

## 电热综合能源网的强耦合路径研究与展望

刘学智<sup>1</sup>, 严正<sup>1</sup>, 解大<sup>1</sup>, 张沛超<sup>1</sup>, 王海<sup>2</sup>, 龙惟定<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 上海市 200092)

**摘要:** 当前电热综合能源网研究大多基于传统热网,并局限于由少量热电联供机组构成的弱耦合网络。第5代区域供热供冷系统驱动的能源元胞可通过热泵池实现高密度网状融合的电热网,改变电热网交互形态。论述了第5代区域供热供冷系统给综合能源电热耦合网统一建模理论带来的重大机遇和挑战,以及基于第5代区域供热供冷系统的能源元胞灵活性聚合的广阔应用前景。进一步,综述了第5代区域供热供冷系统的研究现状、电热耦合网多能流建模理论及分布式资源的灵活性聚合方法。针对能源元胞利用热泵池与热网热惯性提升电网灵活性的契机,提出第5代区域供热供冷系统驱动的能源元胞网络流理论与灵活性聚合方法的研究思路:热动态从热泵池到配电网的交互机理与可行域分析、异质性智慧能源元胞互联的灵活性聚合与分配的分层级协调优化方法。

**关键词:** 综合能源系统; 区域供热; 区域供热供冷系统; 强耦合网络; 能源总线; 能源元胞; 热泵; 灵活性聚合

### 0 引言

电热耦合系统是应用最广泛的综合能源系统类型之一,是实现高比例可再生能源接入电网的重要应用场景与载体。当前电热综合能源网的研究大多局限于弱耦合网络,原因在于热网的投资成本高,若接入集中热网的用户同时安装热泵进行混合供热会增加设备投资成本,所以电热网主要通过少数大型热电联供机组提供弱耦合,相应的统一模型主要是端口等值模型。目前通过电热综合能源系统多能互补提升电力系统运行灵活性主要分为两类:一类是利用热网蓄热的慢动态特性;另一类是对温控负荷的灵活性聚合(与热网无关联)。

第5代区域供热供冷(5th generation district heating and cooling, 5GDHC)系统改变了这种形态<sup>[1-2]</sup>。其水温接近于环境温度、采用塑料管以及借助热泵供热与制冷机供冷的变革性特点,使得电热网真正实现高密度网状深度融合。目前,5GDHC系统或称能源总线的研究仍以建筑暖通学科为主,较少涉及电网交互分析<sup>[3]</sup>;而目前综合能源系统热网建模主要基于传统前4代热网,未考虑到多源环状双向低温5GDHC系统中热源的热交换量、总线水温度和用户热泵机组工况三者互相耦合的复杂运

行调节策略。不同于目前温控负荷的灵活性聚合研究中热泵个体之间无关联,5GDHC系统中热泵池均通过热管网段连接并相互影响。因此,本文中5GDHC系统驱动的能源元胞有效融合了两种方法提升电力系统灵活性,即同时集成热泵池调控与利用热网蓄热的慢动态特性,并考虑两者之间的相互影响。本文从本质上试图揭示两种不同物理性质的网级耦合问题。实现电力系统与能源机械学科的有机结合。期望本文能为电热耦合综合能源系统的经济运行以及夏热冬冷地区供冷供暖提供解决方案。

本文提出以下问题:1)如何根据“多源多汇”、环状、双向的5GDHC系统中各种“源”和“汇”的不同特性,优化源之间的负荷分配和运行调节,以实现管网的水力和热力稳定以及热泵机组工况的稳定运行? 2)5GDHC系统与配电网通过热泵池构成多点高密度网状紧密耦合的能源元胞,如何建立适应新形态的能源元胞网络流理论及可行域分析,提高配电网的可观性? 3)目前热泵灵活性聚合研究中热泵与热网无关联,5GDHC系统中热泵池通过热管网段相连接,聚合商如何兼顾热网热惯性与热泵池的灵活性聚合,分配各元胞的灵活性出力,以实现交互边界清晰的分层级管理架构,为电网调度提供支撑? 基于此,本文提出建立与5GDHC相兼容的考虑产消共享且耦合度更高的电-热网络流模型,通过分析网络流与可行域(边界条件),可实现多时间尺度的强耦合电热网微分-代数方程求解;提出

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-08-31。

上网日期: 2021-12-06。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000)。

5GDHC 能源元胞概念,充分利用了“配电网电压分层级、5GDHC 模块化延展”的特征,将单一能源元胞推广到多能源元胞的灵活性聚合;提出构建一套基于 5GDHC 能源元胞的分层级协调体系以及灵活性聚合与分配方法的思路,协同热网热惯性与热泵聚合为电网调峰提供支撑。

## 1 综合能源电热耦合网发展思路

### 1.1 电热耦合网的统一建模理论的发展

电热耦合网作为综合能源系统的典型代表,通过多种能源的转换与利用热力的易存储特性进行多能互补,得到了国内外学者的广泛研究<sup>[4-7]</sup>,从较早的能量枢纽模型<sup>[8]</sup>和基于网络拓扑的联合潮流模

型<sup>[9-11]</sup>,到针对不同时间尺度动态下的电、气、热多能流统一建模与仿真方法<sup>[4,5,12]</sup>。统一能路理论与广义电路分析理论均具备良好精度与兼容性佳的优势,对促进综合能源建模理论的发展具有里程碑的意义。这两种理论主要通过边界外端口研究互相交互的多能源网络,建立能够考虑动态特性的多能源网络边界端口等值模型,将复杂的内部信息转换为等值的边界条件。然而,多能源网络的边界等值模型仍然是各种能源各自孤立的节点与网络<sup>[4]</sup>。根本原因在于,目前多数综合能源系统建模面向的电热耦合网通过少量大型热电联供(CHP)机组提供弱耦合<sup>[5]</sup>,网络拓扑如图 1 所示<sup>[9]</sup>,或者通过小型 CHP 机组与锅炉等供热,但没有接入集中热网。

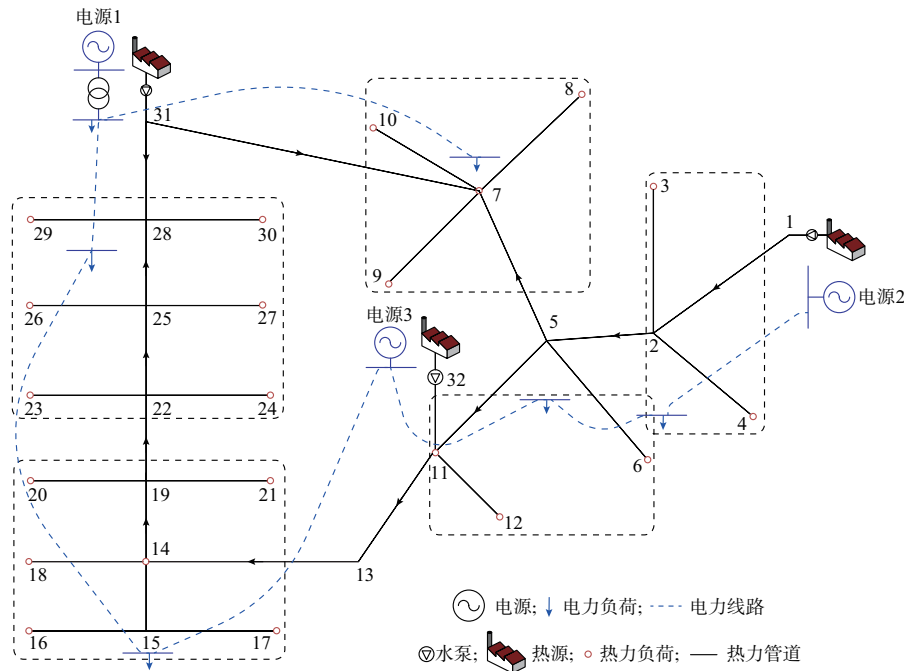


图 1 配电网与热网通过少量 CHP 机组耦合的网络拓扑

Fig. 1 Network topology of distribution network and heat network coupled through a small number of CHP units

