

考虑综合需求响应和气/热惯性的综合能源系统 协同抢修与恢复方法

蒋明轩, 卞艺衡, 李更丰

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Collaborative Repair and Restoration Method for Integrated Energy Systems Considering Integrated Demand Response and Gas/Heat Inertia

JIANG Mingxuan, BIAN Yiheng, LI Gengfeng

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Current methods for post-disaster integrated energy system (IES) repair and restoration mostly neglect to consider the impact of gas/heat dynamics on objective multi-timescales and do not adequately exploit the load-side flexibility resources, the lack of a heat network model, and its coupling relationship as well. A heat network fault repair and restoration model that considers heat loss is proposed. Based on the transient models of gas and heat networks under faults, a specific method and calculation process for quantifying the gas/heat inertia are proposed, with an optimisation calculation model constructed. An integrated demand response framework applicable to the IES repair and restoration process is constructed, and based on the mechanism of user participation in load restoration, a calculation model for different types of loads participating in integrated demand response is proposed. The necessity of considering gas/heat inertia and the effectiveness of the proposed method, considering integrated demand response, are verified with examples. The example results demonstrate that the proposed method can effectively reduce the economic loss of IES after a disaster, reduce the load loss, shorten the load restoration time, and optimise the repair and restoration strategy.

KEY WORDS: integrated energy system; gas/heat inertia; repair and restoration; integrated demand response

摘要: 当下灾后综合能源系统(integrated energy system, IES)的抢修与恢复方法较少考虑热网模型及其耦合关系,大多忽略对客观存在的多时间尺度下气/热动态特性影响的刻画,且恢复过程中对 IES 负荷侧灵活性资源的挖掘不充分。为此,提出了计及热损耗的热网故障抢修与恢复模型;基于故障下气、热网络的暂态模型,提出了 IES 抢修和恢复过程中定量

刻画气/热惯性的具体方法和计算流程,并构建了计及气/热惯性的优化计算模型;构建了适用于 IES 抢修与恢复过程的综合需求响应框架,基于用户参与负荷恢复的机制,提出了参与综合需求响应的不同类型负荷的计算模型。结合算例验证了所提方法考虑气/热惯性的必要性和考虑综合需求响应的有效性,算例结果证明:所提考虑气/热惯性和综合需求响应的 IES 协同抢修与恢复方法可以有效减少灾后 IES 经济损失,降低负荷损失,缩短负荷恢复时间,优化抢修和恢复策略。

关键词: 综合能源系统; 气/热惯性; 抢修与恢复; 综合需求响应

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0279

0 引言

近年来,随着不断扩大的各类型新能源入网规模和能源低碳化发展趋势,传统单一能源网络的资源配置能力已逐渐无法满足需求,综合能源系统(integrated energy system, IES)凭借其能源梯级利用、互济互补的优势得到了广泛关注和重点发展。但日益频发的台风、冰灾、地震、洪涝等极端灾害使 IES 的安全运行面临更加严峻的挑战。例如 2021 年美国德州极端寒潮导致该地区近 1/3 发电设备故障,大量天然气管道冻裂,没有充足的热源储备且各能源之间的应急、调度策略不合理导致了供电、供气、供热严重短缺的大规模事故^[1]。一旦极端灾害引起 IES 发生大范围故障且没有及时得到抢修和恢复,可能导致故障范围进一步扩大,最终对受灾区域的供电、供气、供热造成巨大影响。因此,灾后如何制定 IES 故障设备的抢修方案和高效的负荷恢复策略具有重要的研究意义。

传统针对灾害下电力系统故障抢修和恢复方

基金项目: 国家自然科学基金项目(52222705)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (52222705).

法的相关研究较多^[2-4]，随着 IES 电-气-热耦合不断加深，部分学者开始关注面向 IES 故障抢修和恢复策略的研究。文献[5]提出一种考虑电力网络重构和分布式发电孤岛化的电-气 IES 联合抢修调度方法，以负荷损失最小为目标计算得到电-气 IES 故障下的最优协同抢修和恢复方案。文献[6]在文献[5]的基础上提出考虑储能和电制气设备的一种电-气 IES 两阶段恢复策略，先通过重构和孤岛划分恢复部分负荷，再抢修剩余设备并断开联络开关，进一步提高了 IES 恢复效率。文献[7-9]同样针对电-气 IES 的故障恢复方法和策略提供了建设性的思路。文献[10]虽然考虑了电-气-热 IES，但仅通过以气转电、以热替电的单向耦合方式辅助配电网复电且没有考虑抢修过程。以上文献研究结论表明，IES 在灾害后凭借其多能互补、互济的显著优势能够提升负荷恢复效率，有效降低中断供能造成的经济损失，但子系统数量的增加和耦合关系的介入会使模型更加复杂，同时以上文献均忽略了 IES 不同子系统之间时间尺度上的差异，因而有待进一步研究。

综合需求响应作为一种有效提高多能源综合利用水平、优化能源资源配置和提升 IES 经济性的手段已在 IES 优化调度和优化运行方法的相关研究中得到了广泛应用^[11-14]。文献[15]在 IES 日前优化调度中引入综合需求响应，对不同类型的负荷进行建模，研究结果表明综合需求响应可以有效促进新能源消纳，提升 IES 系统运行的经济性。文献[16-17]研究了计及综合需求响应的区域 IES 优化调度方法并具体地分析了综合需求响应对区域 IES 运行优化的影响，认为计及综合需求响应能够提高能源利用效率。此外，诸多研究还关注综合需求响应参与 IES 机组检修与维护场景^[18]、IES 可靠性评估^[19]、系统规划^[20-21]等问题，但是目前鲜有研究考虑综合需求响应参与 IES 故障下的抢修与恢复过程及其影响。

基于以上，本文梳理当下 IES 抢修与恢复方法的研究思路和研究展望，发现主要存在以下 3 个方面关键且亟待解决的问题：

第一，缺少 IES 热网和各类型耦合元件的故障抢修与恢复模型。现有研究较多考虑电网与气网的耦合，而对灾害导致故障场景下电-气-热耦合关系的研究较少，在 IES 抢修与恢复过程中参与的耦合设备种类单一，能源转换途径只有电-气或气-电，较少考虑热能参与。

第二，忽略对客观存在的气/热动态特性影响的刻画。IES 具有多时间尺度的特征，现有方法较少在 IES 抢修和恢复过程中对客观存在的气/热惯性

动态特征进行刻画，尚未定量明确气/热惯性对抢修和恢复策略的影响，与实际情况存在偏差。

第三，IES 负荷侧灵活性资源挖掘不充分。现有研究在 IES 抢修与恢复过程中仅利用源侧耦合设备实现能源形式的转化和资源的调度分配，成本过高且灵活性较差，IES 用户侧的综合用能特性和可调控资源潜力还有待挖掘。

针对上述问题，本文考虑了故障下 IES 中客观存在的气/热惯性，充分利用 IES 负荷侧的主动响应潜力，提出一种考虑气/热惯性和综合需求响应的 IES 协同抢修和恢复方法，主要创新性贡献如下：

1) 在现有电-气 IES 协同抢修与恢复模型的基础上，提出一套故障下计及热损耗的热网能流计算模型并对约束条件进行线性化处理，使之易于求解；考虑电、气、热 3 个子系统之间的耦合关系并构造相应的模型。

2) 基于故障下气、热网络的暂态模型，提出一套在 IES 抢修和恢复过程中定量刻画气/热惯性的具体方法和计算流程，并构建了优化问题中计及气/热惯性的计算模型。

3) 从能源内部和能源外部、源侧和负荷侧多个维度构建适用于 IES 协同抢修与恢复过程的综合需求响应框架和用户参与负荷恢复的机制，提出参与综合需求响应的不同类型负荷的计算模型。

最后，通过算例验证了所提方法和模型的有效性，设置并对比是否计及气/热惯性和综合需求响应的不同场景下 IES 的抢修与恢复全过程，并对经济成本和负荷损失对比分析，论证所提方法能够有效提升灾后 IES 抢修与恢复的效率与经济性。

1 电-气-热 IES 协同抢修与恢复计算方法

1.1 目标函数

考虑气/热惯性和综合需求响应的条件下，本文以灾害导致故障发生后 IES 整体经济损失最小为目标，建立目标函数如下：

$$\min(C_{\text{loss}} + C_{\text{interia}} + C_{\text{dsr}}) \quad (1)$$

式中： C_{loss} 为 IES 中断供能强迫损失成本； C_{interia} 为气/热惯性用户经济补偿成本； C_{dsr} 为考虑综合需求响应的用户购能成本和参与响应的负荷削减补偿。

其中：

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_g} \omega_i^c P_{\text{shed},i,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{j \in N_g} \omega_j^g W_{\text{shed},j,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N_h} \omega_k^h H_{\text{shed},k,t} \Delta t + \alpha \sum_{t \in T} \sum_{g \in DP} \sum_{d \in N_{c,g,h}^g} \tau d_{d,t}^{\hat{o}} \quad (2)$$

$$C_{\text{interia}} = \sum_{t \in T} \sum_{j \in N_g} n_{\text{use},j}^g \psi_j^g F_{j,t}^g \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N_h} n_{\text{use},k}^h \psi_k^h F_{k,t}^h \Delta t \quad (3)$$

$$C_{\text{dsr}} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_e} \sigma_i^e P_{\text{use},i,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{j \in N_g} \sigma_j^g W_{\text{use},j,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N_h} \sigma_k^h H_{\text{use},k,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_e} c_{\text{cut},i}^e P_{\text{cut},i,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{j \in N_g} c_{\text{cut},j}^g W_{\text{cut},j,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N_h} c_{\text{cut},k}^h H_{\text{cut},k,t} \Delta t \quad (4)$$

式中：各参数含义见附录 A-1。

1.2 电-气-热线性化多能流计算模型

1.2.1 电力系统约束

本文采用线性化的 Distflow 模型作为电网运行潮流约束，主要包含节点的有功和无功功率平衡、支路潮流约束、负荷损失约束、节点电压约束、分布式电源出力约束，见附录 A-2 式(A1)–(A14)。

1.2.2 天然气系统约束

本文参照文献[5]所提出的气网运行约束及线性化方法构造气网运行能流约束，主要包含节点流量平衡、压缩机支路约束、一般支路约束、负荷损失约束、节点气压约束、气源出力约束，见附录 A-3 式(A15)–(A32)。

1.2.3 热力系统约束

热网的潮流计算模型同样是非凸非线性的，文献[22]通过将功率与质量流率解耦的方法求得线性化后的热网潮流模型。考虑到以往专门针对负荷削减优化问题和抢修恢复问题所提出的热力系统约束模型较少且忽略了热损耗，本文提出了一套计及热损耗的线性化热力系统约束用于 IES 协同抢修与恢复优化模型，见附录 A-4 式(A13)–(A48)。

1.2.4 耦合元件约束

本文中的耦合元件主要包含燃气轮机(gas turbine, GT)、电驱动压缩机、电制气设备(power-to-gas equipment, P2G)、热电联产机组(combined heat and power, CHP)、热泵(heat pump, HP)、电锅炉(electric boiler, EB)、燃气锅炉(gas boiler, GB)。基于以上耦合元件的数学模型所构造的约束条件见附录 A-5 式(A49)–(A56)。

1.3 IES 拓扑重构和抢修调度模型

1.3.1 电网拓扑重构及开关操作约束

故障发生后，气网和热网管道位置相对固定且控制阀门开闭需要较长时间，不具备快速拓扑重构的基本条件。而配电网中拓扑重构是一种常用于故障应急恢复、负荷转移和网络优化的方法，通过操作联络开关等设备改变配电网的接线形式从而重新划分孤岛、隔离故障区域，达到缩小故障对系统的影响范围的目的。考虑到电网拓扑重构对 IES 恢复的必要性，本文构建了配电网拓扑重构约束和重构开关操作次数约束，具体数学模型参见附录 A-6

式(A57)–(A66)。

1.3.2 IES 抢修调度模型

灾害发生后，调度中心获取 IES 元件受损信息，既可以派遣专门的抢修队伍单独执行子系统的抢修任务，也可以统一协同抢修所有类型的受损元件。因此，调度中心需要首先确定 IES 的抢修模式，其次根据抢修队伍和物资仓库的地理位置、抢修队伍的数量和类型对 IES 中受损元件进行抢修职责的划分，最后进行抢修队伍的调度和派遣。本文采用的 IES 抢修调度模型见附录 A-7 式(A67)–(A85)。

2 气/热惯性对 IES 抢修与恢复影响分析及其计算模型

2.1 气/热惯性的机理与影响分析

IES 中，各子系统传输能源的载体与媒介存在时间尺度上的显著差异。对于电力系统，故障停电区域的电能供应立刻中断，区域内所有输电载体和负荷不存在任何形式的能量流动直至恢复供电。对于天然气系统和热力系统，供能中断后由于天然气管道的管存效应和建筑物的热储备特性，供能管道两端节点的状态变量如气压和温度不会骤降，而是从初始状态形似单调递减指数函数逐渐降低，在一段时间内维持可接受状态；恢复供能后，气压和温度随时间形似单调递增负指数函数逐渐上升，直至恢复正常工况允许范围^[23]。

为了定量刻画气/热惯性引起节点用户气压和温度状态变量的动态变化过程，本文基于天然气管道的暂态模型式(5)，采用离散线性化的方法推导出描述天然气管道末端节点气压和管道流量关系的二阶常微分方程式(6)。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g^2}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\omega \rho_g v_g^2}{2D} + \rho_g g \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{S_g^2 \ddot{p}(t)}{v_B} + \frac{\omega S_g \dot{p}(t)}{D_g} + \frac{\omega^2 v_B^3 p(t)}{4D_g^2 R_M T_g} = \frac{\omega \dot{f}(t)}{2D_g} + \frac{\omega^2 v_B^2 f(t)}{2D_g^2 S_g} \quad (6)$$

式中： S_g 和 D_g 分别为天然气管道横截面积和内径； ω 为管道摩擦系数； θ 为管道倾角； v_g 和 v_B 分别为天然气流速及其基准值； R_M 为天然气体常数与摩尔质量的商； T_g 和 ρ_g 分别为天然气温度和密度； $p(x,t)$ 为天然气压强； $f(x,t)$ 为天然气流量； x 和 t 分别为空间变量和时间变量； g 为重力加速度。

根据能量守恒定律，本文采用微分近似的方法构建考虑热损耗的建筑物集总体的温度变化过程(式(7)(8))，按照附录 A-8 所述描述热网节点建筑温

度和供热功率关系的一阶常微分方程式(见式(9))。

$$C_a \rho_a V_b [T_f(t + \Delta t) - T_f(t)] = [H_{\text{use}}(t) - H_{\text{loss}}(t)] \Delta t \quad (7)$$

$$H_{\text{loss}}(t) = \varepsilon_{\text{loss}} [T_f(t + h\Delta t) - T_{\text{en}}(t)], 0 < h < 1 \quad (8)$$

$$C_a \rho_a V_b \dot{T}_f(t) + \frac{\lambda_b}{d_b} S_b T_f(t) = H_{\text{use}}(t) + \frac{\lambda_b}{d_b} S_b T_{\text{en}} \quad (9)$$

式中： C_a 和 ρ_a 分别为空气比热容和密度； V_b 为建筑物内空气体积； $T_f(t)$ 为室内热力学温度； $H_{\text{use}}(t)$ 和 $H_{\text{loss}}(t)$ 分别为供给热功率和热损耗； Δt 为间隔时间； $\varepsilon_{\text{loss}}$ 为建筑散热系数，由其表面积 S_b 、材料导热系数 λ_b 、墙厚 d_b 计算得到； $T_{\text{en}}(t)$ 为环境温度。

气/热惯性作为一种电-气-热 IES 中客观存在的固有属性，将会对灾害下 IES 故障发生后 IES 的运行状态判定产生影响，进而影响 IES 协同抢修和恢复的策略。由于气/热惯性，IES 中的气、热网用户即使在灾害故障导致供能中断的情况下，在气压和温度下降至最低允许标准前仍能够维持可接受的用能状态，但恢复供能后需要一定时间等待气压和温度回升，无法立即恢复正常。因此，在制定 IES 的协同抢修与恢复策略时计及气/热惯性的客观存在，可以让部分惯性强的气、热用户处于可接受用能状态中，优先考虑为更加关键和重要的负荷恢复供能，从而减少灾害下 IES 的整体经济损失。

2.2 计及气/热惯性的方法与计算模型

2.2.1 计及气/热惯性的方法和流程

在明确灾害下 IES 协同抢修和恢复过程中考虑气/热惯性的必要性和重要意义后，基于推导得出的定量描述气/热惯性的基本模型式(6)和式(9)，本小节进一步提出在 IES 抢修和恢复过程中计及气/热惯性影响的方法和具体的计算模型。

灾害发生后 IES 抢修与恢复过程中，基于式(6)和式(9)两个描述气、热负荷供能水平-状态变量的常微分方程式，气网节点供气压强、热网节点建筑物室内温度是惯性参数，天然气管道末端流量和热网供热功率是瞬变参数。因此，对于每一个中断供能的气、热网节点而言，结合计算得到的决定函数变化率的气、热惯性参数，只要获取故障初始时刻和恢复功率供应时刻瞬变参数的具体数值，代入后分别得到描述中断供能后惯性参数下降和恢复供能后惯性参数回升的两个方程，就可以解得抢修周期 T 内该负荷点任意时刻的惯性参数数值。在此基础上，对周期内气、热网节点供气气压和室内温度具体数值进行统计，并根据供气合约和热舒适度规定标准进行经济补偿，求得表征不同恢复供能时间下考虑气/热惯性经济补偿的矩阵 ψ_j^g 和 ψ_k^h ，并对原本按照直接功率缺失造成负荷点生产生活的经

济损失惩罚进行修正。IES 协同抢修与恢复过程中计及气/热惯性影响的流程参照图 1，详细的计算流程和步骤参考附录 A-9。

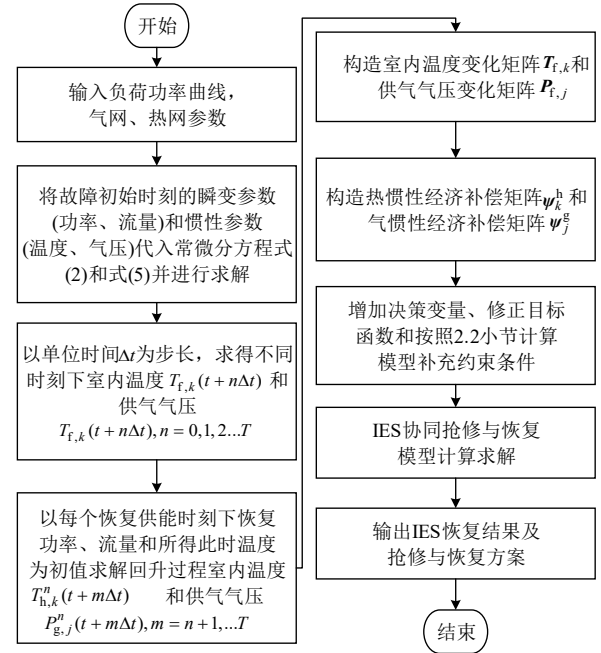


图 1 IES 协同抢修与恢复计及气/热惯性影响的方法流程
Fig. 1 Calculation process of considering the effects of gas and heat inertia in IES collaborative repair and recovery

