

基于 5GDHC 系统的电-热双向耦合建模仿真与准稳态分析

张瑞腾, 李 凌

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以 5GDHC 系统为基础, 深度双向耦合电力网络, 构建了具有复杂新特性的新型电-热双向耦合网络仿真模型。考虑到新型互联网络耦合节点以及耦合方式的改变可能引发运行阶段的安全性问题, 引入多时间尺度分析方法, 划分电-热网络准稳态阶段, 通过添加扰动探讨 5GDHC 系统与电力网络在不同准稳态阶段的相互作用机制, 并分析其与传统电-热网络在交互行为上的差异性。最后, 通过某区域 12 节点配电网、26 节点供热网的综合能源系统验证模型以及准稳态分析的有效性。仿真结果表明: 时域内网络冷热互补功率可达到 13.5 MW, 低温运行下的热损耗仅占网络供热量的 1.3%, 而反映网络水力特性的水力交汇点数量最大增至 5 个; 准稳态分析则揭示了在电负荷开断状态下相比于传统电-热网络, 新型电-热网络的水力变化更加显著, 达到了 5.7 kg/s, 而热力变化相对平缓, 仅为 0.054 °C, 此外, 扰动并不会对建筑的室内温度产生影响。

关键词: 综合能源系统; 双向耦合; 5GDHC 系统; 时域仿真; 准稳态分析

中图分类号: TK 019 **文献标志码:** A

Electro-thermal bidirectional coupling modeling simulation and quasi-steady-state analysis based on 5GDHC system

ZHANG Ruiteng, LI Ling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the fifth generation district heating and cooling (5GDHC) system with deep bidirectional coupling of electric power network, a simulation model of a new electro-thermal bidirectional coupling network with complex new characteristics was constructed. Considering that the coupling nodes and coupling modes of the new interconnection network had changed, which could lead

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476102)

第一作者: 张瑞腾(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 综合能源系统建模与仿真。E-mail: 15161221540@163.com

通信作者: 李 凌(1976—), 女, 教授。研究方向: 微尺度传热、电子设备热管理、能源高效利用。E-mail: lil@usst.edu.cn

引文格式: 张瑞腾, 李凌. 基于 5GDHC 系统的电-热双向耦合建模仿真与准稳态分析[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(2): 148-157.

Citation: ZHANG Ruiteng, LI Ling. Electro-thermal bidirectional coupling modeling simulation and quasi-steady-state analysis based on 5GDHC system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(2): 148-157.

to security issues in the operation stage, the multi-time-scale analysis method was introduced to divide the quasi-steady-state stages of the electro-thermal network. The interaction mechanism between the 5GDHC system and the electric power network was explored by adding disturbances in different quasi-steady-state stages, and the differences in interaction behaviors between it and the traditional electro-thermal network were analyzed. Finally, the validity of the model and quasi-steady-state analysis was verified through the integrated energy system of a 12-node distribution network and a 26-node heating network in a certain area. The simulation results show that the complementary cold and heat power of the network can reach 13.5 MW in the time domain, the heat loss under low temperature operation only accounts for 1.3% of the network heat supply, and the number of hydraulic junction points reflecting the hydraulic characteristics of the network is increased to a maximum of 5. The quasi-steady-state analysis reveals that compared with the traditional electro-thermal network, the hydraulic change of the new electro-thermal network is more significant, reaching 5.7 kg/s, while the thermal change is relatively gentle, only 0.054 °C. In addition, the disturbance does not affect the indoor temperature of the building.

Keywords: *integrated energy system; bidirectional coupling; 5GDHC system; time domain simulation; quasi-steady-state analysis*

综合能源系统 (integrated energy system, IES) 推动了不同能源形式之间的耦合与互动, 在能源利用效率和可再生能源模块化开发方面具有显著优势。传统供热与制冷系统存在能源损耗、环境污染和无法满足多样化需求等问题^[1-2], 而第五代区域供热供冷 (the fifth generation district heating and cooling, 5GDHC) 系统接入低品位余热和清洁可再生能源, 减少了环境污染和能源损耗, 并且可支持多样化需求, 形成网络内冷量和热量的流动互补^[3]。因此, 5GDHC 系统替代传统供热供冷系统整合入 IES 具有很大的应用价值。

目前, 已有文献探讨了 5GDHC 系统在冷热功率互补方面的潜力^[4], 以及在能源高效利用方面的优势^[5], 同时亦研究了其对电力生产问题的缓解^[6]等议题。虽然 5GDHC 系统模型的构建方法已相对成熟, 但与其他网络的耦合关系, 特别是与电力网络之间的双向耦合, 仍需进一步深入研究。此外, 现有研究大多集中在 IES 的经济与优化方面^[7-9], 较少考虑异质网络之间的耦合关系和互动机制^[10], 而这些较少考虑的因素关系到运行阶段的安全性问题。Dancker 等^[11]提出了一种基于灵敏度因子的新方法, 用于估计综合能源系统中单元功率变化对功率流和计算时间的影响。潘昭光等^[12]提出了 IES 预想事故集的概念, 说明了开展多能流静态安全分析的必要性。随后, 通过划分准稳态阶段分析区域电力和供热系统的相互作用机

制, 为进一步的在线安全分析和经济调度提供基础^[13]。在已有的 IES 运行安全性的研究中, 热力网络局限于集中供热系统, 而在 5GDHC 系统与配电网高密度网状耦合且双向交互的场景下, 网络间耦合节点和耦合方式都会有所改变, 网络互动更加密切, 进而引发的安全问题也会更加突出。