### 1.2 支撑统一理论需突破的问题

目前,大多数研究中热源是电热网唯一的耦合点,电网研究者容易忽略泵(热泵和水泵)的问题。热泵的电热能转换可实现电力系统与热力系统的错峰运行;水泵通过变频调节压力实现热网的水力平衡。大量热泵与水泵是实现电热网高度耦合的有效途径。基于综合能源系统多能互补的优势,设想用户依靠集中供热的管网基础设施加上户用热泵进行混合供暖。由此,通过热网中大量热泵接入不同电力馈线,热力网与配电网形成紧密互联的网状结构能源网(如图 2 所示),突破目前综合能源电热耦合网中仅由少数热源——CHP 机组提供的弱耦合,形成电热网高度耦合的复杂形态。热网中大量热泵形

成的热泵池(heat pump pools)联系着电与热的功率流<sup>[13]</sup>。热泵的电热功率转换以及转换功率的大小,受到分时电价、可再生能源、环境温度等信号的影响,而调控热泵池会影响配电网电压与频率以及热网与蓄热装置的运行。

但是,一般热用户多采用一种供热方式,因为接入集中热网的用户同时安装热泵进行混合供热会增加成本,尤其是供热网的成本很高。另外,现阶段空气源热泵的低温适应性以及室外换热器的结霜和除霜问题造成空气源热泵运行效果不理想,制约空气源热泵的推广应用。中国黄河流域、华北等寒冷地区,空气源热泵性能非常低,甚至无法运行;长江流域、华南等地区,虽然冬季空气温度较高,但空气源

热泵的结霜问题严重,导致其运行稳定性和可靠性较低<sup>[3]</sup>。这些因素使得区域供热+热泵的混合供热受到限制,制约了电热网融合统一建模理论发展。

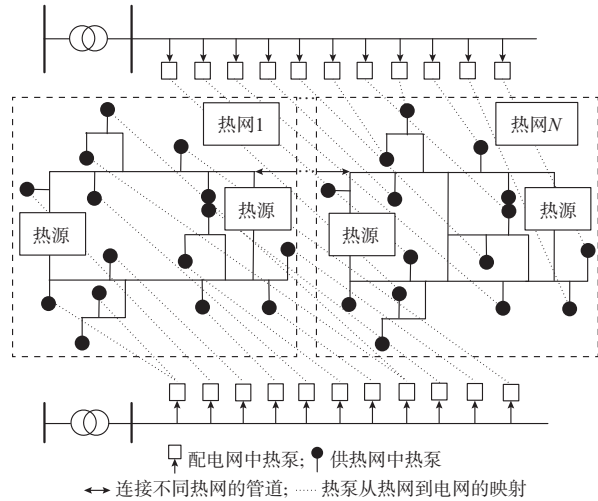


图2 配电网与热力网通过大量热泵高度耦合示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of high coupling between distribution network and heat network through a large number of heat pumps

### 1.3 5GDHC 给统一理论带来的机遇和挑战

#### 1.3.1 5GDHC 的概念与特点

如前所述,实现电热耦合网深度融合系统需要两种供热组态方式的结合,即单体建筑分别配备供能设备提供能源和分布式能源站为多个建筑提供能源,5GDHC系统的出现给这种混合供热提供了解决方案。5GDHC系统<sup>[1,2,14]</sup>或称能源总线系统(energy bus system)<sup>[3]</sup>,或称共享热网(heat sharing networks)<sup>[15-16]</sup>,是一种集成应用城区的可再生能源及未利用能源的城区冷热能源系统。欧洲在第4代热网的基础上,于2017年前后提出了5GDHC系统的概念<sup>[3]</sup>。文献<sup>[3]</sup>认为5GDHC系统就是中国的能源总线系统,早在2008年能源总线的概念就被提出,主要用于建筑暖通学科。根据大量文献调研,本文采用5GDHC的名称,与代表性文献吻合。

5GDHC系统通过集中的城区管网,将冷却水或热媒水输送到用户末端的制冷或热泵机组(如图3所示)。系统用户从冷管取水用于冷水机组的冷凝器冷却,然后向暖管输出,可以提供给其他用户的热泵用于供暖,因此,也称为冷热平衡网(balanced energy networks)<sup>[15, 6]</sup>。5GDHC系统水温接近于环境温度,用塑料管取代钢管,管道无须保温,大大降低了管道投资成本与热力传输损耗,还可大量利用分布式的可再生能源。另外,不同于空气源或土壤源热泵,5GDHC系统的恒温水源提高了末端热泵的效率,并能实现同时供冷供热。用户末端机组可

以根据用户需要启停机组,进行末端调节,公共部分的能耗仅为总循环水泵、冷热源循环水泵。

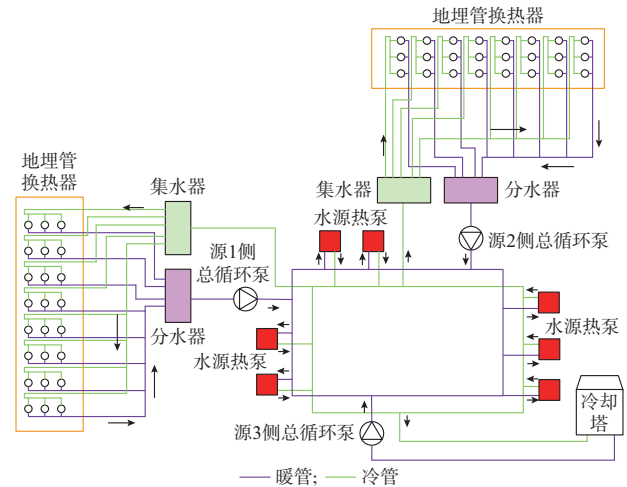


图3 土壤源与冷却塔并联形式的5GDHC系统  
Fig. 3 5GDHC system with parallel connection of soil source and cooling tower

5GDHC系统相比于传统热网,具有以下变革性的特点<sup>[3]</sup>。

- 1) 去中心化的分布式水源热泵系统,不需要冷热源能源中心,由能源站补热和蓄热。
- 2) 管网水温低至12~30℃,可利用更多的低品位可再生能源和余热废热资源。
- 3) 供水温度低,实现低温供暖。采用无保温的塑料管道,能够实现更长的输送距离。
- 4) 没有供回水管的概念,只需冷管和暖管,可以同时供冷供热。
- 5) 当供冷供热不平衡时,需要系统有储热装置。
- 6) 住宅用户的能耗完全根据家庭电表计费。