2.2.2 计及气/热惯性的计算模型

在此基础上，本文结合气/热惯性数学模型，提出了一套适用于上述计及气/热惯性方法的决策变量和约束条件，并采用大 M 法进行修正，使其融入原 IES 协同抢修和恢复优化模型，并进行求解。

1) 气/热负荷供能状态约束。

$$-Mf_{j,t}^g + eM \leq W_{\text{shed},j,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (10)$$

$$W_{\text{shed},j,t} \leq M(1 - f_{j,t}^g), \forall j \in N_g, \forall t \quad (11)$$

$$-Mf_{k,t}^h + eM \leq H_{\text{shed},k,t}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (12)$$

$$H_{\text{shed},k,t} \leq M(1 - f_{k,t}^h), \forall k \in N_h, \forall t \quad (13)$$

式中： $f_{j,t}^g$ 和 $f_{k,t}^h$ 为表示气、热负荷恢复状态的 0-1 变量； M 和 eM 在大 M 法中表示极大数和极小数。

2) 气/热负荷恢复供能时间约束。

$$t(1 - f_{j,t}^g) \leq t_{r,j}^g, \forall j \in N_g, \forall t \quad (14)$$

$$t(1 - f_{k,t}^h) \leq t_{r,k}^h, \forall k \in N_h, \forall t \quad (15)$$

式中： $t_{r,j}^g$ 和 $t_{r,k}^h$ 表示气、热负荷供能恢复时间。

3) 恢复时间标识约束。

$$t_{r,j}^g - t + (1 - F_{j,t}^g)M \geq 0, \forall j \in N_g, \forall t \quad (16)$$

$$t - t_{r,j}^g + (1 - F_{j,t}^g)M \geq 0, \forall j \in N_g, \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{t \in T} F_{j,t}^g = 1, \forall j \in N_g \quad (18)$$

$$t_{r,k}^h - t + (1 - F_{k,t}^h)M \geq 0, \forall k \in N_h, \forall t \quad (19)$$

$$t - t_{r,k}^h + (1 - F_{k,t}^h)M \geq 0, \forall k \in N_h, \forall t \quad (20)$$

$$\sum_{t \in T} F_{k,t}^h = 1, \forall k \in N_h \quad (21)$$

式中: $F_{j,t}^g$ 和 $F_{j,t}^h$ 为表示恢复时刻位置的 0-1 变量。

本文构造 $f_{j,t}^g$ 和 $f_{j,t}^h$ 、 $t_{r,j}^g$ 和 $t_{r,j}^h$ 、 $F_{j,t}^g$ 和 $F_{j,t}^h$ 等决策变量以及约束(10)–(21)的基本思路是通过确定气、热网用户的供能恢复时间来确定负荷的实际气/热惯性动态过程,进而索引气/热惯性经济补偿矩阵 ψ_j^g 和 ψ_k^h 中对应的列,得到该动态过程对应的经济补偿,最终影响 IES 抢修和负荷恢复的顺序。

3 考虑综合需求响应的 IES 协同抢修与恢复计算模型

不同于气/热惯性这一存在于 IES 中固有且被动的特性,综合需求响应更加侧重于充分调用 IES 中各种耦合元件和不同类型负荷的资源,主动地响应与配合灾害下 IES 的协同抢修与恢复,对于提升整体负荷恢复效率、降低经济损失具有重要意义。

3.1 综合需求响应的框架与负荷分类

不同于传统的电力需求响应,IES 中存在着多种能源之间的相互耦合,不仅能够实现电、气、热负荷以各自形式参与容量需求和时间需求上的调

节,而且通过能源转化设备等耦合元件实现不同类型能源之间的相互替代、多能互补。

灾害发生后 IES 协同抢修和恢复中考虑综合需求响应的必要性和意义具体体现在:

第一,最优 IES 协同抢修和恢复策略的本质是利用已有资源最大程度上降低经济损失。灾害下 IES 灵活性资源、抢修资源和可调用能源往往有限且无法临时提升,而负荷需求并非不可调整、一成不变。若想进一步减少损失,积极主动调整可调整的负荷需求完全具备可行性与合理性。

第二,灾害下 IES 发生多处故障,极有可能出现能源供应短缺,在抢修开始前,通过综合需求响应能够实现对有限的能源进行充分地分配,使重要负荷得到优先保障。

第三,考虑综合需求响应能够充分发挥 IES 负荷侧的互补互济优势,为优化 IES 的协同抢修和恢复策略提供可能性,从而合理调整优先抢修设备序列和供能恢复顺序。

基于以上分析,考虑耦合元件和负荷本身两类响应途径,本文针对 IES 协同抢修与恢复所提出的综合需求响应模型如图 2 所示。

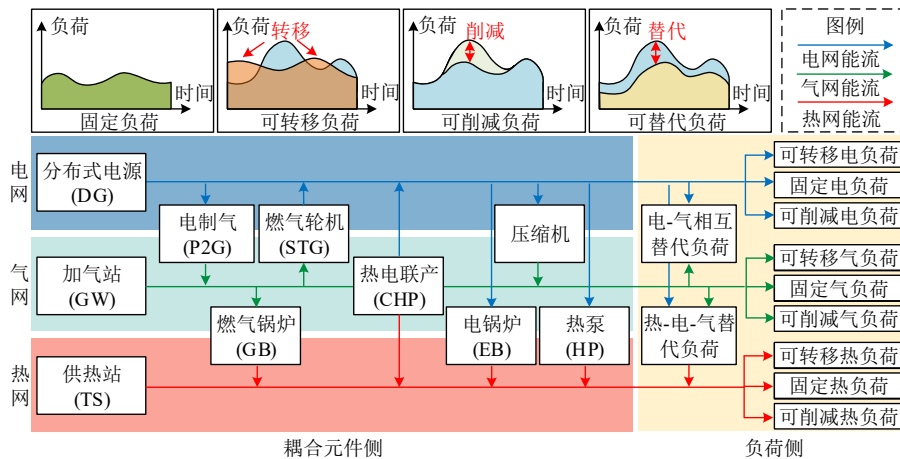


图2 IES协同抢修与恢复所考虑的综合需求响应模型

Fig. 2 Integrated demand response model considered for IES collaborative repair and restoration

综合需求响应不仅实现各能源内部负荷自身的调控,而且能够实现外部不同能源之间的转化互补。能源内部层面,固定型负荷代表用户的基本生产生活需求,一旦能源缺供就会造成极大的经济损失;可转移类型负荷用户可以对能源价格产生多时段响应,换言之用户会根据不同时段电价、气价、热价情况调整自己的用能方案;可削减类型负荷用户可以主动配合调度要求削减自身一定比例的非必需负荷,同时 IES 也会给予一定的经济补偿。能源外部层面,可替代类型负荷用户可以自主根据实

时的能源供应情况和能源价格灵活调整用能方式;此外无论上述何种类型的电、气、热负荷对价格、供能迫切性、自身特性的需求响应均会涵盖在能源转化设备的耦合关系之中。

3.2 考虑综合需求响应的计算模型

3.2.1 可转移类型负荷约束

现有针对电负荷需求响应的研究普遍采用电量电价弹性矩阵对分时电价下价格引导用电需求的机制加以刻画,并按照类似方法开展气、热负荷与分时气价、热价关系的研究。由于价格弹性矩阵

理论已在 IES 优化调度相关研究中较为成熟且应用广泛, 本文基于已有的价格响应机制模型构造能够反映 IES 负荷转移特性的约束条件。价格弹性矩阵法基本原理及其决策变量和约束构造说明参考附录 A-10。此外, 由于可转移气负荷和可转移热负荷的约束条件在形式和结构上类似, 仅有具体参数、变量和集合上的差别, 因此在附录 A-11 中加以说明, 此处仅说明电网侧可转移负荷约束。

1) 负荷转移状态约束。

$$u_{\text{shiftl},i,t}^c + u_{\text{shiftq},i,t}^c \leq 1, \forall i \in \zeta_e, \forall t \quad (22)$$

式中: $u_{\text{shiftl},i,t}^c$ 和 $u_{\text{shiftq},i,t}^c$ 分别为表示时段 t 内转出和转入负荷的状态标识 0-1 变量, 同一时段只能处于一种负荷转移状态; ζ_e 为可转移电负荷点集合。

2) 转移速率约束。

$$0 \leq P_{\text{shiftl},i,t} \leq u_{\text{shiftl},i,t}^c P_{\text{load},i,t} S_{\text{shiftl},i,t}^c, \forall i \in \zeta_e, \forall t \quad (23)$$

$$0 \leq P_{\text{shiftq},i,t} \leq u_{\text{shiftq},i,t}^c P_{\text{load},i,t} S_{\text{shiftq},i,t}^c, \forall i \in \zeta_e, \forall t \quad (24)$$

式中: $S_{\text{shiftl},i,t}^c$ 和 $S_{\text{shiftq},i,t}^c$ 分别为表示时段 t 内转出和转入电负荷占总负荷量的百分比, 用以衡量单位时间内可转移负荷的容量; $P_{\text{shiftl},i,t}$ 和 $P_{\text{shiftq},i,t}$ 分别为 t 时段内转出和转入电负荷; $P_{\text{load},i,t}$ 为 t 时段用户的电负荷需求。

3) 转移容量约束。

$$0 \leq S_{\text{shiftl},i,t}^c \leq S_{\text{shiftl},i}^{\text{c,max}}, \forall i \in \zeta_e, \forall t \quad (25)$$

$$0 \leq S_{\text{shiftq},i,t}^c \leq S_{\text{shiftq},i}^{\text{c,max}}, \forall i \in \zeta_e, \forall t \quad (26)$$

式中: $S_{\text{shiftl},i}^{\text{c,max}}$ 和 $S_{\text{shiftq},i}^{\text{c,max}}$ 分别表示电负荷 i 所能接受转出和转入功率的最大比例。

4) 电量平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{shiftl},i,t} = \sum_{t=1}^T P_{\text{shiftq},i,t}, \forall i \in \zeta_e \quad (27)$$

式(27)表示在给定完成 IES 抢修与恢复的周期内必须满足负荷总电量平衡, 转出、转入负荷总量相等。

5) 电价约束。

$$\sigma_t^c = \sigma_{0,t}^c + \Delta\sigma_t^c, \forall t \quad (28)$$

式中: $\sigma_{0,t}^c$ 为原分时电价; $\Delta\sigma_t^c$ 为分时电价变化量; σ_t^c 为调整后分时电价。

6) 电量电价弹性矩阵约束。

$$\varepsilon_{t_1,t_2}^c = \frac{(P_{\text{shiftq},i,t_1} - P_{\text{shiftl},i,t_1}) / P_{\text{load},i,t_1}}{\Delta\sigma_{t_2}^c / \sigma_{0,t_2}^c}, \quad \forall i \in \zeta_e, \forall t_1, t_2 \in T \quad (29)$$

式中: $t_1 = t_2$ 时 ε_{t_1,t_2}^c 为自弹性系数, 否则为互弹性系数; 下标 t_1 和 t_2 用于索引对应的时段。

7) 价格调控幅度约束。

$$(1 - \kappa^c) \sigma_t^c \leq \sigma_t^c \leq (1 + \kappa^c) \sigma_t^c, \forall t \quad (30)$$

式中: κ^c 为电价可调比例, 用以保障不会因为电价波动过大给电力电量平衡造成潜在风险。

3.2.2 可削减类型负荷约束

IES 中的部分电、气、热用户在灾害发生后可以主动响应削减部分非必要的负荷, 如装饰用的照明设施、人员密集度不高的企业供热和商业用气等, 从而保障系统内关键负荷的优先供应, 降低 IES 抢修与恢复过程中投入的经济成本。通常此类型负荷可削减的负荷量存在上限且 IES 会按照削减容量给予一定的经济补偿。本文中, 考虑的电、气、热可削减类型负荷约束条件如下:

$$0 \leq P_{\text{cut},i,t} \leq \lambda_i^e P_{\text{load},i,t}, \forall i \in \xi_e, \forall t \quad (31)$$

$$0 \leq W_{\text{cut},j,t} \leq \lambda_j^g W_{\text{load},j,t}, \forall j \in \xi_g, \forall t \quad (32)$$

$$0 \leq H_{\text{cut},k,t} \leq \lambda_k^h H_{\text{load},k,t}, \forall k \in \xi_h, \forall t \quad (33)$$

式中: λ_i^e 、 λ_j^g 和 λ_k^h 分别表示电负荷 i 、气负荷 j 、热负荷 k 可主动削减负荷量占总负荷量的比例; $\xi_{e,g,h}$ 为子系统中可削减类型负荷点集合; $P_{\text{cut},i,t}$ 、 $W_{\text{cut},j,t}$ 、 $H_{\text{cut},k,t}$ 分别为电负荷 i 、气负荷 j 、热负荷 k 主动削减的负荷量; $P_{\text{load},i,t}$ 、 $W_{\text{load},j,t}$ 、 $H_{\text{load},k,t}$ 为 t 时段用户的电负荷需求、气负荷需求、热负荷需求。

3.2.3 可替代类型负荷约束

基于能源贬值原理, IES 中电能和天然气能属于高品质能量, 热能属于低品质能量。能量形式的转化过程中, 受到熵增的限制的能量转化效率的限制, 一般不考虑用热能供应替代电能供应或天然气供应。而用电能或天然气替代供热和电能-天然气相互替代在生产生活中十分常见, 例如居民供暖既可以由热网供应, 也可以使用电锅炉或蒸汽锅炉。因此, 本文可替代类型负荷主要考虑电-气相互替代负荷和热-电-气替代负荷, 并提出了一套适用的决策变量和约束条件对以上两种负荷进行描述。

1) 电-气相互替代负荷约束。

$$I_{\text{eg},i,t} + I_{\text{ge},j,t} \leq 1, \forall i, j \in \zeta_{e,g}, \forall t \quad (34)$$

$$0 \leq I_{\text{eg},i,t} T_{\text{eg},i,t} + I_{\text{ge},j,t} T_{\text{ge},j,t} \leq T_{\text{repl},i,j}^{\text{max}}, \forall i, j \in \zeta_{e,g}, \forall t \quad (35)$$

$$T_{\text{repl},i,t} = I_{\text{eg},i,t} T_{\text{eg},i,t} - I_{\text{ge},j,t} T_{\text{ge},j,t}, \forall i, j \in \zeta_{e,g}, \forall t \quad (36)$$

式(34)表示为了避免能量低效循环, 不可同时互相替代, $I_{\text{eg},i,t}$ 和 $I_{\text{ge},j,t}$ 分别为用电负荷替代气负荷和用气负荷替代电负荷的 0-1 变量标识, $\zeta_{e,g}$ 为各子系统可替代类型负荷集合; 式(35)表示可替代等效功率容量限制, $T_{\text{eg},i,t}$ 和 $T_{\text{ge},j,t}$ 分别表示电负荷替代气负荷功率和气负荷替代电负荷等效功率, $T_{\text{repl},i,j}^{\text{max}}$ 为替代功率上限; 式(36)表示实际替代功率,

用于修正电、气能流平衡方程。

2) 热-电-气替代负荷约束。

$$I_{he,i,t} + I_{hg,j,t} \leq 1, \forall i, j \in \zeta_{e,g}, \forall t \quad (37)$$

$$0 \leq I_{he,i,t} T_{he,i,t} + I_{hg,j,t} T_{hg,j,t} \leq T_{rep2,i,j,k}^{max}, \forall i, j, k \in \zeta_{e,g,h}, \forall t \quad (38)$$

$$T_{rep2,k,t} = I_{he,i,t} T_{he,i,t} + I_{hg,j,t} T_{hg,j,t}, \forall i, j, k \in \zeta_{e,g,h}, \forall t \quad (39)$$

其中, 式(37)表示为了设备低效运行, 热负荷至多只能被电、气其中一种能源类型替代, $I_{he,i,t}$ 和 $I_{hg,j,t}$ 分别为选择用电替代和用气替代的 0-1 变量标识; 式(38)表示可替代功率容量限制, $T_{he,i,t}$ 和 $T_{hg,j,t}$ 分别为电替代功率和气替代等效功率, $T_{rep2,i,j,k}^{max}$ 为替代热功率上限; 式(39)表示实际热替代功率, 用于修正 IES 能流平衡方程; $\zeta_{e,g,h}$ 为各子系统可替代负荷集。

4 算例分析

本文算例的测试环境为 2.10 GHz Intel Core i7CPU, 16 GB RAM, Matlab 2021a, 建模使用 YALMIP 优化建模工具包, 模型求解器使用 Gurobi 11.0.2 优化求解器。

4.1 算例说明

本文采用某电-气-热 IES 工业生产生活园区进行算例分析, 由基于文献[5]改进后的 15 节点配电网、12 节点天然气网和 16 节点热网构成, 包含耦合设备有电驱动压缩机、GT、P2G、CHP、HP、EB、GB, IES 拓扑结构和耦合关系见附录 B 图 B1, 单独电网、气网、热网拓扑结构见图 B2—B4, 各

子系统运行参数见表 B1—B9, 耦合元件的基本参数见表 B10, 电、气、热 24h 内的负荷数据见表 B11, 负荷曲线见图 B5。

假设该区域 IES 于 12:00 受极端灾害影响后, 网络多处发生故障, 各子系统损毁设备数据见附录 B 表 B12, IES 抢修仓库数据见表 B13, 各元件所需修复时间见表 B14, IES 中参与综合需求响应的各类型负荷参数见表 B15, 分时能源价格曲线见图 B6, 价格弹性矩阵系数见表 B16, 供气、供热规定标准见表 B17, 其余模型求解过程中所需环境参数和物理量见表 B18。本文共设计表 1 所示的 6 个场景以论证所提 IES 协同抢修和恢复方法的有效性, 其中协同抢修场景下抢修队伍统一调度, 不再区分所属系统。假定各抢修队伍行进速度相同且不同地点之间其行进时间与其相隔距离成正比例。

表 1 场景设置
Table 1 Scenario setting

场景	协同抢修	考虑气/热惯性	考虑综合需求响应
场景 1	×	×	×
场景 2	✓	×	×
场景 3	×	✓	×
场景 4	✓	✓	×
场景 5	×	✓	✓
场景 6	✓	✓	✓