为此, 在网络建模方面, 为适应具有不同物理性质的网级高密度双向耦合新形态, 本文构建了新型电-热双向耦合的综合能源网络流模型, 并给出其潮流计算流程; 在互动机制方面, 本文将新型电-热综合能源网络稳态过程根据多时间尺度特征划分为 4 个准稳态阶段, 探讨电网扰动下 5GDHC 系统与电力网络的交互机制以及可能存在的安全隐患, 并对比分析其与传统电-热网络在交互机制上的差异性。最后, 通过某区域综合能源系统案例验证所提模型和准稳态分析的有效性。

1 新型电-热综合能源系统建模

1.1 电-热综合能源稳态模型

基于 5GDHC 系统的复杂特性, 本文搭建了耦合配电网的电-热综合能源网络稳态模型。

1.1.1 电网模型

电力系统潮流模型已经发展得非常成熟完备, 本文用交流潮流模型来描述电力网络的运行特性:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： ΔP_i 、 ΔQ_i 分别表示节点*i*处的有功、无功不平衡量； P_i^{sp} 、 Q_i^{sp} 分别表示节点*i*处的注入有功、无功功率； V 表示节点的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 分别表示节点*i*到节点*j*的电导和电纳； θ_{ij} 表示节点*i*到节点*j*的电压相角差。

1.1.2 热平衡单元模块的构建

以电锅炉作为辅助热源，集成低温热源构成5GDHC系统的热平衡单元，如图1所示。

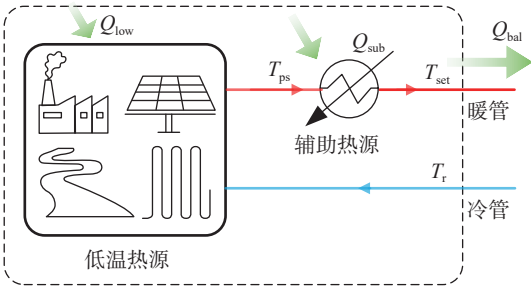


图1 热平衡单元模块示意图

Fig.1 Schematic diagram of the thermal balance unit module

热平衡单元内， $T_{\text{ps}} < T_{\text{set}}$ 时，电锅炉开启，热功率满足如下关系式：

$$Q_{\text{sub}} = c_p m (T_{\text{set}} - T_{\text{ps}}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{bal}} = Q_{\text{sub}} + Q_{\text{low}} \quad (3)$$

反之，电锅炉关闭，热功率满足如下关系式：

$$Q_{\text{sub}} = 0 \quad (4)$$

$$Q_{\text{bal}} = Q_{\text{low}} = c_p m (T_{\text{set}} - T_r) \quad (5)$$

式中： Q_{bal} 、 Q_{low} 、 Q_{sub} 分别表示热平衡单元、低温热源和电锅炉的热功率； c_p 表示水的比定压热容； T_{set} 表示热平衡单元的设定供水温度； T_{ps} 表示低温热源的出口温度； m 表示流经设备的质量流量； T_r 表示热平衡单元的回水温度。

1.1.3 建筑变电站模块的构建

对于单一负荷需求的建筑，变电站内只需运行可逆热泵或者制冷机，当建筑同时有冷热负荷需求时，则需要热泵和制冷机同时运行，即为“热力产销者”^[4]，如数据中心和大型超市等^[14]。下面分两部分介绍建筑变电站模型。

a. 热泵

热泵内部的能量关系式如下：

$$Q_{\text{evap}} + P_{\text{hp}} = Q_{\text{cond}} \quad (6)$$

式中： Q_{evap} 表示蒸发器从外部吸收的热量； Q_{cond} 表示冷凝器向外部释放的热量； P_{hp} 表示压缩机消耗的电量。

热泵的输出热量与输入电量之比为评价热泵性能的指标，称为性能系数 H_{cop} ，其计算公式为

$$H_{\text{cop_h/c}} = \frac{Q_{\text{cond/evap}}}{P_{\text{hp}}} \quad (7)$$

式中， $H_{\text{cop_h/c}}$ 表示热泵制热/制冷模式下的性能系数。

假设热泵的性能系数大致遵循卡诺循环的效率，则与冷暖管温度构成的强函数如下：

$$H_{\text{cop_h}} = \eta_{\text{carnot}} \frac{\bar{T}_{\text{cond}}}{\bar{T}_{\text{cond}} - \bar{T}_{\text{evap}}} \quad (8)$$

$$H_{\text{cop_c}} = \eta_{\text{carnot}} \frac{\bar{T}_{\text{evap}}}{\bar{T}_{\text{cond}} - \bar{T}_{\text{evap}}} \quad (9)$$

式中： η_{carnot} 表示卡诺比例因子，代表热泵 H_{cop} 理论值与热力学最大值的比值； $\bar{T}_{\text{evap}}$ 、 $\bar{T}_{\text{cond}}$ 表示热泵蒸发器侧和冷凝器侧进出口水的平均温度。

b. 热力产销者

图2展示了热力产销者的内部能量交互以及与外部冷暖管网的能量交互。

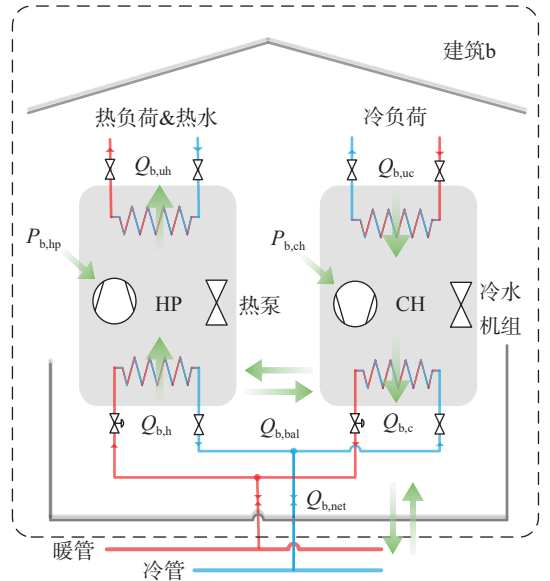


图2 热力产销者示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat prosumer

变电站内热泵为满足建筑原始热负荷所消耗的热功率 $Q_{\text{b,h}}$ ，可由热泵的性能系数 H_{cop} 以及该建筑原始热负荷 $Q_{\text{b,uh}}$ 计算得出，制冷模式下同理可推：