#### 1.3.2 5GDHC系统构成的电热强耦合网

从单独的水环热泵模型,扩展到单元结构中的楼宇供热供冷网,然后到连接楼宇供热供冷网的区域5GDHC系统,集中在能源中心的大型热泵和蓄热水池,以及分散到各个用户的小型热泵池,构成了5GDHC系统与配电网紧密互联的网状结构能源网,如图4所示。借鉴图论思想,根据配电网拓扑图和5GDHC系统拓扑图以及热泵、冷水机组和水泵等转换对应关系,确定电热网络之间节点的互连关系。

5GDHC系统提供低温热源,用于分布式热泵进行提升温度供暖、直接供冷或间接利用制冷机制冷。未来5GDHC系统推广后,分布式热泵的数量会急剧增加,如图4所示,电热需求侧的网级耦合愈发重要<sup>[14]</sup>。但是不同于目前热泵个体之间无关联,5GDHC系统热泵池均通过热网管段连接并相互影



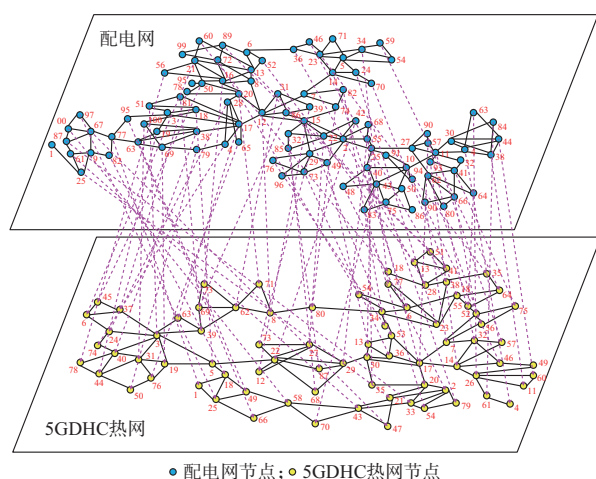


图4 通过5GDHC系统热泵池高度耦合的电热网拓扑图  
Fig. 4 Topology of electricity and heat networks highly coupled with heat pump pools of 5GDHC system

响。因此,本文的强耦合主要体现在基于5GDHC系统热泵池的需求侧新业态<sup>[17-20]</sup>。未来含高渗透率可再生能源与分布式能源的中低压配电网中,需求侧会成为产消者,配电网中紧密耦合的分布式光伏-储能与热泵池会影响潮流与电压分布。基于电热强耦合网的多能流计算,通过调节热泵池改变能流转换,以及无功补偿装置调控电力系统潮流,减小线路潮流阻塞与节点电压越限。

另一方面,5GDHC系统耦合电网不仅体现在需求侧,也体现在电源或热源侧<sup>[20]</sup>。5GDHC系统通过系统的调节和调度,保持冷管和暖管的水温恒定,尽量利用本地可再生能源及余热、废热等“免费”热源,避免开启耗能设备补热补冷,但仍然需要能源站补热补冷如大型热泵或CHP机组<sup>[1,3]</sup>。相比传统的前4代热网,5GDHC系统中大型热泵的性能系数(COP)更高且容量更小,因为后者只需要将空气温度(如 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )提升到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而传统热网需提升到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,所以相较于传统热网,5GDHC系统用大型热泵补热的效率更高。

5GDHC系统驱动的电热网高度耦合的复杂场景如图4所示。该场景改变了目前电热综合能源网由少量CHP机组构成的弱耦合形态,也改变了未来配电网的形态。多个5GDHC系统是否连接、热泵池是否向电网提供灵活性的连续调控运行策略,均会影响系统投资成本、运行成本与收益。热泵池是否作为电力负荷会影响配电网电压与频率,调控热泵会影响热泵在5GDHC系统的节点水温 and 流量,进而影响辅助热源的启停与出力以及蓄热装置运行。这些大量相互交织影响的动态过程需要一套基于5GDHC系统作为电热强耦合网前提条件的系统性网络流建模理论,以提高中低压配电网的可观

性。通过电热能流转换的调控,减小线路潮流阻塞与节点电压越限,分散地消纳分布式可再生能源。

### 1.3.3 5GDHC系统对综合能源统一建模理论的影响

5GDHC系统将分散的低品味热源集成利用,实现资源共享,并利用不同建筑负荷分布的多样性和参差率,平衡供需。分布式水环热泵产消者意味着有用户输入,也有输出,负荷节点之间的热媒双向流动。环状管网的中心循环水泵可以由分布式的变频变速水泵取代,分布式水泵安装在末端热力站中。因此,5GDHC系统水力计算需考虑双向流动与分布式水泵。热力模型方面,传统前4代热网侧重于网络温度计算,但5GDHC系统的水温接近室温,热损耗很小,需要选取合适的总线供水温度。总之,目前5GDHC系统还没有完整统一的建模、设计运行方法,因此对电热耦合网统一建模理论的影响有待研究,可从以下两方面考虑。

稳态方面,在目前综合能源系统多能流计算中,电热网的能流方程主要通过CHP机组耦合,雅可比矩阵的非对角子矩阵非零元素非常稀少;基于5GDHC系统的电热强耦合网中,由于热泵池构成了大量耦合点,因此雅可比矩阵的非对角子矩阵非零元素会大量增加。热泵机组的制热量或制冷量是进水温度(即5GDHC系统暖管或冷管水温)的函数,热网管段水温的变化会影响末端机组的出力,因此会影响系统参数的灵敏度分析,如气温变化引起电热负荷、5GDHC系统总线温度、水环热泵COP和热泵耗电功率的变化,进而影响配电网潮流与电压分布。

准稳态或动态方面,电热综合能源系统是典型的多模态异质系统<sup>[7]</sup>。在供热管网中,压力波的速度约为 $1\ 000\text{ m/s}$ ,水波传播速度通常在 $0.2\text{ m/s}$ 与 $4\text{ m/s}$ 之间。发生扰动后,在几秒钟内系统状态过渡到第1阶段(电力系统暂态过程)。此后,热水管网的水力过程在几十秒钟后发生变化,此时过渡到第2阶段即水力阶段。在几分钟内系统过渡到第3阶段,此阶段电力系统中的功率流、热网中的质量流率和水温均较上一阶段有所变化。CHP电热耦合系统中,配电网和供热网通过距离负荷较远、热惯性延迟较大的少数CHP能源站相互耦合。若CHP能源站与热用户的距离为 $1\ 000\sim 2\ 000\text{ m}$ ,则机组水温的变化到达热用户的时间可能需要大于 $1\text{ h}$ 。然而,5GDHC能源元胞的能源站仅用于补热补冷,主要通过网络中高密度分布的热泵池耦合传导。因此,需要研究其水力-热-力分阶段准稳态过程与传统CHP机组耦合的电热网之间的差异性。

