

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231372

## 兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型

张磊<sup>1</sup>, 王满康<sup>1</sup>, 叶婧<sup>1</sup>, 向紫藤<sup>2</sup>, 陶千惠<sup>1</sup>, 杨子龙<sup>1</sup>, 周正坤<sup>1</sup>, 邱元城<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 电热能源系统模型维度高将会导致求解难度较大。为此, 提出一种兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型。首先, 基于热网拓扑结构特点, 提出可对供热管网进行灵活化简的供热管网拓扑简化方法, 并根据简化后的管道结构和参数建立复杂供热管网等值简化模型。其次, 充分考虑热电联产(combined heat and power, CHP)机组以热定电模式和热网热惯性对旋转备用容量的影响, 建立了系统旋转备用模型。基于此, 建立了考虑旋转备用约束的电热能源系统调度模型。最后, 采用信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)处理系统成本与风电不确定度之间的关系。算例结果分析了供热管网拓扑简化方法在不同简化程度下的简化效果, 验证了所提模型适用于电热能源系统优化调度, 有效地减少优化模型的求解时间。

**关键词:** 电热能源系统; 拓扑简化; 旋转备用; 隐私性; 风电不确定性

### An equivalent simplified model for a complex heating network with a balance between solution speed and privacy

ZHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Mankang<sup>1</sup>, YE Jing<sup>1</sup>, XIANG Ziteng<sup>2</sup>, TAO Qianhui<sup>1</sup>, YANG Zilong<sup>1</sup>,  
ZHOU Zhengkun<sup>1</sup>, QIU Yuancheng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** The high dimensionality of an electric-heat energy system model will lead to great difficulty in analysis. For this reason, an equivalent simplified model of a complex heat supply pipe network is proposed, which combines solution speed and privacy. First, based on the topological characteristics of the heat network, a topological simplification method of the heat supply pipe network is proposed. It can be flexibly simplified, and an equivalent simplified model of the complex heat supply pipe network is established based on the simplified pipe structure and parameters. Secondly, a rotating standby model is established by taking into full consideration the influence of CHP units' heat-determined power mode and thermal inertia of the heat network on the rotating standby capacity. Then an electric-thermal energy system dispatching model that takes into account the equivalent simplified models of several complex heat supply pipe networks is established. Finally, the information gap decision theory (IGDT) is used to deal with the relationship between system cost and wind power uncertainty. The example results analyze the simplification effect of the heat supply pipe network topology simplification method under different degrees of simplification, and verify that the proposed model is applicable to the optimal scheduling of the electric-heat energy system. This effectively reduces the optimization model solution time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007103).

**Key words:** electric heating energy system; topology simplification; spinning reserve; privacy; wind power uncertainty

## 0 引言

在国家“大力发展新能源”和“推进集中供热”规划政策的主导下<sup>[1-2]</sup>, 我国“三北”(东北、华北、

西北)地区形成了含高比例新能源机组和高比例热电联产(combined heat and power, CHP)机组的电热能源结构<sup>[3]</sup>。电热能源系统兼顾供电与供热需求, 然而, 电能网络与热能网络分属于不同主体, 电能网络元件众多、网架复杂, 而热能网络具有供热半径大、拓扑结构复杂等特点, 导致两者协调优化运

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007103)

行面临巨大的挑战。

近年来,由多个供热系统构成的电热能源系统的协调优化运行引起了学术界的广泛关注,并取得了显著成果。文献[4]考虑了影响用户热舒适度的气象因素,建立了考虑用户热舒适度弹性的热电联产联合优化调度模型,实现降低燃料成本、促进新能源消纳的目标。文献[5]提出一种变流量的电热综合能源系统调度方法,与定质量变温度方式相比,变流量方式使系统具有更强的鲁棒性和安全性。文献[6]从用户侧角度出发,提出了一种基于自适应模型预测控制的供热控制策略,提高了供热的效率与精度。文献[7]通过对供热系统进行精细化建模,建立多能灵活性资源模型,提高了系统运行的灵活性。文献[8]将柔性相变材料与供热管道耦合,提高了供热系统的安全稳定性和用户热舒适性。然而,上述文献立足于真实的供热管网优化系统运行,涉及大量的决策变量和约束条件,导致优化模型求解难度较大,工程应用价值有限。同时,上述模型在运行时需要系统的全部信息,可能不利于隐私保护。此外,上述工作没有考虑旋转备用,在面对风电不确定性时,系统的经济性不足。

随着进一步研究,有不少学者注意到电热能源系统旋转备用的潜力,开展了部分研究。文献[9]提出一种计及大规模热泵备用的电热耦合系统实时优化运行方案,利用模型预测控制和不同的运行备用,减少了系统运行成本。文献[10]通过精确评估和合理利用 CHP 机组的可用备用容量,有效地提高了风电消纳能力。文献[11]提出计及大规模热泵、热电联产机组和火电机组备用的两阶段随机优化模型,该模型对能源、跟踪备用、调节备用和热调节进行了共同优化,以应对风力发电的不确定性。文献[12]提出一种考虑多区域互联的电热联合系统协同优化调度模型,针对实时调度阶段可能出现的风电波动制定联络线功率调整计划,实现跨区域备用共享以促进风电消纳。文献[13]建立能量与备用市场主体自调度的电热综合能源系统两阶段优化模型,通过能量和多灵活备用联合有效提高了系统运行的经济性和灵活性。但是,上述研究主要聚焦于电力侧约束对旋转备用容量的直接作用,未考虑以热定电运行模式下热负荷需求的间接影响,也忽视了热网热惯性作为旋转备用容量的重要作用。

鉴于此,本文提出了一种兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型。首先,立足于供热系统实际结构特点,提出一种可对供热管网进行灵活化简的供热管网拓扑简化方法。其次,充分考

虑 CHP 机组以热定电模式和热网热惯性对系统旋转备用容量的影响,建立了系统旋转备用模型。基于此,建立了电热能源系统调度模型。最后,采用信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)处理风电的不确定性。算例结果分析了供热管网拓扑简化方法在不同简化程度下的简化效果,验证了所提模型应用于电热能源系统调度的精确性和有效性。

## 1 兼具隐私保护的复杂供热管网等值简化模型

### 1.1 供热管网拓扑简化原理

本文主要关注一次热网,将各换热站所连接的二次热网看成一个热负荷<sup>[14]</sup>。供热管网通常为树状结构,供应管道和返回管道通过换热站连接,因此近似认为供应管道和返回管道的拓扑互不影响,供应管道和返回管道呈现对称性,本文仅对供应管道建模。此外,本文热网运行方式采用质调节<sup>[5]</sup>。本文所提供供热管网拓扑简化方法基于热量传输动态特性等效原则,即热网拓扑变换前后换热站接收的热力和水力状态要等效。为此,在变换前后有如下等效条件:1) 供热管网各节点温度  $T$  的动态变化一致;2) 供热首站到各换热站节点的时延  $\tau$  不变;3) 各换热站节点的流量  $m$  不变。包括以下两个步骤。

#### 1) 步骤 1: 热网分支等效变换。

首先,定义供热管网中每个节点和由该节点流出的管道为一个单元,将各单元中呈辐射状的流出管道合并在一条线上(如图 1(a)、图 1(b)所示)。按管道时延从小到大的顺序,各管道的末端节点将被依次放置在相邻位置。重复上述等效变换,可得到如图 1(c)的线性无分支热网拓扑结构。

#### 2) 步骤 2: 主干冗余节点聚合。

首先,定义相邻两个没有分支管道流出的节点为冗余节点,两节点间的管道为冗余管道(如图 1(c)中的管道  $bncn$ )。然后,聚合相邻两个冗余节点,冗余节点的负荷流量和冗余管道长度将在聚合后进行重新分配,并形成新的聚合节点(如图 1(d)中的节点  $e$ )。考虑参数重新分配过程会导致等值简化模型在温度动态模拟上存在一定误差,本文将优先选取时延最短的冗余管道及其两端节点进行聚合。同时,设置化简阈值  $E$  来表示管道简化数量,从而确定节点聚合次数。

### 1.2 复杂供热管网等值简化模型

复杂供热管网等值简化模型包括:热网树状分

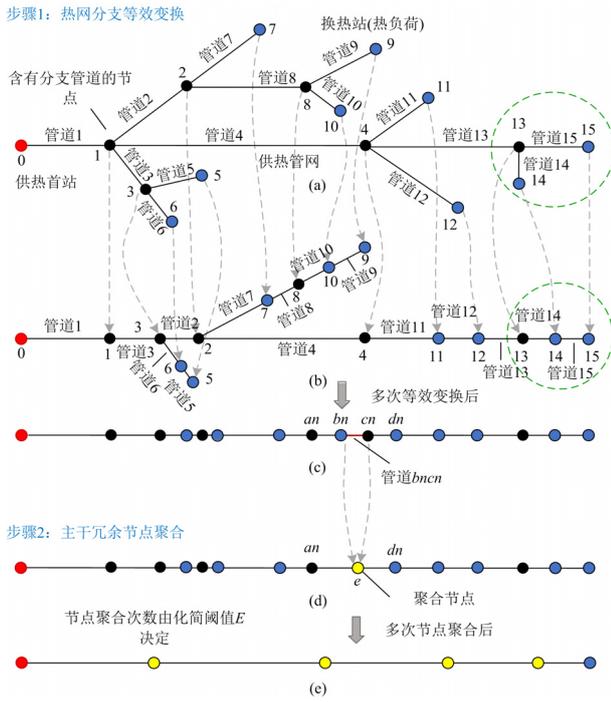


图1 供热管网拓扑简化原理图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of heating pipe network topology