$$\begin{cases} Q_{b,h} = Q_{b,uh} \left(1 - \frac{1}{H_{cop_h}} \right) \\ Q_{b,c} = Q_{b,uc} \left(1 + \frac{1}{H_{cop_c}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Q_{b,uh}$ 表示建筑 b 的原始热负荷; $Q_{b,uc}$ 表示建筑 b 的原始冷负荷; $Q_{b,h}$ 表示热泵满足原始热负荷消耗的热功率; $Q_{b,c}$ 表示冷水机组满足原始冷负荷所释放的余热功率; b 表示独栋建筑。

余热功率大小直接影响变电站内以及变电站之间的能量交互。

变电站内能量交互可用 $Q_{b,bal}$ 表示:

$$Q_{b,bal} = \min \{ Q_{b,h}, Q_{b,c} \} \quad (11)$$

变电站与其他变电站之间的能量交互可用 $Q_{b,net}$ 表达:

$$Q_{b,net} = Q_{b,h} - Q_{b,c} \quad (12)$$

$Q_{b,net}$ 计算结果中的正负号代表能量流动的方向。

1.1.4 管道模型

由于管道设计温度接近地面温度, 管道选择使用非保温塑料材质。假设地面具有无限热容, 管道埋深 y 处的无扰动地面温度计算如下:

$$T_{ground} = T_m + A_s e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}}} \cos \left(\Omega \tau - y \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}} \right) \quad (13)$$

式中: T_{ground} 表示地层某一深度在某一时刻的无扰动温度; A_s 表示地层表面温度波幅; T_m 表示地层表面年平均温度; y 表示管道地埋深度; α 表示地层材料的导温系数; τ 表示计算时间, 以 7 月份为计算原点; Ω 表示温度波的波动频率, 值为 0.000717 rad/h 。

通过管段温降方程描述管道与周围地面之间的热损失 (或热增益)。管段的温降方程为

$$T_{end} = (T_{start} - T_{ground}) e^{-\frac{\lambda L}{c_p m}} + T_{ground} \quad (14)$$

式中: T_{end} 表示管段末端的温度; T_{start} 表示管段始端的温度; λ 表示管段单位长度的总传热系数; L 表示管段长度。

1.1.5 水泵模型

水泵作为综合能源网络的动力装置, 为介质在网络内的循环提供动力。水泵的电力消耗为

$$P_p = \frac{m_p g H_p}{10^6 \eta_p} \quad (15)$$

式中: P_p 表示水泵的电力消耗; m_p 表示流过水泵的质量流率; H_p 表示水泵的泵送水头; η_p 表示水泵的效率; g 表示重力加速度。

1.2 新型电-热综合能源准稳态模型的构建

为了更好地理解扰动在新型电-热综合能源系

统中的传递过程, 本文在稳态模型之外增加了热负荷模型、热交换器模型, 并根据多时间尺度特征划分了准稳态阶段。

1.2.1 建筑热负荷及热交换器计算模型

建筑热负荷的计算模型如下^[15]:

$$Q_b = q_v V_b (T_n - T_a) \quad (16)$$

式中: Q_b 表示建筑热负荷; q_v 表示建筑的容积热指数; V_b 表示建筑的有效体积; T_n 表示建筑的室内温度; T_a 表示环境温度。

供暖状态下, 热交换器将热泵冷凝器释放出的热量传递到建筑物中, 其计算模型如下:

$$Q_r = KF \left(\frac{T_s + T_o}{2} - T_n \right) \quad (17)$$

式中: Q_r 表示热交换器的换热量; K 表示热交换器传热系数; F 表示热交换器总换热面积; T_s 、 T_o 表示热交换器的进出口温度。

当系统达到稳态时, 热泵冷凝器释放出的热量、热交换器的换热量和建筑的热负荷三者相等, 即

$$Q_{cond} = Q_r = Q_b \quad (18)$$

本文只在准稳态中引入建筑热模型和热交换器模型。

1.2.2 分阶段准稳态模型的构建

IES 是一个复杂系统, 由多个具有不同传输速度和调节能力的异质网络组成, 展现出多时间尺度的动态特征, 如表 1 所示。

表 1 IES 能量流的动态响应速度和时间比较

Tab.1 Comparison of the dynamic response speed and time of the IES energy flow

响应类型	电力流	水力工况	热力工况	建筑热力
响应速度	光速响应	声速响应	质量流速响应	取决于热容量
响应时间	数秒	数秒到数分	数分钟到数小时	数小时到数天

鉴于异质网络间的多时间尺度特性, 当 IES 遭受扰动或故障时, 其恢复至稳态需要一段时间^[16]。在此过程中, 可能对 IES 的经济性和安全性产生影响。若采用稳态分析方法研究 IES, 将无法精确模拟系统的瞬态过程和故障响应; 而动态模拟虽能满足此要求, 但其时间和计算需求较高, 不利于扰动后状态的快速评估。因此, 根据多时间尺度特性, 本文将稳态过程划分为 4 个准稳态阶段^[13], 以实现对扰动所引发安全问题的快速高效评估。

如表2所示，阶段1为综合能源多能流仿真的稳态阶段。阶段2为扰动后的首个阶段，电网系统在数秒内重新达到准稳态。随后，鉴于热网及用户变电站具有较大的热惯性，水力工况相较于热力工况先达到准稳态。阶段3中，热网流质已在网络中完成循环，热网、建筑变电站的热力工况及热交换器工况随之发生变化。阶段4为扰动后的最后一个阶段，当响应时间达到一定程度，建筑物室内温度发生改变。至此，系统重新达到一个新的稳态，表2中各阶段所选模型构成了新