4.2 算例结果分析

4.2.1 基础场景结果分析

基础场景 1 的抢修与恢复模拟结果如表 2 所示, 恢复周期内各子系统的负荷损失情况如图 3 所示, 各损毁设备的修复顺序及时间见附录 C 表 C1。

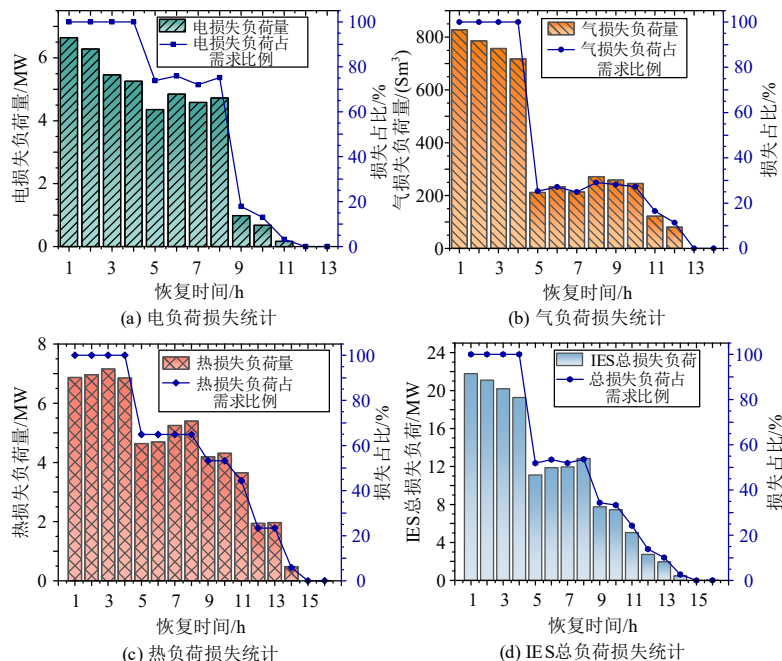


图 3 基础场景 1 下 IES 负荷恢复结果

Fig. 3 IES loads restoration results under scenario 1

故障发生后 0h, 由于部分电源、气源、热源和关键支路的故障, IES 所有的负荷均无法供应。

故障发生后 5h, IES 总负荷恢复大约 50%: 电网由于 3 支抢修队伍分别完成了对 G1、L1、L2、L4、L13、L14 的抢修, 电负荷 9、11、15 的负荷 W1、P2、P3 修复完成使得 CHP 可以正常供气, 使得电负荷 6、热负荷 4 恢复; 热网侧热源 S1 和 S3 恢复正常, 但由于许多关联性支路如 H3、H4、H5 尚未修复, 热网仍有 65%左右的负荷等待恢复。

故障发生后 9h, 由于 G4 修复完成, 电网负荷 3、4、7、12 完全恢复供电, 其中负荷 7 的恢复通过联络开关 T15 重构, 此时仅有 L6 和 L10 两条线路、耦合元件 GT 未完成修复, 电网总恢复负荷比例超过 80%。截至 12h, 电网所有负荷恢复, 气网

P4 和 P7 管道的修复使得 P2G 和 W2 供能流通, 热网管道 H4 修复使热负荷 12、13 恢复供能, 管道 H6 修复使得由 GB 恢复气转热; 此时气网超 80%、热网超 70%负荷恢复, 总体仅剩 10%负荷未恢复。17h 后, IES 全部负荷恢复完毕。

由基础场景结果可知, IES 灾后的抢修与恢复受到多个系统及其耦合关系共同影响。IES 各子系统之间耦合紧密, 负荷的恢复不仅仅由单一系统的抢修结果决定, 还会受到其他类型负荷恢复的影响, 实质上高度依赖于耦合元件的能源转换关系。

4.2.2 考虑气/热惯性的必要性分析

场景 1 和场景 3、场景 2 和场景 4 两组不同抢修模式下 IES 恢复模拟结果可用于分析考虑气/热惯性的必要性及其影响, 如表 2 所示。

表 2 抢修与恢复模拟结果
Table 2 Repair and restoration simulation results

场景	累计 损失/元	电网经济 支出/元	气网经济 支出/元	热网经济 支出/元	损失电量/ (MW·h)	损失 天然气/Sm ³	损失热量/ MJ	电网恢复 时间/h	气网恢复 时间/h	热网恢复 时间/h	IES 总恢复 时间/h
场景 1	2989542	916471.41	919104.29	1153966.27	43.9747	4725.97	231751	12	13	17	17
场景 2	2577721	586517.24	947826.23	1043377.91	25.2537	4835.45	217832	14	14	14	14
场景 3	2260234	693325.02	761638.99	805269.99	31.8898	5562.16	248591	10	13	16	16
场景 4	1934445	545318.52	680978.83	708147.92	23.0223	5013.08	218219	14	14	14	14
场景 5	1926539	611644.90	635118.53	679775.64	28.2117	4404.12	207083	9	12	16	16
场景 6	1751445	498340.29	614488.90	638616.30	20.8285	4456.42	195767	14	14	14	14

场景 3 在独立抢修模式下考虑了气/热惯性, 相比基础场景 1 灾后 IES 总经济损失减少 729308 元, 电网、气网、热网经济损失分别下降 24.35%、17.13%、30.22%, 电网减少损失负荷 12.0849 MW, 气网、热网分别增加负荷损失 836.19 Sm³/h(Sm³/h 为天然气流量单位, 含义为每小时流过的天然气体积)、16840 MJ。电网负荷恢复完成时间提前 2h, 热网提前 1h, IES 恢复时间缩短的根本原因体现在两个气网抢修仓库 4、5 和热网抢修仓库 7 下属队伍对损毁元件抢修策略的调整上。抢修仓库 4 所属队伍抢修次序由 W1-P3-P4-W2 调整为 P3-W1-W2-P4, 抢修仓库 5 所属队伍抢修次序由 P2-P9-P7 调整为 P2-P7-P9, 抢修仓库 7 所属队伍抢修次序由 S3-H5-H6-H13 调整为 H5-H6-H13-S3。策略调整的原因其一是考虑气/热惯性影响后, 决策时让部分惯性强的气、热负荷处于可接受用能状态中, 优先考虑为不存在惯性且重要的电负荷恢复供能, 故气网连通电转气耦合元件 CHP 和 GT 的元件修复优先级更高, 缩短电网的恢复时间; 其二是决策优先恢复惯性弱且重要的气/热负荷, 减少负荷经济损失和补偿, 故热网优先恢复 H5、H6 和 H13 从 GB 优先供热而非 HP。图 4 展示了场景 1 和场景 3 下 IES 各节点电、气、热负荷完全恢复的时间, 考虑气/热惯

性后, 大部分电负荷的恢复时间提前 1~2h, 气负荷如 9、11、12 等和热负荷 3、9、12、13 等恢复时间延后, 部分气/热负荷的恢复时间顺序发生调整。虽然气网和热网的负荷损失增加, 恢复时间总体延后, 但是气、热网的经济损失大幅减少, 侧面佐证在实际 IES 灾后抢修和恢复过程中牺牲或延迟部分气、热负荷的供应换取总体经济利益是可行的。

场景 4 在场景 2 的基础上考虑了气/热惯性, 灾后 IES 总经济损失减少 643276 元, 电网、气网、热网经济损失分别下降 7.02%、28.15%、32.13%, 电网减少损失负荷 2.2314 MW, 气网、热网分别增加负荷损失 177.63 Sm³/h、387 MJ。抢修仓库 2、3、7 的元件抢修次序发生较大调整, 如抢修仓库 7 所属队伍抢修次序由 G4-P9-H13-P7 调整为 G4-P7-P9-H13, 其目的是为了更快恢复 GT 向电网供电。相比第一组, 第二组联合抢修模式下抢修策略本身就综合考虑了 3 个系统之间的供能恢复优先级, 具有倾向性, 因此考虑气/热惯性后各子系统的恢复过程也更加均衡, 气、热负荷损失增量降低。

以上分析表明, 气/热惯性作为一种客观存在的固有属性, 对 IES 的抢修与恢复策略具有不可忽视的影响。考虑气/热惯性并利用其制定和执行 IES 的抢修、恢复策略, IES 经济损失大幅降低, 恢复时

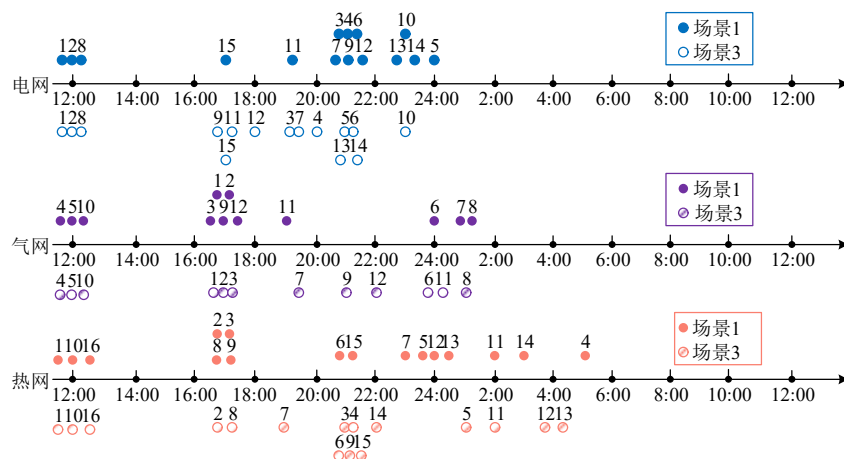


图4 基础场景1和场景3下IES负荷恢复时间对比

Fig. 4 Comparison of IES loads restoration time under basic Scenario 1 and Scenario 3

间更短,一定程度上提高了灾后 IES 的恢复效率,避免不必要的经济和时间成本。

4.2.3 考虑综合需求响应的有效性分析

场景3和场景5、场景4和场景6两组不同抢修模式下模拟结果用于分析综合需求响应参与 IES 协同抢修与恢复的有效性及其影响,如表2所示。

考虑气/热惯性的基础上,场景5在独立抢修模式下考虑了综合需求响应的参与,相比场景3灾后 IES 总经济损失减少 333695 元,电网、气网、热网经济损失分别下降 11.78%、16.61%、15.58%,电网、气网、热网减少损失负荷 3.6781 MW、1158.04 Sm^3/h 、41508 MJ。电网、气网负荷完全恢复时间提前 1h,热网和 IES 总恢复时间不变。场景5下 IES 中电、气、热可转移负荷、可削减负荷参与综合需求响应的结果如图5、附录C图C1所示,调整后的能源价格和原价对比结果见附录C图C2。

对于可转移负荷而言,灾后 IES 通过能源价格引导,电、气、热用户参与综合需求响应,其中电网 0~10h 的负荷集中转移至 11~18h 和 22~24h,气网 1~6h 和 10~12h 的负荷集中转移至 14~17h 和

21~24h,热网 1~8h 的负荷集中转移至 16~24h。通过将 IES 中部分不影响基本生产生活的负荷从灾后初期设备损坏严重、能源供应短缺的时段转移至后期设备修复完毕、能源供应充足的时段,能够优先保障灾后初期关键重要负荷的供应,减少经济和负荷损失。灾后合理的能源价格制定有助于引导用户参与响应,需根据模拟结果事先预估和提前研判。

场景5中,灾后可削减负荷主动参与综合需求响应,其中电负荷在前 11h 内,气负荷在前 12h 内,热负荷在前 15h 内调整了用能需求,在损毁元件抢修过程中配合 IES 削减电负荷 3.7MW,气负荷 1105.85 Sm^3/h 、10.96 MW。虽然与总负荷需求相比响应量占比不高,但是仍在灾后初期为经济损失代价更大的负荷让渡能源供应,提高恢复效率。

电-气相互替代负荷在灾后 0~8h 被强迫损失,9~14h 为电负荷,15~24h 替代为气负荷。原因是 9~14h 电网修复完成度更高,电能相对更为充裕;15~24h 由于 IES 基本恢复供能,考虑分时电价较该时段分时电价更便宜,因此替代为电负荷。电-气-热相互替代负荷在第 14~16h 由热负荷替代为电负荷,分别 0.1、0.1、0.0277MW。此时热负荷需求处于峰值但热网尚未完全恢复,分时电价和气价相近但电能更加充沛,故替代为电负荷。其余时刻由于热价更低,因此仍采用热能供应的方式。

场景6采用协同抢修且考虑了综合需求响应的参与,相比场景4灾后 IES 总经济损失减少 183000 元,电网、气网、热网经济损失分别下降 8.61%、9.76%、9.82%,电网、气网、热网减少损失负荷 2.1938 MW、556.66 Sm^3/h 、22452 MJ。场景6下 IES 中电、气、热可转移负荷、可削减负荷参与综合需求响应的结果如附录C图C3、C4所示,调整后的能源价格和原价对比结果见附录C图C5。电-气相

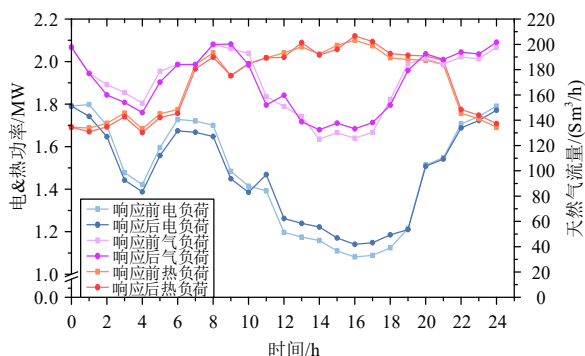


图5 场景5下IES中可转移负荷参与综合需求响应结果

Fig. 5 Results of transferable load participation in integrated demand response in the IES under Scenario 5

互替代负荷在灾后 0~3h 被强迫损失, 3~12h 为电负荷, 13~24h 替代为气负荷。电-气-热相互替代负荷在第 5、12、13、16h 由热负荷替代为电负荷, 分别 0.1、0.1、0.1、0.0276MW。与前一组对比结果的差异主要体现在可削减负荷的响应时间和响应量减少, 侧面说明协同抢修模式下 IES 重要负荷的恢复时间更早, 需要削减的负荷降低。

以上结果表明, 灾后 IES 抢修与恢复过程中考虑综合需求响应能够对有限的能源供应进行再分配, 在客观条件无法改善的情况下主动调整用能策略, 优先为需求更为迫切的负荷恢复供能, 有效降低负荷损失, 减少经济成本, 提升 IES 的恢复效率。

4.2.4 协同抢修的有效性分析

将场景 1 和场景 2、场景 3 和场景 4、场景 5 和场景 6 三组模拟结果对比发现, 采用协同抢修模式后, IES 累计经济损失分别下降 24.96%、17.25%、10.45%, 其中电网经济损失下降最为显著, 热网次之, 气网最少甚至在场景 2 中不降反增。从 IES 恢复时间来看, 协同抢修模式下电网、气网的恢复时间增加, 热网减少, 总恢复时间分别减少 3、2、2h 且各子系统的恢复时间更加均衡。以第三组为例, 场景 5 和场景 6 下各个抢修队伍的抢修路径见附录 C 图 C6 和图 6。其余场景的负荷恢复结果、故障抢修调度方案见附录 C 图 C7—C15。

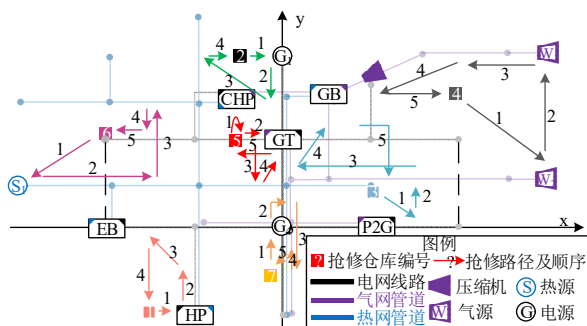


图 6 场景 6 协同模式下的 IES 故障抢修次序

Fig. 6 Maintenance failures sequence under scenario 6

对比两种抢修模式下各队伍的抢修路径发现, 独立抢修模式下电、气、热各自修复, 抢修队伍的路径存在交叉和重叠, 且电网在先于热网和气网抢修完成后抢修队伍直接返回仓库, 造成了抢修资源和时间的浪费; 而协同抢修模式下抢修队伍的路径几乎不存在重叠, 任务分配更加均衡合理, 电网、热网和气网几乎同步完成抢修, IES 经济成本和负荷损失明显降低。由此可见, 协同抢修模能够避免抢修任务分配不均、路程过远等问题造成的时间和资源的浪费, 降低 IES 的经济损失并提高恢复效率。但协同抢修模式存在延后部分子系统负荷恢复时

间的风险, 同时给 IES 抢修队伍提出更高的技术要求。因此, 在选择抢修方案时需要根据故障的位置、抢修的资源 and 子系统恢复的倾向性合理研判。

5 结论

针对当下 IES 抢修与恢复方法中较少考虑热网模型及其耦合关系、大多忽略客观存在的气/热动态特性的影响、负荷侧灵活性资源挖掘不够充分的问题, 本文提出一种考虑综合需求响应和气/热关系的 IES 协同抢修方法及其完整的优化计算模型。算例结果表明:

1) 气/热惯性的本质是 IES 各能源系统时间尺度的不统一, 其作为一种 IES 中客观存在的固有特性, 不仅影响 IES 的抢修和恢复的策略, 而且与 IES 灾后恢复过程的经济成本、负荷损失、恢复时间紧密相关。故不可忽视气/热惯性的影响, 应当按照所提方法结合其特征调整、优化抢修和恢复策略。

2) 灾后客观条件无法改善的前提下, 在 IES 抢修和恢复过程中积极发挥 IES 源侧和负荷侧的灵活调控能力, 鼓励各种类型负荷参与综合需求响应, 实现子系统自身的用能调整和相互之间的能源互补互济, 能够有效降低 IES 的经济和负荷损失, 优先保障重要负荷的能源供应。

3) 独立抢修和协同抢修两种模式各具优势, 但协同抢修能够优化 IES 整体的修复策略, 顾及各子系统损毁元件的抢修任务, 避免资源浪费, 有效降低 IES 的经济、负荷损失, 缩短整体恢复时间。

后续的研究将针对灾害随机性导致的初始故障场景的不确定性、优化 IES 抢修与恢复策略展开。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国德州 2021 年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 1-9. ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9(in Chinese).
- [2] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.
- [3] 孔惠文, 马静, 程鹏, 等. 基于灾害场景预估的配电系统韧性两阶段故障恢复策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3812-3821. KONG Huiwen, MA Jing, CHENG Peng, et al. Resilience two-stage fault recovery strategy for distribution network based on disaster scenario prediction[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3812-3821(in Chinese).
- [4] 徐岩, 郭佳睿, 马天祥. 考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修