枝聚合模型、供热管网节点聚合模型和供热管网等值简化模型。

### 1) 热网树状分枝聚合模型

热网树状分枝聚合模型的目的在于消除热网管道分支,使所有管道聚合在主干管道上,表征热网树状分支消减过程。该模型包括:等效管道流量、等效管道横截面积、等效管道长度和等效管道传热系数。

根据 1.1 节的简化原理,原始热网中分支节点到流出管道末端节点的时延变为在新拓扑结构下两节点间所有途经管道的时延总和。为满足等效条件 2,可定义各管道时延为

$$\tau_b^{\text{st1}} = \tau_b - \tau_{b_f}, \{b, i, j\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+} \quad (1)$$

式中:  $\tau_b^{\text{st1}}$  为等效管道  $b$  的时延; 下标  $b_f$  为在原始热网下与管道  $b$  有相同起始节点的所有流出管道中,按管道时延升序排列位于管道  $b$  前一位的管道;  $\tau_b$ 、 $\tau_{b_f}$  分别为管道  $b$ 、管道  $b_f$  的时延;  $\Phi_{\text{pipe}}^{k+}$  为以节点  $k$  起始的管道集合。

为满足等效条件 3,令各节点负荷流量  $m$  不变。在此基础上,原本从分支节点分流的管道流量,在经拓扑变换后,则全部汇总在了第一根管道并逐次分流,则有

$$\mu_b^{\text{st1}} = \sum \mu_i - \sum_{j \in \{j | \tau_j < \tau_b\}} \mu_j, \{b, i, j\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+} \quad (2)$$

式中:  $\mu_b^{\text{st1}}$  为等效管道  $b$  的流量;  $\mu_i$ 、 $\mu_j$  分别为管道  $i$ 、管道  $j$  的流量;  $\tau_j$  为管道  $j$  的时延。

根据式(2),可定义各管道水流速度为所包含的原始热网管道水流速度的加权平均值。

$$v_b^{\text{st1}} = \frac{\sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} \mu_i v_i}{\sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} \mu_i}, \{b, i\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+} \quad (3)$$

式中:  $v_i$  为管道  $i$  的水流速度;  $v_b^{\text{st1}}$  为等效管道  $b$  的水流速度。

此外,由于管道水流速度计算公式为

$$v = \frac{\mu}{\rho^{\text{wa}} A} \quad (4)$$

式中:  $v$  为管道水流速度;  $\mu$  为管道流量;  $\rho^{\text{wa}}$  为管道中水的密度;  $A$  为管道横截面积。

由式(3)、式(4)得

$$A_b^{\text{st1}} = \frac{\mu_b^{\text{st1}} \sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} \mu_i}{\sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} (\mu_i)^2 / A_i}, \{b, i\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+} \quad (5)$$

式中:  $A_b^{\text{st1}}$  为等效管道  $b$  的横截面积;  $A_i$  为管道  $i$  的横截面积。

此外,管道的时延计算公式为

$$\tau = \frac{\rho^{\text{wa}} AL}{\mu} \quad (6)$$

式中:  $\tau$  为管道时延;  $L$  为管道长度。

由式(1)、式(5)一式(6)得

$$L_b^{\text{st1}} = \frac{\left( \frac{A_b L_b}{\mu_b} - \frac{A_{b_f} L_{b_f}}{\mu_{b_f}} \right) \sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} (\mu_i)^2 / A_i}{\sum_{i \in \{i | \tau_i \geq \tau_b\}} \mu_i}, \{b, i\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+} \quad (7)$$

式中:  $L_b^{\text{st1}}$  为等效管道  $b$  的长度;  $A_b$ 、 $A_{b_f}$  分别为管道  $b$ 、管道  $b_f$  的横截面积;  $L_b$ 、 $L_{b_f}$  分别为管道  $b$ 、管道  $b_f$  的长度;  $\mu_b$ 、 $\mu_{b_f}$  分别为管道  $b$ 、管道  $b_f$  的流量。

最后,为满足等效条件 1,使化简前后各管道节点输出温度相同,由节点法热损失公式得

$$(T_b^{\text{rx,out}} - T^{\text{mat}}) \exp\left(-\frac{h_b}{c^{\text{wa}} \rho^{\text{wa}} A_b} \tau_b\right) = (T_b^{\text{rx,out,st1}} - T^{\text{mat}}) \exp\left(-\sum_{i \in \{i | \tau_i \leq \tau_b\}} \frac{h_i^{\text{st1}}}{c^{\text{wa}} \rho^{\text{wa}} A_i} \tau_i^{\text{st1}}\right) \quad (8)$$

$$x \in \{s, r\}, \{b, i\} \in \Phi_{\text{pipe}}^{k+}$$

式中:  $T_b^{t,x,out}$  为不计热损时管道  $b$  的出口温度;  $T_b^{t,x,out,st1}$  为不计热损时等效管道  $b$  的出口温度, 在保证时延不变的情况下, 有  $T_b^{t,x,out} = T_b^{t,x,out,st1}$ ;  $T^{mat}$  为环境温度;  $h_b$  为管道  $b$  的传热系数;  $c^{wa}$  为水的比热容;  $h_i^{st1}$  为等效管道  $i$  的传热系数;  $\tau_i^{st1}$  为等效管道  $i$  的时延;  $x$ 、 $s$ 、 $r$  分别表示管道、供应管道、返回管道。

联立式(6)和式(8), 可得

$$h_b^{st1} = \frac{h_b L_b \frac{\mu_b^{st1}}{\mu_b} - \sum_{i \in \{i | \tau_i > \tau_b\}} h_i^{st1} L_i \frac{\mu_b^{st1}}{\mu_i}}{L_b^{st1}}, \{b, i\} \in \Phi_{pipe}^{k+} \quad (9)$$

式中:  $h_b^{st1}$  为等效管道  $b$  的传热系数;  $L_i^{st1}$  为等效管道  $i$  的长度;  $\mu_i^{st1}$  为等效管道  $i$  的流量。

根据管道分支情况, 重复上述计算即可得到最终无分支线性结构的供热管网等效拓扑参数  $\mu_b^{st1}$ 、 $A_b^{st1}$ 、 $L_b^{st1}$  和  $h_b^{st1}$ 。

## 2) 供热管网节点聚合模型

供热管网节点聚合模型聚合主干管线上邻近的节点, 聚合两节点间的管道, 从而减少热网管道模型和约束维度。该模型包括新形成的聚合节点负荷流量、聚合管道流量、聚合管道长度、聚合管道横截面积和聚合管道传热系数。

首先, 针对供热管网的无分支拓扑结构, 选取冗余管道和冗余节点为

$$b_s \in \{b_s | \tau_{bs}^{st1} = \min \tau_b^{st1}, b \in \Phi_{pipe}^{st1}\} \quad (10)$$

$$k_{in} \in \{k | b_s \in \Phi_{pipe}^{k+}\} \quad (11)$$

$$k_{out} \in \{k | b_s \in \Phi_{pipe}^{k-}\} \quad (12)$$

式中:  $b_s$ 、 $k_{in}$  和  $k_{out}$  分别为选取的冗余管道索引、冗余管道  $b_s$  的流入节点和流出节点索引;  $\tau_{bs}^{st1}$  为等效管道  $b_s$  的时延;  $\Phi_{pipe}^{st1}$  为等效管道索引集合;  $\Phi_{pipe}^{k-}$  为以节点  $k$  为终点的管道集合。

冗余节点处的负荷流量按比例分配给相邻的两个节点。

$$m_k^{st2} = G_{k-1} m_{k-1} + m_k + G_{k+1} m_{k+1}, k \in \Phi'_{node} \quad (13)$$

$$G_k = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ f_1, & k = k_{in} \\ f_2, & k = k_{out} \end{cases} \quad (14)$$

$$m_{knew}^{st2} = (1 - f_1) m_{k_{in}} + (1 - f_2) m_{k_{out}} \quad (15)$$

式中:  $m_k^{st2}$  为聚合节点  $k$  的负荷流量;  $G_{k+1}$ 、 $G_k$ 、 $G_{k-1}$  分别为节点  $k+1$ 、节点  $k$ 、节点  $k-1$  的比例分配系数;  $m_{k+1}$ 、 $m_k$ 、 $m_{k-1}$  分别为节点  $k+1$ 、节点  $k$ 、节点

$k-1$  的负荷流量;  $\Phi'_{node}$  为不包括冗余节点的热网节点集合;  $f_1$ 、 $f_2$  均为冗余节点的负荷流量分配系数<sup>[15]</sup>;  $m_{knew}^{st2}$  为新形成的聚合节点的负荷流量;  $m_{k_{in}}$  为节点  $k_{in}$  的负荷流量;  $m_{k_{out}}$  为节点  $k_{out}$  的负荷流量。