#### 1.4 基于5GDHC系统能源元胞的灵活性聚合应用前景

5GDHC系统与配电网耦合最紧密的是热泵池,大量的热泵等分布式资源通过聚合的方式提升运行灵活性,实现与电网友好互动。5GDHC系统是由热泵驱动的网络,它使用超低温热网将楼宇连接在一起,并利用需求侧响应优化电力最佳使用时间。这实际上将热泵和楼宇本身变成了分布式储能系统,为电网提供了低成本的平衡服务。在一个可再生能源高度渗透的配电网中,热泵池建立起电网和热网的桥梁,并且能为电网提供辅助服务,如电压控制、配电网中的拥塞管理、平衡发电和需求,并确保电网中的稳定频率、消纳分布式可再生能源、参与需求侧响应、虚拟储能技术等<sup>[3]</sup>。

5GDHC系统通过热泵池与蓄热提升电力系统灵活性带来额外收益,而这类分布式资源的灵活性需要聚合成一定规模才能被电网调度或参与电力市场。研究显示,高比例分布式能源的聚合为1万户居民(约10 MW电力负荷)或等价的工商业负荷是最有效的。当把地理区域范围限制在中低压配电网时,这样的规模可以释放出分布式发电与负荷聚合的最大效益。负荷聚合商通过整合其内部能源供应资源和电、热等能源需求,构建适应本地能源供应能力及结构的能源需求曲线,可以显著提高系统运行效率。聚合商主要是为中小负荷提供参与市场调节的机会,整合需求侧资源并与其他市场主体进行交易。聚合商通过“虚拟电厂(VPP)”的先进信息通信技术和控制系统,实现分布式发电、储能系统、可控负荷等分布式资源的聚合和协调优化,并为电网提供能量与辅助服务。

能源元胞定义为一定的地理边界范围内,根据不同目标控制分布式资源集群的网络区域,如图5(a)所示<sup>[21]</sup>。能源元胞概念利用电力系统的分层级电压体系来构建分布式资源的聚合和控制,将分布式发电和可控负荷作为系统资源参与市场,并用作缓解分布式发电上网连接限制的手段。能源元胞概念是分布式形态系统的典型代表,不仅可成为电力系统的分布式管理机制,还可成为热力和燃气甚至交通能源的分布式管理机制。5GDHC系统的扩展与元胞的生长演化十分类似。因为5GDHC系统是渐进式的能源变革,不需要提前多年规划大型能源站,可以根据项目的开发进度逐步投入,比如先建立楼宇供热供冷网,然后连接扩张形成区域5GDHC系统。

能源元胞概念充分利用了“配电网电压分层级、5GDHC模块化延展”的特征,依据电压等级形成层

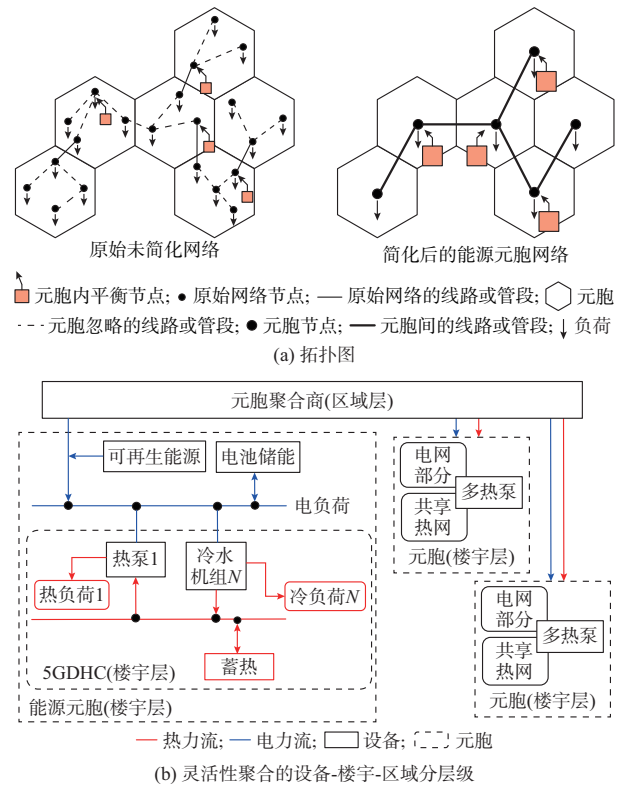


图5 能源元胞拓扑和灵活性聚合的设备-楼宇-区域分层级示意图

Fig. 5 Schematic diagram of energy cell topology and flexibility aggregation in device-building-district hierarchical level

级体系:设备层、楼宇元胞层、区域聚合商层,分别对应设备控制、本地能量管理系统(EMS)、聚合商协调管理系统。本文将楼宇元胞作为最小的元胞单元。自下而上的元胞进化模型将系统理解为自下而上、由基本成分组成的层级结构,级别成分构成了网络,个体在网络中相互作用,系统的功能则是这些相互作用的表现。层级体系的结构是复杂系统逐渐演变的内在方法,包含了进化的内涵,即要在简单结构上构建更为复杂的结构,必须使用某种类型的模块化设计,如图5(b)所示。能源元胞相较于VPP的一个重要优势:减少了中间交易环节的费用。这是因为元胞融合了微电网与VPP的功能。VPP因为关注发电资源而忽视本地负荷消费,但元胞给予用户以优惠价格使用本地发电机组的机会。基于此,本文提出了构建一套基于5GDHC系统能源元胞的分层级协调体系以及灵活性聚合与分配方法的思路。聚合商根据分时或实时电价、配电网约束等信息,协调智慧能源元胞中灵活性资源的启停与运行。

设备层:把设备资源属性及用户舒适度偏好设置发送给元胞;从元胞接收启停或出力调整指令,并进行调整。



元胞层:接收热泵、水泵与蓄热等设备资源的信息并进行聚合,计算设备出力分配的调度指令;发送出力调整指令给设备。

聚合商:接收元胞的出力列表信息并聚合,然后发送给配电网运营商(DSO),后者进行配电网运行安全域的边界越限验证及给出偏差电量罚款等指标。

利用能源元胞,供需资源的同时优化变得可能。能源元胞模型内部由于简化了网络模型,因此可以对复杂扩展网络的长时间尺度问题实现快速高效计算。然而元胞模型改变了原始网络结构,丢失了表征网络的信息,会导致原始未简化网络与简化的元胞网络模型之间的偏差。偏差指元胞之间联络线的有功和无功功率、联络管段的压力与质量流量等偏差,以及整个网络运行状态与网损。因此,可利用补偿方法以接近真实网络<sup>[21]</sup>。

如果未来5GDHC系统推广,分布式热泵的数量将会急剧增加。然而热泵池均通过5GDHC系统热网管段连接,电热网之间交互影响的动态特性与机理尚不明确。目前已有的需求侧响应方法及灵活性资源聚合方法较少涉及5GDHC系统热泵池,需要进一步研究。

蓄热方面,在5GDHC系统中,一般有3级蓄热:系统层面的季节性蓄热;末端分布式热泵能源子站的短期蓄热;用户层面的瞬间蓄热。管道本身也可以当作蓄热罐看待。在有补热的能源中心,可以利用太阳能或夜间电力对管道中的水进行预热预冷。因此,不同于传统热网,分布式蓄热、管段本身蓄热与季节性蓄热是5GDHC系统蓄热的特征,具体表现为:分布式蓄热可根据所需位置存储热能,显著降低相应管段流速峰值;5GDHC系统管径和管网流量大于常规供热管网;5GDHC系统同时供暖供冷,通常与季节性蓄热如地埋管连接。

