang, Dong Shu-feng, He Zhong-xiao, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 123–130.)
- [74] 黄俊. 综合能源系统多目标优化运行算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (Huang Jun. Research on multi-objective optimal operation algorithm of comprehensive energy system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.)