由式(2)、式(13)一式(15)可得聚合管道流量表示为

$$\mu_b^{st2} = \mu_b^{st1} - G_{k_{in}} m_{k_{in}} + G_{k_{out}} m_{k_{out}} \quad (16)$$

$$G_{k_{in}} = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ f_1, & k_{in} \in \Phi_{pipe}^{k_{in}-} \end{cases} \quad (17)$$

$$G_{k_{out}} = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ f_2, & k_{out} \in \Phi_{pipe}^{k_{out}+} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\mu_b^{st2}$  为聚合管道  $b$  的流量;  $G_{k_{in}}$  为节点  $k_{in}$  的比例分配系数;  $G_{k_{out}}$  为节点  $k_{out}$  的比例分配系数;  $\Phi_{pipe}^{k_{in}-}$  为以节点  $k_{in}$  为终点的管道集合;  $\Phi_{pipe}^{k_{out}+}$  为以节点  $k_{out}$  为起点的管道集合。

冗余管道的长度按比例分配给相邻管道, 表示为

$$L_b^{st2} = L_b^{st1} + G_b L_{b_s} \quad (19)$$

$$G_b = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ f_3, & b \in \Phi_{pipe}^{k_{in}-} \\ f_4, & b \in \Phi_{pipe}^{k_{out}+} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $L_b^{st2}$  为冗余管道  $b$  的长度;  $G_b$  为管道  $b$  的比例分配系数;  $L_{b_s}$  为管道  $b_s$  的长度;  $f_3$ 、 $f_4$  为冗余管道的长度分配系数<sup>[15]</sup>。

为保证总时延不变, 由式(6)可令聚合管道横截面积为

$$A_b^{st2} = \left( A_b^{st1} L_b^{st1} \frac{\mu_b^{st2}}{\mu_b^{st1}} + G_b A_{b_s}^{st1} L_{b_s}^{st1} \frac{\mu_b^{st2}}{\mu_{b_s}^{st1}} \right) / L_b^{st2} \quad (21)$$

式中:  $A_b^{st2}$  为聚合管道  $b$  的横截面积;  $A_{b_s}^{st1}$  为等效管道  $b_s$  的横截面积;  $L_{b_s}^{st1}$  为等效管道  $b_s$  的长度;  $\mu_{b_s}^{st1}$  为等效管道  $b_s$  的流量。

为保证总热损不变, 可令聚合管道传热系数为

$$h_b^{st2} = \frac{h_b^{st1} L_b^{st1} + G_b h_{b_s}^{st1} L_{b_s}^{st1}}{L_b^{st2}} \quad (22)$$

式中:  $h_b^{st2}$  为聚合管道  $b$  的传热系数;  $h_{b_s}^{st1}$  为等效管道  $b_s$  的传热系数。

## 3) 供热管网等值简化模型

基于供热管网拓扑简化方法得到参数和管道结构, 建立供热管网等值简化模型, 该模型包括: 热源节点方程约束(如式(23)所示)、供热管网温度动态约束(如式(24)一式(29)所示)、热源节点返回温度混

约束(如式(30)所示)、换热站热负荷约束(如式(31)所示)、供应、返回管道节点温度约束(如式(32)所示)。

$$Q_{g,t} = c^{\text{wa}} m_g (T_{g,t}^{\text{s}} - T_{g,t}^{\text{r}}) \quad \forall t \in \Phi_t, g \in \Phi_{\text{node}}^{\text{HS}} \quad (23)$$

$$T_{b,t}^{\text{r},\text{out}} = (1 - K_b) T_{b,t-\gamma_b-1}^{\text{x},\text{in}} + K_b T_{b,t-\gamma_b}^{\text{x},\text{in}} \quad (24)$$

$$\forall b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}, x \in \{s, r\}, t \in \Phi_t$$

$$T_{b,t}^{\text{x},\text{out}} = T_t^{\text{mat}} + J_b (T_{b,t}^{\text{r},\text{out}} - T_t^{\text{mat}}) \quad (25)$$

$$\forall b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}, x \in \{s, r\}, t \in \Phi_t$$

$$\begin{cases} \gamma_b = \min_{n \in N} \{n : s.t. n \mu_b^{\text{st2}} \Delta t \geq \rho^{\text{wa}} A_b^{\text{st2}} L_b^{\text{st2}}\} \\ R_b = \gamma_b \mu_b^{\text{st2}} \Delta t \\ K_b = (R_b - \rho^{\text{wa}} A_b^{\text{st2}} L_b^{\text{st2}}) / \mu_b^{\text{st2}} \Delta t \\ J_b = \exp \left[ -\frac{h_b^{\text{st2}} \Delta t}{c^{\text{wa}} \rho^{\text{wa}} A_b^{\text{st2}}} \left( \gamma_b + \frac{1}{2} - K_b \right) \right] \end{cases} \quad (26)$$

$$T_{b,t}^{\text{s},\text{in}} = T_{g,t}^{\text{s}}, \forall b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}, t \in \Phi_t \quad (27)$$

$$T_{b,t}^{\text{r},\text{in}} = T_{l,t}^{\text{r}}, \forall b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}, t \in \Phi_t \quad (28)$$

$$T_{b,t}^{\text{s},\text{out}} = T_{l,t}^{\text{s}}, \forall b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}, t \in \Phi_t \quad (29)$$

$$\sum_{b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}} (T_{b,t}^{\text{r},\text{out}} \mu_b^{\text{st2},\text{r}}) = T_{g,t}^{\text{r}} \sum_{b \in \Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2},\text{r}}} \mu_b^{\text{st2},\text{r}}, \quad (30)$$

$$t \in \Phi_t, g \in \Phi_{\text{node}}^{\text{HS}}$$

$$H_{l,t}^{\text{HES}} = c^{\text{wa}} m_l (T_{l,t}^{\text{s}} - T_{l,t}^{\text{r}}), \forall l \in \Phi_{\text{node}}^{\text{HES, st2}}, t \in \Phi_t \quad (31)$$

$$\underline{T}_g^{\text{s}} \leq T_{g,t}^{\text{s}} \leq \bar{T}_g^{\text{s}}, \underline{T}_l^{\text{r}} \leq T_{l,t}^{\text{r}} \leq \bar{T}_l^{\text{r}} \quad (32)$$

式中:  $Q_{g,t}$  为  $t$  时刻 CHP 机组(热源)  $g$  的热功率;  $m_g$  为热源节点  $g$  的流量;  $T_{g,t}^{\text{s}}$  为  $t$  时刻供应管道中热源节点  $g$  的温度;  $T_{g,t}^{\text{r}}$  为  $t$  时刻返回管道中热源节点  $g$  的温度;  $\Phi_t$  为热网仿真时刻集合;  $\Phi_{\text{node}}^{\text{HS}}$  为热源所在节点集合;  $T_{b,t}^{\text{x},\text{out}}$  为不计热损时管道  $b$  在  $t$  时刻的出口温度;  $T_{b,t-\gamma_b-1}^{\text{x},\text{in}}$  为计及热损时管道  $b$  在  $t-\gamma_b-1$  时刻的入口温度;  $T_{b,t-\gamma_b}^{\text{x},\text{in}}$  为计及热损时管道  $b$  在  $t-\gamma_b$  时刻的入口温度;  $T_{b,t}^{\text{x},\text{out}}$  为计及热损时管道  $b$  在  $t$  时刻的出口温度;  $\gamma_b$ 、 $R_b$ 、 $K_b$ 、 $J_b$  为系数;  $n$  为任意数;  $N$  为正整数集合;  $\Delta t$  为节点法的时间分辨率;  $T_t^{\text{mat}}$  为  $t$  时刻的环境温度;  $\Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2}}$  为供热管网等值简化管道集合;  $T_{b,t}^{\text{s},\text{in}}$  为  $t$  时刻供应管道  $b$  的入口温度;  $T_{b,t}^{\text{r},\text{in}}$  为  $t$  时刻返回管道  $b$  的入口温度;  $T_{b,t}^{\text{s},\text{out}}$  为  $t$  时刻供应管道  $b$  的出口温度;  $T_{l,t}^{\text{r}}$  为  $t$  时刻返回管道中节点  $l$  的温度;  $T_{l,t}^{\text{s}}$  为  $t$  时刻供应管道中节点  $l$  的温度;  $T_{b,t}^{\text{r},\text{out}}$  为  $t$  时刻返回管道  $b$  的出口温度;  $\Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2},\text{r}}$  为以节点  $l$  为起点的管道集合;  $\Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2},\text{s}}$  为以节点  $l$  为终点的管

道集合;  $\Phi_{\text{pipe}}^{\text{st2},\text{s}}$  为以节点  $g$  为终点的管道集合;  $\mu_b^{\text{st2},\text{r}}$  为聚合返回管道  $b$  的流量;  $H_{l,t}^{\text{HES}}$  为  $t$  时刻节点  $l$  的热负荷功率;  $m_l$  为节点  $l$  的负荷流量;  $\Phi_{\text{node}}^{\text{HES, st2}}$  为经过供热管网拓扑简化后热网中带有负荷流量的节点集合;  $\bar{T}_g^{\text{s}}$ 、 $\underline{T}_g^{\text{s}}$  分别为供应管道中节点  $g$  的温度上、下限;  $\bar{T}_l^{\text{r}}$ 、 $\underline{T}_l^{\text{r}}$  分别为返回管道中节点  $l$  的温度上、下限。