## 2 电热网建模现状分析

### 2.1 5GDHC的研究现状

文献[3]在总结中国城市发展特点和方向的基础上,提出了适应于建设低碳城市的能源总线系统概念,在欧洲被称为5GDHC系统<sup>[1,2,16]</sup>。所谓“能源总线”就是来自于可再生能源或未利用能源的热源/热汇水,通过作为基础设施的管网输送到用户。在城市范围内,广泛存在着各种低品质的能源资源,例如浅层地表蓄热、江河湖海水、地下水、城市污水、工业余热/废热、各种工艺排热或建筑排热,以及太阳能和空气。这些低品质能源的特点是数量大但密度低,应用中存在效率低、不经济等问题。5GDHC

系统的热源采用低品位能源、可再生能源、热回收的能源,以及小部分高品位能源作为辅助热源如燃气锅炉与空气源热泵等。在用户端,总线来的水作为水源热泵的热源/热汇,经换热后回到源头,或排放(地表水)或循环再次换热(通过换热器与各种“源”和“汇”耦合)或回灌(地下水)。已有“能源总线”相关文献集中在建筑暖通学科层面,研究了能源总线与热泵的能效评价等<sup>[3,22]</sup>。5GDHC系统与第4代区域供热系统具有变革性的不同<sup>[1-2]</sup>。第4代区域供热系统是低温区域供热系统,它仍然是一种从中心能源站向末端热力站或用户集中供热的模式,采用了低温(30~60℃)供水,但系统结构与第3代没有很大差别<sup>[23]</sup>。其供热主机可以不用燃烧型锅炉而改用电力驱动热泵,或利用工业废热<sup>[24]</sup>。5GDHC系统定义为一个以水或盐水为载体介质的热能供应网,末端是带有水源热泵的混合热力站。它的工作温度非常接近环境温度,因此不适合直接供暖。输送的载体可以提供给分布式水源热泵,满足用户的个性化需求。与区域供冷供热系统相比,5GDHC系统在低负荷率情况下的经济运行和节能管理有更大的优势。5GDHC系统具有可拓展性:城区建筑很多是分期建设,负荷是逐渐增加的,环网可以适应这种扩展。另外,用户分布式水环热泵系统可以根据项目的开发进度逐步投入。5GDHC系统在中国已有多个项目投入应用<sup>[3]</sup>;国外也建成了5GDHC提升电网灵活性的项目<sup>[16]</sup>。文献[6]全面回顾总结了现代区域供热网的模型、运行与规划,但是目前5GDHC系统还没有完整统一的设计与运行方法。

5GDHC系统的物理特性表现为:1)双向网络:分布式水环热泵产消者意味着有用户输入,也有用户输出;2)管网分布:未来热力网将集成大量的分布式热源,多源环状热力网水力交汇特性复杂;3)管网流量:管网水温接近环境温度,用户侧热力站的进出口水温差小,为保证用户端热泵性能,管径和管网流量要大于常规供热管网;4)流量调节:分布式循环水泵变频调节的水力特性不仅与水泵选型有关,还与热源、水力工况、定压方式及管网拓扑结构有关;5)热泵性能:热泵机组的制热量或制冷量是进水温度的函数,热网管段水温的变化会影响末端机组的出力。

综上,目前5GDHC系统主要有以下研究方向:

- 1)仍以建筑暖通学科为主,较少涉及电网交互分析;
- 2)主要基于传统前4代热网建模,即少量能源站的辐射状网络;
- 3)5GDHC具有多源、环状、双向、超低温、末端

热泵供暖等特性,且热网管段与地理管蓄热的热动态特性复杂。

## 2.2 电热耦合网多能流建模理论

区域综合能源系统研究,在能源动力、化工以及经济学等领域,通常对电力系统简化处理,不计及潮流计算,可能导致非可行解,如电压越限等<sup>[25]</sup>。在电力系统领域,中国高校与研究机构都开展了广泛研究<sup>[4,5,26-32]</sup>。目前主要采用两类基本模型,一类是能量枢纽模型,另一类是网络拓扑模型。能量枢纽模型将电力系统的节点推广为能量枢纽,能量枢纽等效为包含多能源向量(冷/热/电/气)以及储能的输入输出端口模型<sup>[8,33]</sup>。基于网络拓扑的联合潮流模型中,文献[9,11]将管网热量传输的时延与热损失进行拆分计算,热损失采用稳态模型计算。统一能路模型通过将气、热流体的偏微分方程转化为常微分方程,可实现对气、热网络动态特性的联合仿真;通过将时域中的气、热网络模型映射至频域,可实现气网、热网与电网的统一建模<sup>[5]</sup>;文献[34]从电路的角度出发,可将气网和热网中的元件类比为电路元件,从而提出与电路分析方法相统一的综合能源系统分析方法;广义电路模型通过将多能源网络在时域的复杂特性转换为复频域的代数问题,可建立电、气、热多系统相统一的分布参数电路和网络模型等<sup>[4]</sup>。另外广义电路与统一能路理论假设为工质流量恒定,即处于仅改变供热温度的质调节运行模式<sup>[4]</sup>。质调节主要通过保持燃料输入速率恒定而改变热源的供热温度,量调节则保持热源供热温度恒定,通过改变水泵频率和阀门开度而改变管网流量。文献[10]基于网络和流的映射,用矩阵描述网络,用功率方程描述能流,通过构建转换效率矩阵与置换矩阵,将任意数量的各类能源设备映射到其电热气网所在的物理节点,构建所有设备出力与电热气网各能流方程关联的联合物理方程。文献[35]通过把多能流联合方程构建为优化模型的等式约束,研究了各种能源存储与转换设备的协调优化运行方法。文献[36]基于分解协调方法研究了电热综合能源系统优化运行方法。

网络流与运行可行域建模对综合能源的价值至关重要,因为多能源设备的使用很可能会超过网络运行限制。目前光伏发电、热泵、电动汽车渗透率的提高造成配电网潮流和电压的波动,引发配电网升级改造需求,包括改变网络结构、扩大容量,以及某些调控资源的应用如储能、有载调压变压器的使用。事实上,电热综合能源的建模仿真(不考虑优化功能)还在研究发展中,正确的建模是一项艰巨的任务:冷热网的慢动态特性、电热网的复杂相互影响与

多时空的综合能源需求响应。文献[37]通过有向加权图研究电热能量转换关系,但是没有电网与热网的网络流分析。文献[38]基于电热边界可行域概念研究了考虑区域供热管网热传导过程的CHP电热耦合系统的调度方法。文献[39]研究了考虑楼宇热惯性的电热综合能源调度的可行域方法。文献[40-41]通过闵可夫斯基和(Minkowski sum)集成多个灵活性资源的功率集,形成灵活性多面体可行区域,通过投影到二维空间,形象地显示由多个资源提供的总体灵活性。文献[42]研究了分布式资源聚合组成的VPP的可行域与灵活性运行域的计算方法与经济分析。文献[43-44]研究了多源环状供热网的热力损耗与热力暂态模型,文献[45]兼顾热网动态特性与精细化水力模型,但很少文献研究5GDHC系统中通过管段热媒相连的热泵池对配电网与热网多时间尺度动态过程的影响。