- 协调优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5516-5528.
- XU Yan, GUO Jiarui, MA Tianxiang. Coordinated optimization of fault recovery and emergency repair for distribution network considering resilience improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5516-5528(in Chinese).
- [5] LIN Yanling, CHEN Bo, WANG Jianhui, et al. A combined repair crew dispatch problem for resilient electric and natural gas system considering reconfiguration and DG islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2755-2767.
- [6] 贾伯岩, 李丹, 李雄宇, 等. 电-气综合能源系统多故障两阶段恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 113-123.
- JIA Boyan, LI Dan, LI Xiongyu, et al. Two-stage restoration strategy for multi fault of an electric gas integrated energy system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 113-123(in Chinese).
- [7] 彭寒梅, 张玲, 谭貌, 等. 重构与抢修协同下电-气区域综合能源系统多阶段博弈故障恢复方法[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 27-38.
- PENG Hanmei, ZHANG Ling, TAN Mao, et al. Multi-stage game fault recovery method for electricity-gas regional integrated energy system under reconfiguration and repair coordination[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 27-38(in Chinese).
- [8] 徐望胜, 随权, 曹善康, 等. 考虑网架动态恢复与灵活资源支持的综合能源系统灾后双层优化调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(7): 67-77.
- XU Wangsheng, SUI Quan, CAO Shankang, et al. Dual-layer optimal dispatching strategy for integrated energy system after disasters considering dynamic grid recovery and flexible resource support[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2024, 36(7): 67-77(in Chinese).
- [9] 张儒峰, 杨泽栋, 闫克非. 区域电-气综合能源系统故障恢复与检修协调优化策略[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(4): 90-100.
- ZHANG Rufeng, YANG Zedong, YAN Kefei. Coordinative optimization strategy for fault recovery and maintenance of regional integrated electricity-natural gas system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(4): 90-100(in Chinese).
- [10] 李尚宇, 秦昱, 田巍巍, 等. 计及电-气-热综合能源的有源配电网故障恢复[J]. 供用电, 2024, 41(3): 51-60.
- LI Shangyu, QIN Yu, TIAN Weiwei, et al. Active distribution network service restoration with integrated electricity-gas-heat energy[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 51-60(in Chinese).
- [11] JIANG Meihui, XU Zhenjiang, ZHU Hongyu, et al. Integrated demand response modeling and optimization technologies supporting energy internet[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114757.
- [12] 徐箴, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205, 7446.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205, 7446(in Chinese).
- [13] 熊展, 王素, 王玲玲, 等. 考虑多能互补灵活性和用户低碳意愿的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2691-2701.
- XIONG Zhan, WANG Su, WANG Lingling, et al. Robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering multi-energy flexibility complementary and users' low-carbon willingness [J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2691-2701(in Chinese).
- [14] 喻洁, 曹阳, 鄢鹏阳, 等. 考虑用户需求响应博弈推演的区域综合能源运营策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3745-3757.
- YU Jie, CAO Yang, YAN Pengyang, et al. Integrated regional energy operation strategy considering user demand response game deduction [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3745-3757(in Chinese).
- [15] 徐箭, 胡佳, 廖思阳, 等. 考虑网络动态特性与综合需求响应的综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 40-48.
- XU Jian, HU Jia, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated energy system considering dynamic characteristics of network and integrated demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 40-48(in Chinese).
- [16] ZHANG Liting, LI Qifen, FANG Yue, et al. Optimization scheduling of community integrated energy system considering integrated demand response[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111230.
- [17] LUO Yanhong, HAO Haowei, YANG Dongsheng, et al. Multi-objective optimization of integrated energy systems considering ladder-type carbon emission trading and refined load demand response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(3): 828-839.
- [18] SHARIFI V, ABDOLLAHI A, RASHIDINEJAD M, et al. Integrated electricity and natural gas demand response in flexibility-based generation maintenance scheduling[J]. IEEE Access, 2022, 10: 76021-76030.
- [19] 龚凌霄, 刘天琪, 何川, 等. 考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 39-47.
- GONG Lingxiao, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Reliability evaluation of integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 39-47(in Chinese).
- [20] 梁俊鹏, 张高航, 李凤婷, 等. 计及氢储能与需求响应的路域综合能源系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4918-4927.
- LIANG Junpeng, ZHANG Gaochang, LI Fengting, et al. Road-domain integrated energy system planning strategy considering hydrogen storage and demand response[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4918-4927(in Chinese).
- [21] 冯翼晗, 郑宇鹏, 陈权威, 等. 基于负荷碳排放特征的配电网源荷协同规划方法[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 966-975.
- FENG Yihan, ZHENG Yupeng, CHEN Quanwei, et al. A source-load collaborative planning method for distribution network based on load carbon emission characteristics[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 966-975(in Chinese).
- [22] 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): 1305-1315.
- 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): 1305-1315(in Chinese).
- [23] 王舒萍, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及用户热舒适度的综合能源系统可靠性指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 86-95.
- WANG Shuping, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Reliability indices and evaluation method of integrated energy system considering thermal comfort level of customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 86-95(in Chinese).



蒋明轩

在线出版日期: 2025-04-24.

收稿日期: 2025-03-07.

作者简介:

蒋明轩(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统的可靠性评估、灾后恢复与抢修,

E-mail: xjtujmx@stu.xjtu.edu.cn;

卞艺衡(1994), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为弹性电网规划与优化运行等, E-mail: byh0xyz@stu.xjtu.edu.cn;

李更丰(1984), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为弹性电力系统及其恢复力评估、电力市场等, E-mail: gengfengli@xjtu.edu.cn.

(责任编辑 徐梅)

附录 A 模型和方法的补充说明

A-1 目标函数参数说明

式中： ϖ_i^c 、 ϖ_j^g 、 ϖ_k^h 分别为中断供能后单位电负荷、气负荷、热负荷损失惩罚； $P_{shed,i,t}$ 、 $W_{shed,j,t}$ 、 $H_{shed,k,t}$ 分别为电负荷 i 、气负荷 j 、热负荷 k 在 t 时刻的强迫损失负荷量； N_e 、 N_g 、 N_h 分别为电、气、热节点集合； Δt 为单位时间； α 为权重系数，用于衡量修复时间权重； T 为抢修恢复周期； DP 为抢修仓库集合； $N_{e,g,h}^g$ 为抢修仓库所划分的待抢修元件集合，下标分别对应电、气、热； $\tau_{d,t}^g$ 为表示故障元件修复时刻的 0-1 变量，在 t 时段中完成修复则取 1，其余时刻取 0； $n_{use,j}^g$ 和 $n_{use,k}^h$ 分别为气网节点 j 、热网节点 k 的用户数量(百户)； ψ_j^g 和 ψ_k^h 分别为气/热惯性经济补偿的矩阵； $F_{j,t}^g$ 和 $F_{j,t}^h$ 为表示恢复时间在周期内位置的 0-1 变量； ρ_i^c 、 ρ_j^g 、 ρ_k^h 分别为综合需求响应调整后的电、气、热分时价格； $P_{use,i,t}$ 、 $W_{use,j,t}$ 、 $H_{use,k,t}$ 分别为电负荷 i 、气负荷 j 、热负荷 k 在 t 时刻的实际用能量； $c_{cut,i}^c$ 、 $c_{cut,j}^g$ 、 $c_{cut,k}^h$ 分别为电、气、热可削减负荷的经济补偿； $P_{cut,i,t}$ 、 $W_{cut,j,t}$ 、 $H_{cut,k,t}$ 分别为电负荷 i 、气负荷 j 、热负荷 k 在 t 时刻响应的负荷削减量。

A-2 电力系统约束

本文采用线性化处理后的 Distflow 模型作为电网运行潮流约束^[A1]，主要包含：节点的有功和无功功率平衡、支路潮流约束、负荷损失约束、节点电压约束、分布式电源出力约束。

1) 节点功率平衡

$$P_{DG,i,t} - (P_{load,i,t} - P_{shed,i,t}) = \sum_{l \in \Omega(i)} P_{line,l,t} - \sum_{l \in \Pi(i)} P_{line,l,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A1)$$

$$Q_{DG,i,t} - (Q_{load,i,t} - Q_{shed,i,t}) = \sum_{l \in \Omega(i)} Q_{line,l,t} - \sum_{l \in \Pi(i)} Q_{line,l,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A2)$$

式中： $P_{DG,i,t}$ 和 $Q_{DG,i,t}$ 分别为分布式电源的有功和无功出力； $P_{load,i,t}$ 和 $Q_{load,i,t}$ 分别为负荷有功功率和无功功率； $P_{shed,i,t}$ 和 $Q_{shed,i,t}$ 分别为负荷强迫损失有功功率和无功功率； $P_{line,l,t}$ 和 $Q_{line,l,t}$ 分别为支路有功功率和支路无功功率； $\Omega(i)$ 和 $\Pi(i)$ 分别为节点 i 的下游支路和上游支路集合； N_e 为电网节点集合。

考虑耦合元件和综合需求响应后，对式(A1)作出如下修正：

$$P_{DG,i,t} - P_{use,i,t} = \sum_{l \in \Omega(i)} P_{line,l,t} - \sum_{l \in \Pi(i)} P_{line,l,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A3)$$

$$P_{use,i,t} = P_{load,i,t} + P_{couple,i,t} + P_{dsr,i,t} - P_{shed,i,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A4)$$

$$P_{couple,i,t} = P_{cps,i,t} + P_{p2g,i,t} + P_{HP,i,t} + P_{EB,i,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A5)$$

$$P_{dsr,i,t} = P_{shiftq,i,t} - P_{shiftl,i,t} - P_{cut,i,t} + T_{rep2,i,t} - T_{rep1,i,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A6)$$

式中： $P_{couple,i,t}$ 为电负荷 i 在 t 时刻由于耦合作用产生的等效电负荷，由压缩机等效电功率 $P_{cps,i,t}$ 、P2G 等效电功率 $P_{p2g,i,t}$ 、HP 等效电功率 $P_{HP,i,t}$ 、EB 等效电功率 $P_{EB,i,t}$ 构成； $P_{dsr,i,t}$ 为电负荷 i 在 t 时刻参加综合需求响应所调整的电负荷需求，由转入功率 $P_{shiftq,i,t}$ 、转出功率 $P_{shiftl,i,t}$ 、主动削减功率 $P_{cut,i,t}$ 、电-气替代功率 $T_{rep1,i,t}$ 和电-气-热替代功率 $T_{rep2,i,t}$ 构成。需要注意的是，式(A3)-式(A6)是为了模型统一而进行修正，其中各项需要根据节点是否连接耦合元件及其类型、参与综合需求响应的负荷类型进行判断，若不存在则取 0 即可。

2) 支路潮流约束

$$-M(1 - ul_{l,t}^c) \leq U_{i,t} - U_{j,t} - (r_l P_{line,l,t} + x_l Q_{line,l,t}) \leq M(1 - ul_{l,t}^c), \forall l \in L_e, \forall t \quad (A7)$$

$$-S_{line,l}^{\max} ul_{l,t}^c \leq P_{line,l,t} \leq S_{line,l}^{\max} ul_{l,t}^c \quad (A8)$$

$$-S_{line,l}^{\max} ul_{l,t}^c \leq Q_{line,l,t} \leq S_{line,l}^{\max} ul_{l,t}^c \quad (A9)$$

式中：对电网输电线路集合 L_e 中的任意线路 l ， $ul_{l,t}^c$ 为表征线路工作状态的 0-1 变量，取 1 正常； $U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为该线路首末端的电压幅值； r_l 和 x_l 分别为该线路的电阻、电抗； $S_{line,l}^{\max}$ 为线路最大输送容量。

3) 负荷损失约束

$$0 \leq P_{shed,i,t} \leq P_{load,i,t}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A10)$$

$$Q_{shed,i,t} = P_{shed,i,t} \tan \varphi_i, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A11)$$

式中： φ_i 为负荷点 i 的功率因数角。

4) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max}, \forall i \in N_e, \forall t \quad (A12)$$

式中： $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 为电压允许偏差上限和下限。

5) 分布式电源出力

$$P_{DG,i}^{\min} ug_{i,t}^c \leq P_{DG,i,t} \leq P_{DG,i}^{\max} ug_{i,t}^c, \forall i \in DG, \forall t \quad (A13)$$

$$Q_{DG,i}^{\min} ug_{i,t}^c \leq Q_{DG,i,t} \leq Q_{DG,i}^{\max} ug_{i,t}^c, \forall i \in DG, \forall t \quad (A14)$$

式中： $P_{DG,i}^{\max}$ 和 $P_{DG,i}^{\min}$ 分别为分布式电源有功出力的上、下限； $Q_{DG,i}^{\max}$ 和 $Q_{DG,i}^{\min}$ 分别为分布式电源无功出力的上、下限； $ug_{i,t}^c$ 为表征电源工作状态的 0-1 变量，取 1 正常； DG 为分布式电源集合。

A-3 天然气系统约束

1) 节点流量平衡

$$W_{GW,j,t} - (W_{load,j,t} - W_{shed,j,t}) = \sum_{z \in \Omega(j)} W_{pipe,z,t} - \sum_{z \in \Pi(j)} W_{pipe,z,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A15)$$

式中: $W_{GW,j,t}$ 为气源出力; $W_{load,j,t}$ 和 $W_{shed,j,t}$ 分别为气负荷和负荷点强迫损失天然气流量; $W_{pipe,z,t}$ 为流经天然气管道的气流量; $\Omega(j)$ 和 $\Pi(j)$ 分别为节点 j 的下游管道和上游管道集合; N_g 为气网节点集合。

考虑耦合元件和综合需求响应后, 对式(A15)作出如下修正:

$$W_{GW,j,t} - W_{use,j,t} = \sum_{z \in \Omega(j)} W_{pipe,z,t} - \sum_{z \in \Pi(j)} W_{pipe,z,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A16)$$

$$W_{use,j,t} = W_{load,j,t} + W_{couple,j,t} + W_{dsr,j,t} - W_{shed,j,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A17)$$

$$W_{couple,j,t} = W_{GT,j,t} + W_{CHP,j,t} + W_{GB,j,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A18)$$

$$W_{dsr,j,t} = W_{shiftq,j,t} - W_{shifl,j,t} - W_{cut,j,t} + s_m T_{rep2,j,t} + s_m T_{rep1,j,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A19)$$

式中: $W_{couple,j,t}$ 为气负荷 j 在 t 时刻由于耦合作用产生的等效气负荷, 由燃气轮机的等效气负荷 $W_{GT,j,t}$ 、CHP 等效气负荷 $W_{CHP,j,t}$ 、GB 等效气负荷 $W_{GB,j,t}$ 构成; $W_{dsr,j,t}$ 为电负荷 j 在 t 时刻参加综合需求响应所调整的气负荷需求, 由转入负荷 $W_{shiftq,j,t}$ 、转出负荷 $W_{shifl,j,t}$ 、主动削减流量 $W_{cut,j,t}$ 、电-气替代功率 $T_{rep1,i,t}$ 和电-气-热替代功率 $T_{rep2,i,t}$ 构成, s_m 是功率与天然气流量转化系数。需要注意的是, 式(A16)-式(A19)是为了模型统一而进行修正, 其中各项需要根据节点是否连接耦合元件及其类型、参与综合需求响应的负荷类型进行判断, 若不存在则取 0 即可。

2) 气源出力

$$W_{GW,j}^{\min} ug_{j,t}^g \leq W_{GW,j,t} \leq W_{GW,j}^{\max} ug_{j,t}^g, \forall j \in GW, \forall t \quad (A20)$$

式中: $W_{GW,j}^{\max}$ 和 $W_{GW,j}^{\min}$ 分别为气源出力上下限; $ug_{j,t}^g$ 为表征气源工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常; GW 为气源集合。

3) 负荷损失约束

$$0 \leq W_{shed,j,t} \leq W_{load,j,t}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A21)$$

4) 节点气压约束

$$\pi_j^{\min} \leq \pi_{j,t} \leq \pi_j^{\max}, \forall j \in N_g, \forall t \quad (A22)$$

式中: $\pi_j^{\max}$ 和 $\pi_j^{\min}$ 分别为节点气压允许上、下限。

5) 含压缩机管道流量约束

$$\pi_{i,t} \leq \pi_{j,t} \leq \lambda_z \pi_{i,t}, \forall z \in L_{g,act}, \forall t \quad (A23)$$

$$0 \leq W_{pipe,z,t} \leq W_{pipe,z}^{\max} ul_{z,t}^g, \forall z \in L_{g,act}, \forall t \quad (A24)$$

式中: 对于压缩机管道集合 $L_{g,act}$ 中的任意管道 z , $\pi_{i,t}$ 和 $\pi_{j,t}$ 分别为管道首、末端气压; λ_z 为升压比; $W_{pipe,z}^{\max}$ 为管道允许最大流量; $ul_{z,t}^g$ 为表征线路工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常。

6) 一般支路流量约束

$$|W_{pipe,z,t}| W_{pipe,z,t} = \phi_z (\pi_{i,t}^2 - \pi_{j,t}^2), \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A25)$$

$$-W_{pipe,z}^{\max} ul_{z,t}^g \leq W_{pipe,z,t} \leq W_{pipe,z}^{\max} ul_{z,t}^g, \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A26)$$

式中: ϕ_z 为管道损耗系数; $L_{g,ina}$ 为一般支路集合; 假定天然气的流向为节点 i 到 j , 用等价决策变量代替平方项有

$$W_{pipe,z,t}^2 = \phi_z (\mu_{i,t} - \mu_{j,t}), \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A27)$$

$$0 \leq W_{pipe,z,t} \leq W_{pipe,z}^{\max} ul_{z,t}^g, \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A28)$$

式中: $\mu_{i,t}$ 和 $\mu_{j,t}$ 分别为管道首末端节点气压的平方; 对式(A27)进行分段线性化处理, 引入线性化辅助决策变量, 可得

$$W_{pipe,z,t,1}^2 + \sum_{x=1}^{NP} (W_{pipe,z,t,x+1}^2 - W_{pipe,z,t,x}^2) \delta_{z,t,x} = \phi_z (\mu_{i,t} - \mu_{j,t}), \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A29)$$

$$W_{pipe,z,t} = W_{pipe,z,t,1} +$$

$$\sum_{x=1}^{NP} (W_{pipe,z,t,x+1} - W_{pipe,z,t,x}) \delta_{z,t,x}, \forall z \in L_{g,ina}, \forall t \quad (A30)$$

$$\delta_{z,t,x+1} \leq \omega_{z,t,x} \leq \delta_{z,t,x}, \forall z \in L_{g,ina}, \forall t, x=1, 2, \dots, NP \quad (A31)$$

$$0 \leq \delta_{z,t,x} \leq 1, \forall z \in L_{g,ina}, \forall t, x=1, 2, \dots, NP \quad (A32)$$