## 2 考虑旋转备用约束的电热能源系统调度模型

### 2.1 目标函数

本文目标函数为最小化整个调度系统的成本, 并考虑风电机组弃风惩罚成本, 具体如式(33)~式(37)所示。

$$\min C = C_{\text{nc}} + C_{\text{w}} + C_{\text{chp}} + C_{\text{res}} \quad (33)$$

$$C_{\text{nc}} = \sum_{t \in \Phi_t} \sum_{z \in \Phi_{\text{nc}}} (a_z^1 (P_{z,t})^2 + a_z^2 P_{z,t} + a_z^3) \quad (34)$$

$$C_{\text{w}} = \sum_{t \in \Phi_t} \sum_{v \in \Phi_{\text{w}}} \phi_v (P_{v,t,\text{max}} - P_{v,t}) \quad (35)$$

$$C_{\text{chp}} = \sum_{t \in \Phi_t} \sum_{g \in \Phi_{\text{chp}}} \lambda_g^1 (P_{g,t})^2 + \lambda_g^2 P_{g,t} + \lambda_g^3 (Q_{g,t})^2 + \lambda_g^4 Q_{g,t} + \lambda_g^5 P_{g,t} Q_{g,t} + \lambda_g^6 \quad (36)$$

$$C_{\text{res}} = \sum_{t \in \Phi_t} \sum_{p \in \Phi_{\text{nc}} \cup \Phi_{\text{chp}}} \alpha_p [(B_{p,t}^1)^2 + (B_{p,t}^2)^2] \quad (37)$$

式中:  $C$  为系统总成本;  $C_{\text{nc}}$  为火电机组运行成本;  $C_{\text{w}}$  为风电机组弃风惩罚成本;  $C_{\text{chp}}$  为 CHP 机组运行成本;  $C_{\text{res}}$  为备用成本;  $P_{z,t}$  为  $t$  时刻火电机组  $z$  的出力;  $P_{v,t}$  为  $t$  时刻风电机组  $v$  的出力;  $P_{v,t,\text{max}}$  为  $t$  时刻风电机组  $v$  的实际最大出力;  $P_{g,t}$  为  $t$  时刻 CHP 机组  $g$  的电出力;  $\Phi_{\text{nc}}$ 、 $\Phi_{\text{w}}$  和  $\Phi_{\text{chp}}$  分别为火电机组集合、风电机组集合和 CHP 机组集合;  $\Phi_t$  为调度时段集合;  $a_z^1$ 、 $a_z^2$ 、 $a_z^3$  为火电机组  $z$  的成本参数;  $\phi_v$  为风电机组  $v$  的弃风惩罚系数;  $\lambda_g^1$ 、 $\lambda_g^2$ 、 $\lambda_g^3$ 、 $\lambda_g^4$ 、 $\lambda_g^5$ 、 $\lambda_g^6$  为 CHP 机组  $g$  的成本参数;  $\alpha_p$  为机组备用参数;  $B_{p,t}^1$ 、 $B_{p,t}^2$  分别为机组  $p$  的上备用和下备用。

### 2.2 约束条件

#### 1) CHP 机组旋转备用约束

抽汽式 CHP 机组运行特性曲线如图 2 所示, 图中:  $P_{g,\text{min}}^{\text{cond}}$ 、 $P_{g,\text{max}}^{\text{cond}}$  分别为 CHP 机组在全冷凝模式下的最小、最大输出电功率;  $Q_{g,\text{min}}$  为 CHP 机组最小输出电功率所对应的热出力值;  $Q_{g,\text{max}}$  为 CHP 机组

$g$  热出力上限;  $P_{2,g,t}^*$ 、 $P_{1,g,t}^*$  分别为 CHP 机组  $g$  热出力  $Q_{g,t}$  下电出力的上、下限。

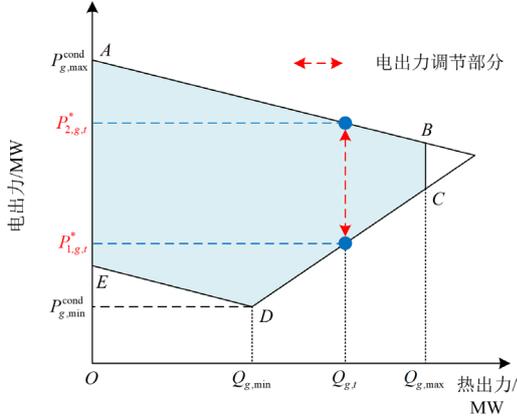


图 2 抽汽式 CHP 机组运行特性曲线

Fig. 2 Operating characteristic curve of extraction CHP unit

如图 2 所示, CHP 机组在以热定电运行模式下, CHP 机组的供热能力与供电能力相互耦合, 受限于  $t$  时刻 CHP 机组的热出力  $Q_{g,t}$ , CHP 机组的供电范围在  $P_{1,g,t}^* \sim P_{2,g,t}^*$  之间, 因此, CHP 机组的旋转备用潜力被限制在  $P_{1,g,t}^* \sim P_{2,g,t}^*$  之间, 旋转备用约束为

$$P_{g,t} + B_{g,t}^1 \leq P_{2,g,t}^*, P_{g,t} - B_{g,t}^2 \geq P_{1,g,t}^* \quad (38)$$

$$0 \leq B_{g,t}^1 \leq R_{g,\text{up}} \Delta t, P_{g,t} + B_{g,t}^1 \leq P_{g,\text{max}} \quad (39)$$

$$0 \leq B_{g,t}^2 \leq R_{g,\text{down}} \Delta t, P_{g,t} - B_{g,t}^2 \geq P_{g,\text{min}} \quad (40)$$

式中:  $P_{g,\text{min}}$ 、 $P_{g,\text{max}}$  分别为 CHP 机组  $g$  的最小、最大输出电功率;  $B_{g,t}^1$ 、 $B_{g,t}^2$  分别为 CHP 机组  $g$  在  $t$  时刻的上、下旋转备用容量;  $R_{g,\text{up}}$ 、 $R_{g,\text{down}}$  分别为 CHP 机组  $g$  的向上、向下爬坡功率。

2) 供热管网等值简化模型约束: 式(23)一式(32)所示。

3) CHP 机组运行域约束

$$P_{g,t} \geq r_g Q_{g,t} \quad (41)$$

$$\underline{F}_g \leq \beta_g^{\text{elec}} P_{g,t} + \beta_g^{\text{heat}} Q_{g,t} \leq \bar{F}_g \quad (42)$$

$$0 \leq Q_{g,t} \leq Q_{g,\text{max}} \quad (43)$$

式中:  $r_g$  为 CHP 机组  $g$  的电热耦合系数;  $\underline{F}_g$  和  $\bar{F}_g$  为 CHP 机组  $g$  最小和最大燃料摄入量;  $\beta_g^{\text{elec}}$  和  $\beta_g^{\text{heat}}$  分别为电出力的燃料消耗率和热出力的燃料消耗率。

4) 火电机组旋转备用约束

$$0 \leq B_{z,t}^1 \leq R_{z,\text{up}} \Delta t, P_{z,t} + B_{z,t}^1 \leq P_{z,\text{max}} \quad (44)$$

$$0 \leq B_{z,t}^2 \leq R_{z,\text{down}} \Delta t, P_{z,t} - B_{z,t}^2 \geq P_{z,\text{min}} \quad (45)$$

式中:  $B_{z,t}^1$ 、 $B_{z,t}^2$  分别为火电机组  $z$  在  $t$  时刻的向上、向下旋转备用容量;  $R_{z,\text{up}}$ 、 $R_{z,\text{down}}$  分别为火电机组  $z$  的向上、向下爬坡功率;  $P_{z,\text{max}}$ 、 $P_{z,\text{min}}$  分别为火电机组出力上、下限。

5) 系统旋转备用约束

$$\sum_z B_{z,t}^1 + \sum_g B_{g,t}^1 \geq S_{\text{up},t} \quad (46)$$

$$\sum_z B_{z,t}^2 + \sum_g B_{g,t}^2 \geq S_{\text{down},t} \quad (47)$$

式中,  $S_{\text{up},t}$ 、 $S_{\text{down},t}$  分别为系统的上、下旋转备用。

6) 有功功率平衡约束

$$P_{z,t} + P_{g,t} + P_{v,t} = P_t^L \quad (48)$$

式中,  $P_t^L$  为  $t$  时刻电负荷的功率。

7) 火电机组的发电输出约束<sup>[16]</sup>

$$P_{z,\text{min}} \leq P_{z,t} \leq P_{z,\text{max}} \quad (49)$$

8) 风电机组出力约束

$$0 \leq P_{v,t} \leq P'_{v,t,\text{max}} \quad (50)$$

式中,  $P'_{v,t,\text{max}}$  为  $t$  时刻风电机组  $v$  的预测最大出力。

9) 机组爬坡约束<sup>[17]</sup>

$$-R_{z,\text{down}} \leq P_{z,t} - P_{z,t-1} \leq R_{z,\text{up}} \quad (51)$$

$$-R_{g,\text{down}} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq R_{g,\text{up}} \quad (52)$$