表2 新型电-热综合能源准稳态阶段模型

Tab.2 Model of quasi-steady-state of a new electro-thermal integrated energy

模型	阶段1	阶段2	阶段3	阶段4
电网模型	√	√	√	√
热网、建筑变电站水力模型	√	√	√	√
热网、建筑变电站热力模型	√	—	√	√
热交换器模型	√	—	√	√
建筑物热模型	√	—	—	√

型电-热综合能源分阶段准稳态模型。

2 新型电-热综合能源系统潮流求解

新型电-热综合能源系统不再局限于通过少量热电联产(combined heating and power, CHP)机组进行弱耦合^[4]，而是在CHP机组、辅助热源、分布式水泵以及众多的建筑变电站之间形成深度融合。本文采用牛顿-拉夫逊法中的分解法^[17-19]求解基于5GDHC系统的新型电-热综合能源网络潮流，并提出求解框架，如图3所示，对于准稳态的潮流计算需引入阶段准稳态特征。图中， ε 表示误差精度。

3 案例分析

本文以北方寒冷地区某园区为研究对象，以该园区11月至次年3月供暖季中的每月典型日作为仿真时域。为了方便结果的展示和分析，将5个月中的典型日数据按照小时精度进行统一描

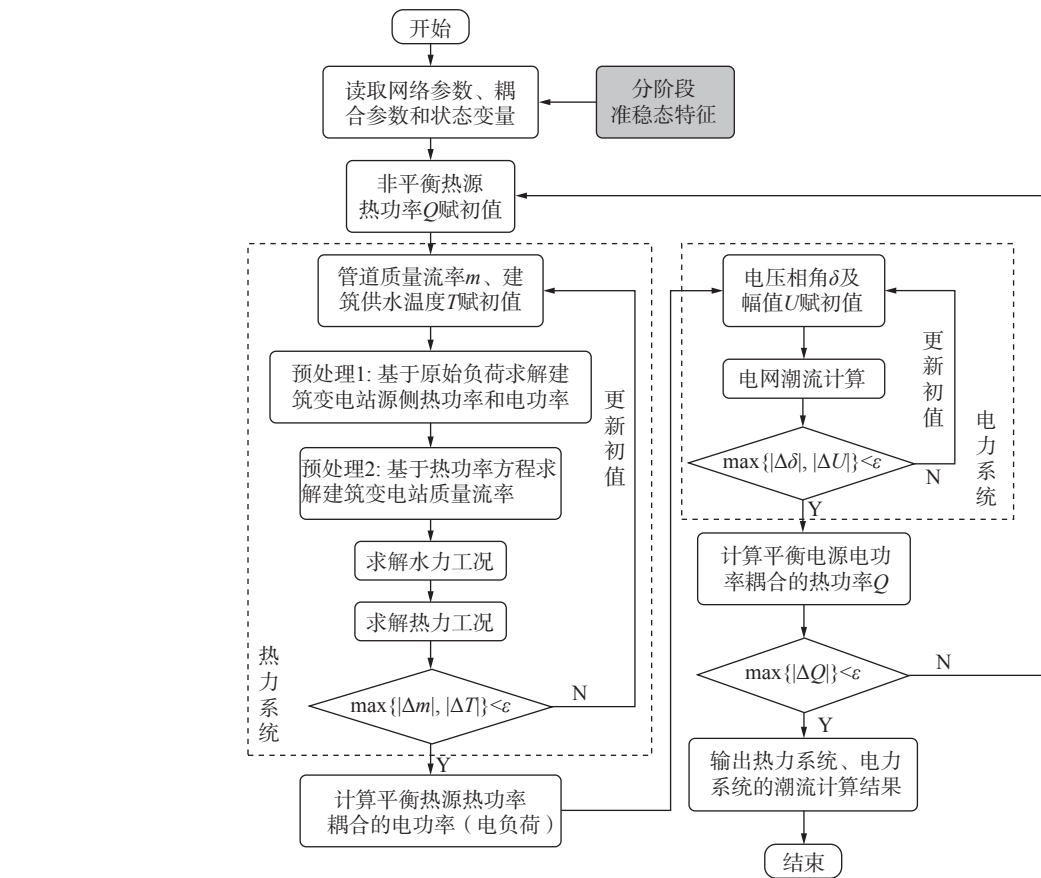


图3 基于5GDHC系统的电-热综合能源潮流计算流程图

Fig.3 Flow chart of electro-thermal integrated energy flow calculation based on 5GDHC system

述, 各月份典型日对应的时间详见表 3。鉴于相邻月份典型日首尾时刻的负荷量相差较小, 对数据结果在不同典型日的连接点采用连续性处理的方式。图 4 展示了园区建筑在典型日的冷热负荷和电负荷的逐小时需求。

表 3 典型日对应时间表

Tab.3 Timetable corresponding to typical days

典型日	对应时间/h
11月典型日	0~24
12月典型日	24~48
1月典型日	48~72
2月典型日	72~96
3月典型日	96~120

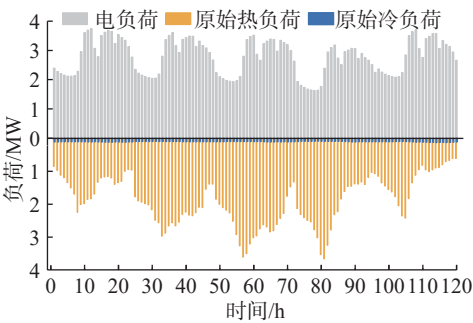


图 4 园区建筑典型日逐时冷热负荷和电负荷

Fig.4 Hourly cooling, heating and electricity loads of typical days in the park buildings