式中: NP 为线性化段数, 下标 x 用于索引第几段, $\omega_{z,t,x}$ 和 $\delta_{z,t,x}$ 为线性化辅助决策变量, 其中前者为 0-1 变量。

A-4 热力系统约束

1) 节点功率平衡

$$H_{TS,k,t} - (H_{load,k,t} - H_{shed,k,t}) = \sum_{m \in \Omega(k)} H_{pipe,m,t} - \sum_{m \in \Pi(k)} (H_{pipe,m,t} - \Delta H_{pipe,m,t}), \forall k \in N_h, \forall t \quad (A33)$$

式中: $H_{TS,k,t}$ 为热源出力; $H_{load,k,t}$ 和 $H_{shed,k,t}$ 分别为热负荷和负荷点强迫损失热功率; $H_{pipe,m,t}$ 和 $\Delta H_{pipe,m,t}$ 分别为流经热网管道的功率和热损耗; $\Omega(k)$ 和 $\Pi(k)$ 分别为节点 k 的下游管道和上游管道集合; N_h 为热网节点集合。

基于能量贬值原理, 由于无耦合元件将热能转换为其他形式能量, 故仅考虑综合需求响应后, 对式(A33)作出如下修正:

$$H_{TS,k,t} - H_{use,k,t} = \sum_{m \in \Omega(k)} H_{pipe,m,t} - \sum_{m \in \Pi(k)} (H_{pipe,m,t} - \Delta H_{pipe,m,t}), \forall k \in N_h, \forall t \quad (A34)$$

$$H_{use,k,t} = H_{load,k,t} + H_{dsr,k,t} - H_{shed,k,t}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A35)$$

$$H_{dsr,k,t} = H_{shiftq,k,t} - H_{shiftl,k,t} - H_{cut,k,t} - T_{rep2,k,t}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A36)$$

式中: $H_{dsr,k,t}$ 为电负荷 k 在 t 时刻参加综合需求响应所调整的热负荷需求, 由转入负荷 $H_{shiftq,k,t}$ 、转出负荷 $H_{shiftl,k,t}$ 、主动削减流量 $H_{cut,k,t}$ 、电-气-热替代功率 $T_{rep2,i,t}$ 构成。需要注意的是, 式(A34)-式(A36)是为了模型统一而进行修正, 其中各项需要根据节点是否参与综合需求响应的负荷类型进行判断, 若不存在则取 0 即可。

2) 热源出力

$$H_{TS,k}^{min} ug_{k,t}^h \leq H_{TS,k,t} \leq H_{TS,k}^{max} ug_{k,t}^h, \forall k \in TS, \forall t$$

(A37)式中: $H_{TS,k}^{max}$ 和 $H_{TS,k}^{min}$ 分别为热源出力上下限; $ug_{k,t}^h$ 为表征热源工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常; TS 为热源集合。

3) 负荷损失约束

$$0 \leq H_{shed,k,t} \leq H_{load,k,t}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A38)$$

4) 热网管道约束

$$H_{pipe,m}^{min} = 2\pi \frac{T_{sw} - T_{en}}{K_m} l_m, \forall m \in L_h \quad (A39)$$

$$H_{pipe,m}^{max} = \rho_w C_p v_m^{max} S_m (T_{sw} - T_{rw}), \forall m \in L_h \quad (A40)$$

$$H_{pipe,m}^{min} ul_{m,t}^h \leq H_{pipe,m,t} \leq H_{pipe,m}^{max} ul_{m,t}^h, \forall m \in L_h, \forall t \quad (A41)$$

式中: 对于热网管道集合 L_h 中的任意管道 m , $H_{pipe,m}^{max}$ 和 $H_{pipe,m}^{min}$ 分别为管道输送热功率上下限; T_{sw} 和 T_{rw} 为热网标准供、回热温度; T_{en} 为外界环境温度; l_m 和 K_m 分别为管道长度和热损耗系数; S_m 为管道横截面积; ρ_w 和 C_p 分别为热水密度和比热容; v_m^{max} 为管道允许的最大流速; $ul_{m,t}^h$ 为表征管道工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常。

5) 热损耗约束

$$\Delta H_{pipe,m,t} = 2\pi \frac{T_{s,k,t} - T_{en}}{K_m} l_m, \forall m \in L_h, \forall t \quad (A42)$$

式中: $T_{s,k,t}$ 为节点 k 在 t 时刻的供热温度。

6) 节点供回热温度约束

$$T_{s,k}^{min} \leq T_{s,k,t} \leq T_{s,k}^{max}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A43)$$

$$T_{s,k,t} = T_{sw}, \forall k \in TS, \forall t \quad (A44)$$

$$T_{r,k,t} = T_{rw}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A45)$$

式中: $T_{s,k}^{max}$ 和 $T_{s,k}^{min}$ 分别为最高和最低允许供热温度; $T_{r,k,t}$ 为节点 k 在 t 时刻的回热温度。

7) 节点温度-热功率关系

$$H_{TS,k,t} - H_{use,k,t} = C_p M_{k,t} (T_{s,k,t} - T_{r,k,t}) \quad (A46)$$

式中: $H_{use,k,t}$ 为热用户实际使用功率; $M_{k,t}$ 为 t 时刻流经节点 k 的质量流量。

8) 质量流量连续

$$M_{k,t} = \sum_{m \in \Omega(k)} M_{pipe,m,t} - \sum_{m \in \Pi(k)} M_{pipe,m,t}, \forall k \in N_h, \forall t \quad (A47)$$

式中: $M_{pipe,m,t}$ 为流经管道 m 的质量流量。

9) 支路质量流量约束

$$-\rho_w v_m^{max} S_m ul_{m,t}^h \leq M_{pipe,m,t} \leq \rho_w v_m^{max} S_m ul_{m,t}^h, \forall m \in L_h \quad (A48)$$

A-5 耦合元件约束

综合能源系统中各种耦合元件的数学模型可参考文献[A2-A3], 本文中的耦合元件主要包含燃气轮机、电驱动压缩机、电制气设备、热电联产机组、热泵、电锅炉、燃气锅炉。

1) 燃气轮机约束

$$W_{GT,j,t} = a_j P_{DG,i,t} + b_j, \forall i, j \in GT, \forall t \quad (A49)$$

式中: $W_{GT,j,t}$ 为燃气轮机的等效气负荷; a_j 和 b_j 为燃气轮机的参数; GT 为燃气轮机节点集合。

2) 电动压缩机约束

$$P_{cps,i,t} = c_z W_{pipe,z,t}, \forall z \in L_{g,act}, \forall t \quad (A50)$$

式中: $P_{cps,i,t}$ 为压缩机等效电功率; c_z 为压缩机参数。

3) 电制气设备约束

$$W_{GW,j,t} = \eta_{P2G,i} P_{P2G,i,t} / Q_{LHV}, \forall i, j \in P2G, \forall t \quad (A51)$$

式中: $\eta_{P2G,i}$ 为 P2G 能量转化效率; $P_{P2G,i,t}$ 为 P2G 等效电功率; Q_{LHV} 为天然气低热值; $P2G$ 为 P2G 节点集合。

4) 热电联产机组约束

$$P_{DG,i,t} = C_m H_{TS,k,t}, \forall i, k \in CHP, \forall t \quad (A52)$$

$$W_{CHP,j,t} = P_{DG,i,t} / \eta_{CHP,j}, \forall i, j \in CHP, \forall t \quad (A53)$$

式中: C_m 为电热比; $W_{CHP,j,t}$ 为 CHP 等效气负荷; $\eta_{CHP,j}$ 为 CHP 电转化效率; CHP 为 CHP 节点集合。

5) 热泵约束

$$H_{TS,k,t} = \eta_{HP,i} P_{HP,i,t}, \forall i, k \in HP, \forall t \quad (A54)$$

式中: $\eta_{HP,i}$ 为 HP 产热效率; $P_{HP,i,t}$ 为 HP 等效电功率; HP 为 HP 节点集合。

6) 电锅炉约束

$$H_{TS,k,t} = \eta_{EB,i} P_{EB,i,t}, \forall i, k \in EB, \forall t \quad (A55)$$

式中: $\eta_{EB,i}$ 为 EB 能量转化效率; $P_{EB,i,t}$ 为 EB 等效电功率; EB 为 EB 节点集合。

7) 燃气锅炉约束

$$H_{TS,k,t} = \eta_{GB,j} W_{GB,j,t}, \forall j, k \in GB, \forall t \quad (A56)$$

式中: $\eta_{GB,j}$ 为 GB 能量转化效率; $W_{GB,j,t}$ 为 GB 等效气负荷; GB 为 GB 节点集合。

A-6 网络拓扑重构约束及开关操作约束

网络拓扑重构前后, 配电网节点和线路的位置不变, 仅根据故障位置和联络开关位置、开闭情况改变网络的连接关系, 因此本文基于单商品流法^[A4]引入虚拟潮流和虚拟功率对重构后的配电网连通性进行描述。假设电力系统因故障解列为多个孤岛, 其中部分孤岛内含含有分布式电源或配置联络开关, 而其余孤岛则因完全失联形成孤立区域。对于含分布式电源或联络开关的孤岛, 可通过闭合联络开关将其接入相邻非故障馈线或以分布式电源或耦合元件为电源形成独立供电的电网。考虑到灾后所有孤岛均由故障线路的隔离而形成, 两端节点构成孤岛边界, 本文选择故障线路两端节点作为潜在根节点候选集合 R , 其在重构后可能成为孤岛内电网的电源点或互联枢纽。基于上述方法构建灾后配电网重构网络拓扑约束条件如下:

1) 一般节点辐射约束

$$\sum_{l \in \Pi(i)} P_{fic,l,t} - \sum_{l \in \Omega(i)} P_{fic,l,t} = 1, \forall i \in N_e / R, \forall t \quad (A57)$$

式中: $P_{fic,l,t}$ 为线路 l 的虚拟功率; R 为潜在根节点集合。

2) 潜在根节点辐射约束

$$-M\gamma_{i,t} + 1 \leq \sum_{l \in \Pi(i)} P_{fic,l,t} - \sum_{l \in \Omega(i)} P_{fic,l,t} \leq M\gamma_{i,t} + 1, \forall i \in R, \forall t \quad (A58)$$

式中: $\gamma_{i,t}$ 为表征潜在根节点被确定为根节点的标识的 0-1 变量, 若被确定为根节点则为 1。

3) 虚拟功率约束

$$-Mul_{l,t}^c \leq P_{fic,l,t} \leq Mul_{l,t}^c, \forall l \in L_e, \forall t \quad (A59)$$

式(A59)表示若线路故障或未投入则虚拟功率为 0。

4) 节点间连通性约束

$$\sum_{l \in L_e} ul_{l,t}^c = n_e - \sum_{i \in R} \gamma_{i,t}, \forall t \quad (A60)$$

式中: n_e 为电力系统节点总数; 式(A60)表示闭合分支的数量等于节点的数量减去岛的数量。

在重构过程中, 过于频繁的开关操作不利于保障联络开关的性能和寿命, 故引入开关操作约束。

5) 重构开关操作次数约束

$$Z_{change,l,t} \geq ul_{l,t}^c - ul_{l,t-1}^c, \forall l \in L_e, \forall t \quad (A61)$$

$$Z_{change,l,t} \geq ul_{l,t-1}^c - ul_{l,t}^c, \forall l \in L_e, \forall t \quad (A62)$$

$$Z_{change,l,t} \leq ul_{l,t}^c + ul_{l,t-1}^c, \forall l \in L_e, \forall t \quad (A63)$$

$$Z_{change,l,t} \leq -(ul_{l,t}^c + ul_{l,t-1}^c) + 2, \forall l \in L_e, \forall t \quad (A64)$$

式中: $Z_{change,l,t}$ 为表征开关操作动作的 0-1 变量, 若线路 l 在时刻 t 动作则取 1, 否则取 0。

6) 单条线路和总体操作执行次数约束

$$\sum_{t \in T} Z_{change,l,t} \leq Z_{change,l}^{\max}, \forall l \in L_e \quad (A65)$$

$$\sum_{l \in L_e} \sum_{t \in T} Z_{change,l,t} \leq Z_{change}^{\max} \quad (A66)$$

式中: $Z_{change,l}^{\max}$ 为线路 l 的最大开关操作次数; $Z_{change}^{\max}$ 为重构过程中最大开关操作次数。

A-7 IES 抢修调度模型

本文参照已有的电网抢修职责划分问题的模型^[A5-A7], 将受损设备按地理分布聚类至各抢修仓库, 随后由各仓库统筹调度维修资源实施定向抢修, 降低抢修路径规划复杂度与资源调配冲突, 类似地将 IES 中受损元件的职责划分问题作为一个整数线性规划优化问题进行求解。具体模型如下:

$$\min \sum_{\forall d} \sum_{\forall g} distance(d, g) \cdot s_{d,g} \quad (A67)$$

$$c.t. \sum_{\forall g} s_{d,g} = 1, \forall d \in N_{e,g,h}^g \quad (A68)$$

式中: $distance(d, g)$ 为故障元件 d 与抢修仓库 g 的距离; $s_{d,g}$ 为表征分配归属结果的 0-1 变量, 划分给该抢修仓库则取 1; 式(A67)表示以整体故障元件分配后抢修队伍所需走的路程最短为目标; 式(A68)表示职责划分后必须匹配一对应的抢修关系。

完成对 IES 中故障元件抢修职责的划分后, 本文将抢修队伍调度派遣的物理模型转化为对其抢修过程的时间和空间上的约束以及被修复的元件工作状态约束如下。

1 抢修队伍路径约束

1) 抢修队伍单向路径约束

$$\sum_{s \in N_{e,g,h}^g \setminus \{d\}} x_{d,s,c}^{\partial} - \sum_{s \in N_{e,g,h}^g \setminus \{d\}} x_{s,d,c}^{\partial} = 0, \quad d, s \in N_{e,g,h}^g, c \in C^g \quad (A69)$$

式中: $x_{d,s,c}^{\partial}$ 为表征抢修队路径的 0-1 变量, 若抢修队 c 从 d 到达 s 则取 1, 否则取 0; $N_{e,g,h}^g$ 为抢修仓库所划分的待抢修元件集合, 下标分别对应电、气、热; C^g 为该抢修仓库下属抢修队伍集合。

2) 元件受抢修状态与抢修路径关系

$$y_{d,c}^{\partial} = \sum_{s \in N_{e,g,h}^g \setminus \{d\}} x_{d,s,c}^{\partial}, d \in N_{e,g,h}^g, c \in C^g, g \in DP \quad (A70)$$

式中: $y_{d,c}^{\partial}$ 为表征抢修队伍是否到达过故障元件的 0-1 标识变量, 若到过则为 1, 否则取 0; DP 为抢修仓库集合。

3) 抢修队伍起点、终点约束

$$\sum_{s \in N_{e,g,h}^g} x_{dp,s,c}^{\hat{o}} = 0, c \in C^g \quad (A71)$$

$$\sum_{d \in N_{e,g,h}^g} x_{d,dp,c}^{\hat{o}} = 1, c \in C^g \quad (A72)$$

式(A71)和式(A72)表示抢修队伍必须从起点出发并最终回到终点。

4) 抢修队伍归属约束

$$\sum_{c \in C^g} y_{d,c}^{\hat{o}} = 1, d \in N_{e,g,h}^g, g \in DP \quad (A73)$$

式(A73)表示划分到抢修仓库 $N_{e,g,h}^g$ 下的故障元件只能被唯一抢修队伍 c 修复。

2. 抢修时间约束

1) 抢修时间与抢修队伍到达抢修点的关系

$$t_{d,c} + t_{\text{repair},d,c} + t_{\text{travel},d,s,c} - t_{s,c} \leq (1 - x_{d,s,c}^{\hat{o}})M \quad (A74)$$

$$0 \leq t_{d,c} \leq My_{d,c}^{\hat{o}} \quad (A75)$$

式中: $t_{d,c}$ 和 $t_{s,c}$ 分别为抢修队到达故障元件 d 和 s 的时间; $t_{\text{repair},d,c}$ 为元件修复时长; $t_{\text{travel},d,s,c}$ 为通行时长。

2) 损伤元件抢修次数约束

$$\sum_{t \in T} \tau_{d,t}^{\hat{o}} = 1, d \in N_{e,g,h}^g \quad (A76)$$

式中: $\tau_{d,t}^{\hat{o}}$ 为表示故障元件修复时刻的 0-1 变量, 在 t 时段中完成修复则取 1, 其余时刻取 0。

3) 损伤元件修复时刻的确定

$$\sum_{c \in C^g} (t_{d,c} + t_{\text{repair},d,c} \cdot y_{d,c}^{\hat{o}}) \leq \sum_{t \in T} t \tau_{d,t}^{\hat{o}} \quad (A77)$$

$$\sum_{t \in T} t \tau_{d,t}^{\hat{o}} \leq \sum_{c \in C^g} (t_{d,c} + t_{\text{repair},d,c} y_{d,c}^{\hat{o}}) + 1 - eM \quad (A78)$$

式(A77)和式(A78)为故障元件修复时间确定区间。

3 被修复元件工作状态约束

1) 故障元件修复状态

$$q_{d,t} = \sum_{a=1}^t \tau_{d,a}^{\hat{o}}, d \in N_{e,g,h}^g, t \in T \quad (A79)$$

式中: $q_{d,t}$ 为表征故障元件 d 在时刻 t 是否完成修复的 0-1 变量, 若此时已完成修复则取 1, 否则取 0。

2) IES 各类网络元件工作状态与修复状态关系

$$ul_{l,t}^c \leq q_{l,t}, l \in DL_e, \forall t \quad (A80)$$

$$ul_{z,t}^g = q_{z,t}, z \in DL_g, \forall t \quad (A81)$$

$$ul_{m,t}^h = q_{m,t}, m \in DL_h, \forall t \quad (A82)$$

$$ug_{i,t}^e = q_{i,t}, i \in DS_e, \forall t \quad (A83)$$

$$ug_{j,t}^g = q_{j,t}, j \in DS_g, \forall t \quad (A84)$$

$$ug_{k,t}^h = q_{k,t}, k \in DS_h, \forall t \quad (A85)$$

式中: $ul_{l,t}^c$ 、 $ul_{z,t}^g$ 、 $ul_{m,t}^h$ 分别为表征电网线路、气网管道、热网管道工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常;

$ug_{i,t}^e$ 、 $ug_{j,t}^g$ 、 $ug_{k,t}^h$ 分别为表征电源、气源、热源工作状态的 0-1 变量, 取 1 正常; DL_e 、 DL_g 、 DL_h 分别为电网故障线路集合、气网故障管道集合、热网故障管道集合; DS_e 、 DS_g 、 DS_h 分别为故障电源、故障气源、故障热源集合。