10) CHP 机组发电输出约束

$$P_{g,\text{min}} \leq P_{g,t} \leq P_{g,\text{max}} \quad (53)$$

11) 支路电功率传输约束<sup>[18]</sup>

$$P_{ij,t} = b_{ij} \theta_{ij,t} \quad (54)$$

$$P_{ij,\text{min}} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,\text{max}} \quad (55)$$

$$P_{i,t}^{\text{zhu}} = \sum_{j \in \pi(i)} P_{ij,t} \quad (56)$$

$$P_{i,t}^{\text{zhu}} = \sum_{i \in \Psi^{\text{the}}} P_{i,t}^{\text{the}} + \sum_{i \in \Psi^{\text{chp}}} P_{i,t}^{\text{chp}} + \sum_{i \in \Psi^{\text{wind}}} P_{i,t}^{\text{wind}} + \sum_{i \in \Psi^{\text{res}}} P_{i,t}^{\text{res}} - \sum_{i \in \Psi^{\text{load}}} P_{i,t}^{\text{load}} \quad (57)$$

式中:  $P_{ij,t}$  为  $t$  时刻线路  $ij$  的功率;  $b_{ij}$  为线路  $ij$  的导纳;  $\theta_{ij,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  与节点  $j$  的电压相角差;  $P_{ij,\text{max}}$ 、 $P_{ij,\text{min}}$  分别为线路  $ij$  传输功率的上、下限;  $P_{i,t}^{\text{zhu}}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的注入功率;  $\pi(i)$  为电网中以  $i$  为末端节点的支路的首端节点集合;  $\Psi^{\text{the}}$ 、 $\Psi^{\text{chp}}$ 、 $\Psi^{\text{wind}}$ 、 $\Psi^{\text{res}}$ 、 $\Psi^{\text{load}}$  分别为与节点  $i$  连接的火电机组、CHP 机组、风电机组、备用和电负荷集合;  $P_{i,t}^{\text{the}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{chp}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{res}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{load}}$  分别为  $t$  时刻  $i$  节点相连的火电机组、CHP 机组、风电机组、备用、负荷的功率。

### 3 算法求解

本文采用典型的包络线模型对风电最大出力的不确定性进行建模<sup>[19]</sup>。

$$U(\alpha, P'_{v,t,\max}) = \left\{ \left| P_{v,t,\max} - P'_{v,t,\max} \right| \leq \alpha P'_{v,t,\max} \right\} \quad (58)$$

式中,  $\alpha$  表示包络线大小的不确定度参数。

本文系统的需求是调度的经济成本不超过最大接受值, 性能阈值  $C_{r0}$  定义为

$$C_{r0} = (1 + \varepsilon)C_0 \quad (59)$$

式中:  $C_0$  为采用确定调度模型时计算出的调度成本, 即不确定度  $\alpha = 0$  时的调度成本;  $\varepsilon$  为偏差系数。

IGDT 方法将原调度模型的目标(函数式(33))转变为总调度成本不高于预期目标成本, 寻求对应的风电最大不确定度。基于此, 本文电热能源系统调度模型表示为

$$\begin{cases} \max \alpha \\ \text{s.t. 式(23)一式(32)、式(38)一式(57)} \\ \left\{ \begin{array}{l} \max C \leq C_{r0} = (1 + \varepsilon)C_0 \\ \text{s.t. 式(58)} \end{array} \right. \end{cases} \quad (60)$$

然而, 转换后的模型如式(60)所示, 属于双层规划模型, 不能直接计算。为此, 本文采用拉格朗日松弛算法计算约束中的调度最大成本<sup>[20]</sup>。

$$\max C, \text{ s.t. 式(58)} \quad (61)$$

基于拉格朗日松弛的最优条件为

$$\nabla_{\kappa} \left\{ C + \kappa \left[ (\alpha P'_{v,t,\max})^2 - (P_{v,t,\max} - P'_{v,t,\max})^2 \right] \right\} = 0 \quad (62)$$

式中,  $\kappa$  为拉格朗日乘子。基于此, 可得在成本最大时, 风电情况为

$$P_{v,t,\max} = P'_{v,t,\max} \pm \alpha P'_{v,t,\max} \quad (63)$$

因此, 式(60)可改写为式(64)所示的混合整数线性规划模型, 可采用商业求解器直接求解。

$$\begin{cases} \max \alpha \\ \text{s.t. 式(23)一式(32)、式(38)一式(57)} \\ C \leq C_{r0} = (1 + \varepsilon)C_0 \\ \text{式(63)} \end{cases} \quad (64)$$

### 4 算例分析

#### 4.1 算例基础数据

本文基于 IEEE 30 节点电力系统和两个 31 节点的区域供热系统<sup>[21]</sup>建立电热能源系统调度模型, 如图 3 所示。调度周期为 24 h, 以 1 h 为最小调度单位, 热网模型的时间分辨率为 5 min<sup>[22]</sup>。弃风惩罚系数为 150 元/MWh, 系统电负荷、区域供热系统热负荷和风电预测最大出力如图 4 所示, 热网管道参数如表 1 所示, 机组参数如表 2、表 3 所示。

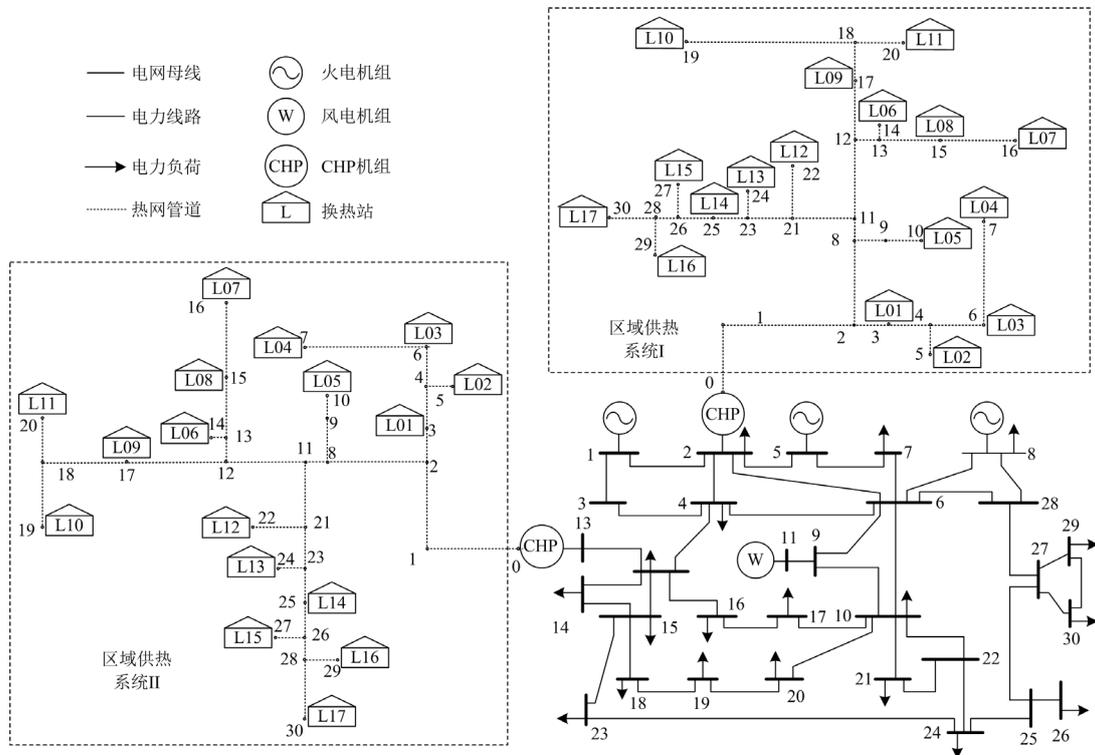


图 3 电热能源系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of electric heating energy

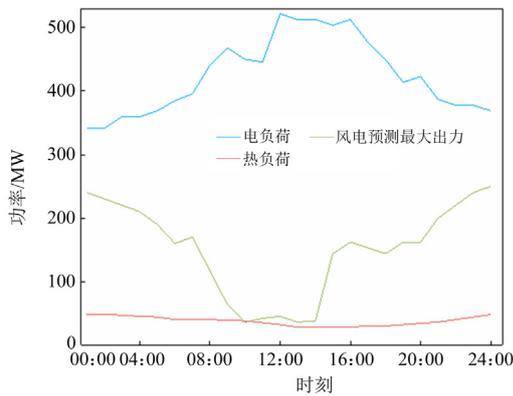


图 4 电负荷、热负荷和风电预测最大出力  
Fig. 4 Electric load, thermal load and forecast maximum output of wind power