3.1 系统描述

本文通过 Matlab 编程和 Matpower 进行联合仿

真, 以 5GDHC 系统为基础搭建的电-热综合能源网络拓扑如图 5 所示, 包含 12 节点配电网和 26 节点供热网。

电力系统装配 185 mm² 电缆, 阻抗为 0.164+ j0.080 Ω/km, 负荷的功率因数为 0.95, 母线 E7 连接发电机, 母线 E4、E6、E10 和 E12 连接热网以外电负荷, 热网中的建筑变电站、水泵以及电锅炉集总成 6 个模块, 分别连接到电力系统母线 E2、E3、E5、E8、E9 以及 E11 上, 配电网基准容量为 1 MV·A, 基准电压为 11 kV。热力系统中, 由低温热源、电锅炉组成的热平衡单元, 以及 CHP 机组作为网络热源为 5GDHC 系统供热。变电站内用户侧供热温度为 60 ℃, 供冷温度为 10 ℃, 热泵的进出口设计温差为 5 ℃, 在供暖需求为主的供暖季保持暖管出水温度为恒定的 25 ℃, 建筑物室内温度设定为 20 ℃。

案例所涉及的设备和土壤环境关键参数如表 4 所示。

3.2 电功率分布结果

综合能源园区供暖季典型日的电功率平衡图如图 6 所示。其中, 电锅炉作为 5GDHC 系统的辅助热源, 只有在暖管温度低于设定值时才会启动并消耗电力。由于 5GDHC 系统冷热管道的低温特性使得全时域内机组的 H_{cop} 变化并不明显, 建筑变电站的电负荷随时间变化的趋势与图 7 中建筑的原始热负荷趋势一致。由图可以看出, 园区的发电功率略大于耗电功率, 这是由配电网的损耗引起的。电网损耗为 21.6 MW, 占该园区发电功

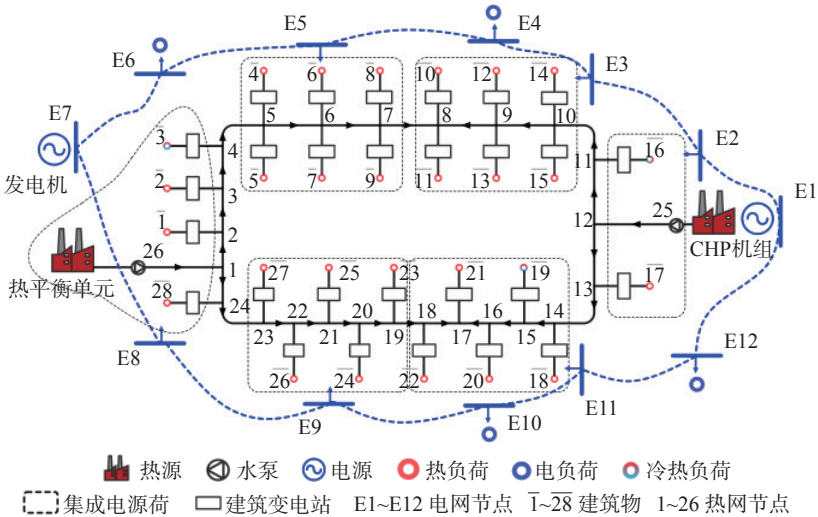


图 5 配电网与 5GDHC 系统耦合的综合能源拓扑图

Fig.5 Integrated energy topology diagram of distribution network coupled with 5GDHC system

表 4 设备及土壤环境关键参数

Tab.4 Key parameters of equipment and soil environment

设备及土壤环境	参数类型	数值
CHP机组	电热比	1.8
电锅炉	制热效率	0.95
热泵	卡诺比例因子	0.5
水泵	工作效率	0.6
土壤环境	地理深度/m	1
	地层材料导热系数/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0.85
	地层表面年平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	16
	底层表面温度波幅/ $^{\circ}\text{C}$	13.35

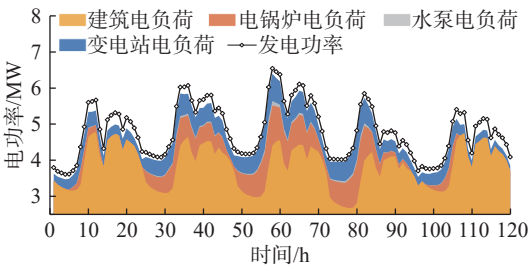


图 6 园区供暖季典型日的电功率平衡图

Fig.6 Electric power balance diagram of typical days during the park heating season

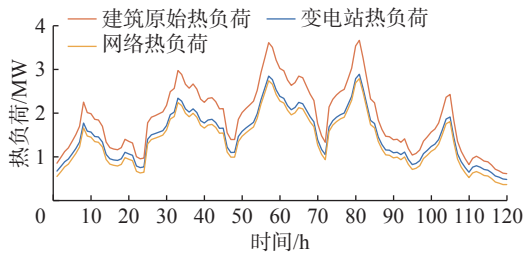


图 7 园区建筑原始热负荷、变电站热负荷以及网络热负荷曲线
Fig.7 Curves of original heat load of building, heat load of substation and network in the park

率的 3.7%，峰值损耗发生在 17 h 处，为 0.325 MW。

3.3 冷热功率互补结果

图 7 展示了园区供暖季典型日的建筑原始热负荷 $\sum Q_{b,uh}$ 、热泵满足原始热负荷所需提供的热功率，即变电站热负荷 $\sum Q_{b,h}$ ，以及冷热互补后冷暖管网所需提供的热功率，即网络热负荷 $\sum Q_{b,net}$ 。