A-8 热网室温-供热功率一阶动态方程推导过程

根据能量守恒定律, 考虑建筑物热惯性和热损耗下的建筑物集总体的温度变化过程可描述为^[A8]:

$$C_a \rho_a V_b [T_f(t + \Delta t) - T_f(t)] = [H_{\text{usc}}(t) - H_{\text{loss}}(t)] \Delta t \quad (A86)$$

$$H_{\text{loss}}(t) = \varepsilon_{\text{loss}} [T_f(t + h\Delta t) - T_{\text{cn}}(t)], 0 < h < 1 \quad (A87)$$

$$\varepsilon_{\text{loss},k} = \frac{\lambda_b}{d_b} S_{b,k} \quad (A88)$$

式(A86)、(A87)与正正式(7)、(8)相同, 式中各参数参考正文说明。

令 Δt 趋于 0, $T_f(t + h\Delta t) \approx T_f(t + \Delta t) \approx T_f(t)$ 修正为:

$$C_{\text{air}} \rho_{\text{air}} V_b \frac{dT_f(t)}{dt} = H_{\text{usc}}(t) - H_{\text{loss}}(t) \quad (A89)$$

$$H_{\text{loss}}(t) = \varepsilon_{\text{loss}} [T_f(t) - T_{\text{cn}}(t)] \quad (A90)$$

忽略建筑物外温度的时变性, 描述热负荷建筑室内温度与热网供热功率变化关系的一阶动态方程, 也即正正式(9):

$$C_a \rho_a V_b \dot{T}_f(t) + \frac{\lambda_b}{d_b} S_b T_f(t) = H_{\text{usc}}(t) + \frac{\lambda_b}{d_b} S_b T_{\text{cn}} \quad (A91)$$

A-9 IES 协同抢修与恢复计及气/热惯性影响的流程

以某热网节点 k 为例, 已知其建筑物相关参数、负荷功率曲线, 未知其供能恢复时间及此时用能功率。

第一步: 将故障初始时刻的供热功率、初始室内温度代入式(9), 以单位时间 Δt 为步长求得不同时刻下的室内温度 $T_{f,k}(t + n\Delta t), n = 0, 1, 2, \dots, T$ 。

第二步: 对于每一个待决策的恢复功率供应时刻 $t + n\Delta t$, 以温度惯性变量 $T_{f,k}(t + n\Delta t)$ 为初值, 此时热用能功率 $H_{\text{usc},k,t}(t)$ 为瞬变参数, 代入式(9)并以单位时间 Δt 为步长求得回升过程每个时刻的室内温度 $T_{h,k}^n(t + m\Delta t), m = n + 1, \dots, T$ 。

第三步: 构造热网节点 k 处热用户室内温度变化矩阵 $T_{f,k}$ 。

$$T_{f,k} = \begin{bmatrix} T_{f,k}(0) & T_{f,k}(0) & T_{f,k}(0) & \cdots & T_{f,k}(0) \\ T_{h,k}^0(\Delta t) & T_{f,k}(\Delta t) & T_{f,k}(\Delta t) & \cdots & T_{f,k}(\Delta t) \\ T_{h,k}^0(2\Delta t) & T_{h,k}^1(2\Delta t) & T_{f,k}(2\Delta t) & \cdots & T_{f,k}(2\Delta t) \\ T_{h,k}^0(3\Delta t) & T_{h,k}^1(3\Delta t) & T_{h,k}^2(3\Delta t) & \cdots & T_{f,k}(3\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{h,k}^0(T\Delta t) & T_{h,k}^1(T\Delta t) & T_{h,k}^2(T\Delta t) & \cdots & T_{f,k}(T\Delta t) \end{bmatrix} \quad (A92)$$

式中：每一列都是热网节点 k 一个恢复功率供应时刻对应的室内温度以 Δt 为步长的解，前 n 个元素是供能恢复前的下降室温，后 $T+1-n$ 个元素是供能恢复后的上升室温。

第四步：构造节点 k 的热惯性经济补偿矩阵 ψ_k^h 。采用线性化的思想，以每个时段的平均温度作为该时段温度，并按热舒适度规定标准计算补偿，参考附录 B 表 B17。

$$\psi_k^h = \begin{bmatrix} \psi_{1,1}^h & \psi_{1,2}^h & \cdots & \psi_{1,T+1}^h \\ \psi_{2,1}^h & \psi_{2,2}^h & \cdots & \psi_{2,T+1}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{T+1,1}^h & \psi_{T+1,2}^h & \cdots & \psi_{T+1,T+1}^h \end{bmatrix} \quad (A93)$$

式中： ψ_{t_1,t_2}^h 表示该节点恢复供能时间为 t_2 时， t_1 时刻建筑物内温度 $T_{f,k}(t_1)$ 按照热舒适度标准给予的经济补偿。

第六步：将矩阵 ψ_k^h 加入目标函数中并对热受迫损失功率的经济惩罚进行修正，在原 IES 协同抢修和恢复优化模型中增加本文第 2.2 节所述构造的决策变量和约束条件。

计及气惯性的方法具体方法与上述流程类似，同样可以得到气网节点 j 的供气气压变化矩阵 $P_{f,j}$ 和气惯性经济补偿矩阵 ψ_j^g ，再将 ψ_j^g 加入目标函数中并对气受迫损失流量的经济惩罚进行修正。

A-10 价格弹性矩阵法及其决策变量和约束构造说明

价格弹性矩阵法的本质是利用弹性指标来表示各时间段内能源价格变化与能源负荷变化之间的关系，通常用于研究和指导能源价格设定与调整、优化能源资源配置、制定和优化需求响应政策 [A9-A10]。以电力系统为例，依据调整后的分时电价与原电价的比值，建立包含自弹性系数和互弹性系数的电量电价弹性矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \varepsilon_{1,2} & \cdots & \varepsilon_{1,T} \\ \varepsilon_{2,1} & \varepsilon_{2,2} & \cdots & \varepsilon_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{T,1} & \varepsilon_{T,2} & \cdots & \varepsilon_{T,T} \end{bmatrix} \quad (A94)$$

$$\varepsilon_{t_1,t_1} = \frac{\Delta L_{t_1}}{L_{t_1}} \left(\frac{\Delta \sigma_{t_1}}{\sigma_{t_1}} \right)^{-1}, \forall t_1 \in T \quad (A95)$$

$$\varepsilon_{t_1,t_2} = \frac{\Delta L_{t_1}}{L_{t_1}} \left(\frac{\Delta \sigma_{t_2}}{\sigma_{t_2}} \right)^{-1}, \forall t_1, t_2 \in T \quad (A96)$$

式中： E 为电量电价弹性矩阵； ε_{t_1,t_1} 为自弹性系数，表征本时段电价对本时段用电量的影响作用； ε_{t_1,t_2} 为互弹性系数，表征其他时段对本时段用电量的影响作用； L_{t_1} 和 ΔL_{t_1} 为 t_1 时段的用户的用电量及其变化量； σ_{t_1} 、 σ_{t_2} 和 $\Delta \sigma_{t_1}$ 、 $\Delta \sigma_{t_2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时段的分时电价及其变化量。

将上述弹性价格矩阵扩展到气、热子系统后 [A11-A12]，可统一表示为

$$E_{c,g,h} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1}^{c,g,h} & \varepsilon_{1,2}^{c,g,h} & \cdots & \varepsilon_{1,T}^{c,g,h} \\ \varepsilon_{2,1}^{c,g,h} & \varepsilon_{2,2}^{c,g,h} & \cdots & \varepsilon_{2,T}^{c,g,h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{T,1}^{c,g,h} & \varepsilon_{T,2}^{c,g,h} & \cdots & \varepsilon_{T,T}^{c,g,h} \end{bmatrix} \quad (A97)$$

$$\varepsilon_{t_1,t_1}^{c,g,h} = \frac{\Delta L_{t_1}^{c,g,h}}{L_{t_1}^{c,g,h}} \left(\frac{\Delta \sigma_{t_1}^{c,g,h}}{\sigma_{t_1}^{c,g,h}} \right)^{-1} \quad (A98)$$

$$\varepsilon_{t_1,t_2}^{c,g,h} = \frac{\Delta L_{t_1}^{c,g,h}}{L_{t_1}^{c,g,h}} \left(\frac{\Delta \sigma_{t_2}^{c,g,h}}{\sigma_{t_2}^{c,g,h}} \right)^{-1} \quad (A99)$$

式中： $E_{c,g,h}$ 为价格弹性矩阵； $\varepsilon_{t_1,t_1}^{c,g,h}$ 为自弹性系数； $\varepsilon_{t_1,t_2}^{c,g,h}$ 为互弹性系数； $L_{t_1}^{c,g,h}$ 和 $\Delta L_{t_1}^{c,g,h}$ 为 t_1 时段的用户的能源用量及其变化量； $\sigma_{t_1}^{c,g,h}$ 、 $\sigma_{t_2}^{c,g,h}$ 和 $\Delta \sigma_{t_1}^{c,g,h}$ 、 $\Delta \sigma_{t_2}^{c,g,h}$ 分别为 t_1 和 t_2 时段的分时价格及其变化量。由于实际中可以根据历史数据估计峰、谷、平时段的价格弹性系数及未响应时的负荷量和原始分时价格，因此仅将负荷改变量 $\Delta L_t^{c,g,h}$ 和价格改变量 $\Delta \sigma_t^{c,g,h}$ 作为决策变量加入可转移类型负荷的约束条件。

A-11 气、热可转移类型负荷约束

1 气可转移类型负荷约束

1) 负荷转移状态约束。

$$u_{\text{shiftl},j,t}^g + u_{\text{shifq},j,t}^g \leq 1, \forall j \in \zeta_g, \forall t \quad (A100)$$

式中： $u_{\text{shiftl},j,t}^g$ 和 $u_{\text{shifq},j,t}^g$ 分别为表示时段 t 内转出和转入负荷的状态标识 0-1 变量，同一时段只能处于一种负荷转移状态； ζ_g 为可转移气负荷点集合。

2) 转移速率约束。

$$0 \leq W_{\text{shiftl},j,t} \leq u_{\text{shiftl},j,t}^g W_{\text{load},j,t} S_{\text{shiftl},j,t}^g, \forall j \in \zeta_g, \forall t \quad (A101)$$

$$0 \leq W_{\text{shifq},j,t} \leq u_{\text{shifq},j,t}^g W_{\text{load},j,t} S_{\text{shifq},j,t}^g, \forall j \in \zeta_g, \forall t \quad (A102)$$

式中： $S_{\text{shiftl},j,t}^g$ 和 $S_{\text{shifq},j,t}^g$ 分别为表示时段 t 内转出和

转入气负荷占总负荷量的百分比，用以衡量单位时间内可转移负荷的容量。

3) 转移容量约束。

$$0 \leq S_{\text{shiftl},j,t}^g \leq S_{\text{shiftl},j}^{g,\max}, \forall j \in \zeta_g, \forall t \quad (\text{A103})$$

$$0 \leq S_{\text{shifq},j,t}^g \leq S_{\text{shifq},j}^{g,\max}, \forall j \in \zeta_g, \forall t \quad (\text{A104})$$

式中： $S_{\text{shiftl},j}^{g,\max}$ 和 $S_{\text{shifq},j}^{g,\max}$ 分别表示气负荷 j 所能接受转出和转入流量的最大比例。

4) 天然气用量平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T W_{\text{shiftl},j,t} = \sum_{t=1}^T W_{\text{shifq},j,t}, \forall j \in \zeta_g \quad (\text{A105})$$

式(A105)表示在给定完成 IES 抢修与恢复的周期内必须满足天然气负荷用量平衡，各时段转出负荷量总和应与各时段转入负荷量总和相等。

5) 气价约束。

$$\sigma_t^g = \sigma_{0,t}^g + \Delta\sigma_t^g, \forall t \quad (\text{A106})$$

式中： $\sigma_{0,t}^g$ 为原分时气价； $\Delta\sigma_t^g$ 为分时气价变化量； σ_t^g 为调整后分时气价。

6) 气量气价弹性矩阵约束。

$$\varepsilon_{t_1,t_2}^g = \frac{(W_{\text{shifq},j,t_1} - W_{\text{shiftl},j,t_1}) / W_{\text{load},j,t_1}}{\Delta\sigma_{t_2}^g / \sigma_{0,t_2}^g}, \quad \forall j \in \zeta_g, \forall t_1, t_2 \in T \quad (\text{A107})$$

式中： $t_1 = t_2$ 时 ε_{t_1,t_2}^g 为自弹性系数，否则为互弹性系数；下标 t_1 和 t_2 用于索引对应的时段。

7) 价格调控幅度约束。

$$(1 - \kappa^g) \sigma_t^g \leq \sigma_t^g \leq (1 + \kappa^g) \sigma_t^g, \forall t \quad (\text{A108})$$

式中： κ^g 为气价可调比例，用以保障不会因为气价波动过大给天然气源荷平衡造成潜在风险。

2. 热可转移类型负荷约束

1) 负荷转移状态约束。

$$u_{\text{shiftl},k,t}^h + u_{\text{shifq},k,t}^h \leq 1, \forall k \in \zeta_h, \forall t \quad (\text{A109})$$

式中： $u_{\text{shiftl},k,t}^h$ 和 $u_{\text{shifq},k,t}^h$ 分别为表示时段 t 内转出和转入负荷的状态标识 0-1 变量，同一时段只能处于一种负荷转移状态； ζ_h 为可转移热负荷点集合。

2) 转移速率约束。

$$0 \leq H_{\text{shiftl},k,t} \leq u_{\text{shiftl},k,t}^h H_{\text{load},k,t} S_{\text{shiftl},k,t}^h, \forall k \in \zeta_h, \forall t \quad (\text{A110})$$

$$0 \leq H_{\text{shifq},k,t} \leq u_{\text{shifq},k,t}^h H_{\text{load},k,t} S_{\text{shifq},k,t}^h, \forall k \in \zeta_h, \forall t \quad (\text{A111})$$

式中： $S_{\text{shiftl},k,t}^h$ 和 $S_{\text{shifq},k,t}^h$ 分别为表示时段 t 内转出和转入热负荷占总负荷量的百分比，用以衡量单位时间内可转移负荷的容量。

3) 转移容量约束。

$$0 \leq S_{\text{shiftl},k,t}^h \leq S_{\text{shiftl},k}^{h,\max}, \forall k \in \zeta_h, \forall t \quad (\text{A112})$$

$$0 \leq S_{\text{shifq},k,t}^h \leq S_{\text{shifq},k}^{h,\max}, \forall k \in \zeta_h, \forall t \quad (\text{A113})$$

式中： $S_{\text{shiftl},k}^{h,\max}$ 和 $S_{\text{shifq},k}^{h,\max}$ 分别表示热负荷 k 所能接受转出和转入功率的最大比例。

4) 热量平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T H_{\text{shiftl},k,t} = \sum_{t=1}^T H_{\text{shifq},k,t}, \forall k \in \zeta_h \quad (\text{A114})$$

式(A114)表示在给定完成 IES 抢修与恢复的周期内必须满足热负荷用量平衡，各时段转出负荷量总和应与各时段转入负荷量总和相等。

5) 热价约束。

$$\sigma_t^h = \sigma_{0,t}^h + \Delta\sigma_t^h, \forall t \quad (\text{A115})$$

式中： $\sigma_{0,t}^h$ 为原分时热价； $\Delta\sigma_t^h$ 为分时热价变化量； σ_t^h 为调整后分时热价。

6) 热量热价弹性矩阵约束。

$$\varepsilon_{t_1,t_2}^h = \frac{(H_{\text{shifq},k,t_1} - H_{\text{shiftl},k,t_1}) / H_{\text{load},k,t_1}}{\Delta\sigma_{t_2}^h / \sigma_{0,t_2}^h}, \quad \forall k \in \zeta_h, \forall t_1, t_2 \in T \quad (\text{A116})$$

式中： $t_1 = t_2$ 时 ε_{t_1,t_2}^h 为自弹性系数，否则为互弹性系数；下标 t_1 和 t_2 用于索引对应的时段。

7) 价格调控幅度约束。

$$(1 - \kappa^h) \sigma_t^h \leq \sigma_t^h \leq (1 + \kappa^h) \sigma_t^h, \forall t \quad (\text{A117})$$

式中： κ^h 为热价可调比例，用以保障不会因为热价波动过大给热网源荷平衡造成潜在风险。

参考文献

- [A1] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [A2] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708. ZENG Ming, LIU Yinxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [A3] 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. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [A4] SHI Wenlong, LIANG Hao, BITTNER M. Dynamic microgrid formation for resilient distribution systems considering large-scale deployment of mobile energy resources[J]. Applied Energy, 2024, 362: 122978.
- [A5] ZHANG Yachao, DING Zhilong. Full-time scale resilience enhancement strategies for an integrated electricity-gas-transportation coupled system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 117: 63-86.
- [A6] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Power Distribution System Outage Management With Co-Optimization of Repairs, Reconfiguration, and DG Dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.

- [A7] ARIF A, MA Shanshan, WANG Zhaoyu, et al. Optimizing Service Restoration in Distribution Systems With Uncertain Repair Time and Demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6828-6838.
- [A8] WANG Zhe, LIN Borong, ZHU Yingxin. Modeling and measurement study on an intermittent heating system of a residence in Cambridgeshire[J]. Building and Environment, 2015, 92: 380-386.
- [A9] KIRSCHEN D S, STRBAC G, CUMPERAYOT P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.
- [A10] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 116-123.
- LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, et al. An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of

demand[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 116-123.

- [A11] 张新鹤, 黄伟, 刘铠诚, 等. 基于综合需求响应的气—电联合分时定价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 91-98.
- ZHANG Xinhe, HUANG Wei, LIU Kaicheng, et al. Optimal combined gas-electricity time-of-use pricing model based on integrated demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4): 91-98.
- [A12] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
- ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.