表 1 I、II 区域供热管道参数  
Table 1 Heating pipe parameters of zone I and II

节点	节点	负荷 流量/(t/h)	管道 流量/(t/h)	传热系数/ [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]	长度/ m	横截 面积/m <sup>2</sup>
0	1	0	1000	0.518	210	0.3078
1	2	0	1000	0.518	1773	0.3078
2	3	331.87	550.99	0.518	705	0.3078
3	4	0	219.12	0.461	2493	0.1075
4	5	80.03	80.03	0.461	285	0.1075
4	6	10.73	10.73	0.302	1149	0.036
6	7	128.36	128.36	0.461	1749	0.1075
2	8	0	449.01	0.518	1821	0.3078
8	9	0	61.9	0.518	462	0.3078
9	10	61.9	61.9	0.466	246	0.1385
8	11	0	387.11	0.441	120	0.2173
11	12	0	294.05	0.441	693	0.2173
12	13	0	239.17	0.466	153	0.1385
13	14	88.94	88.94	0.461	54	0.1075
13	15	139.96	150.23	0.461	954	0.1075
15	16	10.27	10.27	0.288	1302	0.0216
12	17	13.9	54.88	0.351	960	0.0547
17	18	0	40.98	0.302	465	0.036
18	19	7.53	7.53	0.277	993	0.0154
18	20	33.45	33.45	0.302	216	0.036
11	21	0	93.06	0.461	414	0.1075
21	22	25.7	25.7	0.302	390	0.036
21	23	0	67.36	0.42	462	0.0794
23	24	17.21	17.21	0.302	120	0.036
23	25	3.22	50.15	0.351	408	0.0547
25	26	0	46.93	0.351	273	0.0547
26	27	13.37	13.37	0.302	75	0.036
26	28	0	33.56	0.302	90	0.036
28	29	15.32	15.32	0.277	219	0.0154
28	30	18.24	18.94	0.302	645	0.036

表 2 火电机组参数

Table 2 Thermal power unit parameters

机组号	出力上限/MW	出力下限/MW	成本参数 $a_1^j$ /(元/MW <sup>2</sup> ), $a_2^j$ /(元/MW), $a_3^j$ /元	备用参数/(元/MW <sup>2</sup> )
1	200	50	0.0048, 140, 1900	0.000 036
2	200	50	0.004 85, 145, 1910	0.000 036
3	200	50	0.002 15, 155, 1110	0.000 036

表 3 CHP 机组参数

Table 3 CHP unit parameters

机组号	热出力上限/MW	热出力下限/MW	电热耦合系数	成本参数 $\lambda_1^g$ /(元/MW <sup>2</sup> ), $\lambda_2^g$ /(元/MW), $\lambda_3^g$ /(元/MW <sup>2</sup> ), $\lambda_4^g$ /(元/MW), $\lambda_5^g$ /(元/MW <sup>2</sup> ), $\lambda_6^g$ /元
1	60	0	0.85	0.0046, 130, 0.000 85, 19, 0.001 25, 1810
2	60	0	0.85	0.0047, 140, 0.000 86, 20, 0.001 25, 1810

4.2 复杂供热管网等值简化模型分析

为分析供热管网拓扑简化方法在不同简化程度下的效果从而选择最贴合决策者需求的化简阈值, 本文设置模型如下。

基准热网模型 1: 区域 I 原始热网模型, 含有 30 根管道, 如表 1 所示。

供热管网等值简化模型 2: 对区域 I 原始热网模型采用步骤 1 得到无分支的等效模型。

供热管网等值简化模型 3—7: 基于供热管网拓扑简化方法得到的供热管网等值简化模型, 不失一般性, 化简阈值  $E$  分别设置为 15、10、8、6、5。

表 4 为供热管网等值简化模型 2—7 与基准热网模型 1 的管道参数对比, 其中, 时延这一项数据选取了从热源节点 0 到热网节点 6 处的时延作为代表。由表 4 可知, 供热管网等值简化模型 2 相对于模型 1 的管道总长度减少了 64.58%, 但是由于模型 2 仅进行了热网分支等效变换, 两模型的管道和节点数

表 4 供热管网等值简化模型 2—7 与基准热网模型 1 对比  
Table 4 Comparison of equivalent simplified models 2—7 of the heat supply network with the baseline heat network model 1

模型编号	热网管道数	热网节点数	管道总长度/m	时延/h	总热损系数/[W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
1	30	31	19 899	6.082	8293.965
2	30	31	7047.697	6.082	8293.965
3	15	16	7047.697	6.944	8293.965
4	10	11	7047.697	7.189	8293.965
5	8	9	7047.697	7.213	8293.965
6	6	7	7047.697	7.465	8293.965
7	5	6	7047.697	7.117	8293.965

仍相等。由于热网分支等效变换确保模型简化前后的动态特性等效,所以两模型的时延和总热损系数也相同。

此外,表4中供热管网等值简化模型3—7的管道总长度不变,在管道和节点数量上进行了不同程度的消减,管道数分别消减为15、10、8、6、5,节点数分别消减为16、11、9、7、6,对应的热网管道维数分别减少了50%、66.67%、73.33%、80%、83.33%。简化后的模型3—7保证了热网模型的总热损系数与基准模型1相等,但在节点处的时延产生了误差,这是由于节点聚合时,在参数的分配上作了近似处理。由以上分析可知,步骤1在保证模型的时延和总热损不变的情况下有效减少管道总长度,简化了热网拓扑结构。步骤2在保证模型总热损不变的情况下逐步降低供热管网模型维度,从而减少调度模型的约束规模。

表4中化简结果可以改善调度过程的复杂性和隐私性,实际过程中还需要考虑不同简化程度对供热管网等值简化模型动态精度的影响。为此,本文进一步研究了供热管网等值简化模型2—7的管道温度动态变化能力,在区域供热系统I的节点0处给定了图5所示的供水温度 $T_{0,t}^s$ ,对模型1—7在节点0处的返回温度 $T_{0,t}^r$ 进行对比分析。

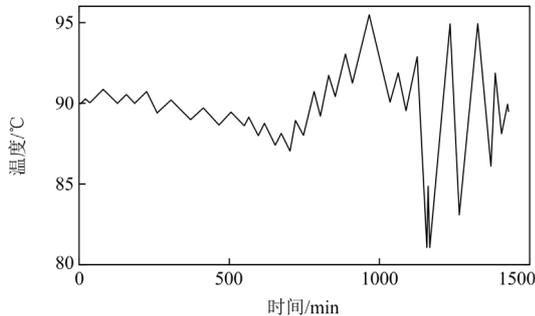


图5 区域I供热系统节点0处供热温度

Fig. 5 Heating system node 0 heating temperature of zone I

图6为各模型的返回温度 $T_{0,t}^r$ 曲线,可以看到,模型4和模型5能较好地跟随基准热网模型温度变化。表5给出了各个模型的温度误差对比。由于图6中的温度误差在正负之间振荡,各模型的平均误差在 $-0.325\sim-0.000\ 049\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。与模型3—5的结果相比,模型2的误差较大,这可能是因为模型2经过步骤1后存在一些长度过短的管道,当管道长度小于节点法适用的最小长度时,在模型计算中会产生数值误差<sup>[15]</sup>。模型6—7误差开始增加,这可能是因为步骤2过程中近似误差会随着主干冗余节点聚合次数积累。上述结果显示,供热管网等值简化模型的精度会随着化简阈值 $E$ 的减小先增大再减小。

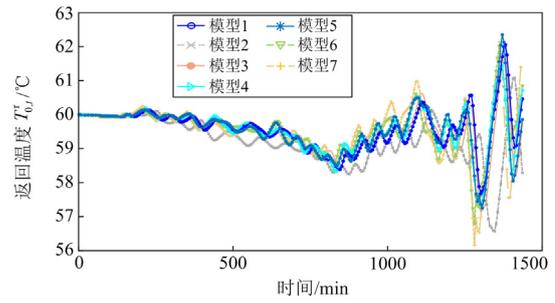


图6 模型1—7的节点0处返回温度曲线

Fig. 6 The node 0 return temperature curve of models 1—7

表5 模型2—7相对于模型1的热源返回温度误差分析

Table 5 Error analysis of heat source return temperature of models 2—7 relative to model 1

模型	管道数量	最大误差绝对值/ $^\circ\text{C}$	平均误差/ $^\circ\text{C}$
2	30	3.6259	-0.325
3	15	0.8992	-0.0248
4	10	1.8987	-0.000 049
5	8	1.5953	-0.003
6	6	3.0248	-0.0069
7	5	3.6098	-0.0415

综合考虑模型精度和简化效果,本文将采用模型5构建电热联合调度模型,其供热管网等值简化模型参数见表6。由表6可以看到模型5减少了73.33%的热网计算量,且管道拓扑和参数都有较大改变,失去了其物理意义,实现可靠隐私保护。