综上,当前电热综合能源网的研究大多局限于由少量热电联供机组组成的弱耦合网络,存在如下缺陷:

- 1)未考虑5GDHC系统构成的电热网高密度耦合形态。
- 2)未考虑多源环状双向5GDHC系统中热源的热交换量、总线水温度和用户热泵机组工况三者互相耦合的复杂运行调节策略。
- 3)未考虑热泵池强耦合改变了电热综合能源系统多时间尺度的水力-热力分阶段准稳态过程。

## 2.3 分布式资源的灵活性聚合方法

高渗透率可再生能源消纳问题归根结底是电力系统的灵活性不足<sup>[46-47]</sup>。当前有很多学者研究如何通过电-热综合能源系统多能互补提升电力系统运行灵活性<sup>[48-50]</sup>,文献[51]综述了电制热消纳可再生能源的模型与灵活性潜力,主要分为2类:一类是利用热网蓄热的慢动态特性,另一类是对温控负荷的灵活性聚合。

第1类主要通过部署储热装置或者电加热系统(如热泵和电锅炉)提高以热定电CHP机组的可调节能力,减少弃风问题<sup>[52]</sup>。文献[7]围绕热力管网动态特性建模及电热协调优化等方面,回顾分析了利用热力管网热惯性提升电热综合能源系统调节能力的研究方法。文献[53]全面研究了热网和冷网的慢动态特性及蕴含的调度灵活性,应用于多能优化调度。文献[52]将电热灵活性应用于解决风力发电消纳与CHP机组广泛应用之间的矛盾。文献[48]提出利用区域供热网络的蓄热能力来增加灵活性,但求解方法较复杂。文献[54]考虑热力系统多重热惯性(电储热锅炉、热网、建筑物)的电热协调



优化运行模型。文献[55]研究了含储热的电-热联供系统,应用能量流法构建包含储热、传热和漏热过程在内的系统整体能量流模型,获得系统中电能、热能的整体传输约束。文献[56]提出基于广义蓄热模型的灵活性评价方法,通过热源爬坡速率、热输入极限和热能容量这3个灵活性指标量化评估区域热力网络在为电-热系统提供平衡方面的能力。文献[57]提出了在满足热网特性以及供能网络电压、温度等节点状态约束的条件下,考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度方法。为分析热网特性和电网交流潮流约束对系统优化调度的影响,相关文献讨论了考虑与不考虑供能网络特性两种情况。文献[58]建立了通过利用电热转换技术和建筑热惯性消纳不确定可再生能源的机会约束模型。文献[59]指出热能传输延时和热网虚拟储能特性主要体现在一次热网中,二次热网及用户部分传输延时较小,动态过程不明显;进一步提出热能输运准动态模型,考虑了热能传输过程的延时性和一次热网的虚拟储能特性。在电-热综合能源系统优化运行中将热网作为调度资源加以利用,可发挥电-热系统的互补性。通过构建2种场景,对综合能源系统优化调度中一次热网的虚拟储能调节潜力进行分析。算例分析得出CHP机组出力不再追随系统热负荷,转而开始响应系统电价激励,将一部分热出力从电价较高的时段平移到电价较低的时段来达到降低系统运行成本的目的,可平移热出力的多少与热网虚拟储能的能力有关。

第2类主要通过异构、分散、多样的分布式能源进行灵活性聚合。文献[60]通过分布式协调控制灵活需求技术实现系统效益。文献[61-62]通过多种能源存储与转换设备提高综合能源系统的灵活性。少数研究灵活性优化的文献同时包含了电网潮流方程约束与热网热力流方程约束<sup>[63-64]</sup>。文献[65]提出居民楼宇电热系统的灵活性量化架构。文献[66]研究了分布式灵活性资源设备的变工况特性。文献[67]研究了热泵与光伏-储能系统运行的影响。文献[68]针对分层级协调中聚合商与上下各层交互的信息边界较不清晰,提出分层级的MPC方法聚合热泵以向电网提供灵活性。文献[17]研究了5GDHC系统通过热泵与蓄热之间的电热转换提供需求侧响应,计算了所研究项目全年向电网提供灵活性服务的收益,包含固定频率响应(FFR)、短期运行备用(STOR)与过网费(UoS),其中短期运行备用主要为减少电网阻塞。

综上,目前综合能源电热耦合系统提升电力系统灵活性的研究有以下特点:

1)主要通过温控负荷聚合(与热网无关联)或热网管段的热惯性和慢动态特性;

2)未考虑能源元胞的热泵池均通过5GDHC管段连接并相互影响;

3)未探讨同时通过调控5GDHC互联热泵池及利用热网管道与埋管蓄热的慢动态特性提升电网灵活性。

### 3 探讨

5GDHC系统驱动的强耦合能源元胞研究方案具体参见附录A。

目前,综合能源系统主要基于传统的前4代热网,热媒温度较高,用户同时接入区域供热网并安装现场锅炉或热泵实现混合供热的投资成本非常高,应用效果有限。本文基于暖通工程领域的5GDHC系统,水温接近于环境温度,用塑料管取代钢管,管道无须保温,大大降低了管道投资成本与热力传输损耗,还可大量利用分布式的可再生能源。另外,不同于空气源或土壤源,5GDHC系统的恒温水源提高了末端热泵的效率,并能实现同时供冷供热。

当前,电热综合能源网研究主要基于少量大型CHP机组的弱耦合,即通过边界外端口研究互相交互的多能源网络等值端口模型。5GDHC系统具有多源环状双向流动特性,通过高密度热泵池、蓄热与配电网紧密耦合,其热惯性动态过程与配电网之间的交互机理与传统CHP热网不同。本文提出建立基于能源元胞的耦合度更高的电-热网络模型,通过分析网络流与可行域(边界条件),可实现多时间尺度的强耦合电热网方程求解。

现阶段,电热转换提升灵活性的研究很少可以同时利用温控负荷聚合与热网热惯性。在温控负荷提升电网灵活性的研究中,所有热泵设备与热网无关联,而5GDHC系统中所有热泵均通过管段热媒相连并相互影响。本文将智慧能源元胞概念引入灵活性聚合,研究5GDHC系统热泵池作为电力系统可调控的灵活性资源以及调控热泵池对配电网、5GDHC系统及蓄热等的动态交互影响,综合解决电热多种能源形式的聚合和分配方式,为电网调峰提供新的解决思路,推进数学和控制方法在电热综合能源系统中的工程应用。

### 4 结语

电热综合能源系统是典型的综合能源系统类型,本文研究基于5GDHC系统驱动的电热网高密度深度融合网络问题,研究涉及电气工程、建筑暖通等学科交叉,通过5GDHC系统驱动,同时集成冷热



的调控慢动态和电的快动态,从网级耦合揭示不同物质性质,提升电力系统的灵活性。本文聚焦于“强耦合元胞网络流”和“智慧元胞灵活性聚合”研究,从5GDHC系统的精细化建模、高密度耦合的能源元胞网络流理论、能源元胞集的灵活性聚合等角度给出了研究思路与展望。