附录 B 算例数据

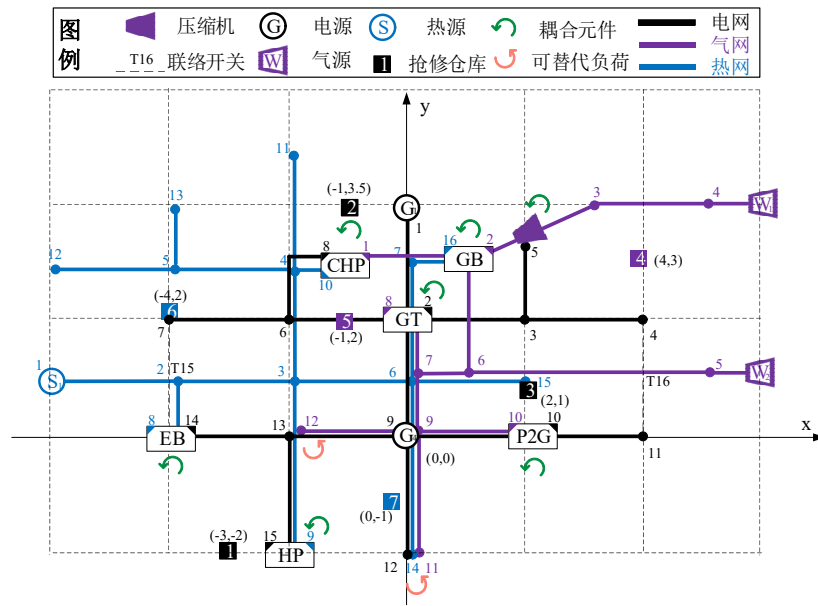


图 B1 IES 网络拓扑结构

Fig. B1 IES topology

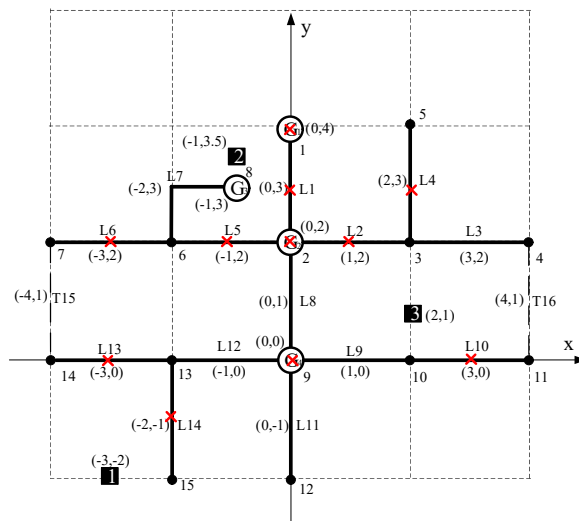


图 B2 电网拓扑结构

Fig. B2 Electricity network topology

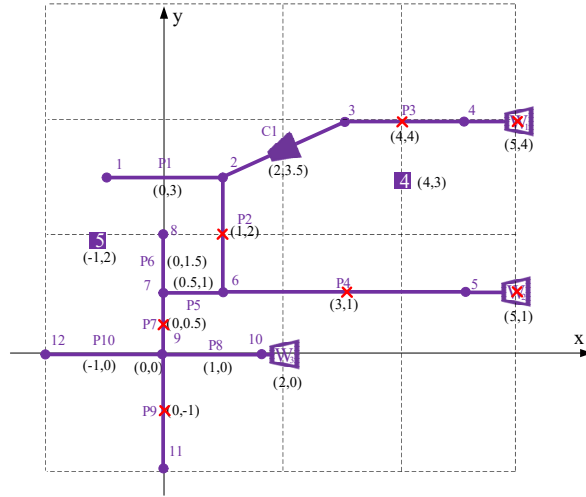


图 B3 气网拓扑结构

Fig. B3 Gas network topology

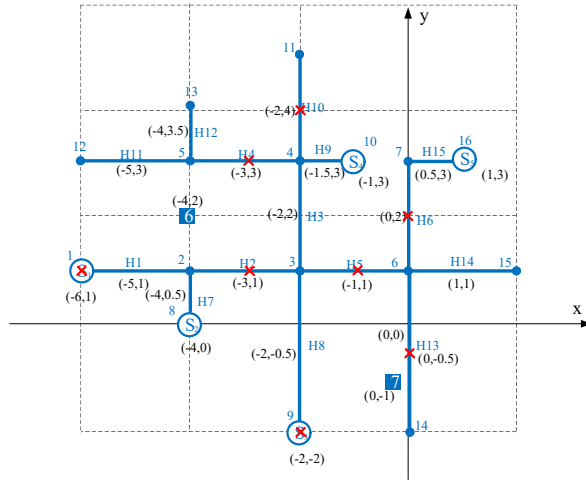


图 B4 热网拓扑结构

Fig. B4 Heat network topology

表 B1 电网负荷数据

Table B1 Loads data of electricity network in IES

节点 编号	有功/ MW	无功/ Mvar	单位经济损失/ (元/MW)	综合需求 响应类型	节点 编号	有功/ MW	无功/ Mvar	单位经济损失/ (元/MW))	综合需求 响应类型
1	0	0	0	1	9	0.24605	0.19684	19000	1
2	0	0	0	1	10	0.24605	0.19684	18000	1
3	0.354651	0.2837208	18500	1	11	1.219325	0.97546	19000	3
4	0.57855	0.46284	18500	3	12	1.670575	1.33646	18500	2
5	0.459812	0.3678496	18000	1	13	0.459812	0.3678496	18000	4
6	0.54605	0.43684	18000	1	14	0.14525	0.1162	18000	1
7	0.5325	0.426	18500	2	15	0.18525	0.1482	19000	1
8	0	0	0	1	—	—	—	—	—

注：综合需求响应类型中，1 表示该负荷为固定负荷，2 表示该负荷为可削减负荷，3 表示该负荷为可转移负荷，4 表示该负荷为可替代负荷

表 B2 电网网络数据

Table B2 Branches data of electricity network in IES

支路编号	首-末	电抗/pu	电阻/pu	最大容量/MW	支路编号	首-末	电抗/pu	电阻/pu	最大容量/MW
1	1-2	0.001927903	0.000656271	5	9	9-10	0.00064343	0.00065741	5
2	2-3	0.000559393	0.000356356	5	10	10-11	0.000981542	0.000515418	5
3	3-4	0.000895029	0.00057017	5	11	9-12	0.000165816	0.000168841	5
4	2-5	0.0006359	0.0004837	5	12	9-13	0.000654187	0.000321674	5
5	6-6	0.000559393	0.000356356	5	13	13-14	0.000482186	0.000355418	5
6	6-7	0.000385495	0.000376092	5	14	13-15	0.000165481	0.000658415	5

7	2-8	0.0004851	0.0005324	5	15	7-14	0.000391847	0.000215641	5
8	2-9	0.001927903	0.000656271	5	16	4-11	0.000657744	0.000347841	5

表 B3 电源数据

Table B3 Generators data of electricity network in IES

电源编号	节点	无功上限/Mvar	无功下限/Mvar	有功上限/MW	有功下限/MW	X 轴坐标	Y 轴坐标	电源类型
1	1	3.5	-2	3.5	0	0	4	DG
2	2	2.7	-1.5	2.7	0	0	2	GT
3	8	1.2	-1	1.2	0	-1	3	CHP
4	9	2.5	-2	2.5	0	0	0	DG

表 B4 气网负荷数据

Table B4 Loads data of gas network in IES

节点 编号	负荷量/ (Sm ³ /h)	最低气压/ (bar)	最高气压/ (bar)	单位经济损失 (元/Sm ³ /h)	管道直径/ mm	初始压强 P_0 (bar)	用户数量/ (百户)	综合需求 响应类型
1	100	105	170	175	300	140	2	1
2	80	135	200	180	300	150	3	1
3	120	70	170	180	300	140	3	3
4	0	150	240	0	400	160	0	1
5	0	100	180	0	400	160	0	1
6	200	140	200	160	350	150	4	2
7	150	140	195	160	350	145	3	2
8	75	120	170	160	300	140	1	1
9	80	135	200	270	300	150	2	3
10	0	110	180	0	400	160	0	1
11	50	120	170	250	250	140	1	4
12	80	100	180	250	300	145	2	4

注：综合需求响应类型中，1 表示该负荷为固定负荷，2 表示该负荷为可削减负荷，3 表示该负荷为可转移负荷，4 表示该负荷为可替代负荷

表 B5 气网网络数据

Table B5 Pipes data of gas network in IES

支路编号	首-末	管道损耗系数(Sm ³ /h/bar) ²	最大流量/(Sm ³ /h)	支路编号	首-末	管道损耗系数(Sm ³ /h/bar) ²	最大流量(Sm ³ /h)
1	2-1	2560.36	800	6	7-8	1640.25	800
2	2-6	1406.25	800	7	9-7	2134.44	800
3	4-3	2510.01	800	8	10-9	2352.25	800
4	5-6	2052.09	800	9	9-11	2510.01	800
5	6-7	1892.25	800	10	9-12	1892.25	800

表 B6 气源数据

Table B6 Gaswells data of gas network in IES

气源编号	节点	出力上限/(Sm ³ /h)	出力下限/(Sm ³ /h)	X 轴坐标	Y 轴坐标	气源类型
1	4	0	500	5	4	GS
2	5	0	600	5	1	GS
3	10	20	210	2	0	P2G

表 B7 热网负荷数据

Table B7 Loads data of heat network in IES

节点编号	热功率/MW	单位经济损失/(元/MW)	建筑物初始室内温度 T_0 (°C)	建筑等效长宽/m	用户数量/(百户)	综合需求响应类型
1	0	0	5	400	0	1
2	0.5	16000	24	350	1	2
3	0.6	18000	25	400	1	3
4	0.8	14000	25	525	2	1
5	0.3	16000	24	225	0.5	1
6	0.5	16000	24	350	1	1
7	0.75	18000	25	500	2	3
8	0.6	16000	25	400	1	1
9	0.5	16000	24	350	1	1
10	0	0	5	400	0	1
11	1.5	18000	26	900	3	2
12	0.75	16000	25	500	1.5	1
13	0.75	16000	25	500	1.5	3
14	0.5	22000	24	350	1	4

15	0.5	16000	24	350	1	2
16	0	0	5	400	0	1

表 B8 热网网络数据

Table B8 Pipes data of heat network in IES

支路编号	首-末	长度/m	管径/mm	最大质量流率/(kg/s)	支路编号	首-末	长度/m	管径/mm	最大质量流率/(kg/s)
1	1-2	1000	400	60	9	4-10	500	300	40
2	2-3	1000	400	50	10	4-11	1000	300	20
3	3-4	1000	400	40	11	5-12	1000	200	20
4	4-5	1000	400	40	12	5-13	500	200	20
5	3-6	1000	400	40	13	6-14	1500	200	20
6	6-7	1000	400	30	14	6-15	1000	200	30
7	2-8	500	200	30	15	7-16	500	300	30
8	3-9	1500	300	30	—	—	—	—	—

表 B9 热源数据

Table B9 Thermal stations data of heat network in IES

热源编号	节点	出力上限/MW	出力下限/(Sm ³ /h)	X 轴坐标	Y 轴坐标	热源类型
1	1	4.5	0	-6	1	TS
2	8	0.8	0	-4	0	EB
3	9	1.5	0	-2	-2	HP
4	10	1.3	0	-1	3	CHP
5	16	1.2	0	1	3	GB

表 B10 IES 耦合设备参数

Table B10 Coupled equipments data of IES

设备	参数类型	参数值	设备	参数类型	参数值
燃气轮机(GT)	燃气轮机参数	$a_i=105, b_i=5$	热泵(HP)	产热效率	$\eta_{HP,i}=2.5$
	耦合节点	电 2-气 8		耦合节点	电 15-热 9
	出力上下限	2.7 MW, 0 MW		出力上下限	1.5 MW, 0 MW
热电联产机组(CHP)	工作模式	背压式	电锅炉(EB)	能量转化效率	$\eta_{EB,i}=0.9$
	电热比	$c_m=1.3$		耦合节点	电 14-热 8
	电转化效率	$\eta_{CHP,i}=0.417$		出力上下限	0.8 MW, 0 MW
	耦合节点	电 8-气 1-热 10	电制气设备(P2G)	能量转化效率	$\eta_{P2G,i}=0.85$
	电网侧出力上下限	1.2 MW, 0 MW		耦合节点	电 10-气 10
	热网侧出力上下限	1.3 MW, 0 MW		出力上下限	210 Sm ³ /h, 20 Sm ³ /h
电驱动压缩机	升压比	$\lambda_z=2$	燃气锅炉(GB)	能量转化效率	$\eta_{GB,i}=0.9$
	耦合关系	电 5-气管道 C1		耦合节点	气 2-热 16
	压缩机参数	$c_g=0.00042$		出力上下限	1.2MW, 0 MW

表 B11 IES 24h 负荷需求

Table B11 IES load demand in 24h

时刻	实际负荷需求/%			时刻	实际负荷需求/%		
	电	气	热		电	气	热
1	65.36	71.416	98.5254	13	100	88.49558	80.36
2	64.446	62.566	96.9209	14	94.5254	84.0708	81.446
3	61.719	65.027	98.8776	15	82.19401	80.95575	83.719
4	60.158	62.912	100	16	79.07161	76.72566	80.158
5	60.55371	65.22124	98.76246	17	88.7627	89.38053	83.55371
6	62.51041	78.18584	96.08659	18	96.08659	92.0354	84.51041
7	67.56869	92.30089	95.71191	19	95.71191	92.0354	94.56869
8	84.20899	94.38053	95.56869	20	94.56869	100	97.20899
9	86.0791	92.15044	94.56869	21	82.56869	98.23009	92.0791
10	94.9209	95.0354	83.6761	22	78.6761	96.46018	94.7627
11	96.8776	94.26549	82.43547	23	77.43547	79.38053	96.07161
12	99.6045	98.86332	80.5612	24	66.5612	75.41593	97.19401

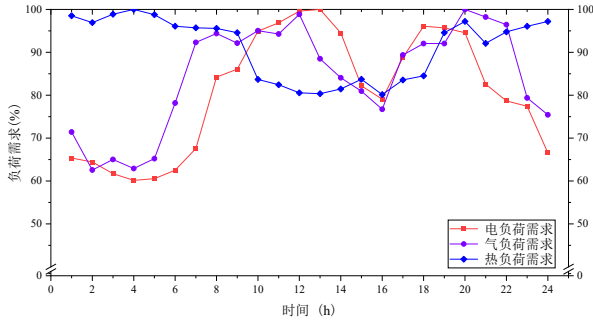


图 B5 24h 内 IES 负荷曲线
Fig. B5 Load curve of IES in 24h

表 B12 IES 损毁元件参数
Table B12 Damaged equipments data of IES

子系统	损毁支路	损毁设备
电	L1、L2、L4、L5、L6、L10、L13、L14	G1、G2、G4
气	P2、P3、P4、P7、P9	W1、W2
热	H2、H4、H5、H6、H10、H13	S1、S3

表 B13 IES 抢修仓库数据
Table B13 Repair Depots data of IES

所属系统	仓库编号	X 轴坐标	Y 轴坐标	队伍数量
电	1	-3	-2	1
	2	-1	3.5	1
	3	2	1	1
气	4	4	3	1
	5	-1	2	1
热	6	-4	2	1
	7	0	-1	1

表 B14 IES 元件所需修复时间
Table B14 Components repair time of IES

子系统	元件类型	修复时间/h	子系统	元件类型	修复时间/h
电	输电线路	1	热	管道	1
	DG	2		供热站	3
	GT	2		EB	2
气	CHP	2		HP	1
	压缩机	2.5		CHP	2
	管道	1		GB	1
	加气站	2		管道	1
	P2G	3		—	—

表 B15 IES 参与综合需求响应负荷数据
Table B15 Load data for IES participation in integrated demand response

所属系统	负荷类型	节点	所需参数
电	固定负荷	其余	—
	可削减负荷	7、12	$\lambda_i^e = 20\%$ $c_{cut,i}^e = 12000$ 元/MW $S_{shift,i}^{e,max} = 0.2$ MW $S_{shift,q,i}^{e,max} = 0.2$ MW $\kappa^e = 0.1$
	可转移负荷	4、11	
	固定负荷	其余	—
气	可削减负荷	6、7	$\lambda_j^g = 30\%$ $c_{cut,j}^g = 75$ Sm ³ /h $S_{shift,j}^{g,max} = 20$ Sm ³ /h $S_{shift,q,j}^{g,max} = 20$ Sm ³ /h $\kappa^g = 0.1$
	可转移负荷	3、9	
	固定负荷	其余	—

	固定负荷	其余	—
热	可削减负荷	2、11、15	$\lambda_k^h = 50\%$ $c_{cut,k}^h = 10000$ 元/MW $S_{shift,k}^{h,max} = 0.2$ MW $S_{shift,q,k}^{h,max} = 0.2$ MW $\kappa^h = 0.1$
	可转移负荷	3、7、13	
	可替代负荷 1	13-12	$T_{rep1,i,j}^{max} = 0.2$ MW
	可替代负荷 2	12-11-14	$T_{rep2,i,j,k}^{max} = 0.1$ MW

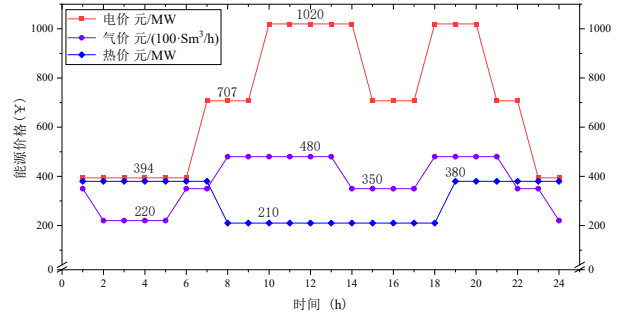


图 B6 IES 分时能源价格
Fig. B6 IES energy prices at different times

表 B16 价格弹性矩阵系数
Table B16 Price elasticity matrix coefficients

子系统	自弹性系数	互弹性系数		
		峰-平	平-谷	峰-谷
电	-0.15	0.012	0.01	0.016
气	-0.2	0.025	0.02	0.03
热	-0.15	—	—	0.024

表 B17 供气供热规定补偿标准
Table B17 Compensation rates for gas and heat supply provisions

所属系统	阈值区间	补偿金额(元/h)
气	$\geq P_0$	0
	$0.95 P_0 \sim P_0$	60
	$0.9 P_0 \sim 0.95 P_0$	120
	$0.85 P_0 \sim 0.9 P_0$	180
	$0.8 P_0 \sim 0.85 P_0$	240
	$P_{min} \sim 0.8 P_0$	300
热	$\leq P_{min}$	360
	$\geq T_0$	0
	$0.75(T_0 - T_{min}) \sim T_0$	50
	$0.5(T_0 - T_{min}) \sim 0.75(T_0 - T_{min})$	100
	$0.25(T_0 - T_{min}) \sim 0.5(T_0 - T_{min})$	150
	$T_{min} \sim 0.25(T_0 - T_{min})$	200
	$< T_{min}$	250