表6 模型5的热网管道参数

Table 6 Heating network pipeline parameters of model 5

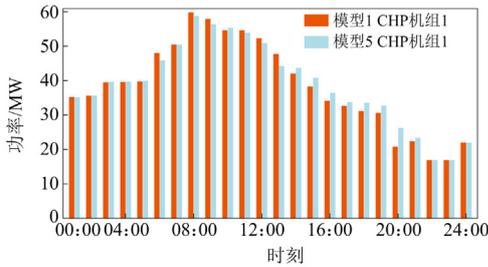
节点	节点	负荷流量/(t/h)	管道流量/(t/h)	传热系数/ $[\text{W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})]$	长度/m	横截面积/ $\text{m}^2$
0	1	0	1000	0.518	210.000	0.308
1	2	331.870	1000	0.654	2419.411	0.388
2	3	57.231	668.130	0.686	1466.802	0.405
3	4	263.897	610.899	2.287	1180.713	0.642
4	5	87.707	120.558	-0.514	452.753	0.418
5	6	226.444	347.002	2.532	793.944	0.504
6	7	19.420	32.852	2.636	465.529	0.084
7	8	13.432	13.432	-1.839	58.545	0.038

#### 4.3 基于供热管网等值简化模型的调度结果分析

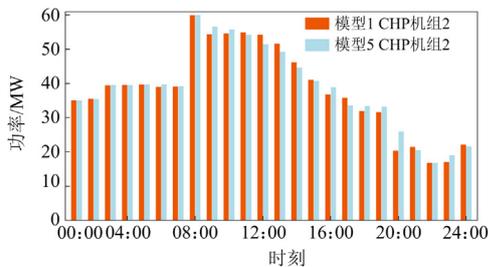
为验证供热管网等值简化模型在电热能源系统调度中的精确性和有效性,本节暂时不考虑风电的不确定性,分别以模型1和模型5建立电热联合调度模型,对调度结果进行对比分析。

图7为模型1和模型5的机组最优热出力情况。相较于基准模型1,模型5的机组热出力结果在总体上误差较小,且在不同时刻误差呈现正负波动的互补趋势。CHP机组1和CHP机组2仅在20:00

误差较大,分别为 5.0125 MW 和 5.6163 MW,其余时刻的误差则均不超过 3.5245 MW 和 3.5347 MW。小误差的正负波动是由于步骤 2 (主干冗余节点聚合) 中的管道参数计算存在一定误差。个别时刻出现的较大误差是由于步骤 2 减少了热网的节点数量,使得原网络中许多节点的热负荷聚合在模型 5 的节点上,导致管道返回温度相比于基准模型将呈现阶梯式变化,因此在部分调度时刻可能产生较大误差。



(a) 模型1和模型5 CHP机组1热出力



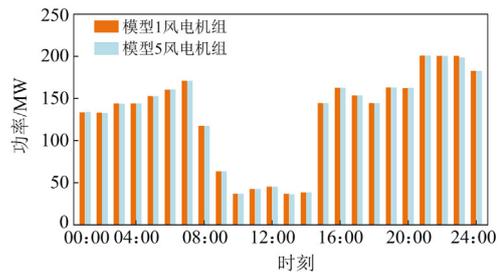
(b) 模型1和模型5 CHP机组2热出力

图 7 两种模型下各机组热出力

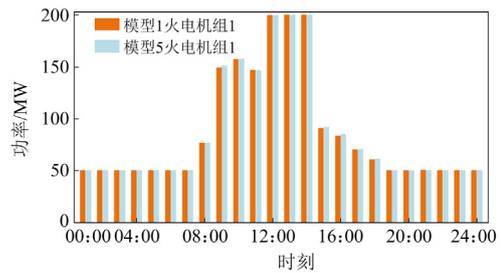
Fig. 7 Thermal output of each unit under the two models

图 8 为两种模型下各机组电出力情况。由图 8 可知,两模型电出力结果基本一致,仅有 CHP 机组 1 和 CHP 机组 2 在 20:00 存在较大误差(-4.2524 MW 和 4.2524 MW)。这是因为模型 5 中 CHP 机组 2 的热出力在 20:00 明显增加,使可行域中的最小电出力增大,因此 CHP 机组 2 在 20:00 时电出力增加,同时挤压了 CHP 机组 1 的电出力空间,使 CHP 机组 1 在 20:00 时电出力减小。

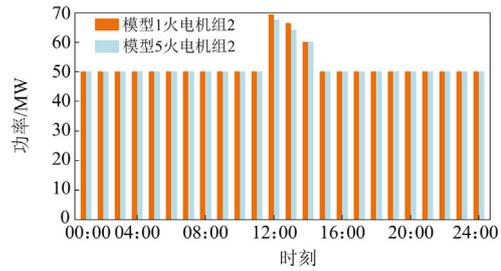
表 7 给出了两种模型的确定性调度结果对比。表中风电机组的调度成本误差率仅为 0.12%,火电机组的调度成本误差率均不超过 0.15%,验证了本文所提复杂供热管网等值简化模型应用于电热联合调度的准确性。相比之下,由于 CHP 机组热出力存在一定误差,其调度成本误差也相对较大,分别为 -0.32%和 0.48%。但总体上相较于模型 1、模型 5 的 CHP 机组成本对电出力结果影响较小。两模型在备用成本上误差较小,仅为-0.03%。同时,模型 5 的



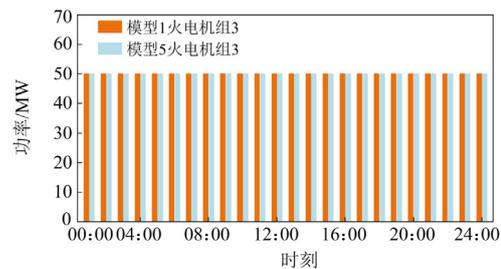
(a) 模型1和模型5风电机组出力



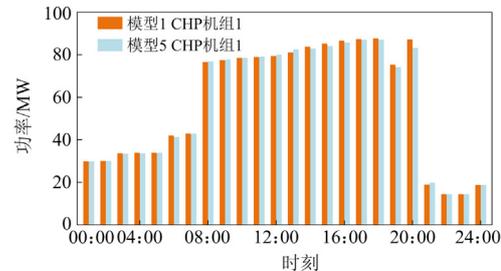
(b) 模型1和模型5火电机组1出力



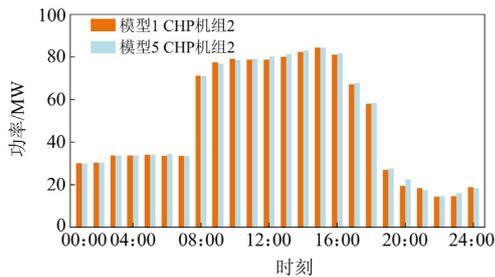
(c) 模型1和模型5火电机组2出力



(d) 模型1和模型5火电机组3出力



(e) 模型1和模型5 CHP机组1电出力



(f) 模型1和模型5 CHP机组2电出力

图 8 两种模型下各机组电出力

Fig. 8 Electrical output of each unit under the two models

表 7 两种模型下调度结果对比

Table 7 Comparison of scheduling results under two models

模型	各机组调度成本/万元					备用成本/万元	总成本/万元	求解时间/s	
	风电机组	火电机组 1	火电机组 2	火电机组 3	CHP 机组 1				CHP 机组 2
1	7.7657	33.8898	22.6777	21.2769	24.0756	22.6432	5.1264	137.4553	32.8
5	7.7751	33.9334	22.6443	21.2769	23.9989	22.7522	5.1247	137.5055	9.8
误差率	0.12%	0.13%	-0.15%	0%	-0.32%	0.48%	-0.03%	0.04%	70.13%

简化方法和供热管网等值简化模型可适用于电热联合调度, 减少了模型求解时间。

#### 4.4 考虑 CHP 机组以热定电模式下系统备用分析

为考虑 CHP 机组以热定电运行模式对系统旋转备用容量的间接影响, 以模型 5 为例, 设置对比情况如下。

情况 1: 常规备用模型, 即不考虑 CHP 机组以热定电运行模式对系统备用容量的影响。

情况 2: 本文所提备用模型, 即考虑 CHP 机组以热定电运行模式运行对系统备用容量的影响。

表 8 为两种情景下调度结果对比。由表 8 可知, 情况 2 比情况 1 备用成本高 0.6876 万元, 从而造成情况 2 的总成本比情况 1 高 0.6876 万元, 其原因在于: 情况 2 中 CHP 机组考虑以热定电模式运行, CHP 机组会受到其热出力的限制, 导致 CHP 机组所提供的备用容量有限, 无法提供系统预期所需备用, 因此, 火电机组需提供 CHP 机组这部分备用缺额, 从而使系统的总成本增加。

表 8 两种情况下调度结果对比

Table 8 Comparison of scheduling results in two cases

情况	万元	
	备用成本	总成本
1	4.4371	136.8179
2	5.1247	137.5055

综上, 本文所提模型对 CHP 机组的备用进行了合理度量, 更加符合系统实际运行情况。

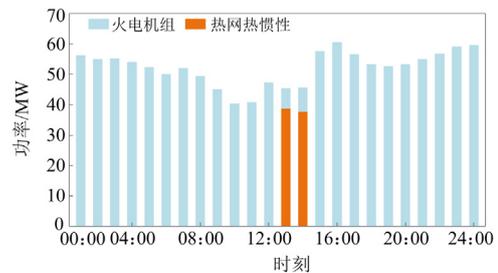
计算时间相比模型 1 节约了 70.13%, 这是因为模型 5 的管道和节点数量相比模型 1 减少了 73.33%, 在调度模型中则减少了 73.33% 热网管道约束, 降低了模型的求解难度。