由建筑热负荷曲线到变电站热负荷曲线，总热负荷减小为 179.9 MW，这是由于热泵蒸发侧的供热量小于冷凝侧的放热量，减少量为热泵所消耗的电功率。由建筑热负荷曲线到网络热负荷曲线，总热负荷进一步降低至 166.4 MW。这是由于

热力产销者内部制冷设备所产生的余热被变电站内或其他变电站内热泵吸收利用，其所围成面积体现为冷热互补功率，为 13.5 MW。本案例中热力产销者建筑对应为图 5 中编号为 3、16 和 19 的建筑。

冷暖管网作为建筑变电站的热源，其网络热负荷主要由低温热源、电锅炉组成的热平衡单元以及热电联产机组来满足，如图 8 所示。由于网络在传输热量时存在损耗，可以看出，热源的累加出力略高于网络热负荷，但并不显著，这是由于管网温度接近环境温度，热损耗相对于传统的绝缘管道更小。时域内总热损耗为 2.3 MW，占冷热管网所携带热量的 1.3%，环境温度在 2 月份典型日达到最低，因此，损耗大多发生在该时间段内，时间 90 h 处产生的热损耗为时域内峰值。

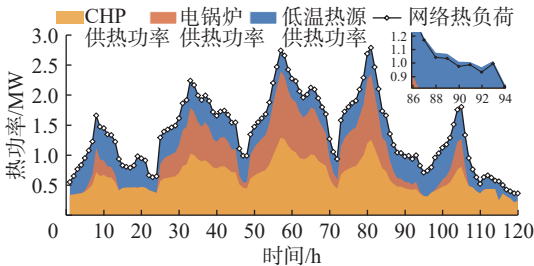


图 8 园区供暖季典型日的热功率平衡图

Fig.8 Thermal power balance diagram of typical days during the park heating season

3.4 质量流率温度变化结果

在供暖季，园区内的质量流率随时间发生变化，具体趋势如图 9(a)所示。在 5GDHC 系统中，由于冷热管道的温度差保持恒定，质量流率的变化趋势与网络热负荷的变化趋势保持一致。在仿真时域内，水力交汇点的位置变化如图 9(b)所示。值得注意的是，热网的水力交汇点 3、4、5 并非连续出现，而是在热力产销者的余热功率达到一定程度时，热量通过冷热管道转移而形成的，并且会在分布式变电站之间形成双向热力流。图中，70、115、119 h 处的水力特性最为复杂，说明此时网络中具有热源属性的热力产销者较多。图 9(c)展示了这 3 个时间点热网节点的质量流率分布情况，可以看出，节点 3 到节点 4、节点 11 到节点 10，以及节点 14 到节点 15 在水流流向没有改变的情况下，质量流率反而变多了，说明介质流经具有热源属性的热力产销者时，余热功率以质量流率的形式传递到网络中。此外，当热源和热力产销者数量增加时，水力特性的复

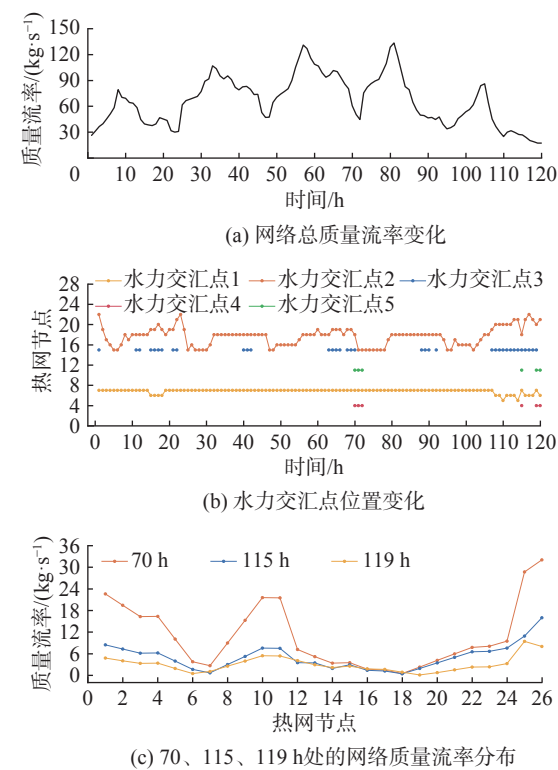


图 9 网络总质量流率、水力交汇点位置以及部分时间网络质量流率分布

Fig.9 Total mass flow rate of the network, location of hydraulic junctions, and mass flow rate distribution at certain time

杂度也会随之增加，进一步加剧了热网的运行和管理难度。

根据图 10(a)所示的低温热源出口温度以及图 10(b)中电锅炉的启停状态(1 代表启动，0 代表关闭)，当低温热源出口温度低于设定值时，电锅

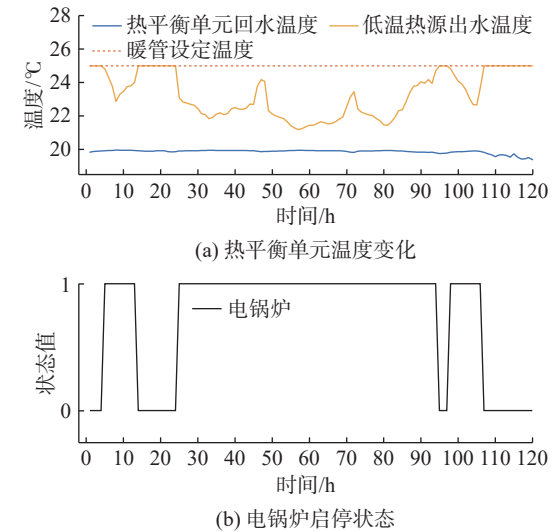


图 10 热平衡单元温度曲线以及电锅炉启停状态

Fig.10 Thermal balance unit temperature curve and electric boiler start and stop status