表 B18 环境参数与物理量
Table B18 Environmental parameters and physical quantities

表达式	参数名称	具体数值
ϕ_i	功率因数角	36.87°
V_i^{max}	节点电压上限	1.05 pu
V_i^{min}	节点电压下限	0.95 pu
P_{min}	最低供气标准	$0.75 P_0$
$Z_{change,l}^{max}$	线路 l 的最大开关操作次数	5
Z_{change}^{max}	重构过程中最大开关操作次数	10
v_B	天然气流速基准值	<3 m/s
K_m	热网管道功率损耗	20
v_m^{max}	管道允许的最大流速	10 m/s

T_{sw}	热网标准供热温度	363 K(90°C)	Q_{LHV}	天然气低热值	37.62 MJ/Sm ³
T_{rw}	热网标准回热温度	343 K(70°C)	C_p	供热媒介比热容	4200 J/(kg·°C)
$T_{s,k}^{max}$	最高供热温度	368 K(95°C)	C_a	空气比热容	1.005 kJ/(kg·K)
$T_{s,k}^{min}$	最低供热温度	358 K(85°C)	R_M	天然气气体常数与摩尔质量的商	520 J/(kg·K)
T_{en}	外部环境温度	278 K(5°C)	λ_b	钢筋混凝土材料导热系数	1.74×10 ⁻⁶ MW/m·K
T_{min}	最低室温标准	287 K(14°C)	d_b	墙体厚度	0.3 m
T_g	天然气温度	273 K(0°C)	ω	天然气管道摩擦系数	0.01
s_m	是功率与天然气流量转化系数	93.75 Sm ³ /(h MW)	θ	管道倾角	0°
ρ_w	供热媒介密度	1000 kg/m ³	NP	线性化段数	5
ρ_g	天然气密度	0.7174 kg/m ³	g	重力加速度	9.8 m/s ²
ρ_a	空气密度	1.29 kg/m ³			

附录 C 算例补充结果

表 C1 损毁设备抢修顺序
Table C1 Sequence of repair of damaged equipment

场景	抢修次序(修复完成时间 h)						
	抢修仓库 1	抢修仓库 2	抢修仓库 3	抢修仓库 4	抢修仓库 5	抢修仓库 6	抢修仓库 7
场景 1	L14(2)-L13(4)	G1(3)-L1(5)-L5(7)- L6(10)-G2(15)	L4(3)-L2(5)-G4 (9)-L10(13)	W1(3)-P3(5)-P4 (9)-W2(13)	P2(3)-P9(7)- P7(10)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-H10(14)	S3(5)-H5(9)-H6 (11)-H13(15)
场景 2	L14(2)-S3 (6)-L13(9)	L1(2)-G1(5)-H10(9)	P4(4)-L10(2)-L2 (7)-P2(8)	W2(4)-W1(9)- P3(11)-L4(14)	L5(1)-G2(4)-H5 (6)-H6(8)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-L6(14)	G4(3)-P9(5)- H13(7)-P7(9)
场景 3	L14(2)-L13(4)	G1(3)-L1(5)-L5(7)- L6(10)-G2(15)	L4(3)-L2(5)-G4 (9)-L10(13)	P3(2)-W1(5)- W2(10)-P4(13)	P2(3)-P7(6)-P9(9)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-H10(14)	H6(5)-H5(7)- H13(10)-S3(16)
场景 4	L14(2)-S3 (6)-L13(9)	G1(3)-L1(5)-H10(9)	L10(2)-P4(4)-L2 (7)-P2(8)	W2(4)-W1(9)- P3(11)-L4(14)	L5(1)-G2(4)-H5 (6)-H6(8)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-L6(14)	G4(3)-P7(5)-P9 (8)-H13(10)
场景 5	L14(2)-L13(4)	G1(3)-L1(5)- L5(7)-G2(10)-L6(14)	L4(3)-L2(5)-G4 (9)-L10(13)	W1(3)-P3(5)- W2(10)-P4(13)	P2(3)-P7(6)- P9(9)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-H10(14)	H6(5)-H5(7)- H13(10)-S3(16)
场景 6	S3(4)-L14 (6)-L13(8)	G1(3)-L1(5)-H10(9)	L10(2)-P4(4)-L2 (7)-P2(8)	W2(4)-W1(9)- P3(11)-L4(14)	L5(1)-G2(4)-H5 (6)-H6(8)	S1(5)-H2(9)-H4 (12)-L6(14)	G4(3)-P7(5)-P9 (8)-H13(10)

注: L/G/P/W/H/S 对应于 IES 中的元件, 可参照拓扑结构; 数字代表编号; (数字)代表修复完成的时刻 h。

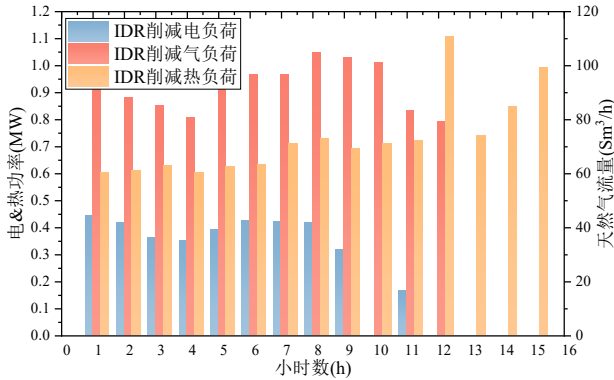


图 C1 场景 5 下可削减负荷响应削减负荷量

Fig. C1 Curtailable loads under scenario 5 responding to load shedding

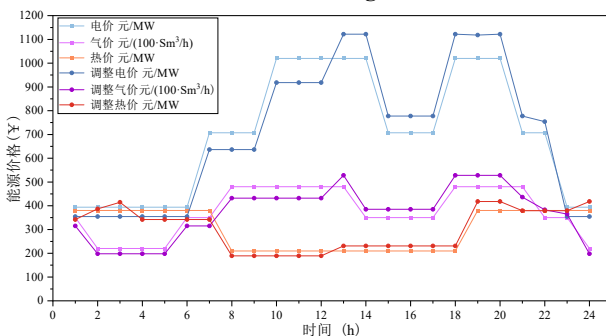


图 C2 场景 5 下综合需求响应前后的能源价格对比

Fig. C2 Comparison of energy prices before and after integrated demand response under scenario 5

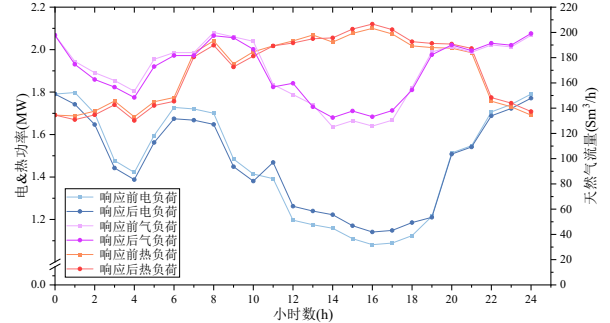


图 C3 场景 6 下 IES 中可转移负荷参与综合需求响应结果

Fig. C3 Results of transferable load participation in integrated demand response in the IES under scenario 6

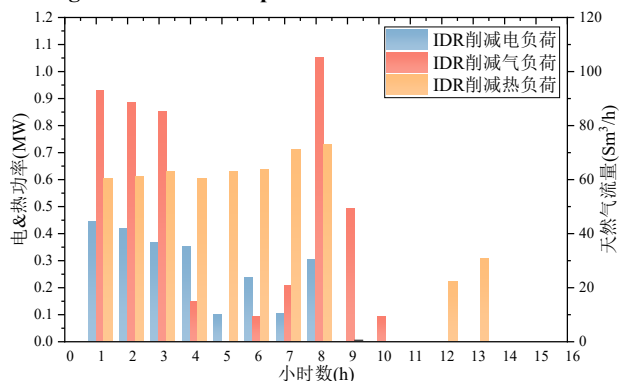


图 C4 场景 6 下可削减负荷响应削减负荷量

Fig. C4 Curtailable loads under scenario 6 responding to load shedding

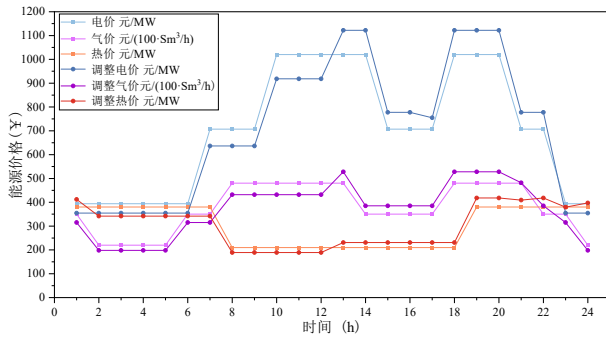


图 C5 场景 6 下综合需求响应前后的能源价格对比
Fig. C5 Comparison of energy prices before and after integrated demand response under scenario 6

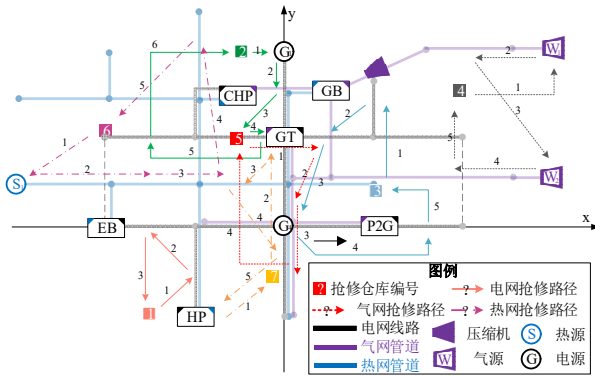


图 C6 场景 5 独立模式下的 IES 故障抢修次序
Fig. C6 Maintenance failures sequence under scenario 5

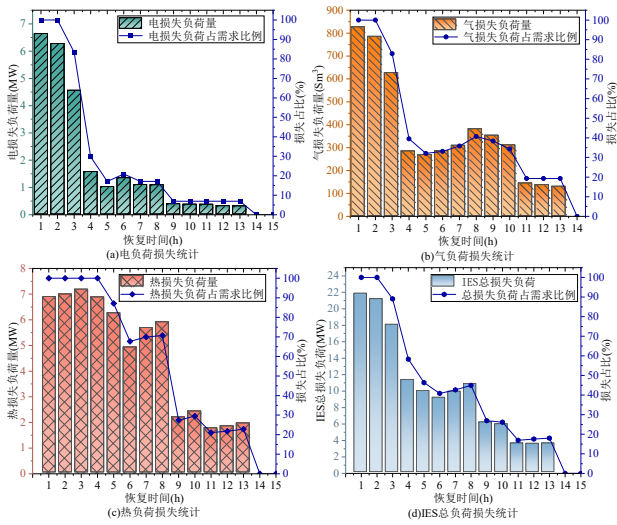


图 C7 场景 2 下 IES 负荷恢复结果
Fig. C7 IES loads restoration results under scenario 2

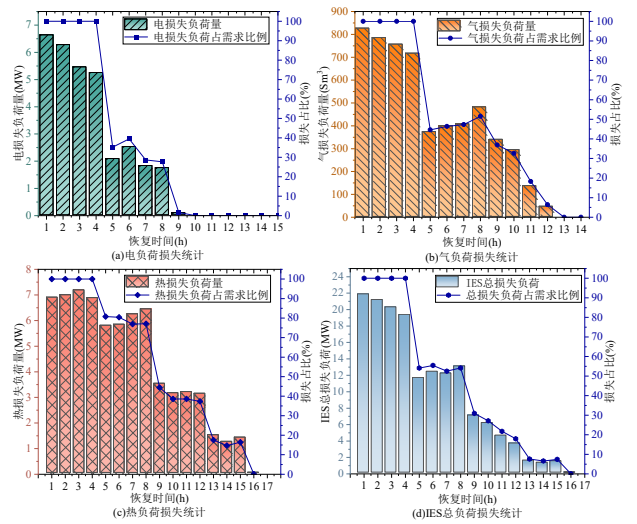


图 C8 场景 3 下 IES 负荷恢复结果
Fig. C8 IES loads restoration results under scenario 3

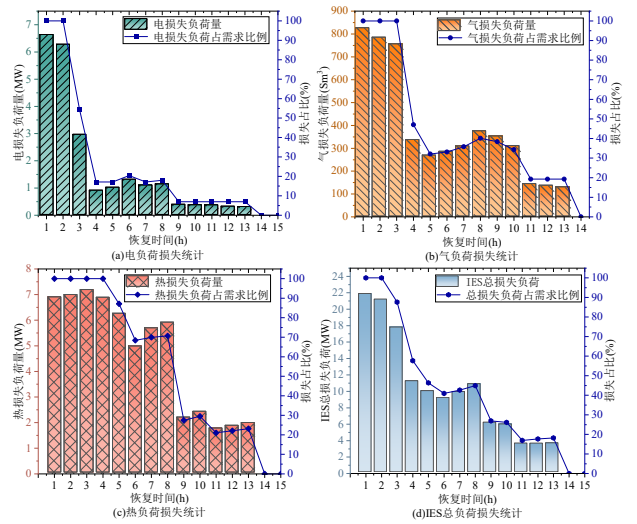


图 C9 场景 4 下 IES 负荷恢复结果
Fig. C9 IES loads restoration results under scenario 4

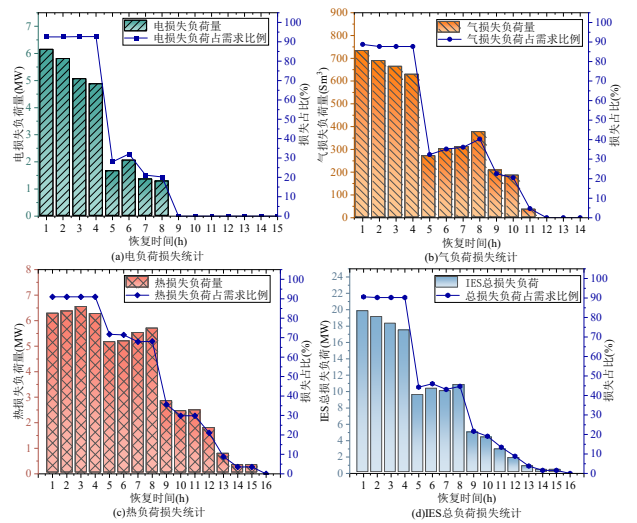


图 C10 场景 5 下 IES 负荷恢复结果
Fig. C10 IES loads restoration results under scenario 5

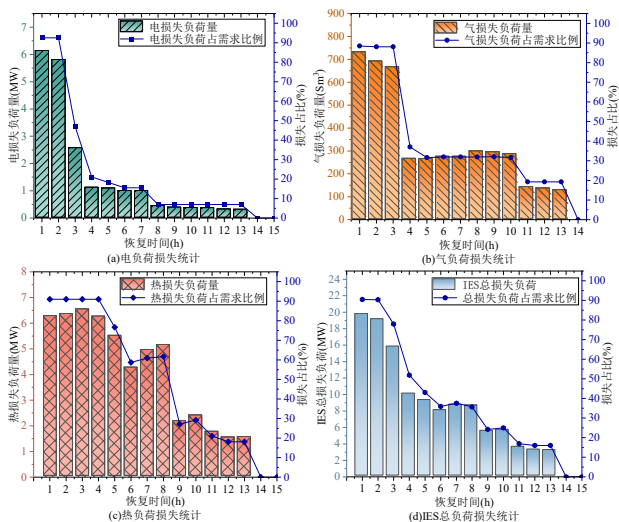


图 C11 场景 6 下 IES 负荷恢复结果

Fig. C11 IES loads restoration results under scenario 6

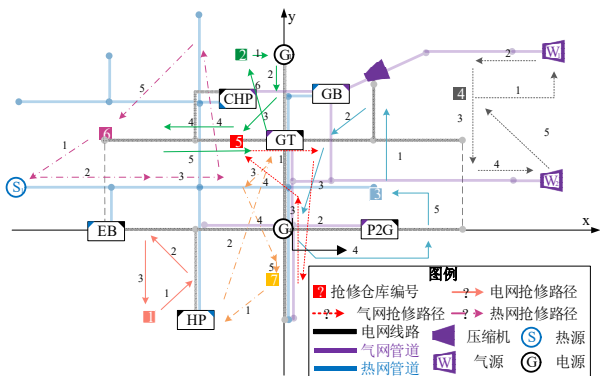


图 C12 场景 1 独立模式下的 IES 故障抢修次序

Fig. C12 Maintenance failures sequence under scenario 1

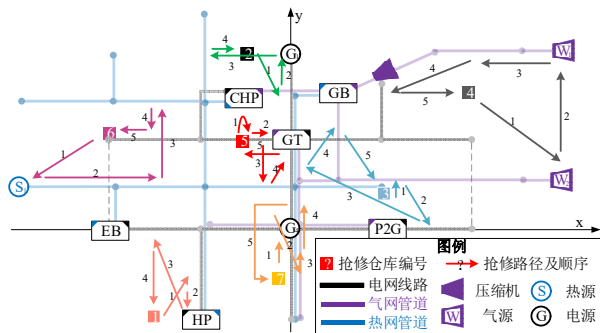


图 C13 场景 2 协同模式下的 IES 故障抢修次序

Fig. C13 Maintenance failures sequence under scenario 2

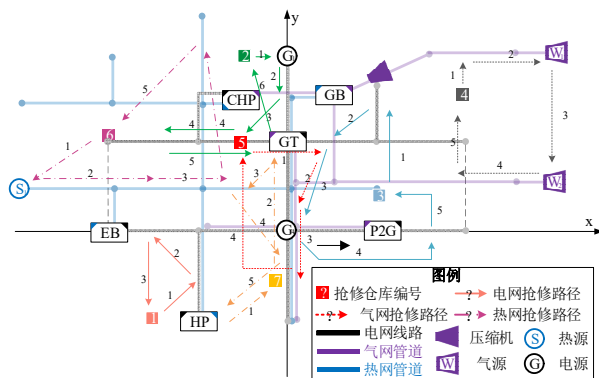


图 C14 场景 3 独立模式下的 IES 故障抢修次序

Fig. C14 Maintenance failures sequence under scenario 3

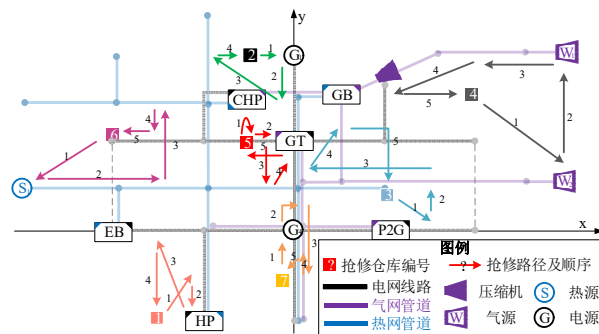


图 C15 场景 4 协同模式下的 IES 故障抢修次序

Fig. C15 Maintenance failures sequence under scenario 4