综上, 模型 5 的最优热出力结果虽然存在一定误差, 但最终造成的增加调度成本仅为 0.04%, 且基于给定的 CHP 机组电出力, 调度中心可对 CHP 机组热出力进一步调节, 而不影响电热联合系统运行。同时, 模型 5 的最优电出力结果与基准模型结果基本一致, 可见供热管网等值简化模型对电力系统的调度影响较小。因此, 本文所提供热网拓扑

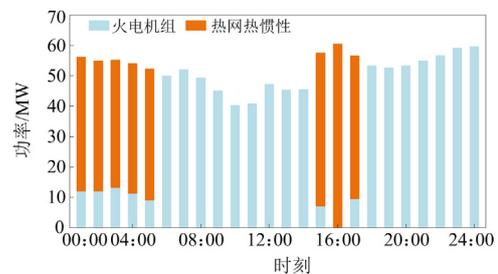
#### 4.5 考虑热网热惯性的系统备用分析

本文参照文献[23]中热网灵活性备用量化模型, 设置热网热惯性的灵活性备用供给周期和恢复周期分别为 5 h 和 7 h, 热网热惯性参与灵活性备用供给的时段为 01:00—05:00 和 13:00—17:00。

图 9 为系统备用供给结果。由图 9 可知, 热网热惯性在 13:00 和 14:00 时刻提供上旋转备用, 在 01:00—05:00 和 15:00—17:00 提供下旋转备用。



(a) 上旋转备用



(b) 下旋转备用

图 9 系统备用供给结果

Fig. 9 System backup supply results

在整个调度周期内，热网热惯性提供了 76.764 MW 的上旋转备用和 372.453 MW 的下旋转备用，分别占比系统总量的 6.13% 和 29.74%，减少了火电机组 0.7403 万元的备用成本。

#### 4.6 考虑风电不确定性的调度结果分析

本节以模型 5 为例，考虑风电实际最大出力的不确定度进行调度，计算不同成本偏差系数下系统能承受的最大不确定度和成本，其确定性模型成本为 137.5055 万元。设置  $\beta$  范围为 1%~5%，结果如表 9 所示。

表 9 不同成本偏差系数下的风电不确定度和成本

Table 9 Wind power uncertainty and cost under different cost deviation coefficients

$\beta$ %	$\alpha$	成本/万元
1	0.0276	138.8801
2	0.0542	140.2556
3	0.0796	141.6301
4	0.1048	143.0057
5	0.1300	144.3801

从表 9 可以看出，随着  $\beta$  的提高，系统能够容忍的风电不确定度和成本也随之增加。从系统运行角度来看，风电不确定度提高后，在风电实际出力少于预测出力时，系统不得不增加火电机组的出力以平衡系统负荷，从而使得调度成本增加。不确定度的大小体现在不同的接受成本下，当前系统能承受的最大风电波动水平。以  $\beta$  为 2% 为例，对应的  $\alpha$  为 0.0542，成本为 140.2556 万元，即调度决策者可接受的最大成本为 140.2556 万元，表 9 的结果可供调度决策者选择兼顾鲁棒性与经济性的方案。

## 5 结论

为提高电热能源系统优化模型的求解效率，本文提出了一种兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型，结论如下。

1) 本文所提供热管网拓扑简化方法和复杂供热管网等值简化模型适用于电热能源系统优化调度，兼顾隐私保护。

2) 本文所提供热管网拓扑简化方法显著简化供热管网拓扑结构，并减小热网模型维度，从而减少优化模型的决策变量和约束条件，优化模型求解时间降低约 70.13%。

3) CHP 机组以热定电运行模式对系统的旋转备用有较大影响，本文所提的旋转备用模型能够更加真实地反映系统的实际运行情况。

4) IGDT 能够给出调度成本与风电不确定度的定量关系，可供调度决策者灵活选择兼顾鲁棒性和

经济性的调度方案。

本文的供热管网等值简化模型对 CHP 机组热出力的调度结果有一定影响，下一步将通过改进步骤 2 中主干冗余节点聚合的精度来提高模型的等效性。

#### 参考文献

- [1] 赵亮, 董洁, 刘艳宁. 新基建背景下供热行业转型升级研究[J]. 中国物价, 2020(12): 79-81.  
ZHAO Liang, DONG Jie, LIU Yanning. Research on transformation and upgrading of heating industry under the background of new infrastructure[J]. China Price, 2020(12): 79-81.
- [2] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.  
HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 1-9.
- [3] XU Fei, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Integrated heat and power optimal dispatch method considering the district heating networks flow rate regulation for wind power accommodation[J]. Energy, 2023, 263.
- [4] 董彧彤, 王艳松, 倪承波, 等. 计及用热舒适度弹性的热电联合优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 26-34.  
DONG Yutong, WANG Yansong, NI Chengbo, et al. Dispatch of a combined heat-power system considering elasticity with thermal comfort[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 26-34.
- [5] ZHENG Weiye, ZHU Jizhong, LUO Qingju. Distributed dispatch of integrated electricity-heat systems with variable mass flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 1907-1919.
- [6] SHA Le, JIANG Ziwei, SUN Hejiang. A control strategy of heating system based on adaptive model predictive control[J]. Energy, 2023, 273.
- [7] 武姝凝, 李华强, 刘洋, 等. 考虑供热系统精细化建模的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1979-1992.  
WU Shuning, LI Huaqiang, LIU Yang, et al. Multi-objective optimal scheduling of regional integrated energy system considering refined modeling of heating system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1979-1992.
- [8] ZHANG Xuemei, YUAN Jianjuan, KONG Xiangfei, et al. Coupling of flexible phase change materials and pipe for improving the stability of heating system[J]. Energy, 2023, 275.
- [9] ZHANG Menglin, WU Qiuwei, WEN Jinyu, et al. Real-time optimal operation of integrated electricity and heat system considering reserve provision of large-scale heat pumps[J]. Energy, 2021, 237.

- [10] ZHOU Yifan, HU Wei, MIN Yong, et al. Integrated power and heat dispatch considering available reserve of combined heat and power units[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1300-1310.
- [11] ZHANG Menglin, WU Qiuwei, WEN Jinyu, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated electricity and heat system considering reserve provision by large-scale heat pumps[J]. Applied Energy, 2022, 307.
- [12] 刘威, 张亚超, 谢仕炜. 计及跨区备用共享的多区域电热联合系统分布式协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3203-3217.  
LIU Wei, ZHANG Yachao, XIE Shiwei. Distributed coordinated optimal scheduling of multi-regional combined heat and power system considering cross-regional reserve sharing[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3203-3217.
- [13] 吕小秀, 李培强, 刁涵彬, 等. 能量与备用市场主体自调度的电热综合能源系统优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 132-141, 150.  
LÜ Xiaoxiu, LI Peiqiang, DIAO Hanbin, et al. Optimization of integrated electric and heating energy system with self-dispatching by energy and reserve market players[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 132-141, 150.
- [14] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-12.  
CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 1-12.
- [15] LARSEN H V, PÁLSSON H, BØHM B, et al. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(8): 995-1019.
- [16] QIN Minglei, YANG Yongbiao, XU Qingshan, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-18.
- [17] 孙文杰, 武家辉, 张强. 基于双层博弈的配电网与多综合能源微网协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 26-38.  
SUN Wenjie, WU Jiahui, ZHANG Qiang. Coordinated optimization of a distribution network and multi-integrated energy microgrid based on a double-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 26-38.
- [18] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 124-135.  
ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering the coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 124-135.
- [19] 张磊, 卢天林, 杨宸, 等. 考虑热网管道铺设方式影响的电热耦合系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 29-37.  
ZHANG Lei, LU Tianlin, YE Jing, et al. Optimal dispatching of electric-thermal coupling system considering influence of laying method of heating network pipeline[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 29-37.
- [20] SUN Bo, LI Simin, XIE Jingdong, et al. IGDT-based wind-storage-EVs hybrid system robust optimization scheduling model[J]. Energies, 2019, 12(20): 3848.
- [21] PÁLSSON H, LARSEN H V, BENNY B, et al. Equivalent models of district heating systems for on-line minimization of operational costs of the complete district heating system[R]. Lyngby: Technical University of Denmark, 1999.
- [22] SHUAI Lu, WEI Gu, ZHOU Suyang, et al. High resolution modeling and decentralized dispatch of heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(3): 1451-1463.
- [23] 王秋实, 杨明, 李鹏, 等. 计及热网灵活性恢复过程的电热综合能源系统鲁棒超前调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3173-3186.  
WANG Qiushi, YANG Ming, LI Peng, et al. Robust look-ahead dispatch of electricity-heat integrated energy system considering the flexibility recovery period of heating networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3173-3186.

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2024-02-26

作者简介:

张磊(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为大规模新能源接入后电力系统优化运行控制、人工智能技术在电力系统运行控制中的应用; E-mail: leizhang3188@163.com

王满康(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行与控制; E-mail: 1605859367@qq.com

叶婧(1986—), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制。E-mail: yejing2000310@163.com

(编辑 许威)