炉会进行辅助加热。11 月和 3 月，电锅炉呈间歇性运行，12 月至次年 2 月为供暖高峰期，电锅炉基本保持运行状态。在此过程中，热平衡单元的回水温度在接近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处略有波动，这是由管网分布热损失导致的温降，最大温降发生在 120 h，为 $5.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而，这一时间点与最大热损失产生的时间点并不一致，这主要是因为此时质量流率较小。

4 准稳态分析

在综合能源仿真的基础上，通过准稳态模型探究某一时刻发生扰动时 5GDHC 系统以及配电网之间的交互机制。需要注意的是，新型电-热综合能源系统中，电负荷节点区别于耦合负荷节点，耦合负荷节点是指向外供电的同时耦合电热网络的电负荷节点，本质上是耦合节点，案例中节点 E2、E3、E5、E8、E9 以及 E11 为耦合负荷节点。本文基于电负荷 E10 开断进行准稳态分析，该分析同样适用于电负荷节点 E4、E6 以及 E12。

当电网节点 E10 开断时，会导致电网损失 0.32 MW 的电负荷。

4.1 准稳态仿真结果

图 11 展示了电负荷变化后，4 个阶段电网功率的变化情况，正值代表耗电负荷，负值代表发电功率。CHP 机组(节点 E1)作为电平衡节点平衡负载损失，阶段 2 虽然损失了 0.32 MW 的电负荷，但是 CHP 机组的发电功率只减少 0.19 MW 。因为当 CHP 机组的发电功率减少时，对应的发热功率减少，而热平衡单元作为热平衡节点，对应的发热功率增加，该侧水泵和电锅炉(集成在节点 E8 中)的耗电功率增加，所以电力系统的实际负荷损失小于 0.32 MW 。阶段 3 中，热网节点温度的改变影响了热网水力工况的流量分布，并通过耦合元件进一步影响电网耗电功率和发电功率。该阶段的扰动通过 CHP 机组、热平衡单元以及变电站进行传递。阶段 4 的耗电功率、发电功率并未发生变化，这是由 5GDHC 系统的网络特性决定的，将在后面分析中提及。

图 12 呈现了电负荷变化后，4 个阶段热网质量流率的变化情况，负值表示流动方向与规定正方向相反。阶段 2 在温度不变的情况下，流过 CHP 机组的质量流率减少，对应热平衡单元热出力增加，质量流率增加 5.7 kg/s ，由此可见，变化幅度与冷暖管温差密切相关。由图可以看出，质量流

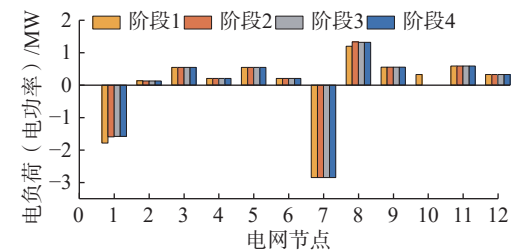


图 11 电网节点电功率变化

Fig.11 Electrical power changes of grid nodes

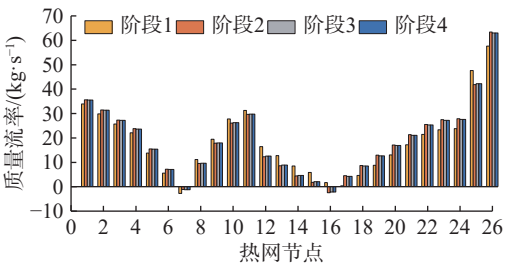


图 12 5GDHC 系统热网节点质量流率变化

Fig.12 Changes of mass flow rates of heat network nodes in 5GDHC system

率变化幅度较大导致热网节点 16 的介质流向发生改变。如上所述，阶段 3 质量流率的变化是由热网节点温度的改变引起的，相比于阶段 3，阶段 4 的质量流率并未发生变化。

负荷变化引起的 4 个阶段热网节点温度变化情况如图 13 所示。阶段 2 的热网流动介质由于惯性作用并未对热网节点产生影响，热网节点温度与阶段 1 相同。阶段 3 中，建筑变电站的热功率改变使得热网节点温度发生改变，但最大温度变化仅为 0.054 ℃。同时，与节点温度密切相关的热泵 H_{cop} 随之改变，导致连接变电站的电网节点电负荷呈现缓慢的变化，如图 11 所示。另外，热泵蒸发器侧的质量流率也会在阶段 3 呈现微弱变化，如图 12 所示。

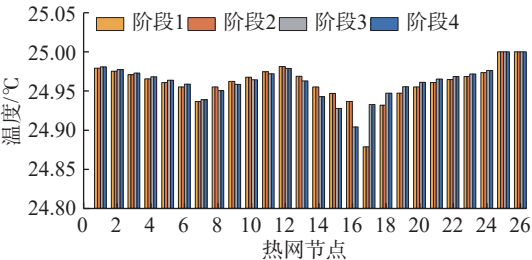


图 13 5GDHC 系统热网节点温度变化

Fig.13 Temperature changes of heat network nodes in 5GDHC system

节点温度变化引起的扰动通过建筑变电站传递到电网中，因此，建筑内热交换器的换热量不受变电站内蒸发器侧进出口温度变化的影响，从

而导致冷凝器释放的热量、热交换器的换热量保持相等且不会发生改变，这也是阶段 4 的电网电功率、热网质量流率、热网管道温度以及建筑室内温度保持不变的原因，建筑物室内温度如图 14 所示，保持在设定温度 20 ℃。

电负荷开断对电力系统产生显著影响，直接体现在 CHP 机组的发电功率上，并通过 CHP 将扰动传递到热力系统中，再次通过热平衡单元以及建筑变电站的耗电功率影响电力系统；在阶段 2 的水力工况中，热力系统的质量流率快速变化；在阶段 3 的热力工况中，温度变化较为缓慢，这是因为建筑变电站作为耦合设备分布密集，其对电力系统的影响范围较大，但受扰动的程度相对较轻；至阶段 4，室内温度并没有受到扰动影响。