现阶段综合能源系统热网研究主要针对中国北方地区,若采用5GDHC系统驱动的能源元胞系统和分层级灵活性聚合方法,可望提高收益降低成本,实现应用在南方地区同时供冷供暖的目标。5GDHC系统驱动的能源元胞将成为电网削峰和消纳可再生能源的重要手段,促进能源资源优化配置和综合能效提升。未来全覆盖的能源信息网络和城市能源互联网综合监测与管理平台的建设为智慧能源元胞提供了更大的发展空间。后续将通过实际工程案例对网络流理论与灵活性聚合算法的验证等方面开展研究。本文提出的研究思路有望为电热综合能源系统建模优化注入新的活力,在可再生能源消纳、碳中和等均具有广泛的应用前景。

基于5GDHC的电热综合能源系统研究刚刚起步,希望本文工作能够引起业内关注,推动相关研究的开展。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

### 参考文献

- [1] WIRTZ M, KIVILIP L, REMMEN P, et al. 5th generation district heating: a novel design approach based on mathematical optimization[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114158.
- [2] BUFFA S, COZZINI M, D'ANTONI M, et al. 5th generation district heating and cooling systems: a review of existing cases in Europe[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 504-522.
- [3] 龙惟定,白玮,范蕊,等. 疫情之后:能源总线与第5代区域供热供冷系统的发展[J]. *暖通空调*, 2020, 50(10): 1-13.  
LONG Weiding, BAI Wei, FAN Rui, et al. After COVID-19 epidemic: development of energy bus and 5th generation district heating and cooling system [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2020, 50(10): 1-13.
- [4] 杨经纬,张宁,康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论:(二)网络模型[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 10-21.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks: Part two network model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 10-21.
- [5] 陈瑜玮,孙宏斌,郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论:(五)电-热-气耦合系统优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(24): 7928-7937.  
CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis: Part V integrated electricity-heat-gas dispatch [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(24): 7928-7937.
- [6] NOVITSKY N N, SHALAGINOVA Z I, ALEKSEEV A A, et al. Smarter smart district heating [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(9): 1596-1611.
- [7] 徐飞,郝玲,陈磊,等. 电热综合能源系统中热力管网动态建模及协调运行研究综述[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(1): 55-63.  
XU Fei, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Review of district energy network dynamic modeling and coordinate optimal operation in integrated electricity and heat energy systems [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 55-63.
- [8] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1): 145-155.
- [9] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1238-1250.
- [10] LIU X, MANCARELLA P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems [J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 336-352.
- [11] LIU X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff, England: Cardiff University, 2013.
- [12] HUANG W, ZHANG N, CHENG Y, et al. Multienergy networks analytics: standardized modeling, optimization, and low carbon analysis [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(9): 1411-1436.
- [13] FISCHER D, WOLF T, WAPLER J, et al. Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool [J]. *Energy*, 2017, 118: 853-864.
- [14] REVESZ A, JONES P, DUNHAM C, et al. Developing novel 5th generation district energy networks [J]. *Energy*, 2020, 201: 117389.
- [15] SONG W H, WANG Y, GILLICH A, et al. Modelling development and analysis on the balanced energy networks (BEN) in London [J]. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 114-125.
- [16] WANG Y, GILLICH A, LU D, et al. Performance prediction and evaluation on the first balanced energy networks (BEN): Part I BEN and building internal factors [J]. *Energy*, 2021, 221: 119797.
- [17] GILLICH A. A smarter way to electrify heat: the balanced energy network approach to demand side response in the UK [C]// European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), 2017, Hyeres, France.
- [18] EDTMAYER H, NAGELER P, HEIMRATH R, et al. Investigation on sector coupling potentials of a 5th generation district heating and cooling network [J]. *Energy*, 2021, 230: 120836.
- [19] CAI H, YOU S, WANG J, et al. Technical assessment of electric heat boosters in low-temperature district heating based on combined heat and power analysis [J]. *Energy*, 2018, 150: 938-949.

- [20] KLYAPOVSKIY S, YOU S, CAI H, et al. Integrated planning of a large-scale heat pump in view of heat and power networks [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 5-15.
- [21] TRAUPMANN A, GREIML M, KIENBERGER T. Reduction method for planning cross-energy carrier networks in the cellular approach applicable for stability assessment in low-voltage networks [J]. *E&I Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2020, 137(8): 509-514.
- [22] 孟华,王海,龙惟定. 夏热冬冷地区能源总线系统的区域能源规划方法[J]. *制冷学报*, 2017, 38(4): 50-58.  
MENG Hua, WANG Hai, LONG Weiding. District-energy planning method based on energy bus system in hot summer and cold winter areas [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 50-58.
- [23] WANG Y, ZHANG S, CHOW D, et al. Evaluation and optimization of district energy network performance: present and future [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110577.
- [24] FANG H, XIA J, JIANG Y. Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat [J]. *Energy*, 2015, 86: 589-602.
- [25] SAMSATLI S, SAMSATLI N J. A multi-objective MILP model for the design and operation of future integrated multi-vector energy networks capturing detailed spatio-temporal dependencies [J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 893-920.
- [26] 王成山,吕超贤,李鹏,等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(23): 6791-6803.  
WANG Chengshan, LYU Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6791-6803.
- [27] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5063-5072.  
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [28] 贾宏杰,王丹,徐宪东. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(7): 198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 198-207.
- [29] 黎静华,朱梦姝,陆悦江,等. 综合能源系统优化调度综述[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2256-2272.  
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. A review on the optimal scheduling of integrated energy systems [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [30] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4318-4328.  
DING Tao, MOU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy Internet and its operation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4318-4328.
- [31] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1305-1316.  
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1305-1316.
- [32] 任洪波,邓冬冬,吴琼,等. 基于热电共融的区域分布式能源互联网协同优化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4023-4034.  
REN Hongbo, DENG Dongdong, WU Qiong, et al. Collaborative optimization of distributed energy network based on electricity and heat interchanges [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4023-4034.
- [33] ZHOU B, DAI X, LI C B, et al. Optimal scheduling of biogas-solar-wind renewable portfolio for multicarrier energy supplies [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6229-6239.
- [34] 陈皓勇,李明,邱明,等. 时变能量网络建模与分析[J]. *中国科学:技术科学*, 2019, 49(3): 243-254.  
CHEN Haoyong, LI Ming, QIU Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(3): 243-254.
- [35] LIU X, YAN Z, WU J. Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices [J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 256-273.
- [36] 张雨曼,刘学智,严正,等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(11): 2372-2386.  
ZHANG Yuman, LIU Xuezhong, YAN Zheng, et al. Decomposition-coordination based optimization for PV-BESS-CHP integrated energy systems [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(11): 2372-2386.
- [37] 田立亭,程林,李荣,等. 基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6471-6483.  
TIAN Liting, CHENG Lin, LI Rong, et al. A multi-scenario energy efficiency evaluation method for district multi-energy systems based on weighted directed graph [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6471-6483.
- [38] JIANG T, MIN Y, ZHOU G, et al. Hierarchical dispatch method for integrated heat and power systems considering the heat transfer process [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110412.
- [39] PAN Z, GUO Q, SUN H. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia [J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 395-407.
- [40] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(9): 1496-1517.
- [41] 栗子豪,李铁,吴文传,等. 基于Minkowski Sum的热泵负荷调度灵活性聚合方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 14-21.  
LI Zihao, LI Tie, WU Wenchuan, et al. Minkowski Sum based flexibility aggregating method of load dispatching for heat pumps [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 14-21.
- [42] WANG H, RIAZ S, MANCARELLA P. Integrated techno-economic modeling, flexibility analysis, and business case