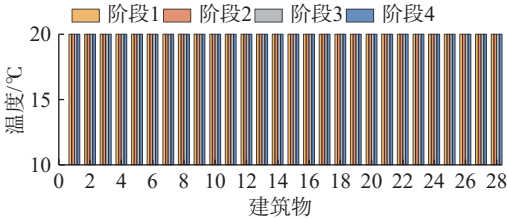


图 14 建筑物室内温度变化

Fig.14 Changes of indoor temperature in buildings

4.2 新型电-热网络与传统电-热网络的准稳态过程对比

5GDHC 系统与集中供热网络在网络拓扑、运行温度、供能方式以及网络组成等方面有所区别，因此，扰动过程也有所不同。通过以上分析总结新型电-热耦合网络与传统电-热耦合网络在准稳态过程中的差异性，并与参考文献 [20] 所做的工作进行对比。

阶段 2，热网的水力工况都会发生较为显著的变化，但 5GDHC 系统较小的设计温差导致质量流率变化更加显著。文献 [20] 中的集中供热网络，供回水温差接近 50 ℃，在电负荷开断引起 CHP 发电功率产生 0.36 MW 变化的情况下，阶段 2 的质量流率变化量仅为 1.5 kg/s，远小于本文 5.7 kg/s 的变化量。若两者保持 CHP 发电功率变化量以及特性参数相同，5GDHC 系统中质量流率变化能够达到集中供热网络的 10 倍左右。

阶段 3，传统的集中供热网络中，节点温度的变化直接引起热交换器换热量的变化，从而改变热网以及热交换器的热力工况。相比之下，5GDHC 系统的节点温度变化不会影响热交换器换热量，而是调整了建筑变电站内供热供冷机组的

H_{cop} 。值得注意的是,大量分布的供热供冷机组在增加网络互动密度的同时,对网络运行效率也提出了更高的要求。

阶段4,对于集中供热网络,热交换器换热量的改变引起室内温度的变化。而在5GDHC系统中,建筑物室内温度保持不变,分布式建筑变电站降低了网络扰动的深度,系统在阶段3再次达到稳态。

5 结论

本文提出了基于5GDHC系统的新型电-热双向耦合综合能源网络模型,并根据多时间尺度,将电-热网络的互动行为划分为4个阶段,探究某时间点电网负荷开断下,新型电-热综合能源网络的互动机制,并针对12节点电力系统、26节点热力系统的电-热系统案例进行了分析,得到以下结论:

a. 不同于传统电-热综合能源系统,新型电-热综合能源系统能够实现网络的冷热互补与低温运行,时域内冷热互补功率可达13.5 MW,且热损耗仅占网络供热量的1.3%。此外,双向水流增加了水力特性的复杂性,水力交汇点数量最多可以增至5个。

b. 与传统电-热综合能源系统相比,在准稳态4个阶段中,阶段2水力过程的变化更加剧烈,质量流率波动达到了5.7 kg/s,此时应该更加注意系统的质量流率监测;而阶段3热力过程变化相对缓慢,节点温度变化最大仅为0.054℃,但温度变化与网络运行经济性密切相关,同样不可忽视;阶段4中建筑的室内温度并不会发生改变,网络在阶段3就已再次恢复到稳态,扰动情况下,这种方式对于保障建筑末端供能稳定性具有很大优势。

参考文献:

- [1] 陆王琳,陆启亮,张志洪. 碳中和背景下综合智慧能源发展趋势[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1): 10-18.
- [2] 李迪,崔国民,陈家星,等. 可再生能源多能互补的分布式能源系统两级超结构模型[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(03): 125-133.
- [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.
- [4] 刘学智,张沛超,严正. 第5代区域供热供冷驱动的产消型综合能源系统多能流分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 78-90.
- [5] BILARDO M, SANDRONE F, ZANZOTTERA G, et al. Modelling a fifth-generation bidirectional low temperature district heating and cooling (5GDHC) network for nearly zero energy district (nZED)[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 8390-8405.
- [6] ABUGABBARA M, JAVED S, JOHANSSON D. A simulation model for the design and analysis of district systems with simultaneous heating and cooling demands[J]. *Energy*, 2022, 261: 125245.
- [7] 邹鑫,陈丹昊,邹爱孟,等. 考虑多种负荷需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 动力工程学报, 2025, 45(01): 154-164.
- [8] 杨海柱,白亚楠,李忠文,等. 基于改进MVO算法的电热气耦合综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 112-123.
- [9] 李兴国,任永峰,孟庆天,等. 考虑可控负荷的含CSP和P2G的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 552-559.
- [10] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [11] DANCKER J, KLABUNDE C, WOLTER M. Sensitivity factors in electricity-heating integrated energy systems[J]. *Energy*, 2021, 229: 120600.
- [12] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [13] PAN Z G, GUO Q L, SUN H B. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 230-243.
- [14] HUANG P, COPERTARO B, ZHANG X X, et al. A review of data centers as prosumers in district energy systems: renewable energy integration and waste heat reuse for district heating[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114109.
- [15] ROY S S, ROY R, BALAS V E. Estimating heating load in buildings using multivariate adaptive regression splines, extreme learning machine, a hybrid model of MARS and ELM[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 4256-4268.
- [16] 王明军,穆云飞,孟宪君,等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-140.
- [17] LI J H, FANG J K, ZENG Q, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 244-254.
- [18] ZENG Q, FANG J K, LI J H, et al. Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bi-directional energy conversion[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 1483-1492.
- [19] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [20] 钟俊杰,李勇,曾子龙,等. 综合能源系统多能流准稳态分析与计算[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 22-30.