- assessment of an urban virtual power plant with multi-market co-optimization[J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114142.
- [43] WANG H, MENG H. Improved thermal transient modeling with new 3-order numerical solution for a district heating network with consideration of the pipe wall's thermal inertia[J]. *Energy*, 2018, 160: 171-183.
- [44] WANG H, MENG H, ZHU T. New model for onsite heat loss state estimation of general district heating network with hourly measurements [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 157: 71-85.
- [45] 刘洪, 赵晨晓, 葛少云, 等. 基于精细化热网模型的电热综合能源系统时序潮流计算[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(4): 63-72. LIU Hong, ZHAO Chenxiao, GE Shaoyun, et al. Sequential power flow calculation of power-heat integrated energy system based on refined heat network model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4): 63-72.
- [46] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 9-20. LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 9-20.
- [47] DING Y, SHAO C, YAN J, et al. Economical flexibility options for integrating fluctuating wind energy in power systems: the case of China[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 426-436.
- [48] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 12-22.
- [49] 陈群, 郝俊红, 陈磊, 等. 电-热综合能源系统中能量的整体输运模型[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 7-13. CHEN Qun, HAO Junhong, CHEN Lei, et al. Integral transport model for energy of electric-thermal integrated energy system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 7-13.
- [50] 邵常政. 面向灵活性与可靠性的电-热综合能源系统运行与规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. SHAO Changzheng. Operation and planning of the integrated heat and electricity systems considering the operational flexibility and reliability constraints [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [51] BLOESS A, SCHILL W-P, ZERRAHN A. Power-to-heat for renewable energy integration: a review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1611-1626.
- [52] CHEN X, MCELROY M B, KANG C Q. Integrated energy systems for higher wind penetration in China: formulation, implementation, and impacts[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 1309-1319.
- [53] 陈瑜玮, 王彬, 潘昭光, 等. 计及用户灵活性和热惯性的多能园区优化调度: 研发及应用[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 29-37. CHEN Yuwei, WANG Bin, PAN Zhaoguang, et al. Optimal dispatch for multi-energy park considering flexibility and thermal inertia of users: research, development and application [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 29-37.
- [54] 孙鹏, 滕云, 冷欧阳, 等. 考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6059-6071. SUN Peng, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6059-6071.
- [55] 郝俊红, 陈群, 葛维春, 等. 热特性对含储热电-热联供系统的综合调度影响[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2681-2689. HAO Junhong, CHEN Qun, GE Weichun, et al. Influence of thermal characteristics on the synthetic scheduling of an integrated heat and power supply system with heat storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2681-2689.
- [56] JIANG Y, WAN C, BOTTERUD A, et al. Exploiting flexibility of district heating networks in combined heat and power dispatch [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2174-2188.
- [57] 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.
- [58] LI Y, WANG C, LI G, et al. Improving operational flexibility of integrated energy system with uncertain renewable generations considering thermal inertia of buildings [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207: 112526.
- [59] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 132-142. WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 132-142.
- [60] STRBAC G, PUDJIANTO D, AUNEDI M, et al. Cost-effective decarbonization in a decentralized market: the benefits of using flexible technologies and resources [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2019, 17(2): 25-36.
- [61] CESENA E A M, GOOD N, PANTELI M, et al. Flexibility in sustainable electricity systems: multivector and multisector nexus perspectives [J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2019, 7(2): 12-21.
- [62] GOOD N, MANCARELLA P. Flexibility in multi-energy communities with electrical and thermal storage: a stochastic, robust approach for multi-service demand response [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 10(1): 503-513.
- [63] MORVAJ B, EVINS R, CARMELIET J. Decarbonizing the electricity grid: the impact on urban energy systems, distribution grids and district heating potential [J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 125-140.
- [64] CESENA E A M, MANCARELLA P. Energy systems integration in smart districts: robust optimisation of multi-energy flows in integrated electricity, heat and gas networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(1): 1122-131.
- [65] BAMPOULAS A, SAFFARI M, PALLONETTO F, et al. A fundamental unified framework to quantify and characterise



energy flexibility of residential buildings with multiple electrical and thermal energy systems[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116096.

- [66] 李建林,田立亭,程林,等.考虑变工况特性的微能源系统优化规划:(一)基本模型和分析[J].*电力系统自动化*,2018,42(19):18-26.

LI Jianlin, TIAN Liting, CHENG Lin, et al. Optimal planning of micro-energy system considering off-design performance: Part one general model and analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(19): 18-26.

- [67] LIU X, ZHANG P, PIMM A, et al. Optimal design and operation of PV-battery systems considering the interdependency of heat pumps[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 526-536.

- [68] FISCHER D, BERNHARDT J, MADANI H, et al. Comparison of control approaches for variable speed air source heat pumps considering time variable electricity prices and PV[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 93-105.

刘学智(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向:综合能源/多种能源网规划与运行。E-mail:liuxz@sjtu.edu.cn

严正(1964—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行、电力系统稳定分析、电力市场。E-mail:yanz@sjtu.edu.cn

解大(1969—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统仿真和混合能源网等。E-mail:xieda@sjtu.edu.cn

(编辑 代长振)

## Research and Prospect of Strong Coupling Pathway for Electricity-Heat Integrated Energy Network

LIU Xuezhi<sup>1</sup>, YAN Zheng<sup>1</sup>, XIE Da<sup>1</sup>, ZHANG Peichao<sup>1</sup>, WANG Hai<sup>2</sup>, LONG Weiding<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** At present, the research of electricity-heat integrated energy networks is mostly based on the traditional heat network and limited to the weak coupling network composed of a small number of combined heat and power units. The energy cells driven by the 5th generation district heating and cooling (5GDHC) system can realize the high-density mesh integrated electricity-heat network through the heat pump pool and change the interactive form of the electricity-heat network. This paper discusses the great opportunities and challenges brought by the 5GDHC system to the unified modeling theory of integrated energy electricity-heat coupling network, and the broad application prospect of energy cell flexibility aggregation based on the 5GDHC system. Furthermore, the research status of the 5GDHC system, the multi-energy flow modeling theory of electricity-heat coupling network, and the flexibility aggregation method of distributed resources are summarized. Aiming at the opportunity of energy cells using the heat pump pools and the heat network thermal inertia to improve the flexibility of the power grid, the research idea of energy cell network flow theory and flexibility aggregation method driven by the 5GDHC system are proposed: the interaction mechanism and feasible region analysis of thermal dynamics from heat pump pool to distribution network and hierarchical coordinated optimization method for flexible aggregation and allocation of heterogeneous smart energy cell interconnection.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0905000).

**Key words:** integrated energy system; district heating; district heating and cooling system; strong coupling network; energy bus; energy cell; heat pump; flexibility aggregation

